

$$k = 4,77 - 0,026 D_3; \quad (16)$$

$$L = 2,39 + 0,09 D_3, \quad (17)$$

- а для колеса с числом зубьев  $m_2 = 50$

$$R_1 = 3,83 + 0,029 D_3; \quad (18)$$

$$A = 42,57 - 0,011 D_3; \quad (19)$$

$$k = 5,74 - 0,023 D_3; \quad (20)$$

$$L = 1,714 + 0,06 D_3. \quad (21)$$

Параметры аппроксимирующих линий, вычисленные по приведенным формулам, обеспечивают малые отклонения профиля зубьев центрального колеса от номинального и, как следствие, нормальную работу передачи с минимальными шумом и вибрациями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пашкевич М. Ф., Геращенко В. В. Планетарные шариковые и роликовые редукторы и их испытания: Обзор. – Мн.: БелНИИНТИ, 1992. – 248 с.

УДК 621.9.06

## ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

*Канд. техн. наук, доц. КАШТАЛЬЯН И. А., инж. ЖУКОВСКИЙ П. К.*

*Белорусский национальный технический университет*

В современном машиностроительном производстве все большее место занимают методы механической обработки, осуществляемые с переменными (нестационарными) режимами резания. На токарных станках с числовым программным управлением (ЧПУ) их применяют при торцовом и фасонном точении, обработке биматериалов, а также для повышения производительности, точности и виброустойчивости обработки нежестких деталей [1]. С этой целью в технологическое программное обеспечение устройства числового программного управления (УЧПУ) включают модули, реализующие различные закономерности изменения подачи и скорости резания в функции пути (линейное и модулированное изменение подачи, прерывание подачи, поддержание постоянства скорости резания и подачи наоборот в условиях бесступенчатого регулирования частоты вращения шпинделя и др.) [2]. На базе этих модулей разрабатываются также адаптивные системы, у

которых в качестве канала управления используются подача и скорость резания. Включение модулей осуществляется по параметрам, задаваемым в кадре управляющей программы, либо автоматически в зависимости от уровня силы резания или вибраций. В результате в течение одного рабочего хода часто реализуются различные закономерности изменения режимов резания. При этом в широких пределах изменяются геометрические параметры сечения срезаемого слоя, кинематические углы режущего лезвия инструмента. Это определяет условия протекания пластического деформирования в зоне резания и оказывает существенное влияние на стабильность силового и температурного режимов, а также на стойкость режущего инструмента. Вследствие этого существующие косвенные методы оценки величины износа (по силам резания, вибрациям, акустической эмиссии в зоне резания и др.) могут оказаться неэффективными из-за необходимости решения

при их реализации ряда дополнительных задач [3, 4]. Основными из них являются: периодическое выявление причины, по которой параметр, используемый для оценки состояния инструмента, изменил свою величину; определение той доли значения параметра, которая зависит непосредственно от износа. Решение указанных задач сдерживается значительными затратами на включение в систему управления станком дополнительных датчиков и на расширение функциональных возможностей УЧПУ. Поэтому появляется необходимость в разработке таких методов определения текущего и предельного износа режущего инструмента, которые могут быть эффективно использованы в условиях нестационарного резания.

Предлагаемый метод основан на прогнозной оценке состояния режущего инструмента по информационным критериям, в частности по изменению энтропийного коэффициента стабильности  $C_H$  размеров деталей, который определяется по скользящей выборке, содержащей некоторое конечное число  $n$  конкретных значений случайной величины [5]. Коэффициент  $C_H$  является вероятностной оценкой стабильности процесса, что и позволяет использовать его для объективной прогнозной оценки интенсивности процесса изнашивания.

По сравнению с известными метод прост в реализации. Это связано с тем, что современные станки с ЧПУ, как правило, оснащены датчиком контроля размеров детали, а в технологическое программное обеспечение устройства управления включен модуль, реализующий различные циклы измерений. В результате размеры детали, полученные с целью коррекции режущего инструмента, могут быть использованы для диагностики его состояния. Причем решение задачи фактически сводится только к математической обработке результатов измерений.

Если случайную величину отклонения (погрешности) размера детали обозначить через  $\Delta$ , то  $C_H$  определяется как отношение энтропии закона распределения  $H(\Delta)$ , полученной в результате  $n$  измерений, к максимально возможной энтропии  $[H(\Delta)]_{\max}$  [5].

