

На правах рукописи



Хоанг Ван Чи

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ
ИЗ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ
НА ОСНОВАНИИ ТЕМПЕРАТУРНО-СИЛОВОГО МОНИТОРИНГА**

Специальность **05.02.07**– Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО "Тульский государственный университет"

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Сальников Владимир Сергеевич

Официальные оппоненты: Дуюн Татьяна Александровна, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. Шухова», г. Белгород, заведующий кафедрой «Технологии машиностроения»;

Петрешин Дмитрий Иванович, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», г. Брянск, директор учебно-научного технического института, профессор кафедры «Автоматизированные технологические системы».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», г. Ижевск.

Защита состоится «14» марта 2017 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.01 при ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (300012 г. Тула, пр. Ленина, 92, 9-101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
<http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/hoang-vh/>

Автореферат разослан «18» января 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Черняев Алексей
Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. В развитых промышленных странах доля механообработки составляет около 30...40 % от общей трудоемкости изготовления деталей машиностроения. По мнению большинства исследователей, традиционная обработка металлов резанием является, и в ближайшие десятилетия будет оставаться, основным способом изготовления деталей машин, в том числе из труднообрабатываемых и конструкционных материалов. Благодаря научным исследованиям и опыту промышленности в этом методе достигнут значительный прогресс. Однако большинство из предлагаемых средств эффективны лишь в относительно узких и неизменных условиях эксплуатации. Их реализация, как правило, связана с серьезными материально-техническими затратами. Такое положение является результатом недостаточной изученности процесса резания. Наиболее перспективным направлением исследования является подход к нему как самоорганизующейся термодинамической системе. Анализ известных исследований показывает, что для многих материалов, в том числе для хромоникелевых сталей и сплавов (1X18H9T, 10X11H23T3MP, ХН35ВТЮ, ХН56ВМКЮ и т.п.), оптимальные условия резания могут быть идентифицированы через процесс стружкообразования. Отмечено, что этим условиям соответствует определенное значение температуры в зоне резания. По мнению ряда авторов, оно, в частности, достигается при режимах, определяющих границу перехода от сливной стружки к сегментной. Однако, контроль вида стружки в процессе обработки представляет значительные трудности и не нашел практического применения.

К числу наиболее информативных параметров, характеризующих условия резания и поддающихся оперативному контролю, исследователи относят силу и температуру в зоне резания. Известно большое число таких эмпирических зависимостей от различных факторов. Они позволяют прогнозировать значения параметров в процессе обработки. Однако эти зависимости характеризуются значительной долей неопределенности, и имеют невысокую точность.

Анализ зарубежной и отечественной литературы показал, что для построения моделей температурно-силовых характеристик перспективным является нейросетевой подход, основанный на использовании искусственных нейронных сетей (ИНС), обучаемых по результатам экспериментальных исследований. Для стабилизации условий резания целесообразно использовать оперативное управление режимами по рекомендациям, полученным на основании этих моделей.

Несмотря на большое внимание, уделяемое исследователями повышению эффективности точения путем рационального выбора и управления скоростью резания с использованием его математических моделей, нет однозначного ответа на то, сколько и каких параметров следует использовать в качестве входных и выходных параметров модели, как реализовать управление в условиях их неопределенности.

Таким образом, актуальной научно-технической задачей является обоснование рациональных режимов токарной обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов на основании модели температурно-силовых характеристик и термодинамического критерия, их мониторинга и оперативного управления скоростью резания.

Цель работы.

Целью настоящей работы является повышение эффективности точения деталей из труднообрабатываемых материалов путем рационального выбора и управления

скоростью резания с использованием мониторинга температурно-силовых характеристик процесса.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи исследования:

1. Провести анализ основных параметров, определяющих эффективность процесса резания;
2. Разработать модель температурно-силовых характеристик процесса резания при точении, построенную на ИНС;
3. Обосновать критерий выбора рациональной скорости резания и разработать алгоритм управления ею, основанный на температурно-силовом мониторинге;
4. Разработать автоматизированную систему обучения ИНС, описывающую процесс резания;
5. Разработать средства технического оснащения температурно-силового мониторинга и управления процессом резания;
6. Использовать результаты исследований в промышленности и учебном процессе.

Объект исследования – точение заготовок из труднообрабатываемых материалов в условиях неопределенности условий резания.

Предмет исследования взаимосвязи температурно-силовых характеристик процесса с условиями резания и критерии выбора скорости резания при точении труднообрабатываемых материалов.

Научная новизна заключается в теоретическом обосновании рациональной скорости резания, определяемой максимальной скоростью изменения зависимости отношения диссипативной функции внешних сил к температуре в зоне резания от скорости резания, использующей формализованные на основе искусственной нейронной сети функциональные связи режимов обработки, параметров инструмента и обрабатываемого материала с силовыми характеристиками и температурой в зоне резания, обучаемой в автоматическом режиме в процессе эксплуатации.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что теоретическое обоснование рациональной скорости резания при точении, модели, построенные на основании нейросетевого подхода, и разработанный алгоритм управления процессом резания углубляют и конкретизируют область знаний, в сфере решения задач повышения эффективности точения деталей из труднообрабатываемых материалов.

Практическая значимость работы заключается в создании:

1. Методики выбора рациональной скорости резания, определяемой максимальной скоростью изменения зависимости отношения диссипативной функции внешних сил к температуре в зоне резания от скорости;
2. Автоматизированной системы сбора информации и самообучения ИНС, моделирующей процесс точения;
3. Алгоритма и программного обеспечения обучения ИНС, позволяющих моделировать процессы резания в различных условиях;
4. Методики и средств технического оснащения экспериментальных исследований процессов в зоне резания и температурно-силового мониторинга, позволяющих оперативно пополнять базу данных информацией, необходимой для моделирования и управления процессом точения;

5. Алгоритма управления скоростью резания, основанного на использовании ИНС и ее обучении по результатам температурно-силового мониторинга, позволяющего повысить эффективность операций точения.

