

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 004.89+621.518.2

DOI 10.12737/11605

Оценка нечеткой границы стойкости инструмента многооперационного станка *

А. К. Тугенгольд¹, К. Г. Шучев², А. И. Изюмов³, Д. Ю. Терехов^{4}**

^{1, 2, 3, 4}Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

The estimation of fuzzy boundary of multioperational machine tool life ***

A. K. Tugengold¹, K. G. Shuchev², A. I. Izumov³, D. Y. Terekhov^{4}**

^{1, 2, 3, 4}Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью работы является представление принципов построения и функционирования системы наблюдения за состоянием инструментов и управления инструментальным обеспечением станков в компьютеризированном производстве. Предложенный подход ориентирован на создание условий эффективного управления состоянием инструментов. Для этого предлагается использовать интеллектуальный информационный управляющий модуль на базе интерактивной электронной технической документации мекатронного технологического объекта. На основе теории нечетких знаний подробно рассматриваются принципы оценки нечеткой границы стойкости инструментов. Представлены три метода оценки параметров нечеткой границы стойкости. Построена нейронная сеть, функционирующая на основе разработанной базы правил нечеткого прогнозирования износстойкости режущего инструмента в зависимости от состояния инструмента и его влияния на точность обработки детали. Полученные результаты применимы в области промышленного машиностроения.

Ключевые слова: многооперационный станок, мониторинг инструментов, система знаний, управление инструментальным обеспечением, нечеткая граница стойкости.

The purpose of this paper is to present the basic principles of the construction and operation of monitoring systems of the tool condition, and the machine tooling backup management in the computer-aided manufacturing. The proposed approach is focused on creating conditions for the effective tool state management. For this, the application of the intelligent host control module on the basis of the interactive electronic technical documentation of the mechatronic technological object is proposed. Valuation principles of the tool life fuzzy boundary are fully considered on the basis of the of fuzzy knowledge theory. Three methods for estimating the parameters of the resistance fuzzy boundary are presented. A neural network which operates on the basis of the developed fuzzy prediction rule base of the cutting tool wear depending on the instrument status and its impact on the part cutting accuracy is built. The results obtained are applicable in the sphere of the industrial engineering.

Keywords: multioperational machine, tool state monitoring, knowledge system, the management of tool software, fuzzy boundary resistance.

Введение. В условиях автоматизированного производства довольно широко применяются многооперационные станки (обрабатывающие центры) с числовым программным управлением (ЧПУ). Перспективным направлением повышения качества обработки представляется создание и применение интеллектуальных систем управления технологическим оборудованием. Таким образом обеспечивается изготовление деталей с учетом состояния:

- станка;
- режущего инструмента;
- заготовки;

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: vibrotech@mail.ru, pme-dgtu@mail.ru, vibrotech@mail.ru, vibrotech@mail.ru

***The research is done within the frame of the independent R&D.

— информационно-измерительной подсистемы.

С 90-х годов XX века экономически развитые государства принимают участие в реализации проекта SIMON (Sensor fused Intelligent Monitoring system for machining), который является частью программы создания технологии мониторинга машин XXI века [1].

В настоящее время процессы металлообработки в большинстве случаев приняли автоматический характер, операторы удалены от работающего станка с ЧПУ. Тем не менее, безусловно, вмешательство человека необходимо для поддержания текущей работоспособности, поднастройки технологической системы и устранения причин возможных отказов. Специалисту приходится вмешиваться в работу станка с помощью управляющей программы. Как правило, такая необходимость возникает в период от 7 до 22 минут с момента начала операции [2, 3]. Системы мониторинга, поддерживающие надежное функционирование режущего инструмента на металлорежущих станках, предназначены для минимизации возможного ущерба от затупления или поломки инструмента. Система мониторинга должна оценивать износ инструмента и, соответственно, инициировать процесс своевременной его замены при минимальном участии человека.

В работах [4, 5] обсуждалось создание интеллектуального информационного управляющего модуля на базе интерактивной электронной технической документации мехатронного технологического объекта (смарт-паспорт). Использование такого подхода призвано совершенствовать информационное обеспечение процесса. Это позволит в рамках жизненного цикла каждого конкретного технологического объекта обеспечить высокое качество изготовления изделий и организационного документооборота.

Система реализуется в качестве автономного программного модуля, который может быть подключен к системе ЧПУ станка [6]. Это дает возможность корректировать управляющую программу с помощью собственной системы знаний при интеллектуальной поддержке смарт-паспорта.

