

Оценка стойкости режущего инструмента при точении на основе вычисления показателя колебательности динамической системы станка

А.И. Пономарев, А.А. Игнатьев

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Аннотация: Обосновывается целесообразность применения метода оценки стойкости инструмента по показателю колебательности динамической системы с целью рационального нормирования расхода смены режущих пластин инструмента. Построена модель динамической системы токарного станка в виде передаточной функции, анализ которой показал снижение запаса устойчивости с износом инструмента. Для вычисления показателя колебательности, служащего косвенной оценкой запаса устойчивости, производилась регистрация виброакустических колебаний при точении виброизмерителем ВШВ-003-М2. Метод по оценке стойкости режущего инструмента по показателю колебательности базируется на использовании автокорреляционной функции виброакустических колебаний и амплитудно-частотной характеристики динамической системы. Он может использоваться для анализа и подбора оптимальных для поставленной задачи режимов резания. Анализ проводился на партии деталей с высокими требованиями по классу обработки и допуску размеров. Посредством обработки результатов измерений получен массив данных – показателей колебательности, отражающих стойкость инструмента. На основе полученных результатов при последовательном подборе режимов и анализе изменения стойкости резца подобраны оптимальные режимы резания при выполнении токарной обработки. Знание стойкости режущего инструмента необходимо для своевременной замены режущих пластин и сокращения брака выпускаемой продукции.

Ключевые слова: динамическая система, передаточная функция, стойкость резца, виброакустические колебания, показатель колебательности, катастрофический износ

Введение

Потребности производств в оптимизации процессов обработки в наше время становятся только более актуальными. Ограничения в поставке и

долгий срок поступления заставляют всё чаще задумываться о сокращении потерь в рамках фактического производства. Рациональное использование режущего инструмента в механообработке можно считать первым из ключевых направлений с учётом тенденций в известных отраслях. Потребность в сокращении количества брака при точении и необходимость не допустить поломки инструмента в детали можно считать главными критериями при нормирования инструмента на участке механической обработки. Контроль над периодичностью смены инструмента позволяет рациональней использовать высококвалифицированный персонал, производить закупку нового инструмента и вести планирование производства. Оценив стойкость инструмента, тем самым зная периодичность его замены, мы способны выполнять поставленные задачи правильно. Динамические характеристики металлообрабатывающего станка, как отмечается в серии достаточно известных трудов [1,2], представляют собой один из наиболее важных факторов, определяющих качество механической обработки. Вопросам контроля состояния режущего инструмента было посвящено множество трудов как отечественных, так и зарубежных ученых, таких, как М.М. Аршанский [3], Г.М. Мартинов [4], М.П. Козочкин [5], А.К. Тутенгольд [6] и другие. Они освещали такие вопросы, как обеспечение надежности режущего инструмента, повышение его износостойкости, и методы управления процессом износа в условиях автоматизированных производств. В связи с вышесказанным, научный и практический интерес представляют теоретическое и экспериментальное обоснование возможности контроля стойкости режущего с использованием показателя колебательности и анализу стохастических характеристик виброакустических колебаний инструмента, и его использования для планирования производства.

Построение модели динамической системы токарного станка для оценки стойкости инструмента по начальной фазе катастрофического износа

Для оценки стойкости инструмента по передаточной функции в первую очередь необходимо установить тенденцию изменения запаса устойчивости динамической системы (ДС) токарного станка по мере увеличения износа инструмента.

В Саратовском государственном техническом университете имени Гагарина Ю.А. был разработан метод определения начальной фазы катастрофического износа инструмента на основе оценки динамического качества автоматизированных станков по запасу устойчивости ДС, который вычисляется, исходя из идентифицированной передаточной функции [7]. По практике можно судить о том, что уровень вибраций возрастает с уровнем износа инструмента, что влечёт к потере запаса устойчивости ДС станка. Учитывая эти факторы, необходимо получить обоснование изменений по аналогии с вышеуказанным методом. По аналогии с работой [8] повторим построение модели ДС токарного станка, с принятием во внимание износа реза, процесса резания, и динамических свойств упругой системы, в которой параллельно используется колебательное звено, для описания шпиндельного узла (ШУ) с деталью и безынерционное звено, описывающее суппортную группу с инструментальным блоком (рис.1). Передаточная функция процесса резания учитывает демпфирование в паре «резец-заготовка», что является отличием данной модели. Соответствующая формула [9] имеет вид:

$$W_p(p) = \frac{K_p (T_h p + 1)}{T_p p + 1} \quad (1)$$

где T_p – постоянная времени стружкообразования, T_h – постоянная времени демпфирования, K_p – коэффициент резания.

