

УДК 621.9.02:681.5

Гибадулин Руслан Рашитович
студент, 4 курс, Институт цифровых интеллектуальных систем,
направления подготовки 15.03.04 «Автоматизация технологических
процессов и производств»
ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Россия, г. Москва

Сидоренко Максим Сергеевич
студент, 4 курс, Институт цифровых интеллектуальных систем
направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»
ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Россия, г. Москва

Колесников Евгений Александрович
студент, 4 курс, Институт цифровых интеллектуальных систем
направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»
ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Россия, г. Москва

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ИЗНОСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В ПРОЦЕССЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Аннотация. Предложен вариант автоматизированной системы текущего контроля состояния режущего инструмента на станке с ЧПУ, основанный на совместном анализе вибрационного сигнала, нагрузки шпиндельного привода и технологического контекста обработки. В отличие от контроля по одному диагностическому признаку, структура предусматривает нормирование информативных параметров относительно базового состояния нового инструмента и формирование интегрального индекса износа. Разработан алгоритм, разделяющий состояния «норма»,

Научное издательство «Фокус знаний»

«развивающийся износ», «предельное состояние» и «аномалия процесса». Приведен расчетный пример для токарной обработки, показывающий принцип формирования диагностического решения без заявления о проведении натурного эксперимента. Рассмотрены вопросы интеграции диагностического модуля с ЧПУ и производственной системой.

Ключевые слова: *режущий инструмент, износ, станок с ЧПУ, мониторинг, вибрация, нагрузка шпинделя, диагностика, автоматизация.*

Annotation: *An automated in-process cutting tool condition monitoring system for CNC machining is proposed. The system combines vibration features, spindle-drive load and machining context. Diagnostic features are normalized against the baseline state of a new tool and combined into an integral wear index. The decision algorithm distinguishes normal operation, developing wear, limiting condition and process anomaly. A calculation example for turning demonstrates the decision principle without claiming physical experimental results. Integration of the diagnostic module with CNC and production-level systems is also considered.*

Key words: *cutting tool, wear, CNC machine, monitoring, vibration, spindle load, diagnostics, automation.*

Режущий инструмент является одним из элементов технологической системы, состояние которого непосредственно влияет на точность размеров, шероховатость поверхности, устойчивость процесса резания и вероятность незапланированной остановки оборудования. В автоматизированном производстве проблема усиливается тем, что оператор не может непрерывно оценивать состояние каждой режущей кромки. Поэтому контроль целесообразно переносить из периодической ручной проверки в цикл работы станка.

В соответствии с терминологией ГОСТ 25751-83 работоспособное состояние инструмента связано с сохранением параметров, обеспечивающих выполнение обработки при установленных требованиях, а критерием затупления служит максимально допустимое значение износа, после

достижения которого наступает отказ [1]. Для лезвийного инструмента распространенным геометрическим показателем является ширина площадки износа по задней поверхности VB. Однако прямое измерение VB во время резания затруднено, поэтому в автоматизированной системе требуется косвенная оценка.

Исследования МГТУ «СТАНКИН» показывают актуальность моделирования и анализа закономерностей износа инструмента для описания процесса обработки, в том числе при работе с труднообрабатываемыми материалами [2]. Для автоматического контроля это означает необходимость учитывать режим резания, материал заготовки, тип операции и геометрию инструмента, а не использовать единый порог для всех технологических ситуаций.

Таблица 1.

Логика классификации состояния инструмента

Контролируемое состояние	Характеристика	Действие системы
Норма	Признаки близки к базовому уровню	Продолжение обработки
Развивающийся износ	Устойчивый рост диагностического индекса	Предупреждение, оценка остаточного ресурса
Предельное состояние	Индекс достигает установленного порога	Плановая смена инструмента
Аномалия	Резкий скачок одного или нескольких признаков	Останов/проверка процесса

Для контроля износа могут применяться силы резания, акустическая эмиссия, вибрация, мощность или нагрузка привода, температура, параметры качества обработанной поверхности и комбинированные сигналы. Выбор канала определяется доступностью датчиков, требуемой чувствительностью и возможностью встроить контроль в существующий станок.