В настоящее время при поставке режущего инструмента (РИ) производитель не предоставляет точной информации о его стойкости — т. е. о периоде времени до затупления. Реальная стойкость РИ зависит от комплекса причин:

- состояние инструмента;
- состояние станочной системы;
- твердость обрабатываемого материала;
- режимы резания (скорость, подача, вибрация станочной системы) и т. д.

Подробное обоснование принципов функционирования блока «Инструмент» в интеллектуальном управляющем модуле станка представлено в работе [7]. Вопросам обоснования и оценки значений для введенного представления «нечеткой границы стойкости РИ» посвящена настоящая статья.

Итак, в интеллектуальном управляющем модуле станка имеется блок «Инструмент». В нем содержится совокупность данных о состоянии РИ, установленных в магазин многооперационного станка. Кроме того, он оснащен модулем наблюдения за изменением состояния инструмента в связи с его изнашиванием. Модуль наблюдения работает в совокупности с модулем мониторинга состояния инструмента, который предназначен для оценки поведения инструмента, прогнозирования его стойкости и износа. В базе знаний модуля используются условные понятия границы в периоде стойкости на некотором интервале времени / пути / объема удаленного материала при операции металлообработки до начала периода катастрофического износа инструмента [7]. Эти понятия описываются специально введенными терминами:

- нечеткая граница общей стойкости инструмента — fuzzy boundary of the tool life (FB) (рис. 1, а);
- нечеткая граница размерной стойкости — fuzzy boundary of the tool wear size (FBS) (рис. 1, б).

Данные термины хорошо согласуются с используемым при интеллектуальном управлении аппаратом нечетких множеств и нечеткой логики, а также с понятием гарантированной стойкости РИ [8]. Знание нечетких границ об-

щей и размерной стойкости инструмента дает гарантию того, что инструмент не выйдет за пределы допустимого износа до момента пересечения границ стойкости: левой (рис. 1, а) и нижней (рис. 1, б).

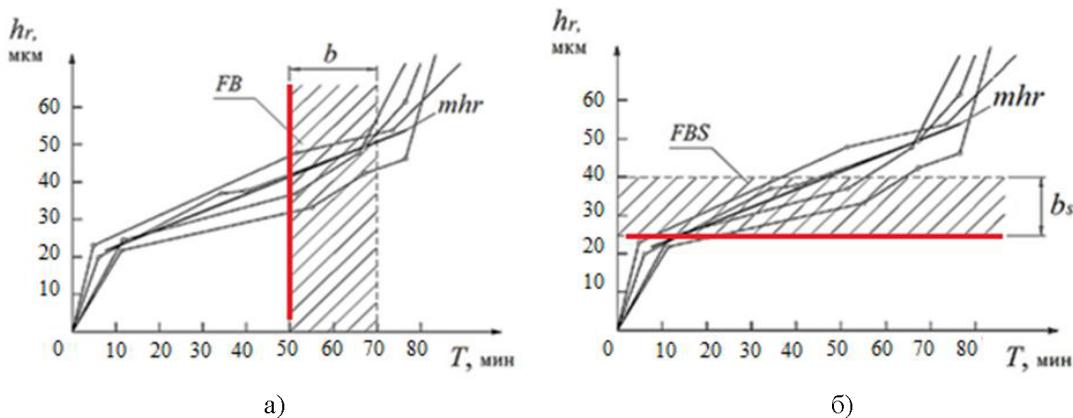


Рис. 1. Нечеткая граница стойкости инструмента FB до износа (а); размерной стойкости инструмента FBS (б):
hr — радиальный износ, мкм; T — стойкость режущего инструмента, мин; b и bs — ширина пограничных полос

Оценка параметров нечеткой границы стойкости. Итак, плановая замена инструмента в соответствии с гарантированной стойкостью позволит уменьшить вмешательство оператора в процесс обработки или запрограммировать прекращение обработки при достижении предельного износа. Поэтому предварительная оценка гарантированной стойкости инструмента особенно важна при обработке на станках с ЧПУ.

При определении нечетких границ стойкости РИ в процессе эксплуатации станков могут возникать следующие типовые ситуации.

1. На основе статистических испытаний устанавливаются статистические характеристики износостойкости (для партии инструмента, поставляемого зарекомендовавшей себя фирмой): стабильности материала и состояния поверхности заготовки, состояния станка и пр. Такая ситуация возникает довольно редко по ряду известных причин. Одна из них — различная обрабатываемость материалов заготовок. Кроме того, могут существенно отличаться состояния поверхностей, режимы обработки и пр.

