

УДК (UDC) 629.11

КОНТРОЛЬ ИЗНОСА ИНСТРУМЕНТА ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ  
ДЕТАЛЕЙ СТРОИТЕЛЬНО-ДОРОЖНЫХ МАШИН В УСЛОВИЯХ  
РЕМОНТНОГО ПРОИЗВОДСТВАCONTROL OF TOOL WEAR DURING TURNING OF PARTS OF CONSTRUCTION  
AND ROAD MACHINES IN CONDITIONS OF REPAIR PRODUCTIONОвсянников В.Е., Васильев В.И.  
Ovsyannikov V.E., Vasiliev V.I.Курганский государственный университет (Курган, Россия)  
Kurgan State University (Kurgan, Russian Federation)

**Аннотация.** В ходе ремонтных воздействий довольно распространенным методом обработки является точение (расточивание). При этом в ремонтном производстве используется преимущественно устаревшее оборудование и квалификация рабочих-станочников зачастую ниже, чем при изготовлении новых изделий. Существенной проблемой, которая затрудняет обеспечение требуемых параметров качества поверхности, является износ режущего инструмента. Путем повышения эффективности обработки является внедрение активного контроля. Целью работы является разработка технических решений, которые дают возможность оценивать ресурс режущего инструмента в ходе обработки. Экспериментальные исследования выполнялись на токарно-винторезном станке марки ИБ11ПФ2. В качестве диагностического признака для оценки износа режущего инструмента использовался акустический сигнал в диапазоне от 6 до 12 кГц, так как в ходе предварительных исследований было установлено, что данный диапазон наиболее чувствителен к изменению режимов обработки. Исследования проводились при различных значениях износа режущего инструмента (оценивался шириной фаски износа). Разработана нейро-нечеткая модель оценки ресурса работы режущего инструмента. Использование моделей данного класса дает возможность подстройки под конкретные условия (станок, инструмент и т.д.) и корректно оценивать ресурс работы инструмента. Погрешность модели по тестовой выборке не превышает 10%.

**Ключевые слова:** строительно-дорожные машины, ремонт, обработка, шероховатость, износ.

**Дата принятия к публикации:** 25.10.2019  
**Дата публикации:** 25.12.2019

**Сведения об авторах:**

**Овсянников Виктор Евгеньевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов», Курганский государственный университет,  
e-mail: vik9800@mail.ru

**Abstract.** During repair actions, turning (weeding) is a fairly common method of treatment. At the same time, repair production uses mainly obsolete equipment and the qualification of machine-tools is often lower than in the manufacture of new products. A significant problem which makes it difficult to provide the required surface quality parameters is the wear of the cutting tool. By improving processing efficiency, active monitoring is implemented. The purpose of the work is to develop technical solutions that make it possible to estimate the life of the cutting tool during processing. Experimental studies were carried out on a ИБ11ПФ2-grade turning machine. As a diagnostic feature, an acoustic signal in the range of 6 to 12 kHz was used to evaluate the wear of the cutting tool, since preliminary studies found that the range was most sensitive to changes in processing modes. Studies were performed at different wear values of the cutting tool (estimated by the width of the wear chamfer). Neuro-fuzzy model of estimation of cutting tool operation resource is developed. Use of models of this class gives the chance of fine tuning under specific conditions (the machine, the tool, etc.) and it is correct to estimate a resource of operation of the tool. Model error by test sample does not exceed 10%.

**Keywords:** construction and road vehicles, repair, treatment, roughness, wear

**Date of acceptance for publication:** 25.10.2019  
**Date of publication:** 25.12.2019

**Authors' information:**

**Victor E. Ovsyannikov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Department “Automation of production processes” at Kurgan State University,  
e-mail: vik9800@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8775-0781

**Васильев Валерий Иванович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автомобильный транспорт», Курганский государственный университет, e-mail: [vvprof@rtural.ru](mailto:vvprof@rtural.ru)

ORCID: 0000-0002-1130-2181

†  
†  
†  
†  
†  
†  
†

ORCID: 0000-0002-8775-0781

**Valeriy I. Vasiliev** - Doctor of of Technical Sciences, Professor, Professor of Department "Motor transport" at Kurgan State University, e-mail: [vvprof@rtural.ru](mailto:vvprof@rtural.ru)

