На правах рукописи

ЩЕРБАКОВ МИХАИЛ ЕВГЕНЬЕВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ АППАРАТА ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Специальность 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические системы)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2007

Работа выполнена в ГОУ ВПО Московском государственном технологическом университете «СТАНКИН»

Научный руководитель -	доктор технических наук, профессор Сосонкин Владимир Лазаревич
	доктор технических наук, доцент Мартинов Георги Мартинов
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Семин Валерий Григорьевич
	кандидат технических наук Баранов Леонид Вячеславович
Ведущая организация:	Институт конструкторско-технологической информатики РАН

Защита диссертации состоится «13» ноября 2007 г. в 10.30 часов на заседании диссертационного совета К 212.142.01 в ГОУ ВПО Московском государственном технологическом университете «СТАНКИН» по адресу: 127994, Москва, Вадковский переулок, д. 3а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО Московского государственного технологического университета «СТАНКИН».

Автореферат разослан «9» октября 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета,
кандидат технических наук Тарарин И.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Проблема повышения эффективности обработки на металлорежущих станках с ЧПУ всегда была одной из главных в машиностроении. Необходимость повышения производительности процесса резания выдвигает на первый план задачу повышения качества управления процессом резания. Ученые и специалисты многих стран активно разрабатывают методики управления процессом резания, которые могли бы увеличить производительность процесса резания. Ключевая роль в этих моделях отводится вычислениям значений управляемых параметров процесса резания, при которых достигается наибольшая производительность.

В настоящее время задача повышения производительности процесса резания, решается системами адаптивного оптимального управления с большим допущением: подразумевается постоянство входных параметров процесса резания. Такой подход игнорирует переменный характер глубины резания, что подвергает сомнению адекватность математической модели процесса механообработки.

Реализация полной модели требует множество громоздких вычислений и серьёзно увеличивает загрузку ресурсов, это делает её неприемлемой для практической реализации.

Одним из направлений дальнейшего совершенствования методов повышения производительности процесса резания является использование элементов искусственного интеллекта, позволяющих упростить вычисления и учесть влияние приведённых выше факторов. В качестве элементов искусственного интеллекта целесообразно использовать искусственные нейронные сети (ИНС), обладающие способностью реализовать широкий класс функций без априорных допущений о законах их распределения. Повышенный интерес к применению ИНС в подобного рода задачах объясняется простотой и эффективностью, с которой нейронные сети выполняют функциональные преобразования. На основе их обучения может быть обеспечено более точное и оперативное получение искомых параметров

в реальном масштабе времени. Разработка эффективных алгоритмов, основанных на искусственных нейронных сетях, для выполнения задач подобного класса представляет собой актуальную проблему современных производств.

Цель работы – разработать методику построения систем адаптивного оптимального управления процессом резания при заданных критериях обработки с учетом переменного характера глубины резания, за счёт применения аппарата искусственных нейронных сетей.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. исследовать возможности использования искусственного интеллекта для определения мгновенной глубины резания;
2. разработать способ определения зависимости максимальной производительности процесса резания от его управляемых параметров и мгновенной глубины резания при ограниченности вычислительных ресурсов;
3. разработать алгоритм оптимальной коррекции управляемых параметров процесса резания с учетом ограничения по предельно возможным изменениям параметров за один шаг;
4. в соответствии с полученными теоретическими и практическими знаниями разработать систему адаптивного оптимального управления процессом резания на основе искусственных нейронных сетей, и интегрировать её в систему ЧПУ класса PCNC с открытой архитектурой.

Методы исследования. Поставленные в работе задачи решены с использованием методов системного анализа, методов математического моделирования, идентификации, программирования, анализа данных, теории искусственных нейронных сетей, теории планирования экспериментов и методов компонентного моделирования, применялись технологии COM (component object model) и DCOM (distributed component object model).

Научная новизна исследования заключается в разработке**:**

1. архитектуры и принципов построения системы адаптивного оптимального управления с использованием искусственных нейронных сетей;
2. способа определения мгновенной глубины резания по косвенным признакам на основе алгоритма нечеткой логики;
3. метода определения и изменения значений управляемых параметров процесса резания, при которых достигается максимальная производительность на основе искусственной нейронной сети.

Практическая значимость работы. Разработана методика построения системы адаптивного оптимального управления на базе искусственных нейронных сетей и их обучения. Разработана система адаптивного оптимального управления для системы ЧПУ типа PCNC в виде подключаемого программного компонента.

Реализация работы. Научные и практические результаты использованы в разработках Научно-исследовательской лаборатории систем ЧПУ, а также учебном процессе кафедры Компьютерные системы управления МГТУ «Станкин».