При контроле времени резания инструментом граничное время принимается с учетом параметров распределения износостойкости, допустимой вероятности наступления отказа [8].

2. Отсутствуют статистические данные по износостойкости, но возможно проведение ограниченных ускоренных испытаний РИ на конкретном станке с ЧПУ [9, 10].

3. Отсутствует возможность выполнения ускоренных испытаний. Но обычно наладчики и/или операторы многооперационных станков с ЧПУ на основе собственного опыта работы с конкретными видами инструментов могут выполнять функции экспертов и воспользоваться представленным ниже 3-м методом оценки параметров FB стойкости РИ.

1-й метод оценки FB. При первой ситуации на основе статистической обработки опытных данных устанавливаются:

- вид распределения значений стойкости (по допустимой величине износа лезвия);
- основные параметры распределения.

Так, если полученное распределение согласуется с теоретическим, например нормальным, то:

$$f(T) = \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(T-T_{cp})^2}{2\sigma_T^2}}, \quad (1)$$

где T_{cp} — математическое ожидание наработки до отказа (принятое по значению допустимого износа РИ), σ_T — среднее квадратическое отклонение времени работы до отказа.

Значение времени гарантированной стойкости T_1 для левого предела нечеткой пограничной полосы стойкости можно определить, используя зависимость [8]:

$$T_1 = T_{cp} - k_1 \sigma_T. \quad (2)$$

Значение квантиля нормального распределения $k_1 = 1,645$ принимается из условия: учитывая влияние множества случайных факторов процесса резания, отказ инструмента не наступит с вероятностью 0,95.

Начиная со времени T_1 , предполагается переход в режим слежения за состоянием инструмента по всей ширине b полосы FB, т. е. до момента не ранее T_2 в диапазоне вероятностей [0,95; 0,85]. При этом $k_2 \approx 1$.

$$T_2 = T_{ep} - k_2 \sigma_T . \quad (3)$$

В период b ($b = T_2 - T_1$) система функционирует в режиме обработки. При этом используется возможность диагностирования состояния инструмента и процесса резания, позволяющая корректировать режимы и выявлять необходимость смены инструмента при появлении признаков возможного отказа [7].

Режимы могут корректироваться, например, для обеспечения завершения начатой на технологическом переходе обработки поверхности. При назначении T_2 нужно учитывать оснащенность станка средствами наблюдения за состоянием инструмента онлайн или возможность присутствия оператора у станка.

Ниже приведен пример определения параметров FB по представленному методу для типовой ситуации 1. Основой в данном случае являются экспериментальные исследования, проведенные на вертикальном многооперационном станке Okuma MB-46VAE (рис. 2). При этом использовано программное обеспечение базы данных и системы знаний интеллектуального управляющего модуля.



Рис. 2. Экспериментальный стенд

В серии экспериментов в качестве материала заготовки использовалась конструкционная углеродистая качественная сталь 45 (HB = 143 ... 179 МПа). Режущий инструмент — концевые фрезы твердосплавные, быстрорежущие, диаметр (D) — 10 мм, число зубьев (z) — 4.

Условия эксперимента:

- использовалась партия концевых фрез;
- проводилась полувистовая обработка уступов;
- глубина фрезерования (t) — 4–8 мм;
- ширина фрезерования (B) — 35 мм.

Подача на зуб назначена, исходя из рекомендаций [9], где для фрез диаметром 9–12 мм предлагается диапазон значений s_z 0,04–0,06 мм/зуб.

Значения рассчитанного диапазона скоростей резания в соответствии с зависимостью [9] составили $V = 100 - 130$ м/мин. Обработка проводилась при усредненных режимах резания.

$$V = \frac{C_V \cdot D^{q_V} \cdot K_V}{T^m \cdot s_z^{y_V} \cdot t^{x_V} \cdot B^{u_z} \cdot z^v}, \quad (4)$$

где: C_V — коэффициент обрабатываемости материала; D — диаметр инструмента, мм; T — значение стойкости инструмента, мин; t — глубина фрезерования, мм; B — ширина фрезерования, мм; s_z — подача на зуб, мм/зуб; z — число зубьев; m — показатель степени в стойкостно-скоростной зависимости; y_V — показатель степени при подаче; x_V —

показатель степени при глубине резания; q_V — показатель степени при диаметре инструмента; K_V , u , p — поправочные коэффициенты.