Энтропия  $H(\Delta)$  является функционалом закона распределения случайной величины  $p(\Delta)$ .

Она учитывает особенности этого закона, определяет степень неопределенности полученных результатов. Для некоторого ряда значений  $n$  случайной величины  $\Delta$  энтропия

$$H(\Delta) = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i, \quad (1)$$

где  $p_i$  – вероятность.

Когда состояния системы равновероятны, энтропия максимальна

$$[H(\Delta)]_{\max} = \ln n. \quad (2)$$

На основании ограниченного числа измерений может быть построена ступенчатая гистограмма, которая в той или иной степени приближается к действительному закону распределения  $p(\Delta)$ . Поскольку гистограмма распределения состоит из  $m$  интервалов (столбцов) с границами  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_i, x_{i+1}, \dots, x_m$  и каждый интервал шириной  $d_i = x_i - x_{i-1}$  включает  $n_{d_i}$  размеров, плотность вероятности на протяжении каждого из интервалов остается постоянной и равной  $p(\Delta) = n_{d_i} / nd_i$ . Тогда энтропия такого распределения

$$H(\Delta) = -\int_{-\infty}^{+\infty} p(\Delta) \ln p(\Delta) dx = -\sum_{i=1}^m \int_{x_{i-1}}^{x_i} \frac{n_{d_i}}{nd_i} \ln \frac{n_{d_i}}{nd_i} dx. \quad (3)$$

После преобразований

$$H(\Delta) = \sum_{i=1}^m \frac{n_{d_i}}{n} \ln \frac{nd_i}{n_{d_i}}. \quad (4)$$

Если принять, что ширина всех интервалов гистограммы одинакова, то

$$H(\Delta) = \sum_{i=1}^m \frac{n_{d_i}}{n} \ln \frac{n}{n_{d_i}} + \ln d. \quad (5)$$

В результате энтропийный коэффициент стабильности определяется по следующей зависимости:

$$C_H = \left( \sum_{i=1}^m \frac{n_{d_i}}{n} \ln \frac{n}{n_{d_i}} + \ln d \right) / \ln n. \quad (6)$$

В полученном соотношении число наблюдений  $n$  должно быть таким, чтобы его можно было разбить на  $m$  (не менее пяти) интервалов шириной  $d$ , в крайние из которых попадает как минимум одно наблюдение. Установлено, что

такому условию удовлетворяет выборка, состоящая из 30...50 наблюдений [5].

Схема алгоритма расчета текущего значения коэффициента стабильности  $C_H$  приведена на рис. 1.