ORCID: 0000-0002-1130-2181

## 1. Введение

Эксплуатационные свойства многих деталей строительно-дорожных машин и их соединений зависят от формы и численных параметров шероховатости поверхности. Одним из наиболее широко используемых методов механической обработки является точение (расточивание). Причем в условиях ремонтного производства обработка ведется чаще всего с использованием универсального технологического оборудования с ручным управлением. В данном случае точность и качество в значительной мере определяются квалификацией рабочего-станочника, которая зачастую ниже, чем при изготовлении новых изделий. Поэтому рабочий не всегда может адекватно оценить ход процесса обработки и выявить причину появления брака.

Выходом из данной ситуации может быть создание решений в области активного контроля [1].

На точность и качество обработки существенное влияние оказывает износ режущего инструмента [2]. В зависимости от степени износа инструмента можно выделить три варианта его использования:

- 1) использование на рекомендуемых режимах обработки;
- 2) использование на заниженных режимах обработки;
- 3) замена инструмента.

Сравнение технических и экономических возможностей произведем на основе метода анализа иерархий. В данном случае предполагается решение задачи для двух уровней иерархии по выбору из шести альтернатив по пяти критериям.

Важным моментом при разработке решений в области активного контроля является выбор источника информации. Наиболее

широко используемые методы диагностики инструмента приведены на рис. 1.



Рис. 1. Методы активной диагностики режущего инструмента

Перечень альтернативных вариантов приведен на рис. 1, а в качестве критериев можно выделить следующие:

- 1) инвариантность метода к режимам и условиям обработки (K1);
- 2) быстродействие алгоритмов распознавания (K2);
- 3) точность измерений (K3);
- 4) надежность и достоверность измерений (K4);
- 5) простота технической реализации (стоимость) (K5).

Полная доминантная иерархия приведена на рис. 2.



Рис. 2. Полная доминантная иерархия

Получение матрицы парных сравнений

Относительно фактора **Уровень Цели. Выбор метода** необходимо провести парное сравнение следующих факторов уровня **Уровень критериев**

№	Фактор	Вес
1	Инвариантность	0,042
2	Быстродействие	0,104
3	Точность	0,374
4	Надежность и дост...	0,260
5	Экономичность и п...	0,219

Матрица парных сравнений:

	1	2	3	4	5
1	1	1/5	1/3	1/6	1/6
2	5	1	1/7	1	1/7
3	3	7	1	1	4
4	6	1	1	1	3
5	6	7	1/4	1/3	1

Какой из факторов предпочтительнее ?

Инвариантность  
 Инвариантность  
 Одинаково важны  
 Не могу сказать

Степень предпочтения:  
 Абсолютно превосходит  
 Промежуточное значение  
 Значительно превосходит  
 Промежуточное значение  
 Существенно превосходит  
 Промежуточное значение  
 Умеренно превосходит  
 Промежуточное значение  
 Одинаково важны

$\lambda = 6,332$      $ИС = 0,333$      $ОС = 0,297$

Рис. 3. Расчет коэффициентов в программе СППР Выбор 6.0

Вычисление коэффициентов проводилось на основе парного сравнения для уровня целей и альтернатив. Расчеты проводились в программном пакете СППР Выбор 6.0 (рис. 3).

На рис. 4 приведены результаты комплексного технико-экономического анализа.

Как можно видеть из рис. 4, наилучшим сочетанием критериев обладает метод виб-

роакустических измерений. Идея акустической диагностики состояния режущего инструмента основана на мысли о том, что определенному состоянию технологической системы соответствует строго индивидуальное акустическое излучение.

