

На правах рукописи

Сырицкий Антони Борисович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА И СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА ТЕКУЩЕГО
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТОКАРНОГО ИНСТРУМЕНТА
НА БАЗЕ ФАЗОХРОНОМЕТРИЧЕСКОГО ПОДХОДА**

Специальность 05.11.15 - Метрология и метрологическое обеспечение

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук



Москва, 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана».

Научный руководитель **Комшин Александр Сергеевич**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Телешевский Владимир Ильич**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Измерительные информационные
системы и технологии» МГТУ «СТАНКИН»

Кутяйкин Василий Георгиевич
кандидат технических наук,
заведующий кафедрой «Стандартизация, сертификация и
управление качеством» Нижегородского филиала ФГАОУ
ДПО «Академия стандартизации, метрологии и
сертификации (учебная)»

Ведущая организация Всероссийский научно-исследовательский институт
метрологической службы, г. Москва

Защита диссертации состоится _____ 2016 г. в ____ часов на заседании
диссертационного совета Д212.141.18 при Федеральном государственном
бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального
образования «Московский государственный технический университет им.
Н. Э. Баумана», по адресу 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью,
просьба высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.bmstu.ru
Телефон для справок: +7 (499)267 09 63

Автореферат разослан «____» 2016 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д212.141.18,
доктор технических наук,
профессор

Цветков Юрий Борисович



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Задача определения технического состояния режущего инструмента в процессе обработки является одной из важнейших для повышения надежности и эффективности металлообработки.

Повышенное внимание к мониторингу состояния инструмента вызвано тем, что пропущенный отказ инструмента является во многих случаях основной причиной брака, а также причиной отказа инструмента, работающего на последующих операциях, а иногда и причиной выхода из строя узлов станка. Оценка фактического состояния режущей кромки инструмента позволяет предотвратить эти события.

Цель диссертации заключается в разработке методологии, технических средств и измерительных технологий информационно-метрологического сопровождения металлообработки, базирующихся на фазохронометрическом (ФХМ) подходе, и позволяющих с высокой точностью осуществлять мониторинг фактического технического состояния режущей кромки токарных пластин непосредственно в процессе обработки.

Для достижения установленной цели в диссертации были поставлены следующие **задачи**:

- определение критериев и видов износа токарного инструмента, а также геометрических характеристик с использованием современных средств оптической, растровой электронной и атомно-силовой микроскопии;
- разработка технических требований к системе информационно-метрологического сопровождения процесса обработки деталей на металлорежущих станках;
- разработка математической модели износа режущего инструмента в фазохронометрическом представлении;
- разработка и создание фазохронометрической системы получения измерительной информации для изучения процесса резания и износа режущего инструмента в процессе технологических операций;
- оценка метрологических характеристик разработанной системы получения измерительной информации;
- проведение испытаний разработанной системы с целью подтверждения работоспособности;
- проведение экспериментальных исследований процесса обработки в фазохронометрическом представлении на станках токарной группы;
- разработка базирующейся на фазохронометрической информации методики прогнозирования технического состояния инструмента в процессе резания.

Методология исследования. В работе использован математический аппарат прикладной метрологии в сочетании с методами теоретической механики, теории колебаний, сопротивления материалов, моделирования динамических систем и трибологии, анализа временных рядов.

Экспериментальные исследования выполнялись в лабораторных и в производственных условиях с использованием современного токарного инструмента и оборудования. Обработка результатов осуществлялась на персональных электронно-вычислительных машинах с применением методов теории обработки результатов многократных измерений, методов теорий случайных сигналов и спектрального анализа, отвечающих требованиям нормативов прикладной метрологии.

Научная новизна результатов. Впервые разработан подход к получению информации о состоянии режущего инструмента в процессе обработки, а также к прогнозированию его состояния на основании результатов хронометрических измерений. Также впервые на базе фазохронометрического метода теоретически и экспериментально обоснованы новые методы обработки измерительной информации.

Практическая значимость работы

Результаты диссертации поддержаны в рамках проектов:

- ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 г.г. ГК №16.740.11.0710 от 08 июня 2011 г. «Разработка научных основ и технических средств прецизионного измерительного вычислительного сопровождения жизненного цикла машин и механизмов в области станкостроения»;

- программа «УМНИК» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (договор №1381ГУ2/2014, №5992ГУ2/2015)

- стипендия Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам 2015-2017 (СП-275.2015.1)

Результаты работы нашли отражение в учебных дисциплинах, читаемых студентам МГТУ им. Н.Э. Баумана: «Метрологическое обеспечение жизненного цикла изделий», «Физические основы измерений и эталоны», «Автоматизация измерений, контроля и испытаний».