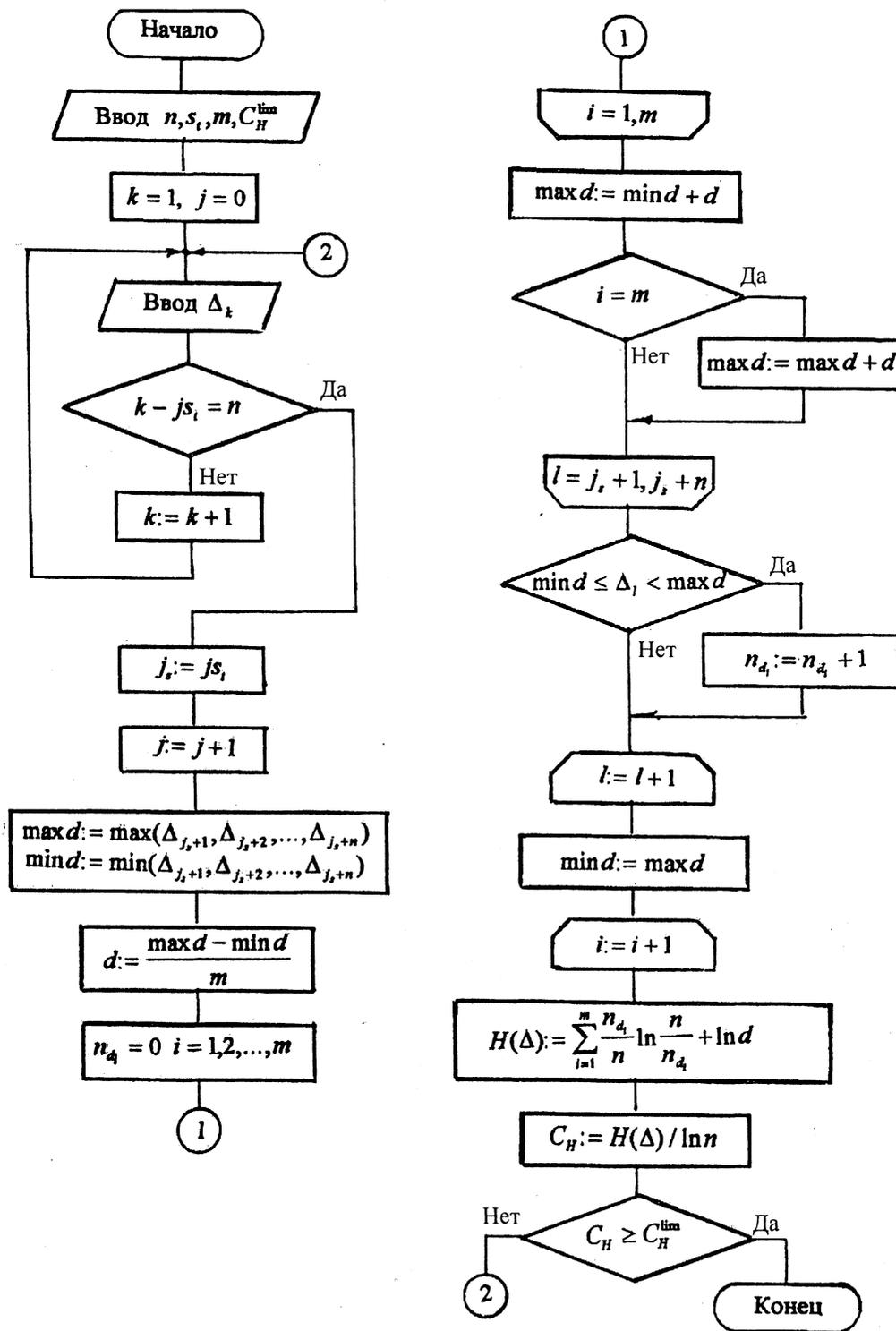


Рис. 1. Алгоритм расчета  $C_H$

На схеме приняты следующие обозначения:  $n$  – число значений случайной величины для расчета  $C_H$  (размер выборки);  $s_i$  – число значений случайной величины, на которое осуществляется сдвиг выборки при расчете очередного значения  $C_H$  (шаг выборки);  $d$  – ширина интервала (столбца гистограммы);  $m$  – число интервалов (столбцов гистограммы);  $\Delta_k$  – текущее значение случайной величины (погрешности размера);  $H(\Delta)$  – энтропия закона распределения случайной величины;  $C_H^{lim}$  – предельное значение  $C_H$ ;  $\min d$  – минимальное значение интервала;  $\max d$  – максимальное значение интервала;  $j_s$  – вспомогательная переменная для определения первого элемента из выборки для расчета  $C_H$ ;  $n_d$  – массив выборки, разбитый по интервалам;  $n_{d_i}$  – число значений случайной величины, которое включает  $i$ -й интервал;  $j$  – текущее значение расчета  $C_H$ ;  $k$  – номер текущего элемента выборки;  $i, l$  – вспомогательные переменные для разбиения выборки на интервалы.

Структурная схема системы, реализующей предложенную информационную модель оценки состояния режущего инструмента, представлена на рис. 2. Система содержит измерительное устройство детали 1, блок расчета рассогласования 2, блок формирования команды управления 3, устройство числового программного управления 4, блок управления приводом 5, привод подачи 6, блок суммирования 7, блок расчета энтропийного коэффициента стабильности 8, блок сравнения 9, блок сигнализации критического состояния инструмента 10, счетчик деталей 11, устройство автоматической смены инструмента 12, инструмент режущий 13.

Система работает следующим образом.

В УЧПУ вводится управляющая программа обработки детали, в которой кроме геометрической и технологической информации содержатся данные для расчета энтропийного коэффициента стабильности  $n, s_i, m$ . В программу также включаются циклы измерений. Предельное значение энтропийного коэффициента стабильности  $C_H^{lim}$  в УЧПУ вводится с пульта оператора.

