

УДК 004.896:621.452.002

А. Г. ГЛАЗКОВ

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

Предложены методы математического моделирования и оптимизации режимов выполнения технологической операции, предназначенные как для разработки рабочей технологической документации, так и для непосредственного управления мехатронными станками, встраиваемыми в производственные участки «интеллектуального производства». Критерием оптимизации является максимальная производительность на операции при выполнении ограничений по точности обработки, исключающих брак. *Технологическая подготовка производства ; рабочая технологическая документация ; искусственный интеллект ; поисковая оптимизация ; искусственные нейронные сети ; нечеткая логика*

Критические технологии Федерального уровня ориентируют разработчиков проектов технического перевооружения производства на создание современных мехатронных технологий, основным отличительным свойством которых является использование средств искусственного интеллекта. Искусственный интеллект используется в проектах мехатронных производственных участков и цехов в рамках концепции «умного производства», которая рассматривает четыре иерархических уровня комплексной автоматизации производства: обеспечения эффективности и конкурентоспособности продукции, учета и управления производством, подготовку производства и производства изделий [1].

Средства искусственного интеллекта уже находят свое применение в технологической подготовке производства, в частности, для разработки проектов технического перевооружения [2, 3], для классификации и группирования изделий ГТД, разработки проектных и перспективных технологических процессов, оптимизации технологических планировок оборудования, при анализе патентной статистики для выбора направлений разработки критических технологий.

ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ, СВЯЗАННАЯ С ОФОРМЛЕНИЕМ РАБОЧЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

В данной публикации в дополнение к названным разработкам предложен метод математического моделирования и оптимизации рабочих технологических процессов, выпол-

няемых на мехатронных станках. Критерием оптимизации является максимальная производительность на операции при выполнении ограничений по точности обработки, исключающих появление брака. Рабочая технологическая документация в этом случае содержит на операционной карте и карте эскизов режимы выполнения технологической операции, рис. 1.

Особенностями оформления рабочей технологической документации в данном случае являются: задание не одного значения скорости резания, а интервала скоростей [6]. Нижний предел этого интервала скоростей определяется традиционными методами, например, для силовой схемы резания — по нормативам [7], а верхнее значение — по рекомендациям современных каталогов прогрессивного инструмента, например, [8]. В таких условиях нижняя граница скорости резания, как правило, имеет резервы роста производительности на операции, а верхняя граница скорости резания нередко формулируется из рекламных соображений, что не всегда устраивает технолога. В этой связи компьютер мехатронного станка должен определить возможности оптимизации технологической операции по времени ее выполнения в заданных границах операционных размеров с учетом поля допуска, заданного на операции.

Это обстоятельство связано с тем, что при обработке каждой детали партии происходит изменение фактических операционных размеров, которые меняются пропорционально скорости резания и износу инструмента.

Метод решения задачи средствами поисковой оптимизации заключается в том, что на этапе моделирования на основе анализа экспериментальных данных строится математическая модель, связывающая изменения отклонения размера детали от скорости резания на операции $d\Delta_j = f(V_j)$.

Данная модель в зависимости от пары инструмент-деталь может иметь линейный, одно- или многоэкстремальный характер [9].

Критерий оптимизации:

$$J = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N V_j \rightarrow \max, \quad (1)$$

где N — количество деталей;

V_j — текущая скорость резания, м/мин;

j — номер детали.

Ограничения по скорости резания в данном случае принимают следующий вид:

$$V_j \in [V_{\min}; V_{\max}] \quad (2)$$

$$\Delta_j < \delta. \quad (3)$$

Здесь V_{\min} — минимальное значение скорости резания, выбираемое из [7];

V_{\max} — максимальное значение скорости резания, выбираемое из [8];

Δ_j — отклонение от заданного размера j -й детали, мм;

δ — заданный допуск на размер, мм.

Поиск экстремума осуществляется методами градиента, наискорейшего спуска, а для функции с локальными экстремумами — методом статистического градиента в зависимости от вида функции $d\Delta_j = f(V_j)$.