Результаты диссертации позволяют осуществлять прогнозирующий мониторинг и контроль износа режущего инструмента в процессе обработки в режиме реального времени.

Достоверность результатов основывается на привязке хронометрических методик к Государственной поверочной схеме для средств измерения времени и частоты, идентификации применяемых математических моделей объектов в фазохронометрическом представлении, определении их метрологических характеристик и верификации.

Результаты работы подтверждены опытной эксплуатацией на АО «Раменский приборостроительный завод» (г. Раменское).

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-технической конференции «Студенческая весна 2013: Машиностроительные технологии» (Москва 2013), Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений» (Москва 2013), Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее

машиностроения России» (Москва 2013), одиннадцатой сессии Международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надёжности и диагностики машин и механизмов» (Санкт-Петербург 2013), Всероссийском совещании-семинаре «Инженерно-физические проблемы новой техники» (Москва 2014), Международной инновационно-ориентированной конференции молодых учёных и студентов МИКМУС (Москва 2014), Международной научно-технической конференции «Современные научноемкие технологии, оборудование и инструменты в машиностроении» (Санкт-Петербург 2014), Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и проблемы измерений» (Москва 2014), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Россия молодая» (Кемерово 2015), Научно-практической конференции «Современное состояние науки и практики в областях стандартизации, метрологии и управления качеством в Российской Федерации» (Владимир 2015), Международной молодежной научной школе-конференции «Современные проблемы физики и технологий» (Москва 2015), Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы-2015» (Казань 2015), Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва 2015), Международной инновационно-ориентированной конференции молодых учёных и студентов (МИКМУС-2015) (Москва 2015), Всероссийском совещании-семинаре «Инженерно-физические проблемы новой техники» (Москва 2016).

На защиту выносится метод мониторинга технического состояния токарного инструмента в процессе обработки на базе фазохронометрического подхода, материалы разработки специализированного блока обработки измерительной информации, фазохронометрические результаты экспериментальных исследований процесса резания на станках токарной группы, методика прогнозирования состояния режущего инструмента в процессе обработки.

Основные результаты диссертации опубликованы в 27 научных работах. Из них 10 - в рецензируемых научных изданиях, среди которых 7 входят в Перечень ВАК РФ, 16 тезисов докладов и патент №2561236 «Способ диагностирования циклических машин - металлорежущих станков фазохронометрическим методом».

Структура работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов по диссертации, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 99 наименований, приложения. Она содержит 135 страниц машинописного текста, 83 рисунка, 21 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, поставлены цели и задачи работы, определено её содержание, указаны основные положения, выносимые на защиту, выделены научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе приведен анализ существующих подходов в области диагностики и мониторинга состояния токарного инструмента в процессе

обработки. Вопросам надежности режущего инструмента, формирования критериев износа, разработки информационно-измерительных систем диагностики инструмента посвящены работы Лоладзе Н.Т., Бржовского Б.М., Зориктуева В.Ц., Безъязычного В.Ф., Григорьева С.Н., Козочкина М.П., Сабирова Ф.С., Залога В.А., Макарова В.Ф., Астахова В.П. и других.

На основании анализа известных методов диагностики выявлены присущие им преимущества и недостатки, сформулирована актуальность разработки нового метода мониторинга состояния инструмента, при этом предложено использовать в качестве базового фазохронометрический метод диагностики.

Проведенный литературный обзор позволил поставить цель и сформулировать задачи исследования.

Во второй главе рассматриваются виды выхода из строя режущего инструмента и методы измерения геометрических параметров режущей кромки, такие как оптическая, растровая электронная и атомно-силовая виды микроскопии. Для каждого метода приведены типичные и возможные области применения в сфере метрологического сопровождения металлообработки, а также ограничения и трудности, возникающие при их использовании.

Также в данной главе приводятся материалы разработки блока обработки измерительной информации, который является основной частью аппаратной части системы мониторинга.

Система мониторинга состоит из трех основных модулей (Рисунок 1): измерительный преобразователь (датчик ЛИР-158А производства ОАО «СКБ ИС»), блок обработки измерительной информации (БОИИ) и подсистема вывода информации оператору станка (в данном варианте – дисплей).