Апробация работы. Теоретические и практические результаты, полученные автором, докладывались на заседаниях кафедры компьютерных систем управления МГТУ «Станкин», конференции «Информационные средства и технологии» в 2006 и 2007 годах, 7-й научной конференций МГТУ «Станкин» и «Учебно-научного центра математического моделирования МГТУ «Станкин» в 2004 году, а также в учебном процессе.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 4 печатные работы.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 78 наименований и приложения. Основная часть работы изложена на 128 страницах

машинописного текста, содержит 42 рисунка и 4 таблицы. Общий объем работы составляет 150 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение включает в себя аннотацию содержания работы с указанием научной новизны и практической полезности, которые выносятся на защиту.

Обоснована потребность в создании систем адаптивного оптимального управления на базе искусственных нейронных сетей.

Констатировано игнорирование переменного характера глубины резания, и отсутствие полноты математической модели процесса механообработки в практических реализациях систем адаптивного оптимального управления.

В **первой главе** на основе научных трудов Соломенцева Ю. М., Сосонкина В. Л., Балакшина Б. С., Подураева В. Н., Аршанского М. М., Проникова А. С. и других специалистов в области адаптивного управления приведён обзор существующих систем управления процессами резания.

Любая система управления приводится к простой схеме объекта управления и управляющего устройства. Управляющее устройство использует информацию о состоянии объекта управления. Показатели, на основании которых осуществляется управление, называют выходной величиной. Данные показатели изменяют свое значение под воздействием множества факторов, воздействующих на объект управления. Эти факторы называют возмущающими, они изменяются по случайным законам и предвидеть их значение и степень их влияния невозможно. Следовательно, выходная величина носит случайный характер. Эта выходная величина поступает на управляющее устройство, там перерабатывается в соответствии с определённой логикой и по тракту управления поступает в виде управляющих сигналов на объект управления. Соответственно, сами управляющие сигналы также являются в некоторой степени случайными.

Системы, в которых параметры регулятора меняются вслед за изменением параметров объекта, обеспечивая при этом неизменное поведение системы в целом, называют адаптивными системами.

Существует два типа адаптивных систем, которые решают задачу управления показателями технологического процесса - это системы адаптивного предельного управления и системы адаптивного оптимального управления. Первые решают задачи увеличения эффективности обработки и выступают как системы стабилизации, следящие или программного регулирования. Вторые строятся на основе: выбранного критерия качества металлообработки (экономического, точностного и т.п.), ограничений, в пределах которых использование данного критерия имеет смысл, конкретных методов оптимизации работы станка в соответствии с принятым критерием и наложенными на него ограничениями, а также технических средств оптимизации и их размещения на тех или иных иерархических уровнях системы управления.

С целью повышения эффективности обработки деталей в этих системах поддерживается оптимальное протекание технологического процесса относительно заданной целевой функции, например, минимальная себестоимость обработки.

Несмотря на случайный характер потока возмущающих воздействий, адаптивная система так управляет технологическим процессом, что целевая функция непрерывно поддерживается на максимальном или минимальном уровне в пределах установленных ограничений.

Определение рационального режима обработки сопряжено со следующими проблемами:

1. в большинстве моделей процессов обработки отсутствует связь точности обработки и критериев оптимальности;
2. игнорируется переменный характер входных параметров, таких как глубина резания, твердость заготовки, износ инструмента;

3. не учитываются погрешности, сопровождающие технологический процесс.

Приведённые выше проблемы серьезно осложняют выработку математической модели, позволяющей оптимизировать процесс резания. Даже если подобная модель создаётся, она требует множество громоздких вычислений, которые серьёзно увеличивают загрузку ресурсов, что неприемлемо.

В настоящее время в промышленности используются системы адаптивного предельного управления в силу простоты их реализации. Однако системы данного типа не обеспечивают высокого качества управления процессом резания и не делают процесс резания экономически эффективным. Системы адаптивного оптимального управления теоретически обеспечивают более эффективное управление процессом резания, но они не получили широкого распространения т.к. либо были реализованы с серьёзными допущениями, либо требовали большого количества вычислительных ресурсов.

На основании проведенного анализа системы адаптивного управления, поставлена цель и сформулированы задачи исследования.

Во **второй главе** приведена реализация системы адаптивного предельного управления, которая управляет износом режущего инструмента во время процесса точения. В представленной системе отслеживается износ режущего инструмента, и в зависимости от него изменяются управляемые параметры процесса - частота вращения шпинделя и продольная подача.

Поскольку невозможно измерить износ инструмента во время работы напрямую, то необходимо делать это по косвенным признакам. В представленной работе износ инструмента определяется по двум параметрам: температуре в зоне резания и радиальной силе в точке контакта. Температуру в зоне резания легко измерить с помощью термопары, а радиальную силу - тензодатчиком.