На рис. 3 представлены результаты процесса изнашивания инструмента. Статистическая выборка получена при испытании пятнадцати фрез. Данные об износе РИ фиксировались через 15 мин, а в период приработки — через 10 мин.

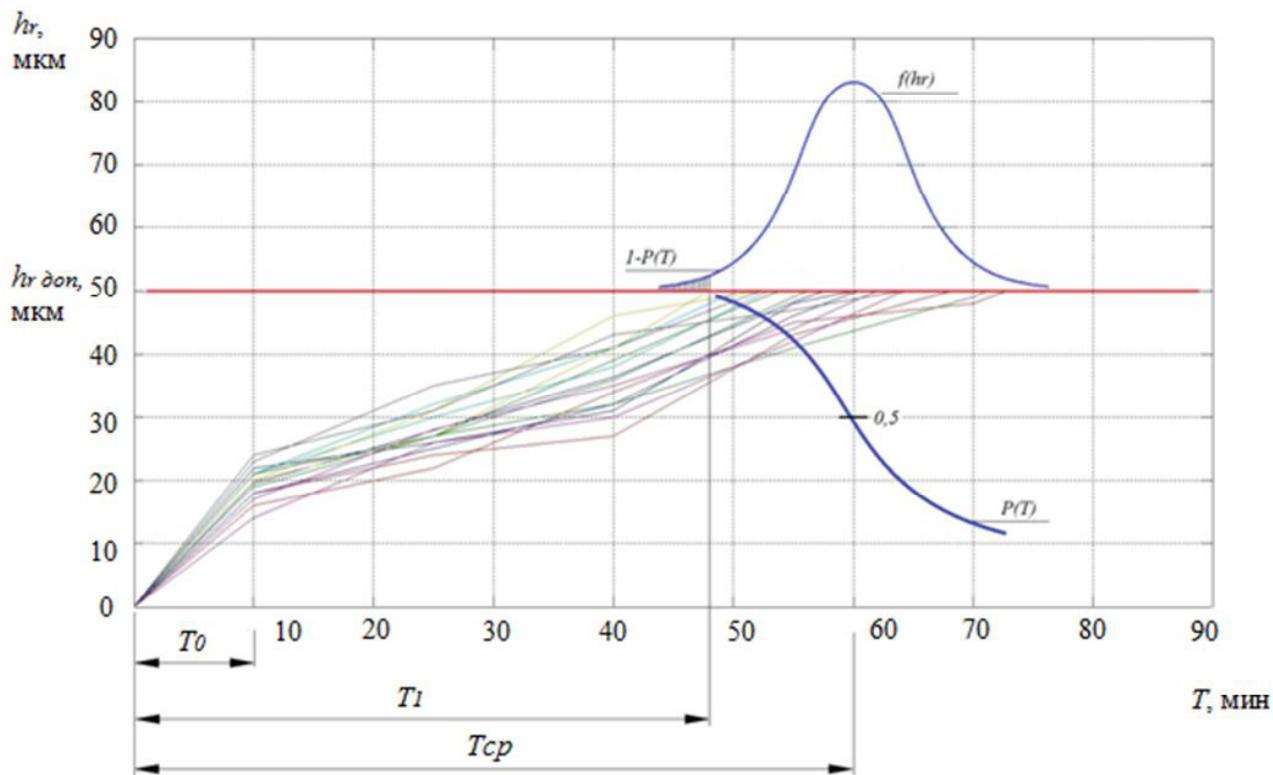


Рис. 3. Реализация случайной функции изнашивания инструмента $f(h_r)$, вероятности безотказной работы $P(T)$ и закон распределения стойкости при допустимом радиальном износе $h_{r\text{ доп}}$. T_0 — период приработки РИ, T_1 — гарантированное время надежной работы инструмента, T_{cp} — среднее время безотказной работы

С целью выявления скрытых статистических закономерностей результаты испытаний оценивались методом первичной обработки данных в программной среде MATLAB. Подтверждена близость полученного распределения к нормальному (1). Среднее значение времени стойкости РИ составило $T_{cp} = 59,09$ мин; среднеквадратическое отклонение $\sigma_T = 7,2788$ мин; минимальное значение в выборке $T_{min} = 47,94$ мин.