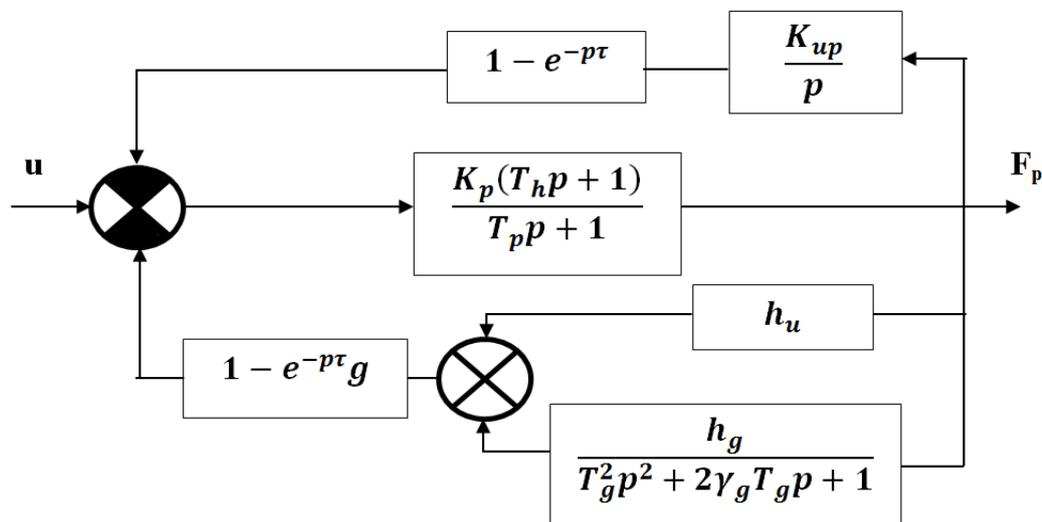


Рис.1. Структурная схема динамической системы токарного станка, где: u – заданная глубина резания, F_y – сила резания, τ_g – время одного оборота детали,

h_u, h_g, T_g, γ_g – коэффициенты, описывающие резцовый блок и шпиндельный узел детали,

T_p – постоянная времени стружкообразования, T_h – постоянная времени демпфирования,

K_p – коэффициент резания, K_{up} – коэффициент износа резца

Передаточные функции ШУ суппортной группы (с инструментом) и шпинделя имеют вид:

$$\begin{cases} W_u(p) = h_u, \\ W_g(p) = \frac{h_g}{T_g^2 p^2 + 2\gamma_g T_g p + 1}. \end{cases} \quad (2)$$

Передаточная функция ДС станка с учетом формул (1) и (2) записывается следующей формулой:

$$W(p) = \frac{K_p \left(\frac{T_h p + 1}{T_p p + 1} \right)}{1 + K_p \frac{T_h p + 1}{T_p p + 1} (1 - e^{-p\tau_g}) \left(h_u + \frac{h_g}{\{D\}} + \frac{K_{up}}{p} \right)}, \quad (3)$$

где $\{D\} = T_g^2 p^2 + 2\gamma_g T_g p + 1$.

Разложив экспоненту в ряд при малой величине τ_g , имеем $(1 - e^{-p\tau_g}) = p\tau_g$, тогда после преобразований, исходя из формулы (3), получаем:

$$W(p) = \frac{K_p (T_h p + 1) \{D\}}{(T_p p + 1) \{D\} + K_p \tau_g (T_h p + 1) [h_u \{D\} p + h_g p + K_{up} \{D\}]} \quad (4)$$

Полученная передаточная функция, соответствующая модели ДС-станка, считается адекватной на протяжении времени обработки одной детали, когда износом инструмента можно пренебречь, тем самым, можно считать, что значения всех параметров системы постоянны. При обработке серии деталей значения коэффициентов будут меняться, по мере износа резца от одной детали к другой, что и будет определять изменение запаса устойчивости ДС-станка.