Вибрационный канал привлекателен тем, что акселерометр может быть установлен на резцедержателе, шпиндельном узле или другом элементе несущей системы без вмешательства в силовую цепь. Российские исследования подтверждают информативность параметров виброакустических сигналов для оценки состояния режущего инструмента и

процесса резания [3]. При этом отдельный спектральный пик не следует автоматически интерпретировать как износ: на вибрацию влияют частота вращения, зубцовая частота, жесткость системы, дисбаланс и колебания припуска.

Вторым каналом предлагается использовать параметр нагрузки шпиндельного привода, доступный из ЧПУ или сервосистемы. Рост износа способен увеличивать силы резания и, следовательно, требуемый момент. Однако простой ток двигателя не всегда пропорционален механической нагрузке во всем диапазоне частот вращения, поэтому предпочтительнее использовать расчетный момент, активную мощность либо внутреннюю оценку нагрузки привода [4].

Таблица 2.

Информационные каналы диагностической системы

Канал	Преимущество	Ограничение	Предлагаемый признак
Вибрация	Высокая динамическая чувствительность	Зависимость от режима и конструкции	RMS, спектральная энергия
Привод шпинделя	Часто доступен без внешнего датчика	Нелинейная связь с нагрузкой	Момент/активная мощность
ЧПУ	Технологический контекст	Не является прямым признаком износа	Режим, время резания
Контроль детали	Связь с качеством продукции	Запаздывающая информация	Отклонение размера/шероховатости

Предлагаемая архитектура строится по модульному принципу. На нижнем уровне располагаются акселерометр, привод шпинделя и ЧПУ. Измерительные данные поступают в модуль предварительной обработки, где выполняются синхронизация, фильтрация, удаление участков холостого хода и выделение временных окон устойчивого резания. Далее вычисляются диагностические признаки.

Для вибрационного сигнала $x(t)$ базовым параметром принимается среднеквадратическое значение $a_{RMS} = \sqrt{[(1/N)\sum x_i^2]}$. Дополнительно рассчитывается энергия в заранее выбранной частотной полосе, связанной с процессом резания. Для привода используется среднее значение момента или активной мощности на том же временном окне. Синхронность окон

принципиальна: признаки должны описывать один и тот же участок обработки.

Архитектурная модель диагностической системы, взаимодействующей с ядром ЧПУ, ранее рассматривалась российскими исследователями как способ организации мониторинга и прогнозирования состояния инструмента в реальном времени [5]. В предлагаемом варианте диагностический модуль не вмешивается непосредственно в интерполяционный цикл ЧПУ. Он формирует статус инструмента и рекомендуемое действие, а выполнение останова или смены инструмента производится штатной логикой станка.

Для повышения переносимости система хранит отдельный паспорт диагностической модели для каждой комбинации «инструмент - материал - операция». Паспорт включает базовые уровни признаков нового инструмента, допустимые диапазоны режимов, пороги индекса и минимальную продолжительность подтверждения состояния.

Использование нескольких каналов требует приведения признаков к безразмерному виду. Для каждого признака z_j вводится базовое значение $z_{j,0}$, определенное при исправном новом инструменте на заданном режиме. Текущее относительное изменение рассчитывается как $q_j = (z_j - z_{j,0}) / z_{j,0}$. Для признаков, уменьшающихся с износом, знак преобразования меняется.

Интегральный диагностический индекс предлагается определять взвешенной суммой $I_w = \sum w_j \cdot q_j$, где $w_j \geq 0$ и $\sum w_j = 1$. В простейшем варианте используются три составляющие: изменение RMS вибрации, изменение спектральной энергии и изменение нагрузки шпинделя. Весовые коэффициенты выбираются по чувствительности признаков на этапе настройки.

Чтобы исключить ложное решение из-за единичного выброса, индекс сглаживается экспоненциальным фильтром $I_k = \alpha I_{w,k} + (1 - \alpha) I_{k-1}$. Состояние считается подтвержденным только тогда, когда соответствующий порог превышен в нескольких последовательных окнах. Для обнаружения скола дополнительно применяется критерий скорости изменения $\Delta I / \Delta t$.