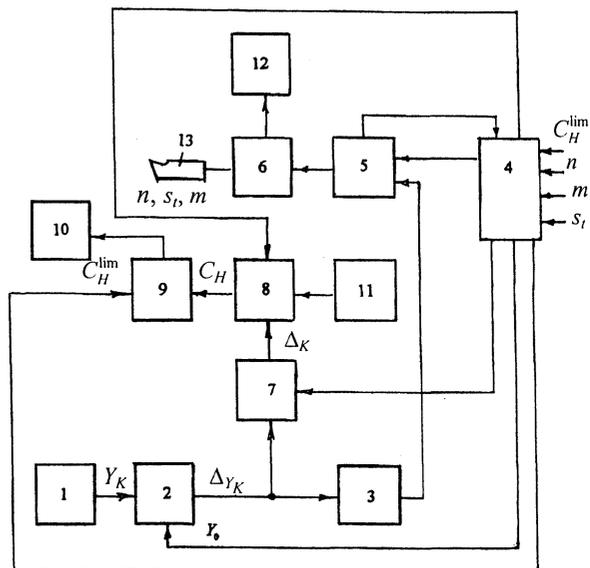


Рис. 2. Структурная схема системы диагностики состояния режущего инструмента

Перед началом обработки очередной  $K$ -й детали предыдущая деталь измеряется с применением устройства 1. Далее полученный действительный размер детали  $Y_k$  сравнивается в блоке расчета рассогласования с заданным размером  $Y_0$ , поступающим в блок с УЧПУ.

Установленное при этом отклонение размера преобразуется в блоке формирования команды управления в сигнал, который поступает на блок управления приводом. В результате привод подачи обрабатывает перемещение, равное по величине погрешности размера. Контроль величины перемещения (поднастройки) осуществляется измерительным преобразователем (круговым или линейным), встроенным в привод подачи. Поднастройка может осуществляться автоматически каждый раз после изменения очередной детали либо после обработки нескольких деталей по мере накопления определенной величины погрешности, определяемой точностью получаемых размеров.

Информация о начальной координате, которая содержится в управляющей программе, и память положения позволяют определять суммарную величину смещения исполнительного органа станка относительно технологических баз после очередного цикла поднастройки. Эта величина из УЧПУ поступает на вход блока суммирования. На второй вход этого блока из блока расчета рассогласования поступает вели-

чина отклонения размера детали от заданного значения. При этом суммарная величина в блоке 7 соответствует размерному износу режущего инструмента и является текущей величиной для расчета энтропийного коэффициента стабильности размеров деталей, если бы они были определены без поднастройки. Полученная в блоке 7 суммарная величина поступает в блок 8, где совместно с другими данными, поступающими из УЧПУ, используется для расчета  $C_H$ . В качестве таких данных используются параметры, характеризующие ступенчатую гистограмму практического распределения случайной величины  $\Delta$ :  $n, s_i, m$ . Первый цикл вычисления  $C_H$  будет выполнен, когда число измеренных деталей достигнет значения  $n$  (текущее значение  $n$  фиксируется счетчиком деталей). Последующие циклы вычисления  $C_H$  будут производиться после каждого очередного поступления в блок 8 суммарной величины, полученной в блоке 7. При этом новая выборка из  $n$  элементов каждый раз будет сдвигаться на один элемент (при условии, что  $s_i = 1$ ).

Значение  $C_H$ , определенное в блоке 8, сравнивается в блоке 9 с заданным значением  $C_H^{\text{lim}}$ , которое поступает из УЧПУ и соответствует наступлению предельного износа режущего инструмента. Величина  $C_H^{\text{lim}}$  выбирается в зависимости от особенностей процесса резания. Если текущее значение  $C_H$  становится равным или больше значения  $C_H^{\text{lim}}$ , то на блок сигнализации поступает сообщение о необходимости смены инструмента.

Экспериментальная проверка описанного метода оценки состояния режущего инструмента проводилась с использованием токарного станка с ЧПУ мод. 1А751Ф3. Устанавливалась взаимосвязь между величиной износа режущего инструмента и значениями  $C_H$ . Измерение деталей для расчета  $C_H$  производилось с помощью индуктивного датчика Р2Н фирмы Renishaw (Великобритания), установленного на одной из позиций правой револьверной головки. Фиксация размерного износа осуществлялась путем измерения расстояния между специальным эталонным упором на державке и вершиной режущей кромки резца. В качестве

измерительного инструмента был использован рычажный микрометр, имеющий шкальное устройство с ценой деления 0,002 мм.