Так как процесс износа режущего инструмента носит случайный характер, то спрогнозировать его можно лишь с определённой долей вероятности. Случайный характер износа инструмента в значительной мере определяется случайным характером параметров начального состояния инструмента. Параметры начального состояния инструмента, формирующиеся на стадии его изготовления, приобретают случайные значения из-за нестабильности операций технологического процесса и нестабильности металловедческих свойств заготовок. Необходимо, не останавливая процесс резания, отследить по приведённым выше критериям, начало износа инструмента, и автоматически изменить управляемые параметры процесса резания, таким образом, чтобы снизить износ инструмента. Управляемыми параметрами для процесса точения являются частота вращения шпинделя и продольная подача.

Не существует прямых зависимостей, описывающих связь между управляемыми параметрами процесса резания и параметрами, характеризующими износ режущего инструмента (температура в зоне резания и радиальная сила в точке контакта). Поэтому для управления износом режущего инструмента следует использовать заранее обученную искусственную нейронную сеть. Входными параметрами для этой нейронной сети являются значения температуры в зоне резания и радиальной силы в точке контакта. Входные значения для данной нейронной сети фильтруются, чтобы избежать изменения управляемых параметров по локальному увеличению износа. Сеть генерирует приращения (с учётом знака) частоты вращения шпинделя и подачи.

Предложенное решение для системы регулирования износа режущего инструмента имеет два ограничения:

1. игнорирование переменного характера глубины резания, что оказывает влияние на качество управления;

2. сложность составления обучающей выборки для искусственной нейронной сети, т.к. требуется большое количество экспериментов для получения корректной обучающей выборки.

Число экспериментов для получения обучающей выборки может быть уменьшено с помощью теории планирования эксперимента.

В **третьей главе** рассматриваются качество и производительность обработки как управляемые показатели технологического процесса. Проблему оптимизации обычно сводят к определению оптимальных режимов резания. В общем виде принцип оптимальности можно сформулировать так: для конкретного варианта технологического процесса необходимо определить такие значения искомых технологических параметров (X), которые обеспечивают наибольшую эффективность процесса при соблюдении ограничений по качеству продукции, производительности, расходу оборотных средств, а также по технологическим и организационно-техническим возможностям основных средств.

Искомыми параметрами для конкретного варианта технологического процесса являются режимы резания (скорость, подача), межпереходные припуски и допуски, стойкость режущего инструмента (его период стойкости и число деталей, обработанных за этот период), допуски на размерную настройку станочной системы.

Оптимальные значения искомых параметров X определяют с учётом критерия оптимальности C, который минимизируется или максимизируется с учётом комплекса ограничений.

Также технологический процесс характеризуется совокупностью фазовых параметров Y. Эти зависимые параметры (например, сила резания, мощность и износ) являются функциями искомых независимых параметров. Кроме того, необходимо учитывать исходные параметры Ψ, например, коэффициенты уравнений и константы. В общем виде математическая модель процесса описывается векторным уравнением $Y=Y(\Psi, X)$.

Ограничения составляют систему неравенств, каждое из которых устанавливает пределы варьирования некоторого фазового или искомого параметра. В общей форме ограничения можно записать так: $X \in [X_{min}, X_{max}], Y \in [Y_{min}, Y_{max}]$.

Критерий оптимальности C_0 является функцией исходных, фазовых и искомых параметров: $C_0 = C_0(\Psi, Y, X)$. Это создает возможность управления искомыми параметрами на основе информации о значениях фазовых параметров. Отсюда следуют два вывода: производительность и себестоимость обработки являются управляемыми показателями технологического процесса; в процессе управления может быть решена задача оптимизации.

Представлена структурная схема системы управления и производится выбор критерия оптимизации режима металлообработки. На практике наибольшее применение получили критерии производительности и себестоимости, которые включают в себя зависимость стойкости инструмента от параметров резания.

Основные известные из практики критерии оптимизации режима металлообработки можно разбить на четыре группы:

1. критерий минимальной стоимости;
2. критерий максимальной производительности;
3. критерий максимальной интенсивности удаления припуска;
4. критерий максимального использования возможностей станка и инструмента.

Для разрабатываемой системы в качестве критерия оптимизации выбран критерий максимальной объёмной производительности, относящийся ко второй группе.

$$П_v = \frac{v}{T + \tau_{см}}, \qquad (4)$$

где v - объём припуска, снятый за цикл использования инструмента; Т – период стойкости инструмента; $\tau_{см}$ - время смены инструмента.

Критерий объемной производительности целесообразно использовать по следующим причинам:

1. учитывает период стойкости инструмента;
2. позволяет рассматривать процесс резания без учета размерных параметров заготовки, что делает возможным представление процесса на плоскости производственных характеристик станка;
3. учитывает влияние переменной глубины резания

В **четвертой главе** описывается структура системы адаптивного оптимального управления процессом точения, которая повышает объёмную производительность процесса резания.