Недостатки рассмотренного метода следующие:

- для каждой партии деталей требуется проведение дорогостоящих и трудоемких экспериментов для получения модели $d\Delta_j = f(V_j)$;

- для учета предыстории нагружения, нелинейности характера износа режущего инструмента требуется применение более сложных моделей.

Методы искусственного интеллекта. В данной публикации в качестве основных методов искусственного интеллекта использован метод нечеткой логики и искусственная нейронная сеть в виде многослойного перцептрона.

Система оптимизации режимов резания, встраиваемая в компьютер мехатронного

станка, основанная на применении названных методов искусственного интеллекта, на основании заданного в операционной карте диапазона регулирования скорости резания и заданного на операционном эскизе поля допуска на технологический размер определяет оптимальные режимы обработки, рис. 1,б.

Система автоматизации расчетов при использовании метода нечеткой логики предусматривает следующие вычислительные процедуры:

- формирование нечеткой системы ввода-вывода: числовые значения входных (скорость резания, отклонения фактического размера от заданной величины) и выходных (управление скоростью резания) переменных преобразуются в переменные нечеткой логики в зависимости от принадлежности к заданному множеству: очень маленькая скорость, маленькая скорость, средняя скорость, большая скорость, очень большая скорость резания; отклонение от заданного размера: очень большое отрицательное, отклонение от заданного большого отрицательное; отклонение от заданного значения несущественно; отклонение от заданного большое положительное; отклонение от заданного очень большое положительное.

- формирования базы правил вывода, вида: «ЕСЛИ... ТО...».

Пример: **Если** маленькая скорость **И** отклонение от заданного большое отрицательное, **ТО** скорость очень сильно увеличится

После процедуры интерпретации результатов вычислений управляющая величина может быть введена в контур управления скоростью резания мехатронного станка.

Процедура «Формирование нечеткой системы вывода». Для оценки качества переходного процесса управления станком выберем необходимые показатели качества: динамическую ошибку и перерегулирование. При этом возможны следующие ситуации в работе системы. Первая из них рассматривает переходный процесс, развивающийся по схеме рис. 2 [3].

Опишем процесс управления: на участке I при существенном отклонении от заданной скорости (ошибка ε — большая отрицательная величина) необходимо быстрее устранить возникшее рассогласование между заданной переменной и фактическим значением выходной переменной.

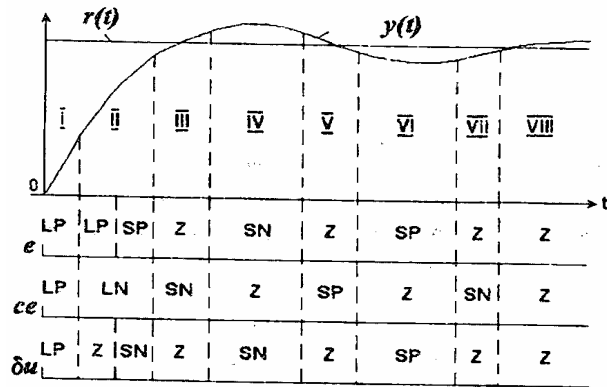


Рис. 2. Переходный процесс в контуре оптимизации скорости резания

Вначале управление выбирают предельным положительным ($\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \rightarrow \max$). Как только выходная величина достигнет некоторой окрестности заданного значения (ошибка ε — невелика и отрицательна), устанавливается управляющее воздействие, при котором значение выхода станет близким к заданному ($\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \rightarrow \min$) (участок II на рис. 2). При перерегулировании и значительном отклонении от заданного значения в большую сторону (ошибка ε — небольшая положительная) необходимо устранить ошибку путем изменения управляющего воздействия в отрицательную сторону ($\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \rightarrow \min, \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} < 0$). На основании формализации объекта методом нечеткой логики введем лингвистические переменные и значения (термы), которые они могут принимать:

- LP — большое положительное;
- SP — малое положительное;
- Z — около 0;

- SN — малое отрицательное;
- LN — большое отрицательное.