Для определения воздействий на устойчивость ДС по мере износа резца следует воспользоваться критерием Гурвица [10], применив его к характеристическому уравнению ДС. Исходя из знаменателя передаточной функции (4), получаем характеристическое уравнение четвертого порядка в виде:

$$a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0, \quad (5)$$

где $a_4 = K_p T_g^2 T_h h_u \tau_g$;

$a_3 = T_p T_g^2 + 2K_p T_g T_h \gamma_g h_u \tau_g + K_p T_g^2 T_h K_{up} \tau_g + K_p T_g^2 h_u \tau_g$;

$$a_2 = 2T_p T_g \gamma_g + T_g^2 + K_p T_h h_g \tau_g + K_p T_h h_u \tau_g + K_p K_{up} T_g^2 \tau_g + \\ + 2K_p K_{up} T_g T_h \gamma_g \tau_g + 2K_p T_g h_u \gamma_g \tau_g ;$$

$$a_1 = 2\gamma_g T_g + T_p + K_p K_{up} T_h \tau_g + K_p h_u \tau_g + \\ + K_p h_g \tau_g + 2K_p K_{up} T_g \gamma_g \tau_g ;$$

$$a_0 = 1 + K_p K_{up} \tau_g .$$

По критерию Гурвица, для устойчивости системы четвертого порядка необходимо и достаточно выполнения двух условий [10]:

- все коэффициенты a_i ($i = 0, 1, \dots, 4$) положительны;
- определитель третьего порядка $\Delta_3 = a_3 a_2 a_1 - a_3^2 a_0 - a_4 a_1^2 > 0$.

Первое условие выполняется, а для проверки второго условия можно воспользоваться значениями параметров $T_p, T_g, T_h, h_g, K_p, h_u, \gamma_g, \tau_g, K_{up}$ для токарных станков, приведенными в работах [11,12].

В период, соответствующий нормальному износу резца, известному из классической S-образной кривой износа инструмента, значение коэффициента износа K_{up} мало, тогда определитель $\Delta_3 > 0$ и, следовательно, ДС является устойчивой. Когда из периода нормального износа резец переходит в период катастрофического износа, резко возрастают значения коэффициентов K_{up} и K_p , что вызывает смену знака определителя $\Delta_3 < 0$, то есть ДС становится неустойчивой. Следовательно, оценкой изменения динамического качества ДС при износе инструмента может служить запас устойчивости, а существенное его снижение, определяющее начальную фазу катастрофического износа резца, следует рассматривать в качестве критерия окончания периода стойкости инструмента.

В результате проведения анализа устойчивости ДС, выполненного с использованием ее передаточной функции, выявлен факт смены состояния ДС устойчивого на неустойчивое по мере износа. Это подтверждается результатами исследований, приведенными в ряде работ [13-15], в которых также упоминается значительное возрастание вибрации в ДС и снижение точности обработки от снижения стойкости инструмента.

Таким образом, анализ построенной модели подтверждает целесообразность использования запаса устойчивости ДС токарного станка для выявления начальной фазы катастрофического износа резца, что позволяет на практике определить период стойкости инструмента.

Экспериментально-аналитический метод оценки стойкости с использованием показателя колебательности

Диапазон частот для анализа динамических сил резания инструмента не превышает 4 кГц, но нужно учитывать шумы ниже 50 Гц от находящихся рядом источников излучения, таких, как внешние шумы и помехи от двигателей [16].

Поиск показателя колебательности устанавливает строгий порядок. На инструментальный блок резца на магнитном основании устанавливают датчик вибрации [17]. Измерения сохраняют в формате WAVE-файла для обработки и анализа [18].