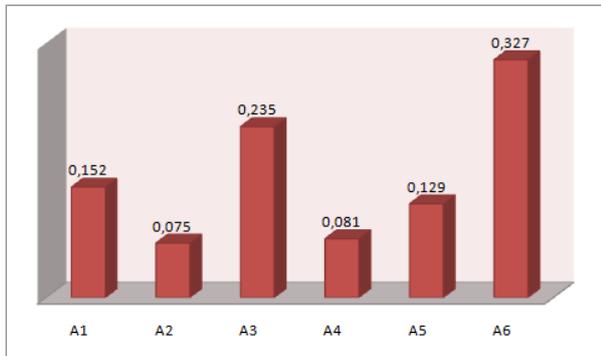


Рис. 4. Результаты комплексного технико-экономического анализа

Считается, что акустическое излучение (эмиссия) представляет собой упругую энергию, которая высвобождается в твердом теле при деформациях или разрушениях. Акустический сигнал, имеющий частоту от десятков кГц до МГц, регистрируется датчиком, воспринимаются ударные волны, возникающие при высвобождении энергии.

Следовательно, проблемой в данном случае является выявление полезной информации из сигнала, так как источников вибраций, которые возникают при обработке, достаточно много (подшипники шпинделя, зубчатые пары, заготовка и т.д.). В ходе предварительных исследований [4] было установлено, что акустический сигнал в диапазоне от 6 до 12 кГц обладает наибольшей информативностью.

Учитывая большое разнообразие станков и схем обработки, решения в области активного контроля целесообразно создавать в виде экспертных систем с возможностью обучения, которые реально настраивать для каждого случая (конкретного оборудования, инструмента, оснастки и т.д.).

Под экспертными системами понимается программный комплекс, выполняющий задачи эксперта в определенной предметной области. Работа таких систем основана на ана-

лизе данных, с последующей выдачей решения (или совета).

Основное преимущество от использования данных систем – реализованная возможность пополнения информации (знаний) с последующим сохранением. При этом построение экспертных систем, в отличие от человека, строится на объективных расчетных закономерностях. Факт субъективности отсутствует, что существенно повышает объективность оценки.

Типовой состав экспертной системы следующий [6]:

- база знаний (содержит в себе знания);
- подсистема вывода (набор правил, которые реализуют функцию решения задачи);
- подсистема объяснения (логический блок);
- подсистема сбора данных и пользовательский интерфейс.

Наиболее важным элементом экспертной системы является база знаний. Именно данный элемент реализует «интеллектуальные способности» системы. База знаний наполняется новыми знаниями и в обязательном порядке входит в состав любой экспертной системы. Чаще всего информация в экспертной системе хранится в символьном виде. Процесс функционирования экспертной системы подразумевает определенную последовательность преобразований символов [6].

Элемент «приобретение знаний» предназначен для того, чтобы добавлять новые знания в базу знаний. Главная задача данного элемента заключается в приведении данных к виду, который пригоден к обработке в рамках экспертной системы [6].

Подсистема вывода – составная часть экспертной системы, которая реализует процесс ее рассуждений с использованием базы знаний и рабочего множества. Данная подсистема реализует две функции [6]:

- производит обработку данных из рабочего множества на основе правил базы знаний, а также добавляет новые факты;
- реализует вывод информации пользователю.

Угруппированная структура экспертной системы приведена на рис. 5 [6]:

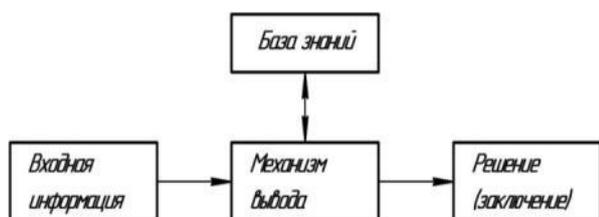


Рис. 5. Взаимодействие компонентов в рамках экспертной системы

В нашем случае предполагается включение человека в систему, поэтому структурная схема несколько изменится (рис. 6) [6]:

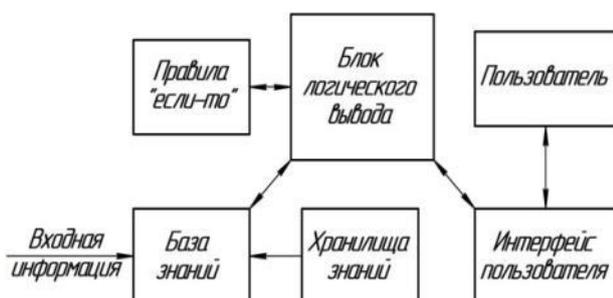


Рис. 6. Структурная схема экспертной системы с участием человека

## 2. Материалы и методы исследования

Эксперимент по изучению зависимости параметров вибросигнала от износа был спланирован и проведен как стойкостной. Обработка проводилась на токарно-винторезном станке модели 1И611ПФ2. Измерение ширины фаски износа по задней поверхности проводилось на инструментальном микроскопе МИМ-6. Обработываемый материал – сталь 45 (незакаленная). Условия проведения экспериментов следующие:

- скорость резания  $V = 215$  м/мин;
- подача  $S = 0,07$  мм/об;
- глубина резания  $t = 0,25$  мм;
- инструментальный материал – ВОК60.

Запись виброакустического сигнала производилась посредством датчика-акселерометра модели KD45. Датчик вибраций устанавливался в непосредственной близости от зоны обработки. Схема установки датчика приведена на рис. 7.

Фильтрация сигналов и последующая их обработка выполнялась в программе [4]. Пример спектрограммы приведен на рис. 8.



Рис. 7. Схема установки датчика вибраций

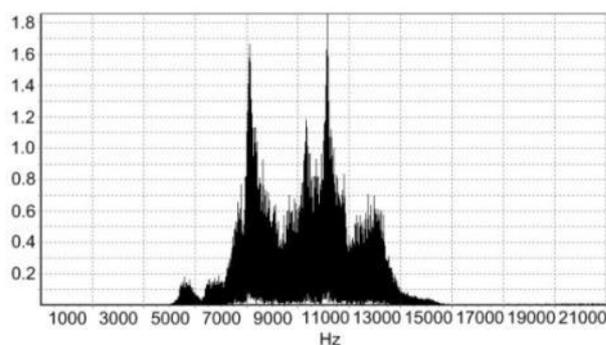


Рис. 8. Спектрограмма сигнала  $h_3=0,4$  мм

В качестве дополнительного критерия для оценки ресурса работы инструмента предлагается использовать корреляционную энтропию сигнала [6]. Корреляционная энтропия выражается через корреляционный интеграл следующим образом [6]:

$$K = \lim_{n \rightarrow \infty} \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \lim_{ED \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \cdot \left( \sum_{i=1 \dots in} \frac{C_n(\epsilon)}{C_{n+1}(\epsilon)} \right),$$

где  $\tau$  - временная задержка;  $ED$  - размерность фазового пространства.

Вычисление корреляционной энтропии производилось в компьютерной программе [7].

Анализируя опыт создания экспертных систем [6], следует отметить, что наибольшие затруднения возникают при создании блоков правил «если-то». Применительно к рассматриваемой задаче главной проблемой является высокая неопределенность исходных данных.

Одним из выходов является использование аппарата нечеткой логики при построении логических блоков и блоков «если-то».

Нечеткая логика является частью математики и расширением классической логики, основана на концепции частичной истинности. Главным достоинством нечеткой логики можно отнести [8, 9]:

- нечеткая логика позволяет обрабатывать данные, которые не заданы однозначно («довольно изношенный», «достаточно новый» и т.д.);

- возможность формализовать критерии оценки и сравнения и использовать понятия вида «возможно», «допустимо» и т.д.;

- возможность обработки данных, которые заданы в качественном виде;

- на основе нечеткой логики можно строить различные имитационные модели сложных систем (в том числе динамических) с целью обеспечения требуемой сложности.

Основное понятие нечеткой логики – множество, которое обычно задано в форме характеристической функции (функции принадлежности), указывающей на принадлежность элемента  $x$  к множеству  $A$  [8, 9]:

$$\mu_A = \begin{cases} 0, & x \in A \\ 1, & x \notin A \end{cases}$$

Согласно рекомендациям [8, 9], при построении экспертных систем целесообразно применять гауссову функцию принадлежности:

$$\mu_A(x) = \exp\left(-\left(\frac{x-c}{b}\right)^2\right).$$

Важными понятиями нечеткой логики является лингвистическая и нечеткая переменная. Нечеткая переменная включает в себя три параметра [9, 10]:

$$\langle \alpha, U, \mu \rangle,$$

где  $\alpha$  – имя переменных;  $U$  – область определения переменных;  $\mu(x)$  – функция принадлежности.