Далее формализуем качественное описание процесса управления объекта: ЕСЛИ ($\varepsilon = LN$ и $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = Z$), то

Правила нечеткой логики удобно представлять в виде таблицы (табл. 1):

Таблица 1
Формализованные отображения правил нечеткой логики

ε	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$				
	LN	SN	Z	SP	LP
LP	Z	SN	LN	LN	LN
SP	SP	Z	SN	LN	LN
Z	SP	SP	Z	SN	SN
SN	LP	LP	SP	Z	SN
LN	LP	LP	LP	SP	Z

На основании этих правил разработана блок-диаграмма модели системы управления скоростью резания с нечетким регулятором в системе MATLAB 6.5 [4], которая изображена на рис. 3.

Полученные результаты по итогам математического моделирования для деталей типа «Вал» изображены на рис. 4:

На рис. 4 показаны различные варианты моделирования. Вариант 1 — идеальный случай, позволяющий обработать заданное количество деталей (в данном случае 15 штук) без брака. Из диаграммы рис. 4, а, б (вариант 1) видно, что скорости отличны от рекомендаций современных каталогов прогрессивного инструмента. Вариант 2 — выбраны скорости из каталогов прогрессивного инструмента.

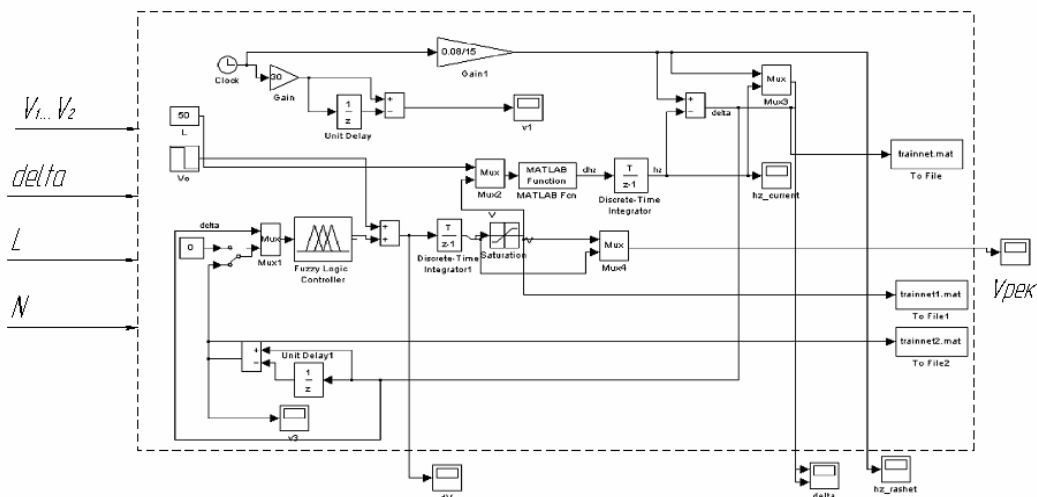


Рис. 3. Блок-диаграмма модели системы управления скоростью резания с нечетким регулятором

Из диаграммы рис. 4, а, б (вариант 2) можно сделать вывод о том, что, выбирая скорости из каталогов, нередко возможны ситуации, приводящие к браку деталей, так как износ инструмента происходит более интенсивно в схеме варианта 2, чем в варианте 1. В данном случае наступление брака произошло уже при обработке 11-й детали, поэтому схема варианта 1, в данном случае, является более предпочтительной.