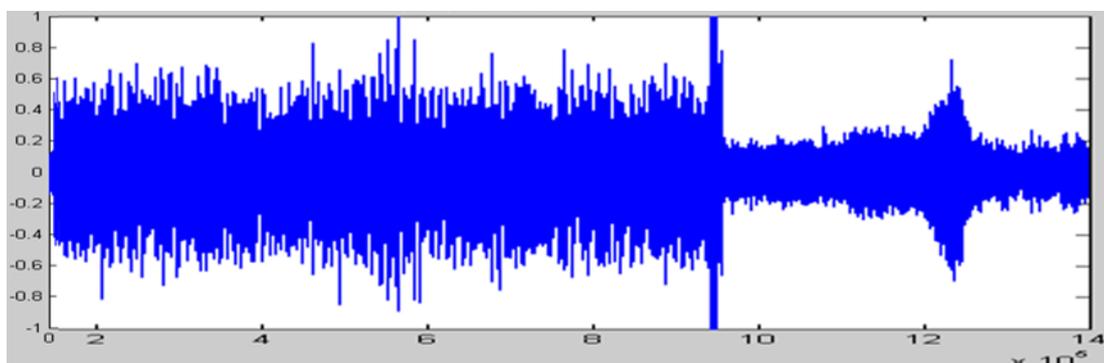


Рис. 2. – Запись вибраций резцового блока при точении детали

По выведенной ранее методике [8] выделяется передаточная функция:

$$W_3(p) = \frac{A(1+m)\sqrt{2}[(p+a)^2 + \omega_0^2]}{[(p+a)^2 + (\omega_0 + \Omega)^2][(p+a)^2 + (\omega_0 - \Omega)^2]} \quad (2)$$

Из передаточной функции путём замены $P=j\omega$, производится расчет амплитудно-частотной характеристики $A(\omega)$ [7]. Сопоставив начальное и максимальное показание АЧХ, выводится соответствующий показатель колебательности:

$$M_{\max} = \frac{[A(\omega)]_{\max}}{A(\omega_0)} \quad (3)$$

Имея ряд показателей, путем их анализа оценивается стойкость инструмента для рассматриваемых условий. В дальнейшем превышение показателем установленного значения стойкости предупреждает скорую поломку инструмента.

Результаты исследований

При работе главной целью было доказать полезность применения метода оценки стойкости инструмента по показателю колебательности. В процессе проведения эксперимента установили цель, состоящую в определении норм по смене режущей пластины инструмента при обработке. Регистрация виброакустических колебаний производилась прибором для измерения шума и вибрации ВШВ-003-М2. Процесс записи для последующей обработки происходил на переносном компьютере с предустановленным аудио-редактором WAVE-Lab [19].

Для анализа был выбран горизонтальный токарный обрабатывающий центр DOOSAN Lynx 2100M. Для анализа возможностей методики, обработка велась по ранее отработанной программе с рекомендуемыми производителем режимами, и на подобранных по результату оценки стойкости, скорректированных переменных подачи и оборотов. Измерения вибраций производились на чистовой обработке торцевой канавки с

требованиями по выдерживанию размера $\Phi 43+0,08$, ширине $3,2+0,1$ и глубине $2,2+0,1$ мм с чистотой обработки не больше Ra1.6. Стандартным значениям режимов в управляющей программе соответствовали режимы: подача - F0,075 мм/мин., скорость вращения шпинделя - S1200 об/мин, припуск оставленный на чистовой проход - 0,1 мм на сторону. Обработка осуществлялась за счёт врезания по центру обрабатываемой канавки с расширением размера на ширину попеременно. Обрабатываемые детали – направляющие втулки КПЗ-50-03-14, приборы типа КПЗ-50, клапан предохранительный запорный прямооточного типа, из материала - сталь 20. В ходе обработки были применены сменные пластины Kyocera TWFGGL 200 PR1535, с державкой Kyocera STWL2525M15 [20].

До проведения измерений, смена пластин производилась по факту несоответствия обработанной детали требованиям чертежа, что автоматически приводило к бракованной детали и потерям в производстве. При вычислении показателя колебательности для серии деталей, было установлено, что стойкость инструмента достигает своего предельного значения на 43-45 детали. Для справедливости оценки, как поверочный показатель использовалась зависимость между значением показателя колебательности, и шероховатостью обработанных поверхностей. Итоги измерений приведены в таблице №1.

С целью подбора новых режимов с поиском наилучшей стойкости поочередно были перебраны изменения в значениях подачи и скорости вращения шпинделя [21]. В результате были выявлены новые параметры: подача - F0.06, скорость вращения шпинделя - S2800. На подобранных режимах было отмечено выравнивание диапазона исчерпывания стойкости до 2 деталей и увеличение количества обработанных деталей до 51-52.