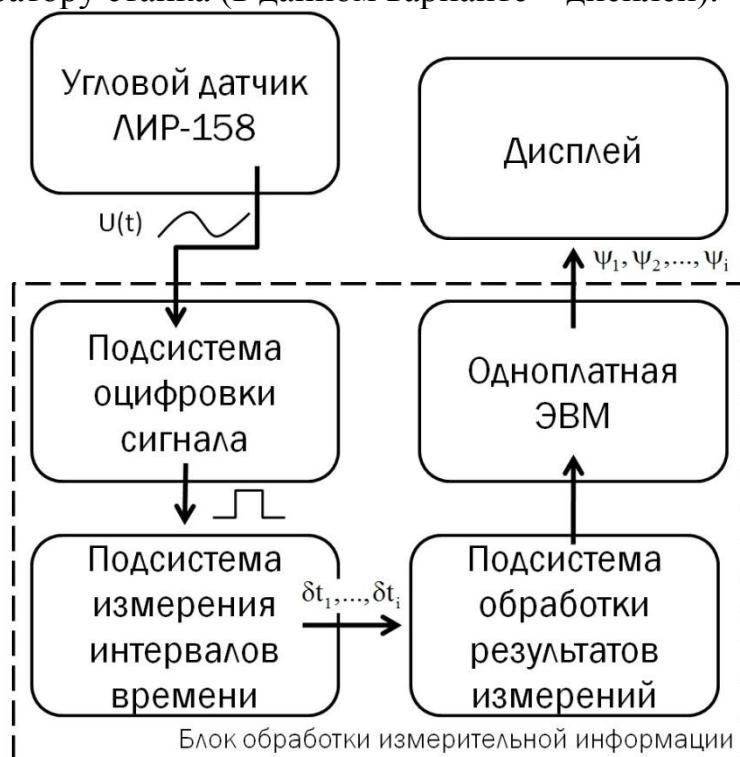


Рисунок 1. Функциональная схема системы мониторинга

Установленный на шпиндель станка угловой датчик вырабатывает аналоговый синусоидальный измерительный сигнал $U(t)$, затем поступающий на вход блока обработки измерительной информации. Подсистема оцифровки сигнала при помощи аналоговых компараторов преобразует аналоговый сигнал в удобный для дальнейшей обработки цифровой вид (рисунок 2).

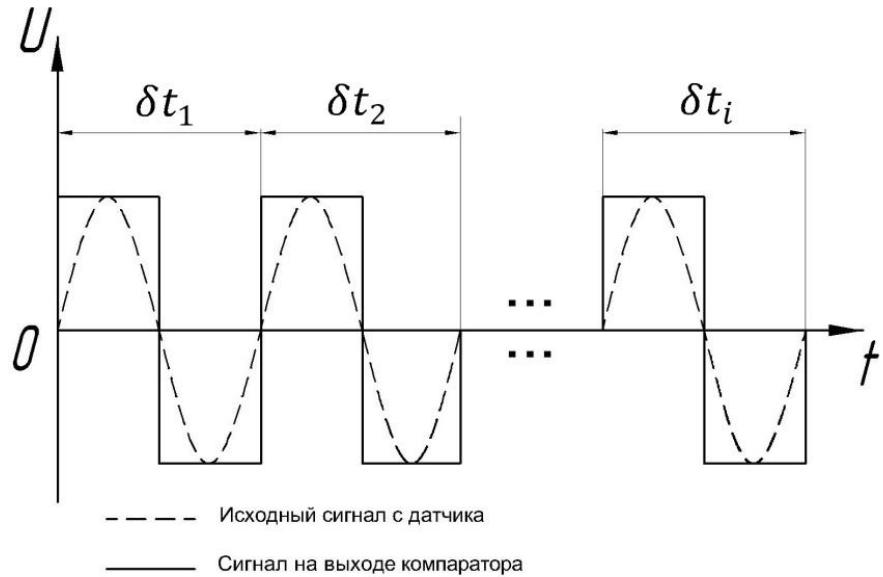


Рисунок 2. Преобразование сигнала из аналогового синусоидального в прямоугольный

На основании измеренных значений интервалов времени $\delta t_1, \delta t_2 \dots \delta t_i$ в удобном для восприятия оператором виде формируется информация $\Psi_1, \Psi_2 \dots \Psi_i$ отражающая текущее состояние токарного инструмента.