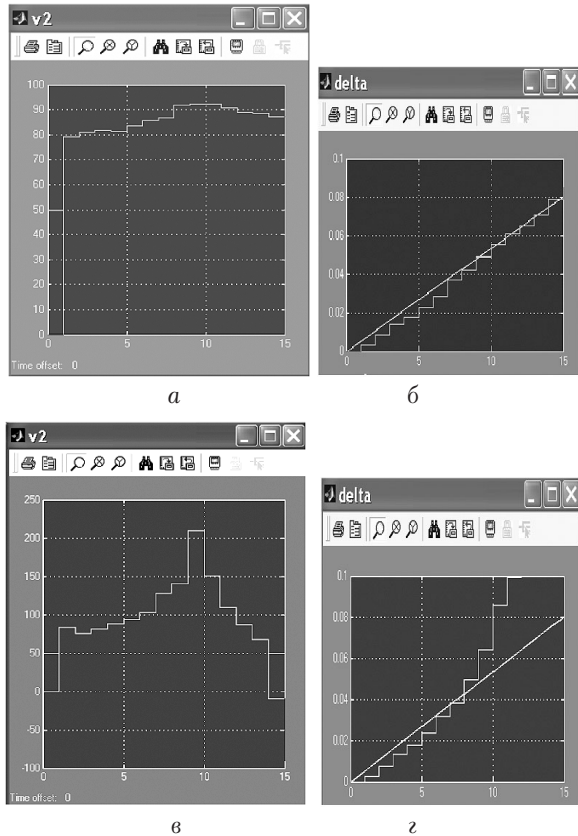


Рис. 4. Результаты моделирования системы управления с нечетким регулятором: а, б — вариант 1; в, з — вариант 2

Преимущества данного метода являются:

- метод очень просто реализуется и не требует предварительного проведения экспериментов;
- легко адаптируется введением дополнительных блоков к учету нелинейности характера износа режущего инструмента.

Недостатком данного метода является:

- не гарантирует глобального экстремума и не учитывает стохастичности обрабатываемости деталей.

Система оптимизации режимов резания, основанная на использовании метода искусственной нейронной сети позволяет учесть ряд важных особенностей процесса механообработки, нелинейности характера износа режущего инструмента со временем, влияние

истории нагружения режущего инструмента, путем последовательного соединения нейронных сетей, и легко адаптировать сеть к новой номенклатуре изделий (новым операциям механообработки).

Данная система содержит следующие процедуры:

- построение концептуальной модели принятия решения;
- выбор архитектуры искусственной нейронной сети;
- разработку алгоритма обучения искусственной нейронной сети.

Концептуальная модель системы принятия решения представляется в виде «черного ящика», рис. 5

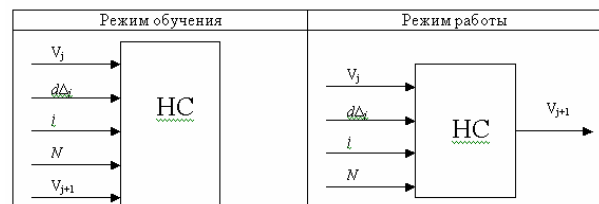


Рис. 5. Концептуальная модель системы принятия решения

Для перехода от числа обработанных деталей к длине обработанной поверхности нужно заменить j (номер детали) на L (мм).

При выборе архитектуры искусственной нейронной сети необходимо учитывать следующее утверждение: для любого множества пар входных–выходных векторов произвольной размерности $\{(X^*, Y^*), k = 1 \dots N\}$ существует двухслойная однородная сеть с последовательными связями, с сигмоидальными передаточными функциями и с конечным числом нейронов, которая для каждого входного вектора X^* формирует соответствующий ему выходной вектор Y^* [4, 5].

На первом этапе для оценки числа нейронов в скрытом слое воспользуемся эвристической формулой для оценки необходимого числа синоптических весов L_W (в многослойной сети с сигмоидальными передаточными функциями):

$$\frac{mN}{1 + \log_2 N} \leq L_W \leq m \left(\frac{N}{m} + 1 \right) (n + m + 1) + m, \tag{4}$$

где n — размерность входного сигнала;

m — размерность выходного сигнала;

N — число элементов обучающей выборки.