Лингвистическая переменная характеризуется пятью параметрами [8, 9]:

$$\langle \beta, T, U, G, M \rangle,$$

где  $\beta$  – имя переменной;  $T$  – терм-множество (область значений);  $G$  – процедура обработки элементов терм-множества;  $M$  – процедура преобразования новых данных в нечеткий вид.

Нечетким логическим выводом называют аппроксимацию зависимости

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

выходной лингвистической переменной от входных лингвистических переменных и получение значения в виде нечеткого множества с использованием базы знаний, содержащей правила «если-то».

### 3. Результаты и их обсуждение

На рис. 9 приведена зависимость мощности вибросигнала ( $Sw$ ) от ширины фаски износа.

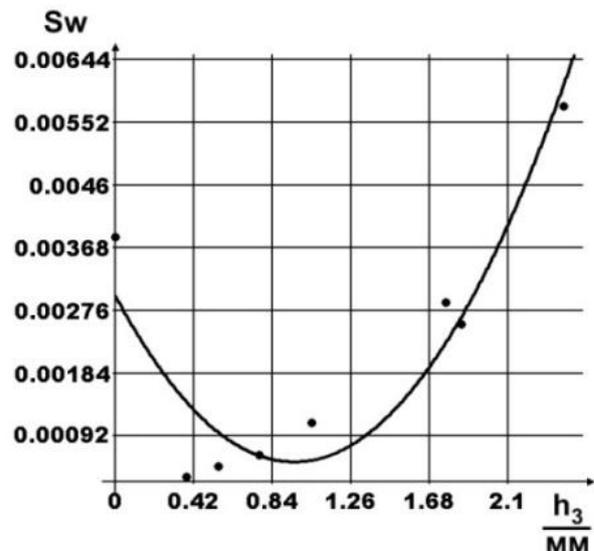


Рис. 9. Зависимость  $Sw=f(h_3)$

Анализируя данную зависимость, можно выделить три участка, которые характеризуют периоды износа инструмента. При значениях фаски износа от 0 до 0,4 мм, наблюдается период приработки, который характеризуется постепенным снижением мощности виброакустического сигнала. В период нормального износа (от 0,4 до 1,8 мм) рост мощности виброакустического сигнала незначителен. При наступлении катастрофического износа (ширина фаски износа превышала 1,8 мм) имеет место интенсивный рост мощности виброакустического сигнала.

Зависимость корреляционной энтропии от ширины фаски износа приведена на рис. 10.

Характер зависимости данного параметра аналогичен классической кривой износа. Это дает возможность более адекватно определять периоды износа. Для оценки ресурса работы режущего инструмента была разработана нейро-нечеткая модель. Входными

параметрами модели являются корреляционная энтропия сигнала  $K$  и мощность вибросигнала  $Sw$ , а выходным – ширина фаски износа  $h_3$ .

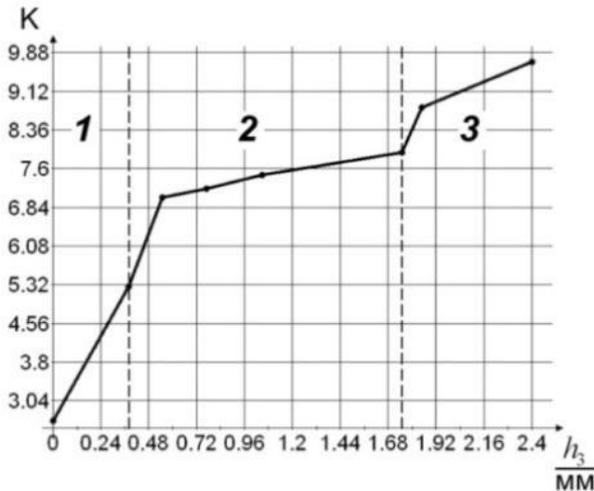


Рис. 10. Зависимость  $K = f(h_3)$

Структура модели представлена на рис. 11.