Реализация работы. Сформированный подход и предложенная методика подтверждены патентами (патент на изобретение № 2566979 РФ. МПК8 G06N 3/02, 23.07.2015, способ обучения искусственной нейронной сети; патент на полезную модель № 156863 РФ. МПК8 G01K 7/02, 14.09.2015, устройство измерения температуры) и свидетельствами о государственной регистрации программы для ЭВМ (свидетельство № 2015612413 РФ 18.02.2015, программа обучения искусственной нейронной сети; свидетельство № 2015619028 РФ, 21.08.2015, программное обеспечение устройства измерения температуры с использованием термопар). Их применение позволяет повысить производительность на 10...15 % в зависимости от условий обработки при сохранении нормативной стойкости инструмента. Они прошли апробацию и рекомендованы к внедрению в ОАО «Вьеттел» г. Ханой - Вьетнам.

Методология и методы диссертационного исследования. Теоретические исследования проводились с использованием основных положений технологии машиностроения, теории резания, теории автоматического управления, теории ИНС, положений электроники и микропроцессорной техники, методов программирования.

Экспериментальные исследования базировались на современных методах математической статистики, теории планирования экспериментов, математических методах обработки экспериментальных данных и на широком применении ЭВМ.

Экспериментальные исследования проводились на токарном станке с ЧПУ Emco Concept Turn 250 с использованием разработанного периферийного устройства мониторинга температурно-силовых характеристик процесса резания.

Положения, выносимые на защиту:

1. Теоретическое обоснование рациональной скорости резания, определяемой максимальной скоростью изменения зависимости отношения диссипативной функции внешних сил к температуре в зоне резания от скорости резания;
2. Математическая модель температурно-силовых характеристик процесса резания при точении, построенная на основе ИНС;
3. Методика активного эксперимента для токарных станков с ЧПУ, формирующая выборки данных для обучения ИНС, моделирующей процесс точения в условиях, не определенных имеющейся базой данных системы управления;
4. Алгоритм управления скоростью резания на токарных станках с ЧПУ, основанный на температурно-силовом мониторинге процесса точения.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается использованием фундаментальных теоретических положений, адекватностью разработанных математических моделей реальным процессам, нашедшей необходимое экспериментальное подтверждение, использованием объективных исходных данных о характеристиках процесса резания при точении заготовок из труднообрабатываемых материалов, полученных в производстве ОАО «Вьеттел» г. Ханой - Вьетнам и из известных литературных источников.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на X-ой международной молодежной школе «Электроника и автоматика экспериментальных установок», Дубна, 2012г, международной научно-технической конференции

«Автоматизация: проблемы, идеи, решения» (АПИР), Тула, 2012г, всероссийской научно-практической конференции «Инновационные наукоемкие технологии: теория, эксперимент и практические результаты», Тула, 2011г, региональных молодежных научно-практических конференциях "Молодежные инновации", Тула, 2012-2015г, региональных магистерских научных конференциях, Тула, 2013-2015г, на региональной НТК «Высокие и критические электро- и нанотехнологии», Тула 2015, а также на ежегодных научно-технической конференциях кафедр ТулГУ «Автоматизированные станочные системы» в 2011–2015г и «Электро- и нанотехнологии» в 2016г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 29 печатных работ, из них 1 патент на изобретение, 1 патент на полезную модель, 2 свидетельства на программы для ЭВМ, 10 статей в изданиях, входящих в «Перечень утвержденных ВАК Российской Федерации изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней», 1 статья на английском языке в издании, входящем в международные реферативные базы данных и цитирования Scopus и Springer.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов по результатам работы, списка литературы из 172 наименований, общим объемом 136 страниц машинописного текста, включая 55 рисунков, 4 таблицы и приложения на 9 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, научная новизна и практическая ценность.

В первой главе проведен анализ операций точения. Определены факторы, ограничивающие технологические возможности процесса и оказывающие наиболее существенное влияние на его эффективность.

Проанализированы основные направления повышения эффективности процесса резания. Показано, что сложность управления стохастическим нестационарным объектом управления, каким является процесс резания, в условиях существенной неопределенности требует применения интеллектуальных систем управления. В большинстве случаев для оперативной идентификации математических моделей используется метод множественного регрессионного анализа. Это требует проведения серии экспериментов, которые отличаются высокой трудоемкостью и не всегда обеспечивают требуемую сходимость при широком диапазоне изменения входных параметров.

Показано, что перспективным направлением повышения эффективности точения труднообрабатываемых материалов является рациональный выбор и управление режимами обработки на основе мониторинга состояния зоны резания и, в частности применение адаптивного управления с моделью процесса резания, построенной с использованием ИНС, обучаемой на базе существующих данных и накопленного в процессе эксплуатации опыта.

На основании проведенного анализа определена цель диссертационной работы и сформулированы задачи научных исследований.

Вторая глава посвящена обоснованию критерия выбора рациональной скорости резания, разработке математической модели температурно-силовых характери-

стик процесса, основанной на ИНС, и алгоритма ее обучения.

Известно, что механизм формирования и морфология стружки являются ключевой информацией о процессе обработки (Тиме И.А., Бобров В.Ф., Полетика М.Ф., Кушнер В.С., Артамонов Е.В., Васильев Д.В., GuiGen Ye, Aco Anti и др.). Они характеризуют структурно параметрические изменения в системе стружкообразования. Из термодинамики известно, что мерой этих изменений является производство энтропии в зоне резания (Кабалдин Ю.Г., Хейфец М.Л., Постнов В.В.). Оно выражается отношением диссипативной функции внешних сил $\psi(V)$ к средней температуре в зоне резания $\theta_p(V)$ и является термодинамическим критерием, позволяющим определить условия устойчивости процесса стружкообразования.

$$F(V) = \frac{\psi(V)}{\theta_p(V)} = \frac{1}{A_p \cdot \theta_p(V)} \cdot \frac{d(P_z(V) \cdot l)}{d\tau} \approx \frac{f_b \cdot \sin \varphi \cdot P_z(V) \cdot V}{S \cdot t \cdot \theta_p(V)} \quad (1)$$

где A_p – площадь контакта инструмента с деталью и стружкой; $P_z(V)$ – составляющая силы резания; l – длина пути резания; f_b – функция возмущений, учитывающая неконтролируемые параметры процесса; φ – главный угол в плане резца; S, t – подача и глубина резания; V – скорость резания; τ – время.