Таблица № 1

Результаты испытаний с поиском показателя колебательности до анализа стойкости

| № детали | Показатель колебательности | Допуск по шероховатости, Rz, мкм | Фактический результат по шероховатости Ra, мкм |
|----------|----------------------------|----------------------------------|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 1,02 | 1,6 | 1,08 |
| 2 | 1,03 | 1,6 | 1,1 |
| 3 | 1,02 | 1,6 | 1,09 |
| 4 | 1,01 | 1,6 | 1,05 |
| 6 | 1 | 1,6 | 0,8 |
| 8 | 1,04 | 1,6 | 0,88 |
| 12 | 1,05 | 1,6 | 1,1 |
| 16 | 1,04 | 1,6 | 1,09 |
| 20 | 1,14 | 1,6 | 1,11 |
| 24 | 1,14 | 1,6 | 1,15 |
| 28 | 1,13 | 1,6 | 1,12 |
| 32 | 1,2 | 1,6 | 1,14 |
| 36 | 1,25 | 1,6 | 1,2 |
| 40 | 1,19 | 1,6 | 1,24 |
| 43 | 1,29 | 1,6 | 1,4 |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 45 | 1,33 | 1,6 | 1,52 |
| 46 | 1,55 | 1,6 | 1,65 |
| 47 | 1,71 | 1,6 | 2,2 |

Учитывая природу чистовой обработки потерями во времени в 5 секунд на деталь, можно пренебречь в пользу повышения количества изготовленных за цикл использования пластины деталей, и более глубокого рычага контроля смены инструмента. За счет контролируемого цикла деталей рекомендована смена режущей пластины каждые 48 деталей с учётом пятипроцентного запаса стойкости инструмента. Итоги измерений, а также гистограмма сравнения полученных результатов до и после подбора режимов приведены в таблице №1, отталкиваясь от показателей.

Таблица № 2

Результаты испытаний с поиском показателя колебательности после анализа стойкости

| № детали | Показатель колебательности | Допуск по шероховатости, Rz, мкм | Фактический результат по шероховатости Ra, мкм |
|----------|----------------------------|----------------------------------|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 1,03 | 1,6 | 0,94 |
| 2 | 1,02 | 1,6 | 0,96 |
| 3 | 1,01 | 1,6 | 0,91 |
| 4 | 1,01 | 1,6 | 0,92 |
| 6 | 1 | 1,6 | 0,75 |
| 8 | 1,01 | 1,6 | 0,87 |
| 12 | 1,02 | 1,6 | 1,95 |
| 16 | 1,04 | 1,6 | 1,04 |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 20 | 1,12 | 1,6 | 1,1 |
| 24 | 1,14 | 1,6 | 1,11 |
| 28 | 1,13 | 1,6 | 1,14 |
| 32 | 1,19 | 1,6 | 1,14 |
| 36 | 1,2 | 1,6 | 1,2 |
| 40 | 1,22 | 1,6 | 1,24 |
| 43 | 1,24 | 1,6 | 1,37 |
| 45 | 1,28 | 1,6 | 1,32 |
| 46 | 1,3 | 1,6 | 1,35 |
| 47 | 1,31 | 1,6 | 1,3 |
| 48 | 1,36 | 1,6 | 1,33 |
| 49 | 1,4 | 1,6 | 1,38 |
| 50 | 1,42 | 1,6 | 1,52 |
| 51 | 1,45 | 1,6 | 1,55 |
| 52 | 1,49 | 1,6 | 1,58 |
| 53 | 1,75 | 1,6 | 1,9 |

Для лучшего визуального представления рассмотрены гистограммы результатов по оценке показателя колебательности и измеренной шероховатости, что использовались для нахождения стойкости до (Рис.3) и после проведения оптимизации режимов (Рис.4).