Предлагается рассматривать задачу повышения производительности на плоскости производственных характеристик станка. Плоскость производственных характеристик представляет собой систему координат, осями которой являются управляемые параметры процесса резания – частота вращения шпинделя и продольная подача.

Представление технологического процесса на плоскости производственных характеристик станка удобно тем, что на ней можно определить зависимость процесса резания от двух управляемых параметров – частоты вращения шпинделя и подачи, абстрагируясь при этом от размерных параметров инструмента, станка и заготовки.

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. Кроме того, частота вращения шпинделя не может быть меньше некоторой величины, при которой ухудшаются условия стружкообразования.

Наибольшее значение частоты вращения шпинделя определяется конструктивно заданным верхним пределом диапазона изменения. Кроме того, она ограничена некой величиной, при превышении которой происходит

быстрое изнашивание и разрушение инструмента вследствие чрезмерного нагревания режущей кромки.

Наибольшая и наименьшая подачи ограничиваются конструктивно заданными пределами для привода подачи станка. Кроме того, на максимальное значение подачи влияет прочность используемого инструмента.

Помимо конструкторско-технологических ограничений частоты вращения шпинделя и скорости подачи, существуют силомоментные ограничения. С учетом упомянутых выше ограничений можно определить зону допустимых режимов на плоскости производственных характеристик станка (на рисунке 1 эта область выделена серым цветом).

Ограничения устанавливаются для конкретного станка, инструмента и материала заготовки, т.к. зависят от их параметров, следовательно, нельзя переносить ограничения одного процесса резания на другой.

Глубина резания не является управляемым параметром процесса и изменяется во время обработки. Изменения глубины резания имеют случайный характер и зависят от многих факторов. Выбранная в качестве критерия оптимизации объёмная производительность зависит от глубины резания.

Для каждой глубины резания существует некая оптимальная кривая, которая проходит через область допустимых значений n и s на плоскости производственных характеристик станка и соответствует максимальной производительности процесса резания. Т. к. глубина резания является переменной величиной, то можно говорить о семействе оптимальных кривых, каждая из которых соответствует какой-то конкретной величине t_1, t_2 или t_3 (см. рис. 1).

Если рассматривать задачу только с точки зрения максимизации производительности, без ограничения на точность изготавливаемой детали, т.е. черновую обработку, то максимумы производительности будут находиться на пересечении оптимальных кривых с верхней границей области

допустимых значений управляемых параметров. Это связано с тем, что производительность процесса резания пропорциональна как частоте вращения шпинделя, так и скорости продольной подачи. Соответственно, максимальному значению производительности соответствуют максимально допустимые значения управляемых параметров процесса резания. Глубине резания t_1 соответствует точка A_1, глубине t_2 - точка A_2, а глубине t_3 - точка A_3 (см. рис 1).

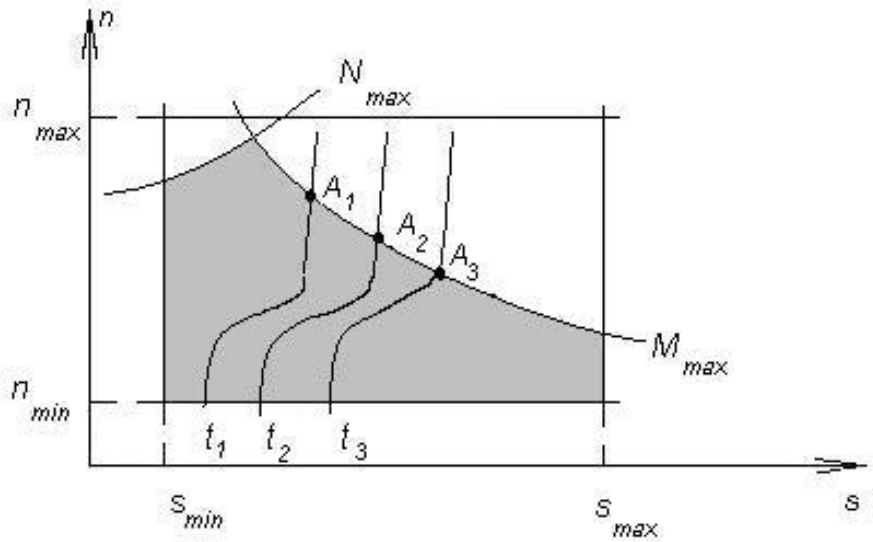

Рис. 1. Точки максимальной производительности

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

Т.к. напрямую измерить глубину резания невозможно, то следует определять её величину косвенно с помощью других параметров процесса резания. Как известно, силы в зоне резания могут быть рассчитаны по формулам:

$$P_x = C_{Px} t^{Xpx} s^{Ypx} v^{Zpx} K_{ОБЩ};$$
$$P_y = C_{Py} t^{Xpy} s^{Ypy} v^{Zpy} K_{ОБЩ}; \qquad (5)$$
$$P_z = C_{Pz} t^{Xpz} s^{Ypz} v^{Zpz} K_{ОБЩ};$$

где P_x, P_y, P_z - соответственно, осевая, радиальная и тангенциальная составляющая силы резания; C_{Px}, C_{Py}, C_{Pz} - константы; t, s, v - глубина, подача и скорость резания; *x*, *y*, *z* - показатели степени, выражающие влияние соответствующего параметра режима резания на силы резания; $K_{ОБЩ}$ - коэффициент, учитывающий дополнительно влияние на силы резания свойств обрабатываемого, инструментального материала и т.д.