Таблица 3.

Настраиваемые параметры диагностической логики

Параметр	Обозначение	Пример назначения
Нижний порог	I_1	Начало устойчивого развивающегося износа
Верхний порог	I_2	Предельное состояние инструмента
Порог скачка	$dI_{кр}/dt$	Вероятное выкрашивание/поломка
Коэффициент фильтра	α	Подавление случайных выбросов
Число подтверждений	m	Защита от ложной тревоги

Алгоритм работы в составе станка с ЧПУ

- 1) После вызова инструмента ЧПУ передает диагностическому модулю его идентификатор и номер технологической операции.
- 2) До врезания выполняется контроль исправности измерительного канала и считывается текущий режим обработки.
- 3) После подтверждения устойчивого резания начинается накопление синхронного окна вибрации и параметров шпиндельного привода.
- 4) Из окна исключаются переходные участки разгона, врезания, выхода инструмента и ускоренного перемещения.
- 5) Рассчитываются признаки, выполняется их нормирование относительно паспортного базового состояния и формируется индекс I .
- 6) При $I < I_1$ сохраняется статус «норма». При $I_1 \leq I < I_2$ формируется предупреждение и сокращается интервал между диагностическими оценками.
- 7) При $I \geq I_2$ в течение m последовательных окон ЧПУ получает командный флаг «замена инструмента после завершения безопасного участка программы».
- 8) При резком превышении критерия dI/dt формируется статус «аномалия», который может инициировать немедленный контролируемый останов.

9) После смены пластины или инструмента оператор подтверждает обслуживание, счетчик стойкости сбрасывается, а новая серия данных используется для проверки базового уровня.

Алгоритм принципиально не должен останавливать станок только на основании одного зашумленного измерения. Решение о предельном состоянии формируется с временным подтверждением. Исключение составляет признак внезапного разрушения, для которого допустима более быстрая реакция.

Для иллюстрации рассмотрим условный расчетный набор данных токарной обработки. Он не является результатом натурного эксперимента и используется только для проверки логики алгоритма. За базовый уровень нового инструмента приняты $a_{RMS,0}=1,00$; $E_0=1,00$; $M_0=1,00$ в относительных единицах. Весовые коэффициенты: 0,40; 0,35 и 0,25 соответственно.

Таблица 4.

Расчетный пример изменения диагностических признаков

Стадия	aRMS	E	M	Интегральный индекс I
Новый инструмент	1,00	1,00	1,00	0,000
Начальный износ	1,12	1,10	1,05	0,096
Развивающийся износ	1,28	1,25	1,14	0,234
Выраженный износ	1,47	1,42	1,25	0,397
Предельное состояние	1,68	1,61	1,38	0,581

Для приведенных данных индекс последовательно возрастает примерно от 0 до 0,57. Если условно принять $I_1=0,20$ и $I_2=0,50$, то третья стадия будет классифицирована как развивающийся износ, а последняя - как предельное состояние. Пороговые значения в реальной системе должны определяться не расчетным предположением, а по серии контролируемых испытаний с прямым измерением фактического износа.

Для проверки качества будущей системы следует использовать матрицу ошибок классификации, долю ложных тревог, вероятность пропуска

предельного состояния и среднее упреждение до фактического отказа. Именно эти показатели позволяют оценить практическую ценность диагностики, а не только корреляцию отдельного сигнала с износом.

Перед промышленным применением требуется этап параметрической настройки. Для каждой типовой операции выполняется серия обработок инструментом от нового состояния до установленного критерия затупления. Через заданные интервалы производится прямое измерение износа, а соответствующие участки сигналов маркируются. Такая процедура формирует эталонную выборку.

Выбор порогов следует выполнять отдельно для разных семейств операций. Для чернового точения допустимая вариативность сигналов выше, чем для чистовой обработки. При фрезеровании необходимо учитывать периодичность вхождения зубьев в резание и число реально работающих режущих кромок. При сверлении характер информативных участков меняется по мере углубления инструмента.