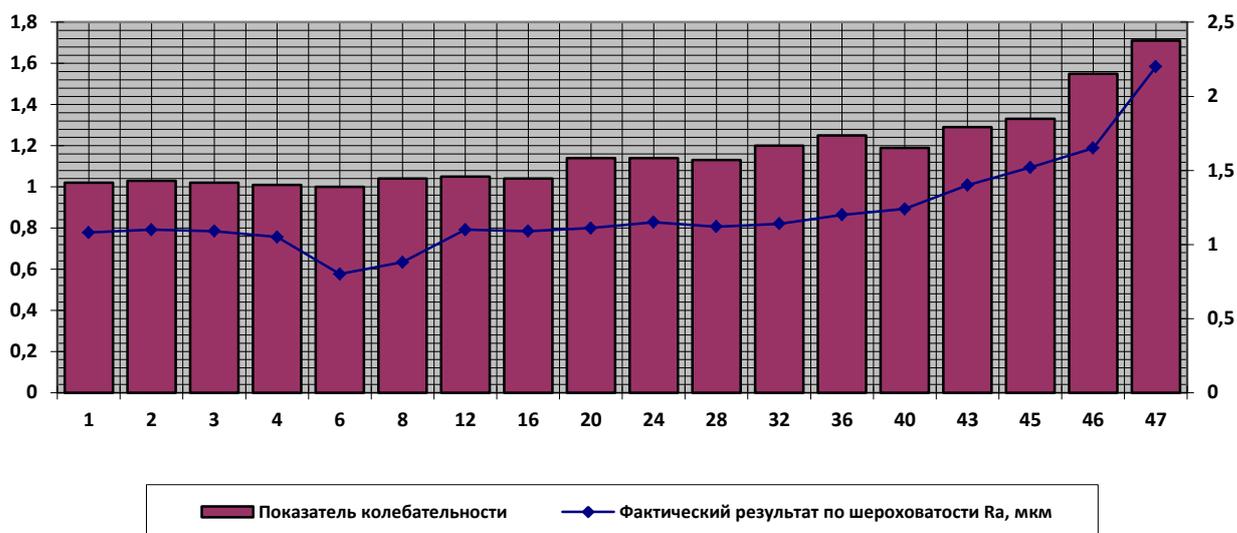


Рис.2. Результаты измерений показателя колебательности и шероховатости до корректировки режимов резания.

По представленным данным чётко виден результат анализа стойкости режущего инструмента и увеличение производительности деталей одного инструмента с 45 до 52 деталей.

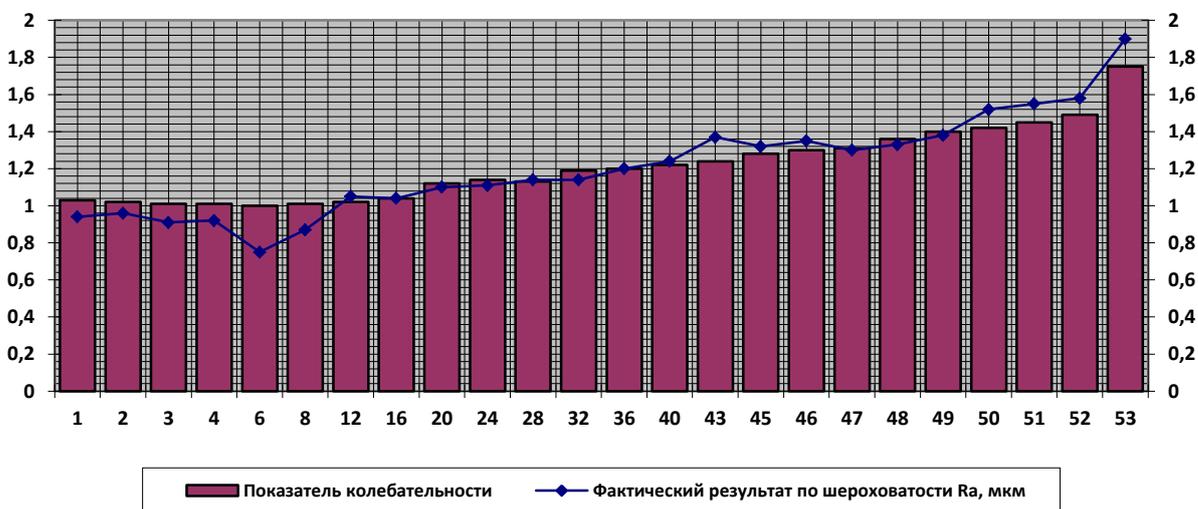


Рис.3. Результаты измерений показателя колебательности и шероховатости в результате корректировки режимов резания.