Эти формулы (5) достаточно часто используют для практических расчетов. Они получены эмпирическим путем. Имеются и теоретически полученные уравнения, но они сложны и для практических расчетов не используются. Из приведённых выше зависимостей составляющих сил резания от параметров процесса резания, с точки зрения измерения, удобнее всего использовать радиальную силу. Радиальную силу можно измерять с помощью тензодатчика с достаточно высокой точностью, скорость резания пропорциональна частоте вращения шпинделя, подача является управляемым параметром процесса резания. Однако эмпирические формулы – предоставляют только приблизительные значения. Необходимо более точно определять глубину резания, чтобы на основании полученной величины оптимизировать управляемые параметры процесса резания.

Для определения точного значения глубины резания предлагается использовать искусственную нейронную сеть. Входами данной нейронной сети являются: частота вращения шпинделя, продольная подача, радиальная сила в точке контакта, а выходом - мгновенная глубина резания. Схема данной сети представлена на рисунке 2.

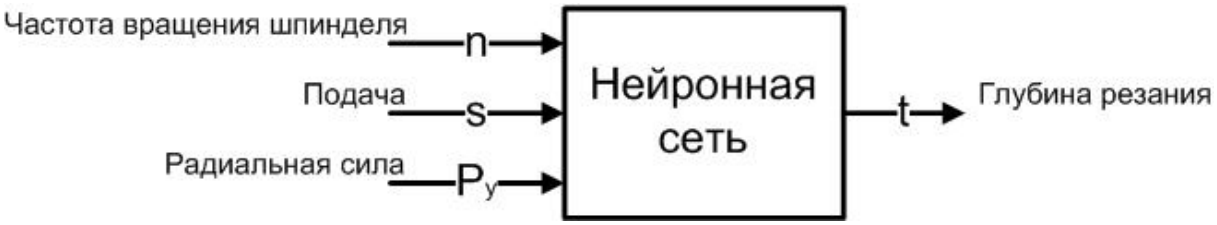

Рис. 2. Входы и выходы нейронной сети, определяющей глубину резания.

В качестве нейронной сети, определяющей мгновенную глубину резания целесообразно использовать сеть, обучающуюся с учителем, по алгоритму обратного распространения ошибки.

Данная нейронная сеть не учитывает параметры инструмента и заготовки, поэтому для каждой пары «инструмент – заготовка» необходимо создать отдельную обучающую выборку.

По результатам компьютерного моделирования, проведенного с помощью нейропакета NeuroPro (НейроПро) версии 0.25, было определено оптимальное количество нейронов в скрытом слое равное 59. При данном количестве обеспечивается наибольшая скорость обучения. Результаты моделирования приведены в приложении 2. Таким образом, нейронная сеть, определяющая мгновенную глубину резания, имеет во входном слое 3 нейрона, в скрытом слое 59 нейронов, а в выходном слое 1 нейрон.

После определения мгновенной глубины резания необходимо определить координаты пересечения кривой максимальной производительности для данной глубины резания с верхним ограничением.

Использование в качестве критерия оптимизации объёмной производительности (4) предполагает, что для определения положения оптимальной кривой на плоскости производственных характеристик необходимо выразить её через управляемые параметры процесса резания.

Известно, что стойкость инструмента зависит от параметров резания и для продольного точения может быть определена по формуле:

$$T^m = \frac{318 c_v k_v}{n t^{x_v} s^{y_v} d}, \quad (6)$$

где c_v - постоянная величина; k_v - коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала, инструмента и типа СОЖ; d - диаметр обработки; t - глубина резания; x_v, y_v, m - показатели степеней, зависящие от свойств инструмента и условий резания.

Таким образом, можно выразить производительность процесса точения через управляемые параметры, т.е. данная зависимость позволяет определить положение оптимальной кривой на плоскости производственных характеристик станка. Точка максимальной производительности определяется как точка пересечения оптимальной кривой с верхним ограничением. В общем случае, ограничения по моменту и мощности резания описываются уравнениями 3-го порядка, коэффициенты которых можно получить экспериментальным путём.