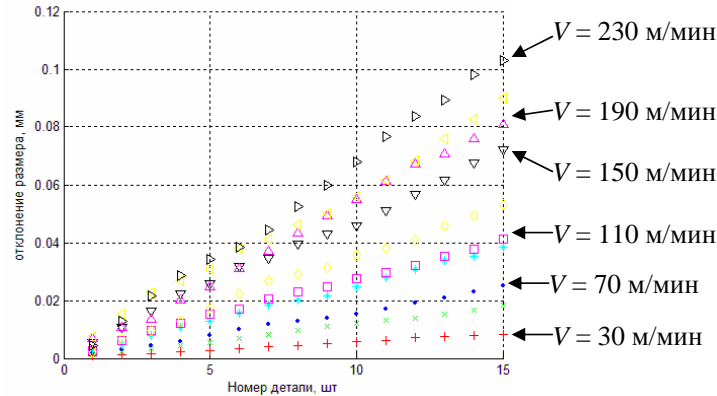


Рис. 6. Зависимость отклонения размеров детали от заданного при обработке партии

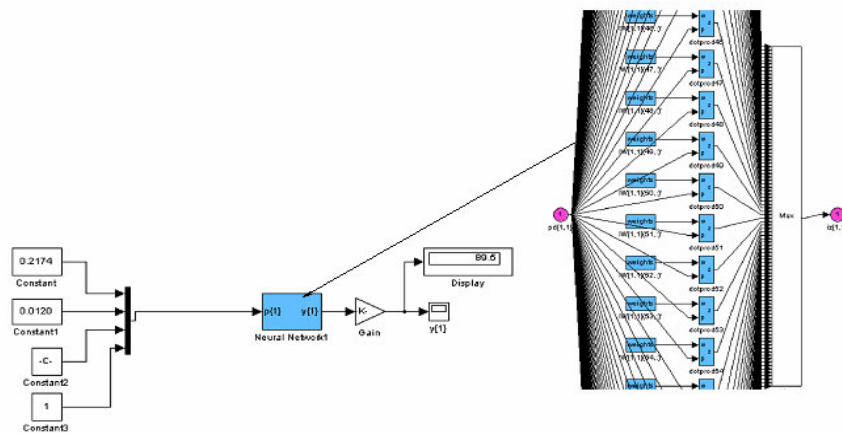


Рис. 7. Simulink-модель и конфигурация искусственной нейронной сети для регулирования скорости резания, реализованная в системе MATLAB 6.5

Для решения поставленной задачи сформируем трехслойную сеть обратного распространения [4], включающую 4 нейрона во входном слое (по числу компонент входного вектора) с передаточной функцией *logsig*, 200 нейронов во втором слое с передаточной функцией *logsig* и 1 нейрон в выходном слое (по числу компонент выходного вектора) с передаточной функцией *purelin*. При этом в качестве обучающего алгоритма выбран одношаговый алгоритм метода секущей (*trainoss*). Этот алгоритм обеспечивает быстрое обучение, но требует много ресурсов. В случае, если для реализации этого алгоритма не хватит оперативной памяти, можно использовать другие алгоритмы (*trainbfg*, *trainrp*, *trainscg*, *traincgb*, *traincgf*, *traincgp*, *trainoss*, *traingd*). По умолчанию используется *trainlm*. Указанная сеть формируется с помощью процедуры: `net = newff([0 1; 0 1; 0 1; 0 1], [100, 200, 1], {'logsig' 'logsig' 'purelin'}, 'traingd')`.

Результатом выполнения процедуры *newff* является объект — нейронная сеть *net* задан-

ной конфигурации. Сеть можно сохранить на диске в виде *mat*. файла с помощью команды *save* и загрузить снова с помощью команды *load*. На рис. 6 показаны экспериментальные данные зависимости отклонения размеров детали при обработке партии.

В системе MATLAB 6.5 разработана Simulink-модель искусственной нейронной сети для регулирования скорости резания. Фрагмент искусственной нейронной сети изображен на рис. 7.

Обучение искусственной нейронной сети производится по следующему алгоритму: требуется поддерживать скорость резания на таком уровне, чтобы отклонение от заданного размера последней детали не превышало $\Delta = 0,08$ мм. Для этого необходимо определить шаг изменения скорости резания.

Шаг изменения скорости для обработки следующей детали из партии можно выбрать двумя способами:

1) Шаг изменения скорости фиксирован и равен $1/k$ от диапазона регулирования и опре-

деляется по формуле:

$$V_j = 1/k \cdot (V_{\max} - V_{\min}). \quad (5)$$

Результаты первого способа изображены на рис. 8.

Процесс выбора скорости носит колебательный характер и происходит на граничных значениях скоростей регулирования, что является неблагоприятным фактором, повышающим динамические нагрузки на конструктивные элементы станочного модуля. Также существенно отличаются параметры качества полученных деталей, происходит неравномерность нагрузки инструмента. Для повышения эффективности предложен выбор скорости пропорционально отклонению размера детали от расчетного.