Заключение

Использование метода оценки стойкости режущего инструмента по показателю колебательности динамической системы позволяет не только

провести оценку периодичности смены инструмента, но и подобрать режимы резания для наиболее оптимальной обработки, соответствующей поставленной задаче. Смена инструмента не будет происходить лишь по факту поломки и брака изготавливаемой детали, а будет нести управляемый характер, наиболее удобный для нормирования труда, расхода инструмента и планирования производства, что особенно важно для крупных организаций с высокими требованиями к производимой продукции [22].

Посредством анализа была выявлена фактическая стойкость используемых пластин на стандартных режимах резания, и посредством серии измерений с корректировкой режимов выявлено оптимальное сочетание подачи и скорости вращения шпинделя, позволяющие повысить стойкость инструмента на серию деталей на 18% с учётом установления запаса стойкости в пределах 5%.

Использование метода с применением показателя колебательности динамической системы для оценки стойкости инструмента наиболее выгодно, исходя из требований к используемому для анализа оборудованию, и позволяет оценивать широкий спектр режущего инструмента различного вида, не ограничиваясь стандартными пластинами типа vbmt, dcmt, scmt.

Литература

1. Пономарев А.И., Игнатьев А.А. Применение показателя колебательности динамической системы станка для идентификации катастрофического износа резца // Инженерный вестник Дона, 2022. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2022/7598/.
 2. Игнатьев А.А., Добряков В.А., Захарченко М.Ю., Игнатьев С.А., Каракозова В.А., Березина Е.В. Автоматизированный неразрушающий контроль в системе мониторинга технологического процесса производства подшипников // Инженерный вестник Дона, 2021. № 9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7193/.
-



3. Аршанский М.М., Щербаков В.П. Вибродиагностика и управление точностью на металлорежущих станках. М.: Машиностроение. 1988. 136 с.
 4. Мартинов Г.М., Григорьев А.С. Диагностирование режущих инструментов и прогнозирование остаточной стойкости на станках с ЧПУ в процессе обработки // СТИН. 2012. № 2. С. 23-28.
 5. Козочкин М.П., Гурин В.Д., Сабиров Ф.С. Диагностика и мониторинг сложных технологических процессов с помощью измерения виброакустических сигналов // Измерительная техника. 2006. № 7. С. 30-34.
 6. Тугенгольд А.К., Шучев К.Г., Изюмов А.И., Терехов Д.Ю. Оценка нечеткой границы стойкости инструмента многооперационного станка// Вестник ДГТУ. 2015. №2(81). С. 33 – 41.
 7. Игнатьев А.А., Добряков В.А., Игнатьев С.А. Автоматизированное распознавание катастрофического износа инструмента по стохастическим характеристикам виброакустических колебаний: монография. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2020. 84 с.
 8. Пономарев А.И., Игнатьев А.А. Контроль состояния инструмента при токарной обработке на основе оценки показателя колебательности динамической системы // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2020. № 3 (86). С. 19-24.
 9. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
 10. Егоров К.В. Основы теории автоматического регулирования. М.: Энергия, 1967. 648 с.
 11. Попов В.И., Локтев В.И. Динамика станков. Киев: Техника, 1975. 136 с.
 12. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1978. 200 с.
-

13. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. М.: Машиностроение, 1988. 184 с.
 14. Малыхин В.В., Яцун Я.И., Новиков С.Г. Виброакустическая диагностика состояния режущего инструмента и микронеровностей обрабатываемой поверхности // Справочник. Инженерный журнал. 2014. № 4. С. 31-35.
 15. Безъязычный В.Ф., Сутягин А.Н. Взаимосвязь шероховатости обработанной поверхности с параметрами вибраций технологической системы СПИЗ при обработке точением // СТИН. 2019. № 2. С. 28-32.
 16. Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин. Омск: Издательство Омского государственного технического университета, 2011. 360 с.
 17. Suchil K. Birla Sensors for adaptive control and diagnosis of machine tools // Machine Building Technology, 1980. v. 10. № 4. - P. 7.12-1. -7.12-70.
 18. Пономарев А.И., Игнатъев А.А. Контроль износа резца по вибрационным характеристикам // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2020. С. 74-77.
 19. De Silva C.W. Vibration Monitoring, Testing, and Instrumentation. CRC Press. Taylor & Francis Group, 2007. 696 p.
 20. Indexable General Catalog Kyocera — (2022–2023)
 21. Ташлицкий Н. И. Гипотезы теории изнашивания твердосплавного режущего инструмента // М.: Вестник машиностроения. 2011. № 4. С. 88.
 22. Григорьев С.Н., Гурин В.Д., Козочкин М.П. Диагностика автоматизированного производства. Москва: Машиностроение, 2011. 600 с.
-