Максимально допустимую мощность резания можно определить по формуле:

$$N = \frac{1}{6120} \cdot V \cdot C_{Pz} \cdot s^{\beta_z} \cdot t^{\gamma_z} \cdot HB^{n_z}, \quad (7)$$

где N - мощность резания; V - скорость резания; HB - твердость материала заготовки; $C_{Pz}, \beta_z, \gamma_z, n_z$ - коэффициенты, полученные экспериментальным путём.

В свою очередь, максимальный момент резания определяется по формуле:

$$M = 0{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot d \cdot C_{P_z} \cdot s^{\beta_z} \cdot t^{\gamma_z} \cdot HB^{n_z}. \quad (8)$$

Эти зависимости получены эмпирическим путём и являются приблизительными.

Вычисление точки пересечения оптимальной кривой с ограничением традиционным способом очень ресурсоёмкий процесс. Поэтому предлагается для определения этой точки использовать заранее обученную искусственную нейронную сеть. Как и в предыдущих случаях, такая нейронная сеть должна обучаться с учителем по алгоритму обратного распространения ошибки.

Входами данной нейронной сети являются текущие значения частоты вращения шпинделя и продольной подачи, мгновенная глубина резания,

диаметр обработки, твердость материала заготовки, максимально допустимые значения управляемых параметров. Эта искусственная нейронная сеть определяет координаты оптимальной точки, т.е. точки максимальной производительности на плоскости производственных характеристик станка.

По результатам компьютерного моделирования было определено оптимальное количество нейронов в скрытом слое равное 14. Результаты моделирования приведены в приложении. Таким образом, нейронная сеть, определяющая максимальную мощность резания, имеет во входном слое 7 нейронов, в скрытом слое 14 нейронов, а в выходном слое 2 нейрона.

После определения положения оптимальной точки на плоскости производственных характеристик станка необходимо выбрать алгоритм изменения управляемых параметров процесса резания таким образом, чтобы за один шаг достичь или максимально приблизиться к оптимальной точке.

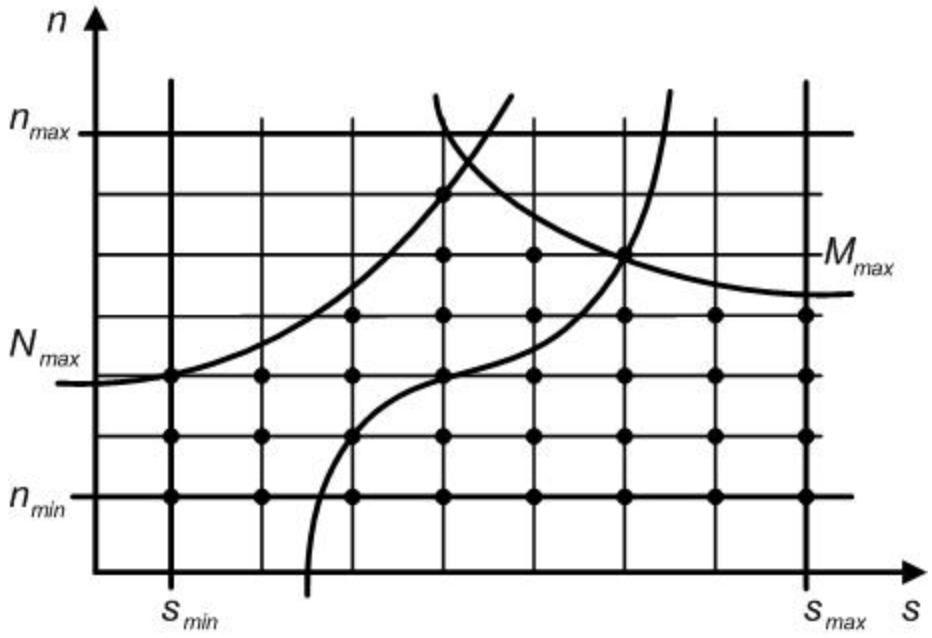

Рис. 3. Дискретность системы ЧПУ

Система ЧПУ является дискретной системой, т.е. значения управляемых параметров процесса резания могут принимать определенные значения, зависящие от шага квантования по уровню. Данная ситуация проиллюстрирована на рисунке 3. Система ЧПУ может находиться в состоянии, соответствующем одному из узлов сетки. Расстояние между

узлами по горизонтали определяется минимально допустимым приращением подачи, а по вертикали - минимально допустимым приращением частоты вращения шпинделя. Эти значения неизменны для системы ЧПУ и связаны с конструктивными особенностями системы. Чем меньше расстояние между узлами координатной сетки, тем выше качество управления.

Максимально возможные приращения значений управляемых параметров процесса резания также ограничены. Эти ограничения определяются на основе многих факторов, таких как параметры материалов заготовки и инструмента, диаметр обработки, требуемая точность обработки и т.п. Максимально возможное приращение можно выразить в количестве узлов координатной сетки по соответствующему измерению.