В соответствии с зависимостями (2) и (3) получены граничные значения времени $T_1 \approx 47$ мин и $T_2 \approx 52$ мин.

2-й метод оценки FB. Эксплуатация многооперационных станков в условиях компьютеризированного производства при серийном выпуске продукции требует решения ряда важных задач. Одна из них может быть сформулирована следующим образом: необходимо оценить значение гарантированной стойкости применяемого инструмента без проведения объемных статистических испытаний.

Если наладчик или оператор при подготовке к использованию нового РИ имеет некоторый резерв времени, то целесообразно провести предварительное оценочное испытание 3–5 образцов этого инструмента. Профессор А. С. Проников в работе [10] рекомендует использовать для этого метод ускоренных испытаний. Метод предусматривает назначение предельных значений параметров, определяющих условия резания. Параметры назначаются на основе рекомендаций по технологии обработки поверхности детали.

На стойкость инструмента оказывают влияние различные факторы:

- химический состав и структура обрабатываемого материала, его твердость;
- состояние поверхностного слоя заготовки (корка, песчаные включения, раковины);
- условия обработки (неравномерный припуск, прерывистое резание, удары);
- состояние станка и жесткость системы «станок — приспособление — инструмент — деталь» (СПИД);
- скорость, величина подачи и глубина резания;
- марка материала инструмента и его геометрические параметры;
- наличие и вид смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) и пр.

При разработке технологии и составлении программы ЧПУ условия ускоренных испытаний назначаются с учетом усредненных характеристик указанных факторов. Поэтому при проведении таких испытаний можно воспользоваться изменением варьируемых режимов обработки, которые в наибольшей степени влияют на износостойкость РИ.

Гарантирующее значение в нечеткой границе стойкости РИ (T_{cp-y}) оценивается по предельным значениям скорости резания, подачи и других параметров, характеризующих технологический переход, выполняемый исследуемым инструментом.

Учитывая диапазон V_{rez} , рассчитанный по формуле (4), для ускоренных испытаний из приведенных выше рекомендуемых значений выбраны следующие предельные режимы резания:

- скорость резания 130 м/мин;
- подача 0,06 мм/зуб;
- глубина фрезерования 8 мм.

На основе полученных результатов установлено среднее значение времени стойкости инструмента при предельных значениях режимов резания: $T_{cp-y} = 46,31$ мин. При этом рекомендуемое время гарантированной стойкости РИ для левого предела нечеткой пограничной полосы — $T_1 \approx 46$ мин.

3-й метод оценки FB. Если провести ускоренные испытания невозможно, предлагается оценить параметры FB стойкости РИ способом, основанным на методологии искусственного интеллекта. При этом, как говорилось ранее, функции экспертов могут выполнять наладчики и/или операторы многооперационных станков с ЧПУ на основе собственного опыта работы с конкретными видами инструментов.

Один из вариантов решений, доказавший эффективность применения в том числе для оценки надежности РИ, — нейро-нечеткий мониторинг процессов обработки [11, 12].

Моделирование выполнено на базе адаптивной системы нейро-нечеткого вывода ANFIS (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System) в среде MATLAB с пакетом расширения Fuzzy Logic Toolbox [13]. Данная система моделирует нелинейную зависимость времени стойкости инструмента от локального изменения твердости поверхности заготовки и основных варьируемых факторов режима обработки — величины подачи и скорости резания.

Применение методов нечеткой логики и нейронных сетей для решения вопросов назначения нечетких границ дает гибридной системе следующие возможности:

- закладывать в информационное поле нейросистем априорный опыт специалистов, работающих со станками с ЧПУ;
- извлекать знания при использовании нечеткого представления информации;
- оценивать согласованность экспертных знаний [14].

Нейро-нечеткую сеть можно рассматривать как разновидность системы нечеткого логического вывода типа Сугено. При этом в лингвистической модели вывода нечеткие множества заключений (вывода) являются синглтонами (одноточечными множествами). Они представляют собой вещественные числа f_i множества заключений Y .

При формировании базы правил нечеткого прогнозирования износостойкости РИ в качестве входных переменных выбраны относительные значения скорости резания, подачи на зуб и поверхностной твердости заготовки к соответствующим средним значениям в диапазонах, указанных ранее. Выходная переменная — коэффициент коррекции времени стойкости f_i множества Y :

$$f_i = T_i / T_m,$$

где T_m — табличное значение стойкости, гарантируемое фирмой-поставщиком, или среднее значение по результатам наблюдений; T_i — искомое значение стойкости при i -х значениях входных переменных.