Для случая обработки партии деталей из стали 40ХН резцом, оснащенным пластиной твердого сплава Т15К6 (рис. 3). Режимы резания были приняты следующими: скорость резания  $v = 150$  м/мин; глубина резания  $t = 2$  мм; подача периодически изменялась от  $S_{\text{min}} = 0,2$  мм/об до  $S_{\text{max}} = 0,4$  мм/об на длине  $l = 1,2$  мм приращениями величиной  $\Delta S = 0,1$  мм/мин. Длина резания при обработке одной детали составляла 132 м. Интенсивность изнашивания оценивалась по отношению размерного износа к пути, пройденному режущим лезвием инструмента за время обработки одной детали. Предельный износ инструмента ( $h = 138$  мкм) был зафиксирован при обработке 76-й детали в партии. Расчет текущего значения  $C_H$  проводился для  $n = 30$ ;  $s_i = 1$ ;  $m = 5$ .

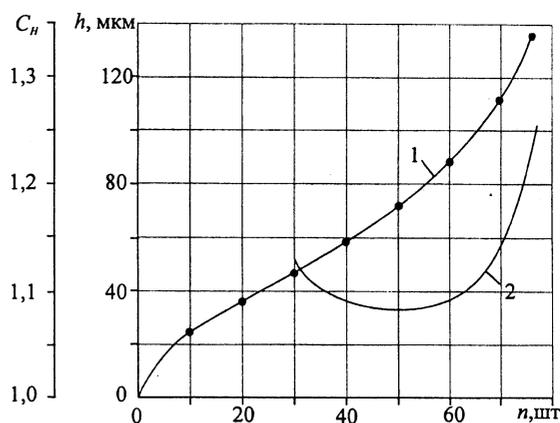


Рис. 3. Закономерности изменения размерного износа режущего инструмента  $h$  (1) и энтропийного коэффициента стабильности размеров  $C_H$  (2) при обработке партии деталей

Из графиков видно, что участку кривой размерного износа  $h$ , отражающему начальную стадию нормального износа, соответствует плавное уменьшение  $C_H$ . Это связано с тем, что выборка объемом  $n$  для расчета  $C_H$  еще содержит значения погрешности контролируемого размера, полученные в период приработки резца (начального износа). После некоторого количества сдвигов на шаг  $s_i$  выборка состоит из значений погрешности контролируемого размера, полученных только в период нормаль-

ного износа, величина  $C_H$  при этом остается практически минимальной. С увеличением интенсивности и неравномерности изнашивания (началом критического износа) в состав выборки объемом  $n$  для расчета  $C_H$  вместо значений погрешности контролируемого размера, полученных в период нормального износа резца, включаются новые значения погрешности, величина и диапазон рассеивания которых возрастают. Причем после каждого сдвига на шаг  $s_i$  число таких значений погрешности в составе выборки объемом  $n$  увеличивается. В результате растет и значение  $C_H$ .

Экспериментально установлено, что изменение энтропийного коэффициента стабильности  $C_H$  адекватно отражает состояние режущего инструмента. Предельная интенсивность изнашивания инструмента обычно наступала при увеличении  $C_H$  на 10...15 % по отношению к его минимальному значению. Здесь под предельной следует понимать такую интенсивность изнашивания, при которой размерный износ резца за время обработки одной детали увеличивается на величину, равную (большую) величине допуска на получаемый при обработке размер.

## ВЫВОД

По изменению энтропийного коэффициента стабильности размеров деталей, обработанных на станке, может быть дана объективная оценка текущего состояния режущего инструмента и его предельного износа. Метод может быть эффективно использован при обработке сравнительно больших партий деталей в условиях нестационарного резания. Функция расчета энтропийного коэффициента стабильности может выполняться непосредственно УЧПУ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Подураев В. Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. – М.: Машиностроение, 1977. – 304 с.
2. Kashtalyan I. A. Improvement of Manufacturing Software for Microprocessor Program Controllers // Micro and Precision Mechanics: Proceeding of the 41th International Colloquium. – Ilmenau, 1996. – V. 1. – P. 441–444.
3. Ратмиров В. А. Управление станками гибких производственных систем. – М.: Машиностроение, 1987. – 272 с.
4. Каштальян И. А., Клевзович В. И. Обработка на станках с числовым программным управлением. – Мн.: Вышэйш. шк., 1989. – 271 с.
5. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств. – Л.: Энергия, 1968. – 248 с.