References

1. Ponomarev A.I., Ignat'ev A.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2022/7598/.
 2. Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Zaharchenko M.Yu. et al. Inzhenernyj vestnik Dona, 2021, №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7193/.
 3. Arshanskij M.M., Shherbakov V.P. Vibrodiagnostika i upravlenie tochnost'ju na metallovezhushhih stankah [Vibration diagnostics and precision control on machine tools]. M.: Mashinostroenie. 1988. 136 p.
 4. Martinov G.M., Grigor'ev A.S. STIN. 2012. № 2. pp. 23-28.
 5. Kozochkin M.P., Gurin V.D., Sabirov F.S. Izmeritel'naja tehnika. 2006. № 7. pp. 30-34.
 6. Tugengold A.K., Shuchev K.G., Iziumov A.I., Terekhov D.Yu. Vestnik DGTU. 2015. № 2. pp. 33-41.
 7. Ignat'ev A.A., Dobryakov V.A., Ignat'ev S.A.1 Avtomatizirovannoe raspoznavanie katastroficheskogo iznosa instrumenta po stohasticheskim harakteristikam vibroakusticheskikh kolebanij: monografija [Automated recognition of catastrophic tool wear by stochastic characteristics of vibroacoustic vibrations: monograph]. Saratov: Sarat. gos. tehn. un-t, 2020. 84 p.
 8. Ponomarev A.I., Ignat'ev A.A. Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2020. № 3 (86). pp. 19-24.
 9. Kudinov V.A. Dinamika stankov [Machine tool dynamics]. M.: Mashinostroenie, 1967. 360 p.
 10. Egorov K.V. Osnovy teorii avtomaticheskogo regulirovaniya [Fundamentals of the Theory of Automatic Regulation]. M.: Mashinostroenie, 1988. 56 p.
 11. Popov V.I., Loktev V.I. Dinamika stankov [Dynamics of machines]. Kiev: Technique, 1975. 136 p.
-

12. Kedrov S.S. Kolebaniya metallorezhushchih stankov [Vibrations of metal-cutting machines]. M.: Mashinostroenie. 1978. 200 p.
13. Zharkov I.G. Vibracii pri obrabotke lezviynym instrumentom [Vibrations during machining with a blade tool]. M.: Mashino-stroenie, , 1988. 184 p.
14. Malykhin V.V., Yatsun Ya. Engineering Journal.. 2014. № 4. pp. 31-35.
15. Bez'yazichny V.F., Sutyagin A.N. STIN., 2019. № 2. pp. 28-32.
16. Kostjukov V.N. Osnovy vibroakusticheskoy diagnostiki i monitoringa mashin [Fundamentals of vibroacoustic diagnostics and machine monitoring]. Omsk: Izdatel'stvo Omskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta, 2011. 360 p.
17. Suchil K. Birla Sensors for adaptive control and diagnosis of machine tools. Machine Building Technology. 1980. v. 10. № 4. P. 7.12. pp. 1-70.
18. Ponomarev A.I., Ignat'ev A.A. Avtomatizacija i upravlenie v mashino- i priborostroenii: sb. nauch. tr. Saratov: SGTU, 2020. pp. 74-77.
19. De Silva C.W. Vibration Monitoring, Testing, and Instrumentation. CRC Press. Taylor & Francis Group, 2007. 696 p.
20. Indexable General Catalog Kyocera (2022–2023)
21. Tashlitsky, N. I. M., Vestnik Mashinostroeniya. № 4. 2011, p. 88.
22. Grigor'ev S.N. Diagnostika avtomatizirovannogo proizvodstva [Diagnosis of automated production]. Moskva: Mashinostroenie, 2011. 600 p.