Правила представлены в виде таблицы 1.

Таблица 1

База правил нейронной сети

№ правила	V	HB	s_z	Y
1	В	В	В	0,8
2	В	В	Н	0,9
3	В	Н	В	0,9
4	В	Н	Н	1,0
5	Н	В	В	1,0
6	Н	В	Н	1,1
7	Н	Н	В	1,1
8	Н	Н	Н	1,2
9	С	Н	В	1,0
10	С	В	Н	1,0
11	С	В	В	0,9
12	С	Н	Н	1,1

Величины V , S_z и HB представляют собой нечеткие множества, которые имеют функции принадлежности для каждой переменной. Так, функции принадлежности для входной переменной V : B — высокая, C — средняя, H — низкая и т. д. Значения коэффициентов коррекции стойкости f_i множества Y : $[0,8; 1,2]$. Правило 3, например, имеет вид: «Если V есть B , и HB есть H , и S_z есть B , то Y есть f_2 ».

На рис. 4 графически представлена структура нейросети в условиях программной реализации MATLAB.

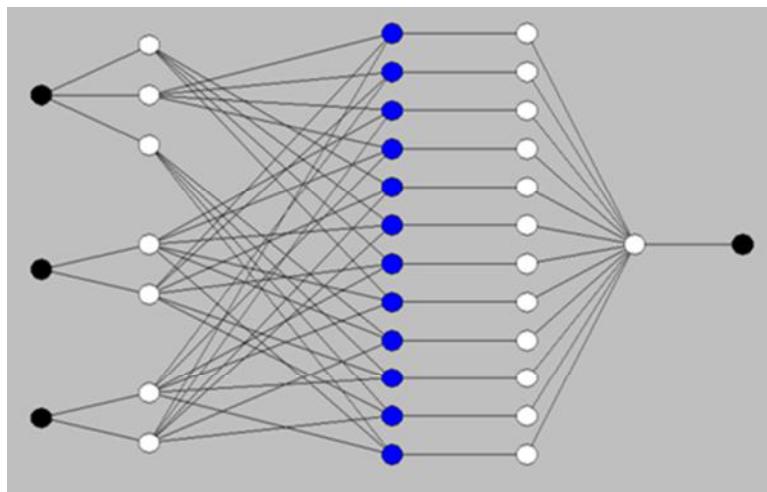


Рис. 4. Структура нейронной сети

Нейронная сеть включает промежуточный слой с 12 нейронами (в соответствии с нечеткими правилами вывода) и один выход.

Коэффициент коррекции, с учетом которого определяется прогнозируемое значение стойкости РИ, и соотношения входных параметров приняты на основе экспертных заключений и в соответствии с данными каталогов компаний — производителей инструментов, в том числе Seco Tools, Sandvik, Walter, Taegutec [14].

Для определения параметров нечеткой границы стойкости РИ входным переменным нейро-нечеткой сети V , S_z и HB присваиваются значения, соответствующие предельным значениям скорости резания, подачи и поверхностной твердости заготовки, характерные для технологического перехода, выполняемого инструментом.

Условиям рассматриваемого в статье примера соответствуют относительные значения $V_{om} = 1,083$, $S_{z om} = 1,2$ и $HB_{om} = 1,1$. Решением является граничное значение коэффициента коррекции — $f_{1ep} = 0,805$. При этом T_1 , определяемое зависимостью (2), примерно равно 47,5 мин для $T_{cp} = 59,09$ мин. Полоса нечеткой границы продолжается до значения T_2 при $f_{2ep} = 0,905$ ($V_{om} = 1,065$, $S_{z om} = 1,0$ и $HB_{om} = 1,0$):

$$T_2 = T_{cp} \cdot f_{2ep} \approx 53,5 \text{ мин.}$$

Следует отметить, что полученные значения времени стойкости для пограничной полосы по трем приведенным методам достаточно близки и соответствуют специфике условий оценки нечеткой границы FB . При этом значение T_2 целесообразно корректировать в соответствии с такими условиями, как: складывающаяся ситуация; принимаемые решения по адаптации режимов резания; время, требуемое для окончания технологического перехода на обрабатываемой поверхности детали.