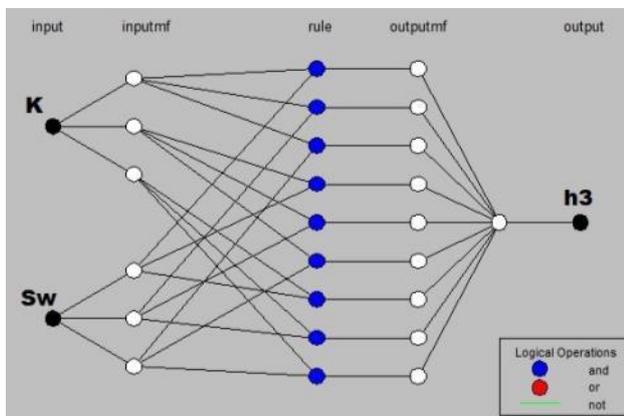


Рис. 11. Структура модели

Для обучения системы была сформирована выборка. Тестирование производилось на данных, которые не входили в обучающую выборку. Результаты тестирования приведены на рис. 12.

Установлено, что ошибка в оценке параметров износа не превышает 5%. Использование аппарата нечеткой логики дает возможность более эффективно оценивать ресурс работы инструмента в условиях неопределенности.

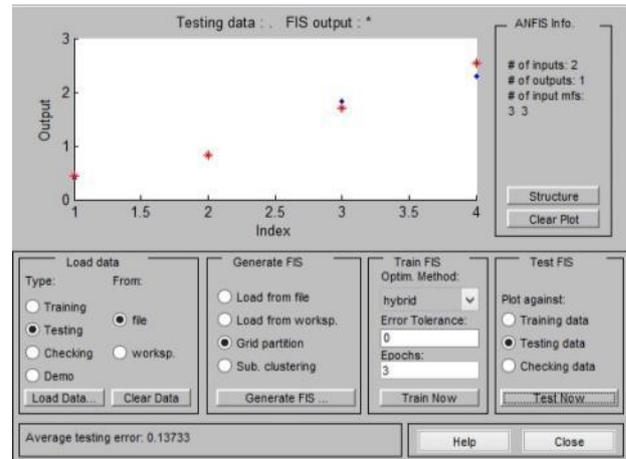


Рис. 12. Результаты тестирования

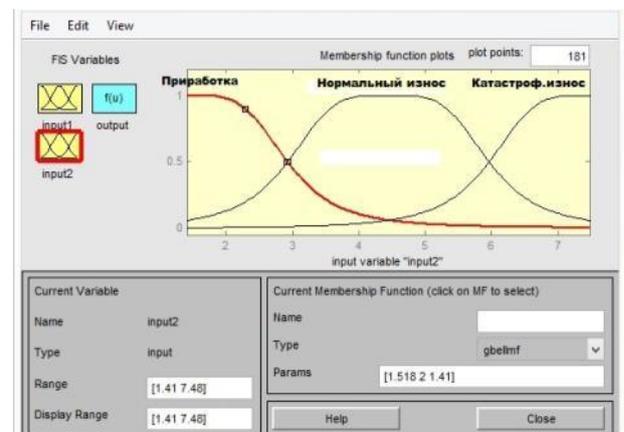


Рис. 13. Выходная переменная

На рис. 14 представлена поверхность функции нечеткой логики.