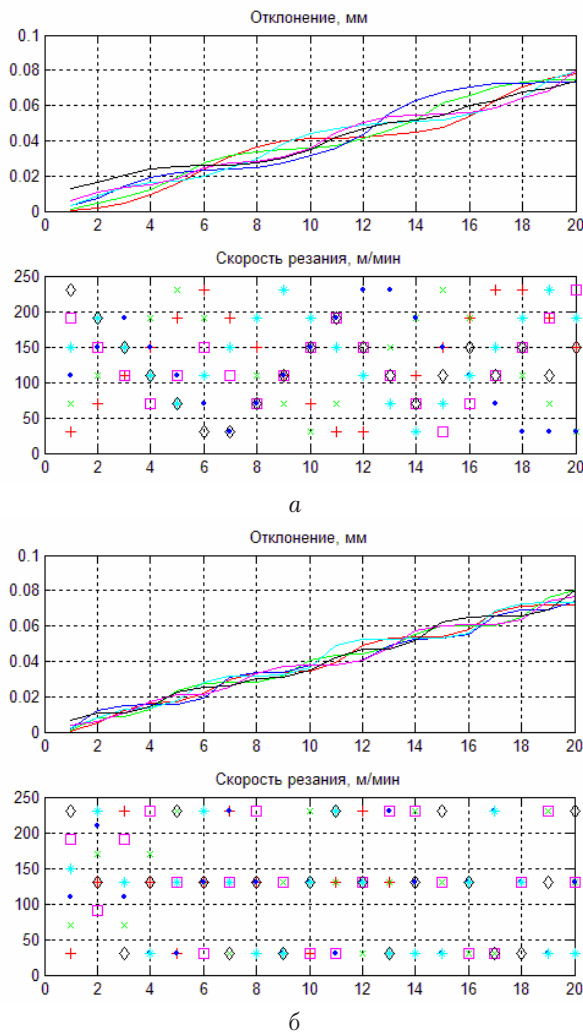


Рис. 8. Зависимость скорости резания и допуска на размер от шага изменения скорости: а — при $k = 5$; б — при $k = 2$

2) Шаг изменения скорости выбирается пропорционально отклонению размера от

расчетного по формуле:

$$\Delta V_j = \frac{\Delta_j - \Delta_{j \text{ расч}}}{(\Delta - d)/N} \cdot (V_{\max} - V_{\min}), \quad (6)$$

которое рассчитывается по формуле:

$$\Delta_{j \text{ расч}} = j \cdot \frac{\Delta - d}{N}, \quad (7)$$

где d — отклонение от математического ожидания с вероятностью 97%;

Δ — допуск, мм;

N — количество деталей, которое необходимо обработать одним инструментом без переналадки;

j — номер детали в партии.

Результаты расчета шага изменения скорости изображены на рис. 9.

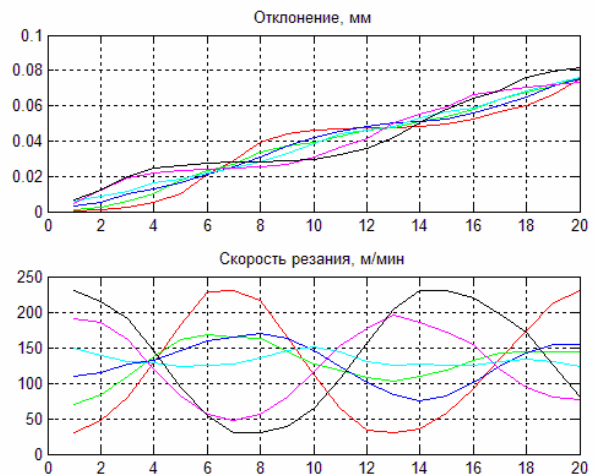


Рис. 9. Взаимосвязь между скоростью резания и допуском на размер

Обучение нейронной сети по алгоритму, описанному выше, гарантирует решение близкое к оптимальному.

Перед обучением необходимо задать параметры обучения. Задаем максимальное количество циклов обучения. После того, как будет выполнено это количество циклов, обучение будет завершено: `net.trainParam.epochs = 200`;

`net.trainParam.show = 50`.