Заключение. Понятие нечеткой полосы общей стойкости инструментов основывается на представлениях нечетких знаний. Его применение обусловлено следующими обстоятельствами:

- необходимость повышения вероятности безотказной работы технологической системы в условиях компьютеризированного производства;

- неподходящесть прерывания процесса резания и замены инструмента в связи с наступлением граничного состояния при незавершенной обработке поверхности.

Исходя из имеющейся информации, можно корректировать управляющую программу с целью снижения интенсивности износа инструмента.

Представлены три подхода к оценке значений времени пограничной полосы: на основе известного статистического подхода, метода ускоренных испытаний инструмента и нейро-нечеткого вывода.

Уделено внимание условиям, при которых целесообразно воспользоваться тем или иным методом. Приведены примеры оценок.

Предложенный метод на базе нейро-нечеткой сети, реализующий представление входных переменных и вывода в относительных единицах, позволяет принимать решения по оценке стойкости РИ в самых различных технологических ситуациях.

Библиографический список

1. Sensor Fused Intelligent Monitoring System for Machining. European Module IMS Project EP 26504. Final Report [Электронный ресурс] / J. Hernendez [et al.] ; European IMS-SIMON consortium. — 152 p. — Режим доступа: <http://www.ims.org/2012/11/simon-sensor-fused-intelligent-monitoring-system-for-machining/> (дата обращения: 03.12.2014).
2. Григорьев, С. Н. Повышение производительности фрезерования с помощью диагностирования состояния инструмента с учетом достоверности отображения состояния объекта по критерию его отказа / С. Н. Григорьев, В. Д. Гурин, Н. Ю. Черкасова // Вестник МГТУ «СТАНКИН». — 2011. — № 3 (15). — С. 44–48.
3. Кочеровский, Е. В. Диагностика состояния инструмента по силовым характеристикам процесса резания / Е. В. Кочеровский, Г. М. Лихцер. — Москва : ВНИИТЭМР, 1988. — 40 с.
4. Тугенгольд, А. К. Моделирование базы знаний системы управления мехатронным объектом / А. К. Тугенгольд, А. А. Кузьмин // Изв. высш. учеб. заведений. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. — 2009. — Спец. вып. «Мехатрона. Соврем. сост. и тенденции развития». — С. 69–73.
5. Тугенгольд, А. К. Smart-паспорт мехатронного технологического объекта. Концепт / А. К. Тугенгольд, А. А. Бердичевский // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — № 7. — С. 33–41.
6. Тугенгольд, А. К. Smart-Passport открытой мехатронной технологической системы. Контент / А. К. Тугенгольд. — Saarbrucken : Lambert Academic Publishing, 2013. — 83 с.
7. Тугенгольд, А. К. Принципы концептуального подхода к созданию подсистемы «ИНСТРУМЕНТ» в смарт-паспорте многооперационного станка / А. К. Тугенгольд, А. И. Изюмов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2014. — № 2. — С. 33–41.
8. Синопальников, В. А. Надежность и диагностика технологических систем / В. А. Синопальников, С. Н. Григорьев. — Москва : Высшая школа, 2005. — 343 с.
9. Серебренецкий, П. П. Краткий справочник технолога-машиностроителя / П. П. Серебренецкий. — Санкт-Петербург : Политехника, 2007. — 951 с.
10. Проников, А. С. Надежность машин / А. С. Проников. — Москва : Машиностроение, 1978. — 592 с.
11. Čuš, F. Real-Time Cutting Tool Condition Monitoring in Milling / F. Čuš, U. Župerl // Strojniški vestnik — Journal of Mechanical Engineering. — 2011. — № 57 (2). — P. 142–150.
12. Bagci, E. Monitoring and analysis of MRR-based feedrate optimization approach and effects of cutting conditions using acoustic sound pressure level in free-form surface milling / E. Bagci // Scientific Research and Essays. — 2011. — Vol. 6 (2). — P. 256–277.
13. Штовба, С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. — Москва : Горячая линия — Телеком, 2007. — 288 с.
14. Димитров, В. П. Методика оценки согласованности моделей нечетких экспертизных знаний / В. П. Димитров, Л. В. Борисова, И. Н. Нурутдинова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2010. — Т. 10, № 2 (45). — С. 205–216.
15. Алгоритмы выбора инструментов фирм Sandvik Coromant и Walter / сост. А. В. Широков. — Самара : Самарский государственный технический университет, 2011. — 33 с.