Оптимизация процесса резания сводится к управлению перемещением из одного узла координатной сетки к другому. Однако для определения приращений частоты вращения шпинделя и скорости подачи необходимо решить ряд дополнительных проблем.

Первая проблема заключается в том, что оптимальная точка, как правило, не находится в одном из узлов координатной сетки, так как положение данной точки определяется теоретически без учёта дискретности системы ЧПУ. Необходимо заменить теоретическую оптимальную точку реальной, которая будет располагаться в одном из узлов координатной сетки и будет максимально приближена к теоретической.

Алгоритм определения оптимального узла координатной сетки заключается в следующем: прямоугольник, ограниченный узлами координатной сетки, делится на четыре равных прямоугольника; каждый из полученных прямоугольников содержит узел координатной сетки. Оптимальная точка попадает в один из этих прямоугольников. Вершина этого прямоугольника (содержащего оптимальную точку) и является оптимальным узлом координатной сетки. В случае, когда оптимальная точка равноудалена от двух и более узлов, в качестве оптимального следует выбирать узел, соответствующий максимальной производительности.

Вторая проблема коррекции управляемых параметров 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. Необходимо определить алгоритм изменения управляемых параметров процесса резания, в случае невозможности достижения оптимального узла координатной сетки за один шаг.

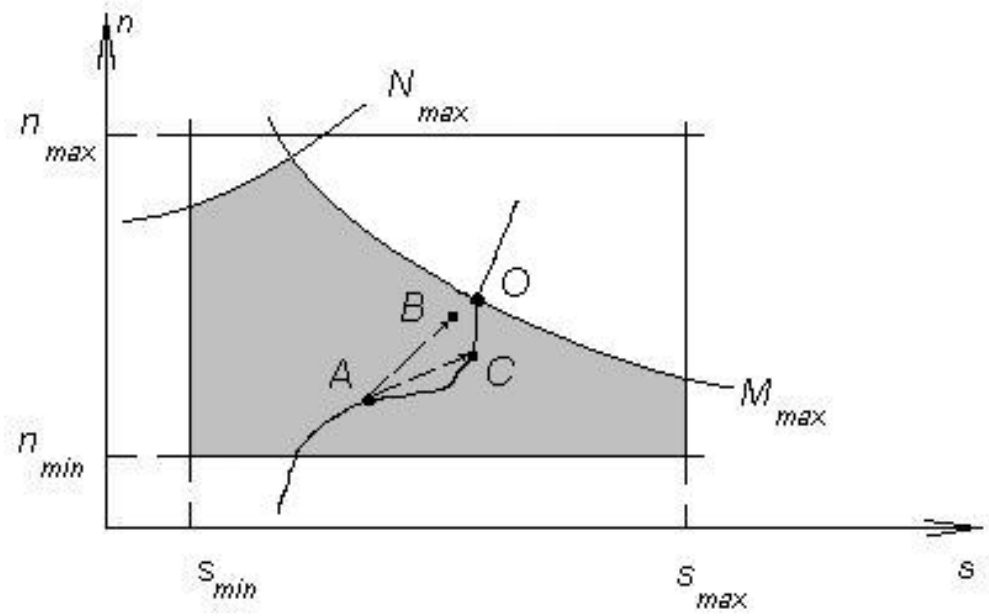

Рис. 4. Возможные приращения управляемых параметров процесса резания

Допустим, система находится в состоянии, которому соответствует точка *A* на рисунке 4. Оптимальный узел координатной сетки соответствует точке *O*. Из точки *A* невозможно переместиться в точку *O* за один шаг. При этом необходимо максимально приблизиться за один шаг к оптимальному узлу. Однако, если перемещаться от точки *A* в точку *O* на максимально возможное расстояние по прямой, то система окажется в состоянии, которое соответствует точке *B*, которая находится в стороне от оптимальной кривой. Следовательно, система может оказаться в худшем состоянии, чем предыдущее. Поэтому, необходимо максимально возможно подняться вверх именно по оптимальной кривой.

Для решения этой задачи разработан специальный алгоритм, который определяет узел координатной сетки, находящийся рядом с оптимальной кривой и соответствующий максимально возможному приращению управляемых параметров процесса резания.

Данная задача также решается с помощью искусственной нейронной сети, обучающейся по алгоритму обратного распространения ошибки. Входами этой нейронной сети являются: текущие значения управляемых параметров до коррекции, координаты оптимального узла, максимально допустимые приращения частоты вращения шпинделя и скорости подачи за один шаг, минимально возможные приращения управляемых параметров за один шаг и мгновенная глубина резания.

По результатам компьютерного моделирования было определено оптимальное количество нейронов в скрытом слое равное 14. Результаты моделирования приведены в приложении. Таким образом, нейронная сеть, определяющая скорректированные значения управляемых параметров процесса резания, имеет во входном слое 9 нейронов, в скрытом слое 14 нейронов, а в выходном слое 2 нейрона.