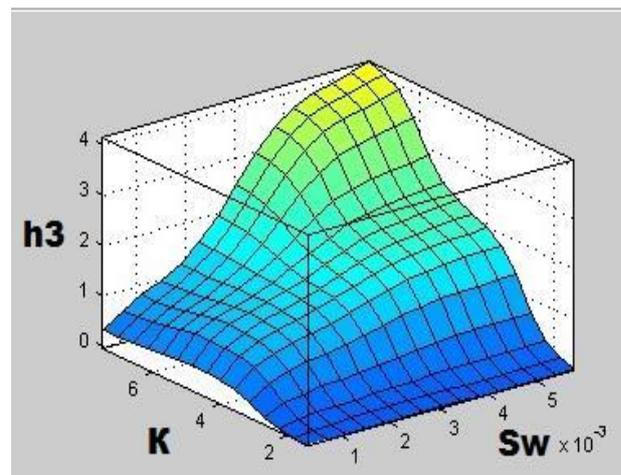


Рис. 14. Поверхность функции

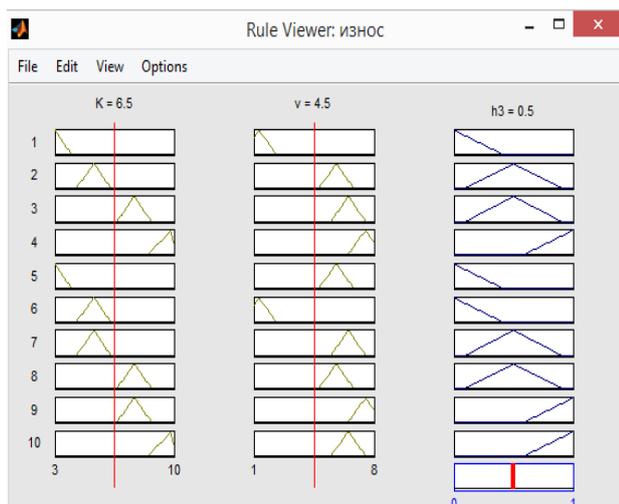


Рис. 15. Пример вычисления переменных

Пример вычисления погрешности оценки износа при помощи нейро-нечеткой модели:

$$\Delta = \frac{h_{3\text{теор}} - h_{3\text{эксп}}}{h_{3\text{теор}}} \cdot 100\% = \frac{0.5 - 0.48}{0.5} \cdot 100\% = 4\%.$$

В результате тестирования модели было установлено, что средняя погрешность не превышает 10%. Дополнительным преимуществом применения нечетких моделей является возможность формализовать определение периодов износа (рис. 13), что дает возможность более эффективно принимать решения о дальнейшем использовании инструмента.

Данная модель может быть положена в основу устройства контроля износа режущего инструмента, схема которого приведена на рис. 16.

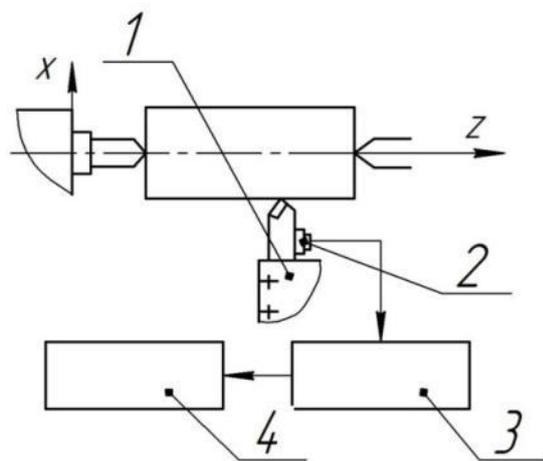


Рис. 16. Схема устройства активного контроля износа

Устройство включает в себя пьезоакустический датчик 2, который устанавливается на державку резца 1. Записанный сигнал поступает в устройство обработки 3, где осуществляется его фильтрация и необходимые вычисления, связанные с оценкой износа. Полученные результаты отображаются на устройстве вывода 4.

Использование данного устройства позволит повысить качество обработки исполнительных поверхностей деталей строительно-дорожных машин в условиях ремонтного производства.

#### 4. Выводы

1. Использование виброакустического сигнала в частотном диапазоне от 6 до 12 кГц дает возможность проводить оценку износа режущего инструмента в ходе обработки. Мощность сигнала в данном диапазоне и величина корреляционной энтропии сигнала имеют тесную взаимосвязь с критериями износа режущей кромки инструмента.

2. Применение нейро-нечетких моделей дает возможность определения параметров износа режущего инструмента с погрешностью, не превышающей 10%. Использование нечеткой логики позволяет эффективно оценивать ресурс работы инструмента в условиях неопределенности и принимать решения по его дальнейшему использованию.

3. Внедрение устройств активного контроля износа режущего инструмента позволит повысить качество обработки исполнительных поверхностей деталей строительно-дорожных машин в условиях ремонтного производства. Особенно актуальным использование данных решений представляется в тех случаях, когда производится большой объем обработки однотипных деталей (например, растачивание гильз цилиндров).