References

1. Hernandez, J., et al. Sensor Fused Intelligent Monitoring System for Machining. European Module IMS Project EP 26504. Final Report; European IMS-SIMON consortium. 152 p. Available at: <http://www.ims.org/2012/11/simon-sensor-fused-intelligent-monitoring-system-for-machining/> (accessed: 03.12.2014).
2. Grigoryev, S. N., Gurin, V. D., Cherkasova, N. Y. Povyshenie proizvoditelnosti frezerovaniya s pomoshch'yu diagnostirovaniya sostoyaniya instrumenta s uchetom dostovernosti otobrazheniya sostoyaniya ob'ekta po kriteriyu ego otkaza. [Milling rate improvement using tool status diagnostics with account for the reliability of the object status display by its failure criterion.] Vestnik MSTU “Stankin”, 2011, no. 3 (15), pp. 44–48 (in Russian).
3. Kocherovskiy, E. V., Lichtser, G. M. Diagnostika sostoyaniya instrumenta po silovym kharakteristikam protsesssa rezaniya. [Tool status diagnostics on the cutting process power characteristics.] Moscow: VNIITEMR, 1988, 40 p. (in Russian).

4. Tugengold, A. K., Kuzmin, A. A. Modelirovaniye bazy znanii sistemy upravleniya mekhatronnym ob'ektom. [Modeling of mechatronic object management system knowledgebase.] Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Technical Sciences, 2009. Special iss. "Mekhatronika. Sovrem. sost. i tendentsii razvitiya" [Mechatronics. Current state and development trends.] pp. 69–73 (in Russian).
5. Tugengold, A. K., Berdichevskiy, A. A. Smart-pasport mekhatronnogo tekhnologicheskogo ob'ekta. Konsept. [Smart-passport of mechatronic production facility. Concept.] Vestnik of DSTU, 2012, no. 7, pp. 33–41 (in Russian).
6. Tugengold, A. K. Smart-Passport otkrytoj mekhatronnoj tekhnologicheskoy sistemy. Kontent. [Smart-Passport of open mechatronic manufacturing system. Content.] Saarbrucken : Lambert Academic Publishing, 2013, 83 p. (in Russian).
7. Tugengold, A. K., Izyumov, A. I. Printsipy kontseptual'nogo podkhoda k sozdaniyu podsistemy «INSTRUMENT» v smart-pasporte mnogooperatsionnogo stanka. [Principles of conceptual approach to creating TOOL subsystem for multioperation machine smart-passport.] Vestnik of DSTU, 2014, no. 2, pp. 33–41 (in Russian).
8. Sinopalnikov, V. A., Grigoryev, S. N. Nadezhnost' i diagnostika tekhnologicheskikh sistem. [Reliability and diagnostics of process systems.] Moscow: Vysshaya shkola, 2005, 343 p. (in Russian).
9. Serebrenitskiy, P. P. Kratkiy spravochnik tekhnologa-mashinostroyatelya. [Quick reference book for mechanic engineer-technologist.] Sankt-Peterburg: Politehnika, 2007, 951 p. (in Russian).
10. Pronikov, A. S. Nadezhnost' mashin. [Machine reliability.] Moscow: Mashinostroenie, 1978, 592 p. (in Russian).
11. Čuš, F., Župerl, U. Real-Time Cutting Tool Condition Monitoring in Milling. Strojniški vestnik — Journal of Mechanical Engineering, 2011, no. 57 (2), pp. 142–150.
12. Bagci, E. Monitoring and analysis of MRR-based feedrate optimization approach and effects of cutting conditions using acoustic sound pressure level in free-form surface milling. Scientific Research and Essays, 2011, vol. 6 (2), pp. 256–277.
13. Shtovba, S. D. Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MATLAB. [Design of fuzzy systems by means of MATLAB.] Moscow: Goryachaya liniya — Telekom, 2007, 288 p. (in Russian).
14. Dimitrov, V. P., Borisova, L. B., Nurutdinova, I. N. Metodika otsenki soglasovannosti modeley nechetkikh ekspertnykh znanii. [Methods for estimating coordination of fuzzy expert knowledge models.] Vestnik of DSTU, 2010, vol. 10, no. 2 (45), pp. 205–216 (in Russian).
15. Shirokov, A. V., comp. Algoritmy vybora instrumentov firm Sandvik Coromant i Walter. [Algorithms for selecting tools by Sandvik Coromant and Walter companies.] Samara: Samara State Technical University, 2011, 33 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 22.03.2015

Сдана в редакцию 23.03.2015

Запланирована в номер 10.04.2015