Верификация должна проводиться на данных, не использованных при настройке. Если пороги проверяются на той же выборке, по которой они были выбраны, точность будет завышена. Для практической системы важна устойчивость к изменению партии заготовок, небольшим изменениям закрепления и естественному разбросу режущих пластин.

Таблица 5.

Последовательность подготовки диагностической модели

Этап	Исходные данные	Результат
Калибровка	Новый инструмент	Базовые уровни признаков
Стойкостные испытания	Сигналы + прямое измерение VB	Связь признаков с износом
Настройка	Маркированные данные	Веса и пороги
Верификация	Независимые циклы обработки	Оценка ошибок
Эксплуатация	Потоковые данные	Текущий статус инструмента

На уровне станка диагностический модуль должен обмениваться с ЧПУ минимальным набором данных: идентификатор инструмента, состояние цикла, текущий режим, диагностический статус и оценка накопленного

ресурса. На уровне производственной системы информация может использоваться для планирования смены инструмента, учета фактической стойкости и анализа причин брака.

Практический эффект возникает не только за счет предотвращения поломки. Слишком ранняя регламентная замена приводит к недоиспользованию ресурса режущей пластины, а слишком поздняя повышает риск брака и аварий. Контроль по фактическому состоянию позволяет перейти от фиксированного интервала смены к обслуживанию по состоянию.

Перспективным направлением является комплексный мониторинг динамических параметров процесса резания, при котором несколько информационных каналов рассматриваются совместно. Современные российские исследования подчеркивают необходимость такого подхода для оценки состояния системы «станок–инструмент–заготовка» [8].

Для внедрения предлагаемой системы целесообразно начинать с одной массовой операции и одного типа инструмента; использовать признаки, физически связанные с процессом резания; сохранять исходные сигналы для последующего пересмотра модели; отделять порог постепенного износа от порога аварийной аномалии; регулярно сопоставлять автоматическую оценку с прямым контролем режущей кромки.

Сформирован интегральный индекс состояния, предусматривающий нормирование признаков относительно базового уровня нового инструмента, их взвешивание и временное подтверждение диагностического решения. Разделение состояний «норма», «развивающийся износ», «предельное состояние» и «аномалия» позволяет связать результаты мониторинга с конкретными действиями ЧПУ.

Расчетный пример показал принцип работы индекса, но не заменяет экспериментальной настройки. Для реального внедрения пороги и весовые коэффициенты должны определяться по стойкостным испытаниям с прямым измерением износа. Предлагаемая архитектура соответствует задачам мехатроники и автоматизации технологических процессов, поскольку

объединяет сенсорный контроль, обработку сигналов, данные электропривода, ЧПУ и алгоритм принятия решения.

Использованные источники:

1. ГОСТ 25751-83. Инструменты режущие. Термины и определения общих понятий.
2. Исаев А. В., Николаев М. С. Анализ моделей износа режущего инструмента, используемых для имитации обработки труднообрабатываемых материалов сборными фрезами в системах инженерного анализа // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2024. № 1 (68). С. 75–86.
3. Алленов Д. Г., Журавлев Г. Г., Козочкин М. П., Маслов А. Р. Параметры вибраций при изменении состояния и качества крепления режущих вставок модульного инструмента в условиях автоматизированной обработки резанием // Технология машиностроения. 2022. № 1. С. 16–25.
4. Системы мониторинга станков с ЧПУ в России. Обзор технологий и рынка // САПР и графика. 2016.
5. Григорьев А. С., Мартинова Л. И., Соколов С. В. Диагностика и прогноз износа режущего инструмента в процессе обработки на станках с ЧПУ // Автоматизация в промышленности. 2010. № 5. С. 46–50.
6. Комшин А. С., Сырицкий А. Б., Потапов К. Г. и др. Способ контроля износа режущего инструмента токарного станка в процессе обработки детали: патент РФ № 2680632. Оpubл. 25.02.2019.