Оптимальному значению скорости резания соответствует некоторая температура, определяемая конкретной парой инструментального и обрабатываемого материалов, и соответствующая по мнению разных исследователей: началу разупрочнения, максимальному значению коэффициента термического расширения, максимальному периоду кристаллической решетки, провалу пластичности инструментального материала; минимальной длине участка упрочнения на контактной поверхности режущего инструмента; заданным значениям усадки и коэффициента сплошности стружки; максимуму производства энтропии или заданному значению отношения термодинамических критериев для мощности резания и мощности сдвига и т.д. Целый ряд исследований (Боброва В.Ф., Полетики М.Ф., Кушнера В.С., Артамонова Е.В., Васильева Д.В.) показали, что для большинства металлов, причем для труднообрабатываемых особенно, при увеличении скорости резания процесс стружкообразования переходит ряд последовательных стадий: от сегментной стружки, через сливную, вновь к сегментной или элементной стружке. Это позволяет предположить, что функция (1) имеет особые точки (локальные экстремумы и точки перегиба), характеризующие переход от стадии к стадии и, в частности от сливной стружки к сегментной. Она учитывает температурно-скоростной фактор и отражает условия максимальной обрабатываемости материала.

На основании этого предложено в качестве критерия определения рациональной скорости резания использовать равенство нулю второй производной по скорости от целевой функции (1):

$$\left. \frac{d^2 F(V)}{dV^2} \right|_{S, V, t \in U} = 0 \quad (2)$$

В таком виде критерий характеризует отношение вводимой в зону резания мощности к диссипируемой ее части и отражает эффективность использования энергии. Это условие соответствует области структурно-параметрических изменений процесса стружкообразования.

Для использования этого критерия при оперативном управлении необходима адекватная в широком диапазоне изменения условий обработки модель, связывающая режимы, параметры инструмента и обрабатываемого материала с силовыми характеристиками и температурой в зоне резания, поднастраиваемая в процессе эксплуатации и накапливания опыта обработки.

В результате анализа известных литературных данных и проведенных исследований при моделировании температурно-силовых характеристик процесса резания в качестве факторов влияния использованы наиболее значимые параметры: режима резания – V , S , t (скорость, подача, глубина резания); инструмента – r , φ (радиус при вершине и главный угол в плане резца) и обрабатываемого материала – λ , HV (теплопроводность и твердость).

На основании анализа последних достижений в области моделирования процессов резания для построения такой математической модели выбран известный нейросетевой подход.

Базируясь на рекомендациях теории ИНС, для моделирования температурно-силовых характеристик процесса резания предложено использовать структуру многослойного персептрона с сигмоидной и линейной функциями активации соответственно скрытого и выходного слоев. Размерность входного слоя (число нейронов на входе) равна семи и соответствует числу вышеперечисленных наиболее значимых параметров, характеризующих условия резания. Размерность выходного слоя (число нейронов на выходе) равна числу контролируемых параметров: температура и сила резания. Размерность скрытого слоя определяется требуемой точностью и минимально допустимым размером выборки обучающих данных.

Входные параметры: глубина резания t и радиус при вершине резца r , с точки зрения управления приняты за возмущения. Они не поддаются оперативному контролю в процессе обработки, их изменение позволяет судить о нарушении условий резания. При таком подходе ИНС позволяет однозначно определить, какое из возмущений вызвало отклонение выходных параметров.

Результаты моделирования процесса резания по экспериментальным данным Зорева Н.Н., Силина С.С. и Васильева Д.В. (Обрабатываемые материалы ЭИ787ВД, 1Х18Н9Т, 10Х11Н23Т3МР, ХН56ВМКЮ; инструмент: твердый сплава ВК8, Т14К8; подача $S = 0,2 \dots 1$ мм/об.; глубина резания $t = 1 \dots 3$ мм; скорость резания $V = 10 \dots 300$ м/мин), с использованием известных алгоритмов обучения показали, что для удовлетворительной адекватности предложенной топологии модели (среднеквадратичная ошибка не превышает $0,6 \dots 1,25$ %) достаточно использовать один скрытый слой с 20 нейронами.

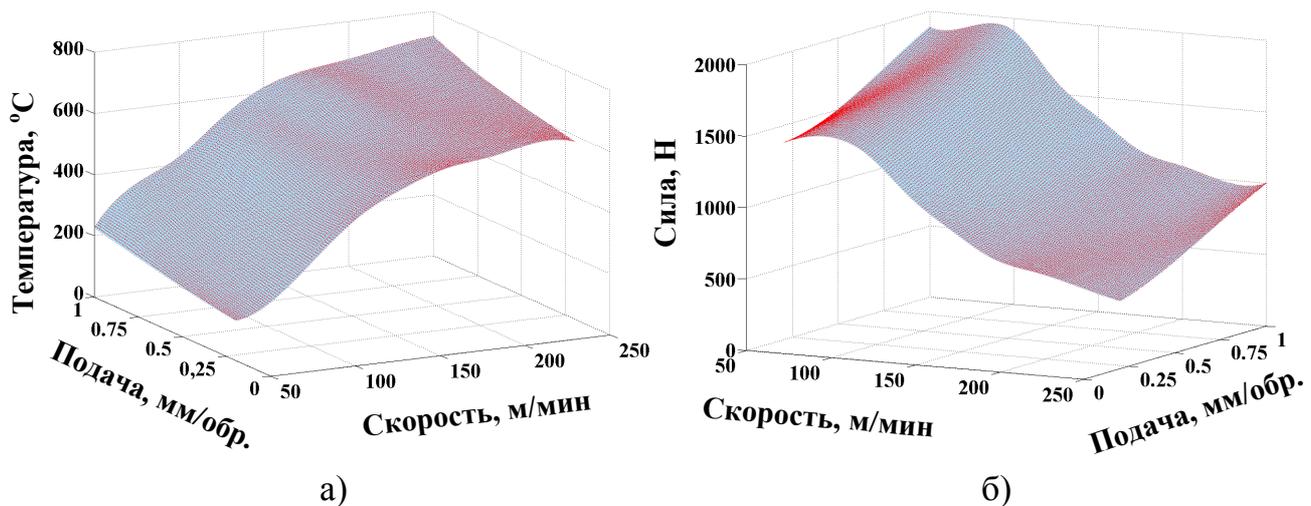
В результате проведенных исследований отмечено, что в широко используемом алгоритме обучения (Michael T. Manгу и др.) направление изменения весов однозначно определено направлением изменения ошибки. В определенных условиях это приводит к увеличению длительности обучения и не дает гарантии его сходимости. Обеспечение требуемой адекватности достигается увеличением объема обучающей выборки данных, что является не желательным в условиях оперативного управления. Для устранения отмеченного недостатка предложен модифицированный алгоритм обучения (патент на изобретение № 2566979). Он отличается тем, что при увеличении ошибки производится выбор направления изменения весов скрытого слоя. На его основе разработана программа обучения ИНС, моделирующая процесс резания (Свидетельство на программу для ЭВМ № 2015612413).