Теперь можно начинать обучение:

`net = init(net)`;

`net = train(net, X_ns_normal', Y_ns_normal')`

Процесс обучения искусственной нейронной сети продемонстрирован на рис. 10.

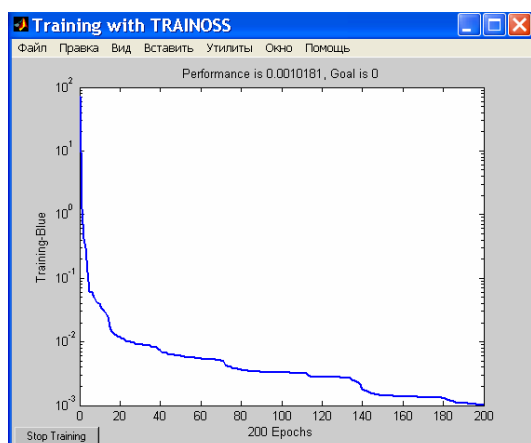


Рис. 10. Процесс обучения искусственной нейронной сети

Таким образом, обучение сети окончено. Теперь эту сеть можно сохранить в файле.

Преимущества данного метода:

- метод обеспечивает выбор скорости резания, близкий к оптимальной
- если получена модель $d\Delta_j = f(V_j)$;
- возможна работа сети без предварительного обучения (эффективность ниже, чем для предварительно обученной сети);
- нейронная сеть адаптируется путем последовательного соединения нейросетевых каскадов, для учета предыстории нагружения, нелинейности характера износа режущего инструмента.

Результаты моделирования показали, что метод искусственного интеллекта, основанный на аппарате нечеткой логики и метод искусственной нейронной сети, выдает более точные значения скоростей резания, чем метод поисковой оптимизации. Более того, система искусственного интеллекта, основанная на аппарате нечеткой логики, не требует предварительного проведения дорогостоящих экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен и реализован метод искусственного интеллекта для решения задач оптимизации технологических процессов, выполняемых на мехатронных станках. Данный метод основан на аппарате нечеткой логики и искусственных нейронных сетей. Результаты моделирования показали, что при выборе скорости из каталогов прогрессивного режущего инструмента, возможны ситуации, которые

приводят к браку деталей. Разработанный метод позволяет учесть неопределенности, связанные с износом инструмента, свойствами материала инструмента и заготовки, при этом определяет адекватные значения скоростей резания на партию деталей в заданном диапазоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Solver**. Умное производство. Горизонтальные обрабатывающие центры. Инженерно-консалтинговая компания «Solver», 2004. 16 с.
2. **Селиванов, С. Г.** Теоретические основы реконструкции машиностроительного производства / С. Г. Селиванов, М. В. Иванова. Уфа : Гилем, 2001. 310 с.
3. **Селиванов, С. Г.** Технологическая инноватика / С. Г. Селиванов. М. : Наука, 2004. 283 с.
4. **Дьяконов, В. П.** MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP2 + Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики. Серия «Библиотека профессионала» / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2006. 456 с.
5. **Медведев, В. С.** Нейронные сети. MATLAB 6 / В. С. Медведев, В. Г. Потемкин. М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. 496 с.
6. **Лобода, Е. А.** Единая система технологической документации : справочное пособие / Е. А. Лобода, В. Г. Мартынов, Б. С. Мендриков [и др.]. М. : Издательство стандартов, 1992. 325 с.
7. **Баранчиков, В. И.** Обработка специальных материалов в машиностроении : справочник. Библиотека технолога / В. И. Баранчиков, А. С. Тарапанов, Г. А. Харламов. М. : Машиностроение, 2002. 264 с.
8. **Sandvik Coromant**. Каталог инструментов. Точение, фрезерование, сверление.
9. **Ящерицын, П. И.** Теория резания : учеб. / П. И. Ящерицын, Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корневич. Мн. : Новое знание, 2005. 512 с.

ОБ АВТОРЕ



Глазков Александр Геннадьевич, магистрант по технол., оборуд. и автоматиз. машиностр. произв. Готовит дис. в обл. исп. методов иск. интел. в задачах технол. подг. произв.