Также, в данной главе описывается применение теории планирования эксперимента для создания обучающих выборок нейронных сетей.

В **пятой главе** описана программная реализация системы адаптивного оптимального управления и реализована ее интеграция в систему ЧПУ типа PCNC.

Не все существующие системы ЧПУ допускают подключение внешних программных модулей, без изменения архитектуры последней. Системы ЧПУ WinPCNC с открытой архитектурой поддерживают возможность подключения внешних программных модулей, реализованных как COM – компоненты, что определяет способ интеграции система адаптивного оптимального управления.

Разбиение системы адаптивного оптимального управления на COM – компоненты повышает её гибкость, позволяет модифицировать и

конфигурировать только отдельную часть системы без изменения остальных компонентов. Исходя из действий, которые выполняет система адаптивного оптимального управления, она была реализована в виде набора следующих компонент:

1. компонент, определяющий мгновенную глубину резания (функционирующий как искусственная нейронная сеть);
2. компонент, определяющий оптимальные значения управляемых параметров процесса резания (функционирующий как искусственная нейронная сеть);
3. компонент, определяющий оптимальный узел координатной сетки;
4. компонент, определяющий скорректированные значения управляемых параметров процесса резания (функционирующий как искусственная нейронная сеть);
5. компонент, обеспечивающий корректное взаимодействие приведенных выше компонентов. Данный компонент также должен осуществлять взаимодействие с системой ЧПУ.

Далее специфицированы COM – интерфейсы компонентов. Исследована возможность применения готовых инструментальных средств для ускорения процесса разработки искусственных нейронных сетей. По результатам исследования выбрана библиотека NeuroNet, позволяющая создавать искусственные нейронные сети, обучающиеся по алгоритму обратного распространения ошибки и сохранять структуру сети в файл. Описана схема интеграции системы адаптивного оптимального управления в систему ЧПУ WinPCNC и приведена расширенная архитектура.

В **приложении** вынесены результаты компьютерного моделирования по определению структур искусственных нейронных сетей, использующихся в системе.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Система адаптивного оптимального управления, построенная на базе искусственных нейронных сетей, позволяет обеспечить необходимое быстродействие системы управления и надлежащее качество обрабатываемых изделий при достижении максимальной производительности процесса резания. Максимально возможная производительность обработки зависит от дискретности управляемых параметров системы ЧПУ.
2. Точность обучения искусственных нейронных сетей, используемых в системе адаптивного предельного управления, напрямую зависит от требований, предъявляемых к износостойкости режущего инструмента, и может быть повышена итеративно путем дополнительного обучения.
3. Мгновенная глубина резания может быть определена с высокой точностью по косвенным признакам с помощью искусственной нейронной сети.
4. Максимальная производительность процесса резания может быть определена с помощью искусственной нейронной сети на основании значений управляемых параметров и их ограничений, а также мгновенной глубины резания.
5. Коррекция управляемых параметров процесса резания может быть осуществлена с помощью искусственной нейронной сети, на основании оптимальных значений управляемых параметров и ограничений, накладываемых на систему ЧПУ.
6. Предложенная реализация системы адаптивного оптимального управления в виде набора COM – компонентов позволяет легко встроить её в систему ЧПУ класса PCNC без изменения архитектуры последней. Использование внешних библиотек, реализующих искусственные нейронные сети, позволяет значительно ускорить процесс разработки и снизить его себестоимость. Предложенный механизм сохранения структуры обученной нейронной сети в файле и

последующей ее загрузки обеспечивает многократное использовании сети без повторного обучения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Щербаков М. Е. Повышение производительности процесса точения за счёт использования аппарата искусственных нейронных сетей // Автоматизация и современные технологии. 2007 №9. С. 3 – 7.
2. Щербаков М. Е. Управление производительностью процесса точения с помощью искусственных нейронных сетей // Международный форум информатизации. Труды международной научно-технической конференции «Информационные средства и технологии». 16 – 18 октября 2007 г., в 3-х т.т. Т3. С. 202 - 207 – М.: Янус-К, 2007.
3. Щербаков М. Е. Повышение производительности процесса резания за счет использования аппарата искусственных нейронных сетей // Международный форум информатизации. Труды международной научно-технической конференции «Информационные средства и технологии». 17 – 19 октября 2006 г., в 3-х т.т. Т3. С. 220 - 223 – М.: Янус-К, 2006.
4. Щербаков М. Е. Использование аппарата искусственных нейронных сетей в системе управления процессом резания // 7-я научная конференция МГТУ «Станкин» и «Учебно-научного центра математического моделирования МГТУ «Станкин» - ИММ РАН». Программа сборник докладов. 28 – 29 апреля 2004 г. С. 146 – 149. – М.: Янус-К, ИЦ ГОУ МГТУ «Станкин».