Результаты сравнительной оценки предлагаемого алгоритма с оригинальным алгоритмом (Michael T. Manry и др.) показали, что при равном числе нейронов в скрытом слое время обучения снижено более, чем в 2 раза, а величина ошибки уменьшена с 1,25 до 0,6 %. При сохранении исходной погрешности он дает возможность уменьшить количество опытов для обучения модели, увеличивая, таким образом, оперативность идентификации условий резания.

Третья глава посвящена проверке адекватности теоретических положений, разработке алгоритма и системы адаптивного управления процессом резания на основе температурно-силового мониторинга, с автоматизированной подсистемой обучения модели.

Для проверки адекватности предложенной модели и алгоритма ее обучения проведено имитационное моделирование температурно-силовых характеристик процесса резания с использованием большого объема известных экспериментальных данных Зорева Н.Н., Силина С.С., Резникова А.Н., Постнова В.В. и Васильева Д.В.

Результаты моделирования температуры и силы резания, например, для условий обработки экспериментальные данные Зорева Н.Н.: заготовок из жаропрочного сплава ЭИ787ВД; инструмент из твердого сплава ВК8; подача $S = 0,2 \dots 1$ мм/обр.; глубина резания $t = 1,5$ мм; скорость резания $V = 50 \dots 250$ м/мин приведены на рис. 1.



а) б)
Рисунок 1– Результаты моделирования:
 а) температуры резания; б) силы резания

Полученные результаты показали, что выходные параметры ИНС хорошо совпадают с экспериментальными данными, средняя квадратичная ошибка достигает допустимого значения $E (< 1 \%)$ после 10 шагов обучения.

Установлено, что зависимость силы резания от скорости резания (рис. 1б) носит сложный характер, который выражается в наличии локальных экстремумов и точек перегиба, что подтверждается исследованиями Силина С.С., Постнова В.В., Васильева Д.В., Евсеева Л.Л.

Для оценки возможности использования модели, построенной на основе ИНС, за пределами диапазона ее обучения было проведено сравнение известных экспериментальных данных в неизученной области варьируемых параметров с прогнозами, построенными в этой области с помощью ИНС. Результаты сравнения при разных значениях подачи и глубины резания приведены на рис. 2.

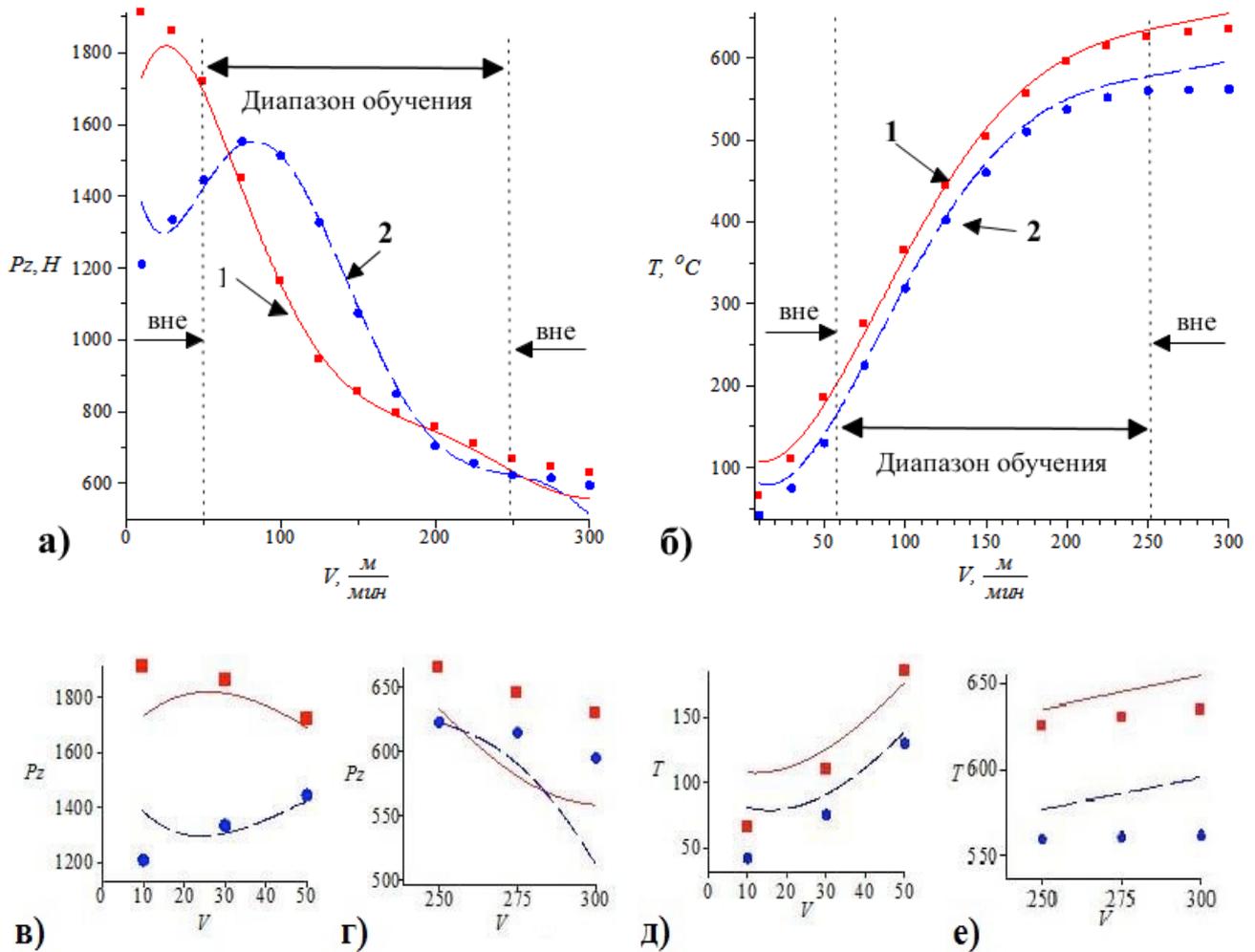


Рисунок 2– Оценка возможности прогнозирования результатов моделирования за границами диапазона обучения ИНС:

- а) силы резания при $t=2$ мм и (1) $S=0,5$ мм/обр., (2) $S=0,25$ мм/обр.;**
б) температура резания при $S=0,25$ мм/обр. и (1) $t=1,5$ мм, (2) $t=2,5$ мм
(сплошные линии: результаты моделирования с помощью ИНС;
точки: экспериментальные данные)

Из рис. 2 а, б можно видеть, что: в диапазоне обучения погрешность модели не превышает 1 %; вне диапазона (рис. 2 в, г, д, е) она зависит от расстояния рассматриваемой точки до границы диапазона обучения и может достигать 15 %.

Таким образом, обученная модель дает хорошие результаты и в условиях прогноза, то есть без дополнительного обучения, если параметры условий проведения обработки выходят не более чем на 10 % за границу области обучения.

В результате проведенного имитационного моделирования процесса резания по экспериментальным данным Зорева Н.Н., Силина С.С. и Васильева Д.В., получены зависимость целевой функции (1) от скорости резания (рис. 3).

Не зависимо от обрабатываемого материала (рис. 3а), подачи (рис. 3б) и глубины резания (рис. 3в) характер полученных зависимостей подтверждает предположение о наличии точек перегиба, в которых вторая производная от целевой функции по скорости резания равна нулю. Значение скорости в этих точках определяет границу структурно-параметрических изменений процесса стружкообразования. Ее зависимость от обрабатываемого материала, подачи и глубины резания подтверждается известными теоретическими и экспериментальными исследованиями.

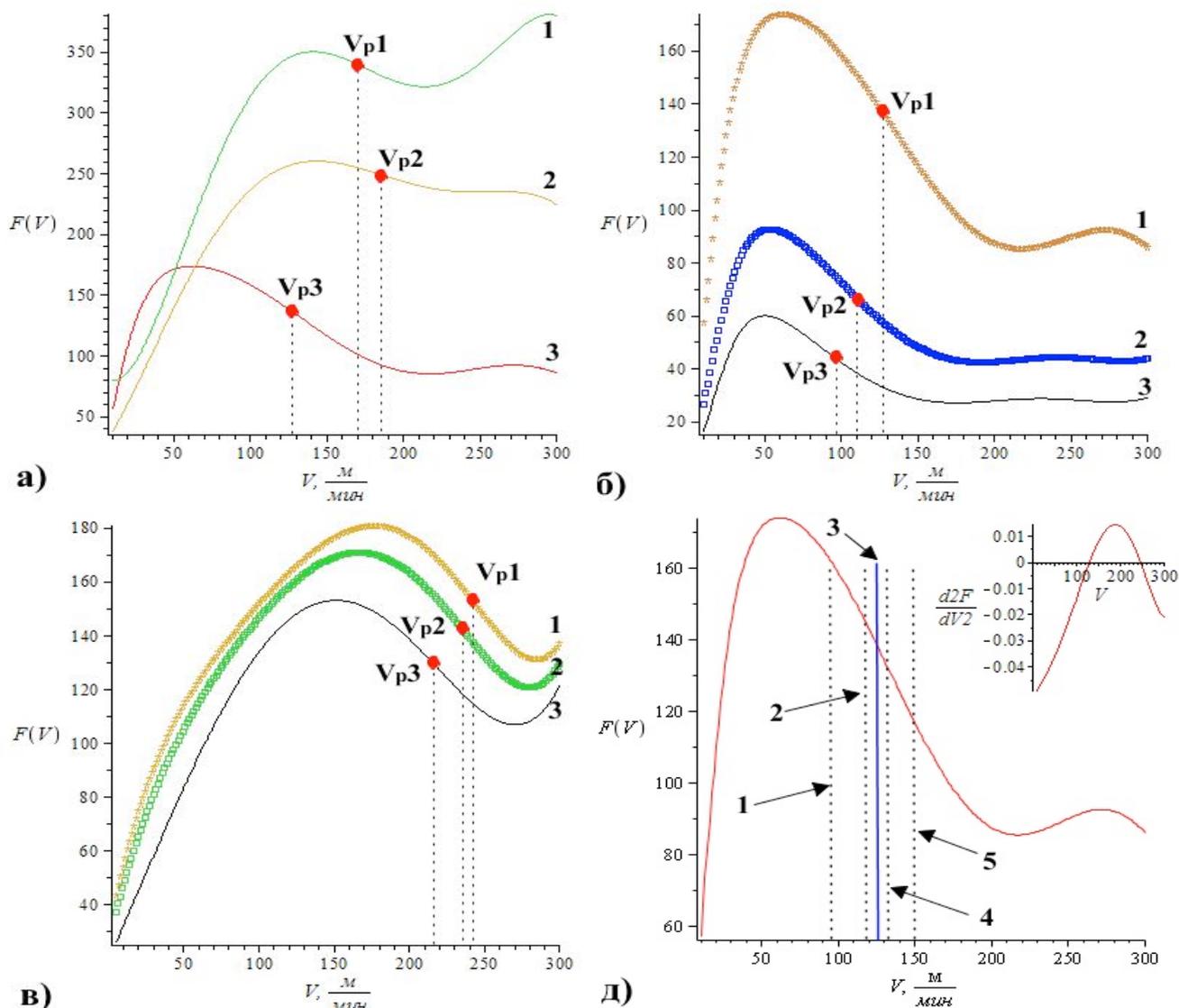


Рисунок 3– Целевая функция $F(V)$: а) для различных материалов: (1)1X18H9T, (2)10X11H23T3MP, (3)ЭИ787ВД при $S=0,2$ мм/обр. и $t=1,5$ мм; б) для сплава ЭИ787ВД при $t=1,5$ мм и: (1) $S=0,2$, (2) $S=0,4$, (3) $S=0,6$ мм/обр.; в) для стали ХН56ВМКЮ при $S=0,43$ мм/обр. и: (1) $t=1,5$ (2) $t=3$ (3) $t=4,5$ мм; д) для сплава ЭИ787ВД при $S=0,2$ мм/обр. и $t=1,5$ мм, отмечены оптимальные значения скоростей резания, рекомендованные: (1) Макаровым А.Д., (2) Артамоновым Е.В. и Васильевым Д.В., (3) в соответствии с предложенным критерием, (4) International Tool Consulting & Management 2015 г., (5) Постновым В.В.