4. В качестве перспектив для дальнейших исследований следует выделить апробацию в условиях реального ремонтного производства и пополнение базы знаний экспертной системы. Также следует уделить внимание разработке пользовательского интерфейса экспертной системы, который обеспечивает комфортное взаимодействие с рабочим.

## Список литературы

1. Вальков В.М. Контроль в ГАП. Л.: Машиностроение, 1986. 232 с.
2. Козочкин М.П. Виброакустическая диагностика технологических процессов. М.: ИКФ "Каталог", 2005. 196 с.
3. Овсянников В.Е., Остапчук А.К. Научные основы обеспечения шероховатости поверхности на базе анализа случайных процессов. Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та, 2012. 188 с.
4. Остапчук А.К., Овсянников В.Е., Рогов Е.Ю. Анализ виброакустических сигналов v1.0: свид-во об отраслевой регистрации программы для ЭВМ № 50200802217, рег. 14.11.2008.
5. Павлов А.Н. Методы анализа сложных сигналов. Саратов: Научная книга, 2008. 120 с.
6. Тузовский А.Ф., Чириков С.В., Ямпольский В.З. Системы управления знаниями (методы и технологии). Томск: Изд-во НТЛ, 2005. 260 с.
7. Остапчук А.К., Овсянников В.Е., Рогов Е.Ю. Анализ коррелограмм профилей поверхностей, обрабатываемых резанием: свид-во о государственной регистрации программы для ЭВМ №2012611805, рег. 17.02.2012.
8. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и flzzyTEC. СПб.: БХВ Петербург, 2005. 736 с.
9. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия Телеком, 2007. 288 с.

## References

1. Valkov V.N. *Kontrol v GAP* [Control in GAP]. Leningrad, Mashinostroenie, 1986. 232 p. (In Russian).
2. Kozochkin M.P. *Vibroakusticheskaya diagnostika tekhnologicheskikh protsessov* [Vibroacoustic diagnostics of technological processes]. Moscow, IKF "Catalog", 2005. 196 p. (In Russian).
3. Ovsyannikov V.E., Ostapchuk A.K. *Nauchnye osnovy obespecheniya sherokhovatosti poverkhnosti na baze analiza sluchaynykh protsessov* [Scientific basis for surface roughness based on random process analysis]. Kurgan, Kurgan State University, 2012. 188 p. (In Russian).
4. Ostapchuk A.K., Ovsyannikov V.E., Rogov E.Yu. *Analiz vibroakusticheskikh signalov. Svidetelstvo ob otraslevoy registratsii programm dlya EVM* [Vibration acoustic signal analysis. The Certificate on branch registration of the computer program]. No. 50200802217, 2008. (In Russian).
5. Pavlov A.N. *Metody analiza slozhnykh signalov* [Methods of analysis of complex signals]. Saratov, Nauchnaya kniga, 2008. 120 p. (In Russian).
6. Tuzovski A.F., Chirikov S.V., Yampolski V.Z. *Sistemy upravleniya znaniyami (metody i tekhnologii)* [Knowledge management systems (methods and technologies)]. Tomsk. Izd-vo NTL, 2005. 260 p. (In Russian).
7. Ostapchuk A.K., Ovsyannikov V.E., Rogov E.Yu. *Analiz korrelogramm profiley poverkhnostey, obrabatyvaemykh rezaniem. Svidetelstvo o gosudarstvennoy registratsii programm dlya EVM* [Analyzing the Correlograms of Cut Surface Profiles. The Certificate on official registration of the computer program]. No2012611805, 2012. (In Russian).
8. Leonenkov A.V. *Nechetkoe modelirovaniye v srede MATLAB I flzzyTEC* [Fuzzy Modeling in MATLAB and flzzyTEC]. St. Petersburg, BKhV Peterburg, 2005. 736 p. (In Russian).
9. Shtovba S.D. *Proektirovaniye nechetkikh sistem sredstvami MATLAB* [Designing fuzzy systems with MATLAB]. Moscow, Goryachaya liniya Telecom, 2007. 288 p. (In Russian).