На основании обобщения результатов обработки разработанной моделью большого объема экспериментальных данных (рис. 3д) показано, что скорость резания, соответствующая предложенному критерию, находится в средней части диапазона, определенного оптимальной температурой (Макарова А.Д.) и максимальной диссипацией механической энергии (Постнова В.В.). Она наиболее близка к значениям, соответствующим переходу процесса стружкообразования со сливной стружки к элементной (рекомендации Артамонова Е.В. и Васильева Д.В.). Однако в отличие от последних предложенный критерий позволяет производить оперативную оценку условий резания в режиме реального времени, что позволяет вести обработку на более высоких значениях скоростей резания, способствуя повышению производительности при обеспечении высокой надежности процесса точения.

Для экспериментальной проверки выдвинутых теоретических положений разработана методика и средства технического оснащения исследований. С целью накопления и расширения существующей базы данных для обучения ИНС, в соответствии с конкретными запросами производства в качестве обрабатываемого материала выбрана сталь марки ШХ15, условия проведения экспериментов аналогичны условиям, рассмотренным при имитационном моделировании.

Полученные результаты подтвердили наличие точек перегиба на целевой функции, а следовательно, существование передоложенного критерия выбора скорости резания. Это позволило рекомендовать в качестве рациональной скорости резания для выбранного материала – 185 м/мин.

Для повышения эффективности процессов точения предложен алгоритм адаптивного управления (рис. 4). Он использует в качестве модели ИНС, которая обучается встроенной автоматизированной подсистемой в процессе активного эксперимента по результатам температурно-силового мониторинга.

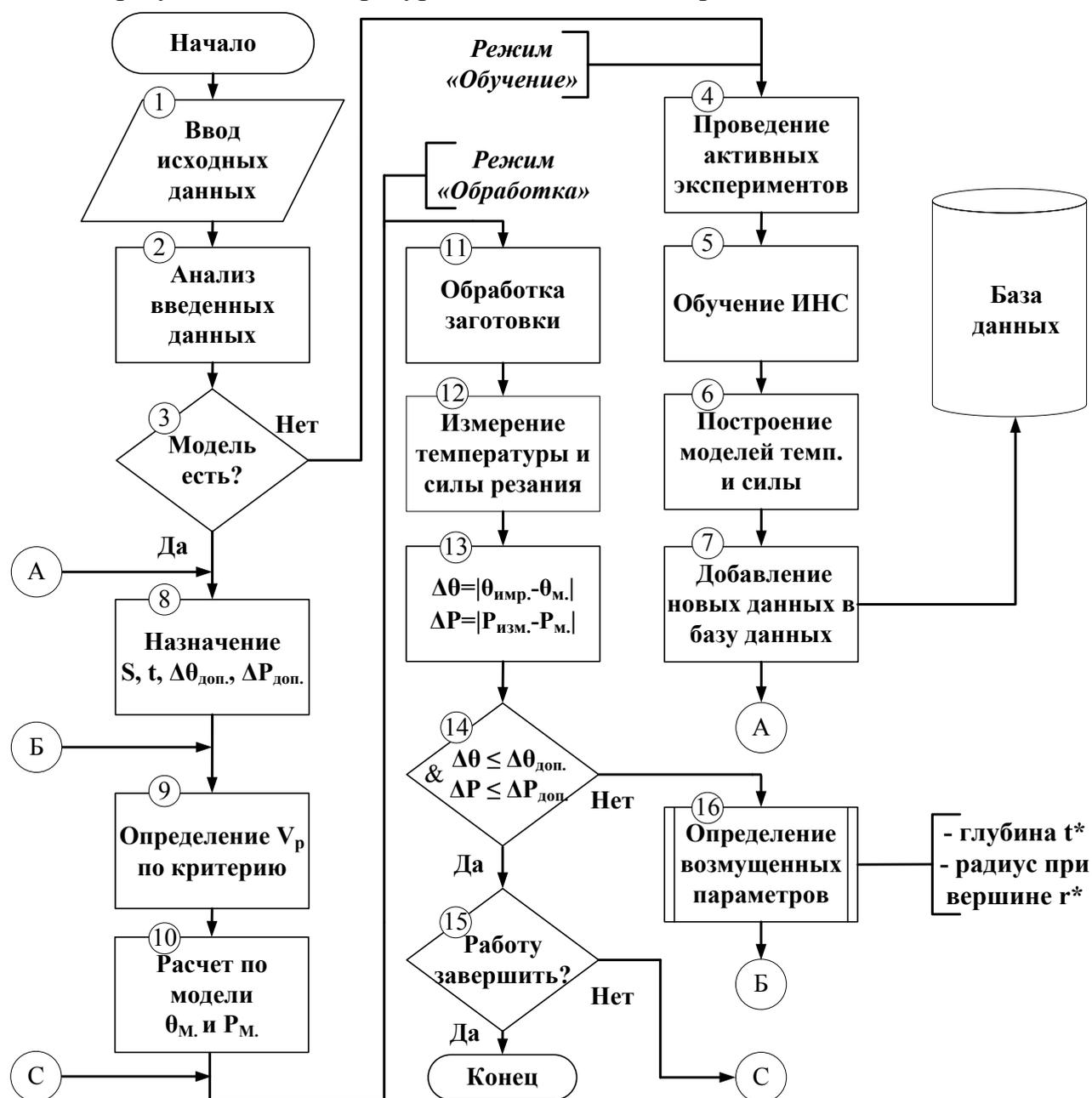


Рисунок 4– Алгоритм адаптивного управления процессом резания

Суть алгоритма адаптивного управления заключается в том, что по введенным данным система анализирует, имеется ли в базе данных соответствующая им математическая модель. Если математическая модель есть, то по заданным исходным данным в соответствии с предложенным критерием (2) система автоматически определяет рациональную скорость резания и соответствующие им значения силы $Pz_M(V, S, t, r, \lambda, \varphi, HB)$, температуры $\theta_M(V, S, t, r, \lambda, \varphi, HB)$. После чего переходит в режим «Обработка». Отклонения температуры $\theta_{изм.}$ и силы резания $Pz_{изм.}$ в процессе обработки от выходных параметров модели позволяют идентифицировать возмущения (t^*, r^*), вызвавшие эти отклонения.

$$\begin{cases} \theta_{M.}(V, S, t^*, r^*) - \theta_{изм} = 0 \\ Pz_{M.}(V, S, t^*, r^*) - Pz_{изм} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} t^* \\ r^* \end{cases} \quad (3)$$

На основании этих возмущений корректируется целевая функция $F^*(V)$. Она аппроксимируется полиномом 5-й степени $F^*(V) = c_0 + c_1 \cdot V + c_2 \cdot V^2 + c_3 \cdot V^3 + c_4 \cdot V^4 + c_5 \cdot V^5$. После чего в соответствии с критерием (2) определяются новое скорректированное значение скорости резания V_p^* и для нее формируются новые выходные значения модели $Pz_{M.}^*, \theta_{M.}^*$.

$$\begin{cases} t^* \\ r^* \end{cases} \Rightarrow F^* \xrightarrow{\text{аппрок.}} F(V)^* = c_0 + c_1 V + \dots + c_5 V^5 \Rightarrow \frac{d^2 F^*}{dV^2} = 0 \Rightarrow V_p^* \Rightarrow \begin{cases} Pz_{M.}^* \\ \theta_{M.}^* \end{cases} \quad (4)$$

При возникновении новых возмущений процесс поиска рациональной скорости повторяется.

Если модель отсутствует, то система предлагает провести активный эксперимент в режиме «Обучение», то есть задать материал заготовки и параметры инструментов, установить тестовую заготовку с заданными геометрическими параметрами, после чего она загружает в ЧПУ станка специальную управляющую программу и запускает цикл обработки.

Четвертая глава посвящена разработке средств технического оснащения и программного обеспечения системы адаптивного управления и температурно-силового мониторинга, а также промышленной апробация результатов работы.

Разработано программное обеспечение системы адаптивного управления, температурно-силового мониторинга и подсистемы автоматизированного обучения ИНС, моделирующей процесс резания.

Для первичной обработки информации с термопары и датчика силы резания (Kistler 9919A) разработано периферийное устройство мониторинга температурно-силовых характеристик процесса резания (Патент № 156863).

С целью оценки возможностей подсистемы автоматизированного обучения, включающей систему мониторинга, проведен активный эксперимент для операции токарной обработки кольца подшипника диаметра 30 мм из стали 52100 на токарном станке с ЧПУ Emco Concept Turn 250. Для эксперимента в качестве заготовки выбран гладкий вал диаметра $D = 40$ мм, длиной $L = 50 \dots 100$ мм. По известным рекомендациям выбран проходной резец из твердого сплава CBN010 (аналога сплава T14K8) (главный угол в плане $\varphi = 55^\circ$, передний угол $\gamma = 0^\circ$, задний угол $\alpha = 12^\circ$, радиус при вершине $r = 3$ мм). Сгенерированная управляющая программа многопроходной обработки ступенчатого вала обеспечила требуемый диапазон варьирования режимов об-

работки. Поскольку выбранный материал представляет собой аналог стали ШХ-15, то для переобучения существующей в базе данных модели потребовалось всего восемь наборов обучающих данных. На основании новой модели в качестве рекомендованных предложены следующие режимы $V = 190$ м/мин., $S = 0,1$ мм/обр., $t = 2$ мм. Практическая апробация разработанной системы адаптивного управления процессом точения проведена в отмеченных выше условиях в ОАО «Вьеттел» (г. Ханой, Вьетнам).

Анализ полученных результатов показал, что применение предложенной системы адаптивного управления благодаря оперативному контролю условий резания, рациональному выбору и непрерывной коррекции скорости резания на верхней границе допустимых значений позволяет повысить производительность операций точения на 10,5 % при сохранении нормативной стойкости инструмента. Данный результат отражен в свидетельстве № 135/08 (22/7/2015) об «Эффективность внедрения методики адаптивного управления процессом резания, основанной на обучении ИНС по результатам температурно-силового мониторинга», полученном при модернизации систем управления металлорежущих станков.

В заключении обсуждены итоги и сформулированы общие выводы диссертации.

В приложении представлены листинги отдельных модулей программного обеспечения алгоритма обучения ИНС, копии свидетельств на программные продукты, патентов, акта внедрения результатов работы в ОАО «Вьеттел» (г. Ханой, Вьетнам).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная научно-техническая задача обоснования рациональных режимов токарной обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов на основании модели температурно-силовых характеристик и термодинамического критерия, их мониторинга и оперативного управления скоростью резания, имеющая важное значение для машиностроительных отраслей.

1. На основании проведенного анализа факторов, определяющих эффективность процесса точения подтверждено, что доминирующее влияние на него оказывает скорость резания, а одним из перспективных направлений ее повышения является оперативное управление, использующее термодинамические критерии; показано, что применяемые при этом модели процесса резания адекватны в узком диапазоне изменения условий обработки и не отражают структурно параметрических изменений процесса стружкообразования;

2. В результате теоретических и экспериментальных исследований формализованы функциональные связи режимов точения, параметров инструмента и обрабатываемого материала, разработана модель температурно-силовых характеристик процесса резания, описываемая в виде ИНС, представляющей собой многослойный персептрон с одним скрытым слоем. Доказано, что для адекватного моделирования процесса резания (погрешность не превышает 1 %) необходимо и достаточно использовать следующие размерности слоев: входного–7 (подача, скорость и глубина резания, радиус при вершине и главный угол в плане резца, теплопроводность и твердость обрабатываемого материала); скрытого– 20; выходного– 2 (температура и сила резания);

3. На основании обобщения результатов имитационного моделирования точения деталей из труднообрабатываемых материалов дано обоснование рациональной скорости резания, соответствующей максимальной скорости изменения зависимости отношения диссипативной функции внешних сил к температуре в зоне резания от скорости. Установлено, что она находится в средней части диапазона, определенного скоростями, соответствующими оптимальной температуре резания (по Макарову А.Д.) и максимуму диссипации механической энергии (по Постнову В.В.). Это значение отражает структурно-параметрические изменения процесса стружкообразования, и позволяет повысить производительность процесса при сохранении заданной стойкости инструмента;

4. В результате обобщения известных экспериментальных исследований точения деталей из ЭИ787ВД, 1Х18Н9Т, 10Х11Н23Т3МР, ХН56ВМКЮ и имитационного моделирования на их основе с помощью ИНС температурно-силовых характеристик процессов показано, что рациональное в смысле предложенного критерия значение скорости резания существенно зависит от обрабатываемого материала и увеличивается с уменьшением глубины резания и подачи. Это хорошо согласуется с известными положениями Макарова А.Д. и подтверждает правильность выдвинутых теоретических положений;

5. Разработанные для станков с ЧПУ средства технического оснащения температурно-силового мониторинга, защищенные патентами № 2566979, № 156863, и подсистема автоматизированного обучения ИНС, описывающая процесс резания, в основу которой лег предложенный алгоритм обучения построенный на анализе и выборе варианта направления изменения весов скрытого слоя, позволили сократить время обучения более, чем в 2 раза, величину ошибки моделирования уменьшить с 1,25 до 0,6 %, сократить объем обучающей выборки. Подсистема автоматически строит активный эксперимент и идентифицирует параметры модели в режиме эксплуатации оборудования для дальнейшего использования в системе адаптивного управления, что сокращает сроки подготовки производства на 15 %;

6. Разработанная система адаптивного управления станками с ЧПУ использует модель процесса резания в виде ИНС, температурно-силовой мониторинг и оперативное управление скоростью резания на уровне значения, соответствующего максимуму скорости изменения зависимости отношения диссипативной функции внешних сил к температуре в зоне резания от скорости резания. Она позволяет повысить производительность операций точения на 10...15 % в зависимости от условий обработки;

7. Результаты промышленной апробации основных положений диссертационной работы на примере операции точения кольца подшипника подтвердили увеличение производительности более, чем на 10,5 % при сохранении заданной стойкости инструмента, что отражено в свидетельстве № 135/08 (22/7/2015) ОАО «Вьетел» (г. Ханой, Вьетнам).

Научные и практические результаты диссертационных исследований использованы в учебном процессе при подготовке магистров и аспирантов в области машиностроения и повышения квалификации работников машиностроительных предприятий.

Содержание диссертации отражено в 29 научных публикациях, основными из которых являются:

Патенты и свидетельства:

1. Патент на изобретение № 2566979 РФ. МПК⁸ G06N 3/02 (15.12.2014). Способ обучения искусственной нейронной сети / В.С. Сальников, **В.Ч. Хоанг**, А.В. Анцев.
2. Патент на полезную модель № 156863 РФ. МПК⁸ G01K 7/02 (24.06.2015). Устройство измерения температуры / **В.Ч. Хоанг**, В.С. Сальников.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612413 РФ (18.02.2015). Программа обучения искусственной нейронной сети / **В.Ч. Хоанг**, В.С. Сальников.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015619028 РФ (21.08.2015). Программное обеспечение устройства измерения температуры с использованием термопар / **В.Ч. Хоанг**, В.С. Сальников.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ:

5. **Хоанг В.Ч.**, Сальников В.С. Один из аспектов моделирования процесса резания с помощью искусственной нейронной сети // СТИН -2016 - №7. С. 27-31.
6. **Хоанг В.Ч.**, Сальников В.С. Критерий оптимизации процессов резания // СТИН -2015 - №11. С. 33-36.
7. **Хоанг В.Ч.** Практические вопросы исследования температуры резания при точении // Известия ТулГУ. Технические науки. Выпуск 7: в 2 ч. 2015. Ч.1. С. 78-84.
8. **Хоанг В.Ч.**, Сальников В. С. Моделирование температуры резания в условиях неопределенности с применением искусственной нейронной сети // Известия ТулГУ. Технические науки. Выпуск 11: в 2 ч. 2014. Ч.1. С. 386-395.
9. **Хоанг В.Ч.**, Сальников В. С. Выбор оптимального варианта комплекса исходных параметров в математической модели температуры резания // Известия ТулГУ. Технические науки. Выпуск 11: в 2 ч. 2014. Ч.1. С. 402-405.
10. Сальников В. С., **Хоанг В.Ч.** Температурный мониторинг процесса резания // Известия ТулГУ. Технические науки. Выпуск 12: в 2 ч. 2013. Ч.1. С. 216-220.
11. Сальников В. С., **Хоанг В.Ч.** Анализ процессов управления режимами резания по температурному критерию // Известия ТулГУ. Технические науки. Выпуск 1. 2013. С. 172-178.
12. Сальников В. С., **Хоанг В.Ч.** Оперативные средства мониторинга процесса резания // Известия ТулГУ. Технические науки. Выпуск 1. 2013. С. 210-215.

Статья на английском языке в журналах, входящих в международные реферативные базы данных и цитирования Scopus и Springer:

13. V.S. Salnikov, V.C. Hoang Optimization of Cutting Processes. ISSN 1068-798X, Russian Engineering Research, 2016, vol. 36, No. 6, pp. 508-510. doi: 10.3103/S1068798X16060186

Изд. лиц. № _____ от _____. Подписано в печать 10.01.2017 г.

Формат бумаги 60x84¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл.-печ. л. 1,1. Уч.-изд. л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ ____.

Тульский государственный университет

300600, Тула, просп. Ленина, 92.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ

300012, Тула просп. Ленина, 95.