Суммарную погрешность измерительного канала системы мониторинга было предложено представить согласно РМГ 62-2003 в виде оценки границы относительной погрешности измерений δ :

$$\delta = K \sqrt{\sum_{i=1}^i \delta_i^2} = 2,5 \cdot 10^{-3} \%,$$

где $K=1,2$ для оценок границ погрешности измерений наиболее важных параметров;

δ_i - оценка границы i -й составляющей относительной погрешности измерений. При этом были учтены погрешности непосредственно первичного преобразователя, преобразования в компараторах, а также погрешность передачи вращения муфтой датчика. Полученное значение $\delta = 2,5 \cdot 10^{-3} \%$ дает возможность говорить о высоком уровне прецизионности разработанной аппаратной части системы мониторинга.

Для контрольно-диагностической техники, применяемой в машиностроении и основанной преимущественно на амплитудных методах, характерны уровни точности порядка $(1 \div 0.01) \%$. Следовательно, разработанная система мониторинга по метрологическим характеристикам превосходит аналоги, используемые для измерения параметров вибрации, силы, температуры, мощности, используемых в

системах промышленной диагностики и мониторинга. К этому можно добавить, что разработанная система отличается низкой чувствительностью к помехам (за счет перехода от амплитудного к фазовому методу измерения), а также низкой себестоимостью (30 – 40 тысяч рублей).

В третьей главе представлены результаты исследования метрологических характеристик разработанного блока обработки измерительной информации.

Для проведения оценки метрологических характеристик разработанного БОИИ был осуществлен эксперимент, аналогичный по плану контрольным испытаниям (проверке, калибровке). На входе разработанного БОИИ (СИ) в определенных точках диапазона измерений N раз с помощью рабочего эталона (РЭ) необходимо воспроизвести физическую величину заданного размера x (см. Рисунок 3) и на выходе получить показания прибора y .

Разность $\hat{y}_n - \hat{x}_n = \xi_n$, $n = \overline{1, N}$, есть значение случайной составляющей основной погрешности средства измерения в данной точке диапазона.

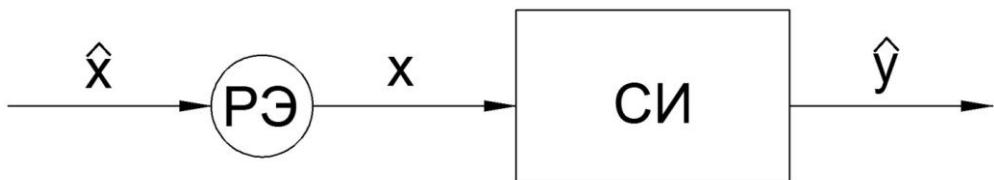


Рисунок 3. Структурная схема измерительной задачи идентификации основной погрешности разработанного БОИИ

Измерения проводились по всему диапазону частот входного сигнала с первичного преобразователя. При этом нижней границе диапазона соответствует значение частоты вращения шпинделя станка 50 об/мин, а верхней – 2500 об/мин. Учитывая, что на измерительном лимбе первичного преобразователя 5000 меток, диапазон частот входного сигнала был принят от 5000 Гц до 230000 Гц. Внутри данного диапазона был сформирован набор точек измерений, приведенный в Таблице 1. Количество точек измерения $N=10\uparrow$. Количество измерений в каждой точке $m=10$.

Таблица 1.
Точки измерения

| № п/п | Номинальное значение периода, мкс | № п/п | Номинальное значение периода, мкс |
|-------|-----------------------------------|-------|-----------------------------------|
| 1 | 4 | 6 | 104 |
| 2 | 24 | 7 | 124 |
| 3 | 44 | 8 | 144 |
| 4 | 64 | 9 | 164 |
| 5 | 84 | 10 | 184 |

Для решения задачи в качестве РЭ применялся высокостабильный (стабильность частоты сигнала 0.0001 %) генератор сигналов Tektronix AFG 3021B, настроенный на воспроизведение синусоидального сигнала с амплитудой 1 В.

Обработка результатов измерений производилась методом контурных оценок. По результатам расчетов построена динамическая характеристика погрешности разработанного БОИИ, то есть зависимость погрешности от точки диапазона измерения (рисунок 4).

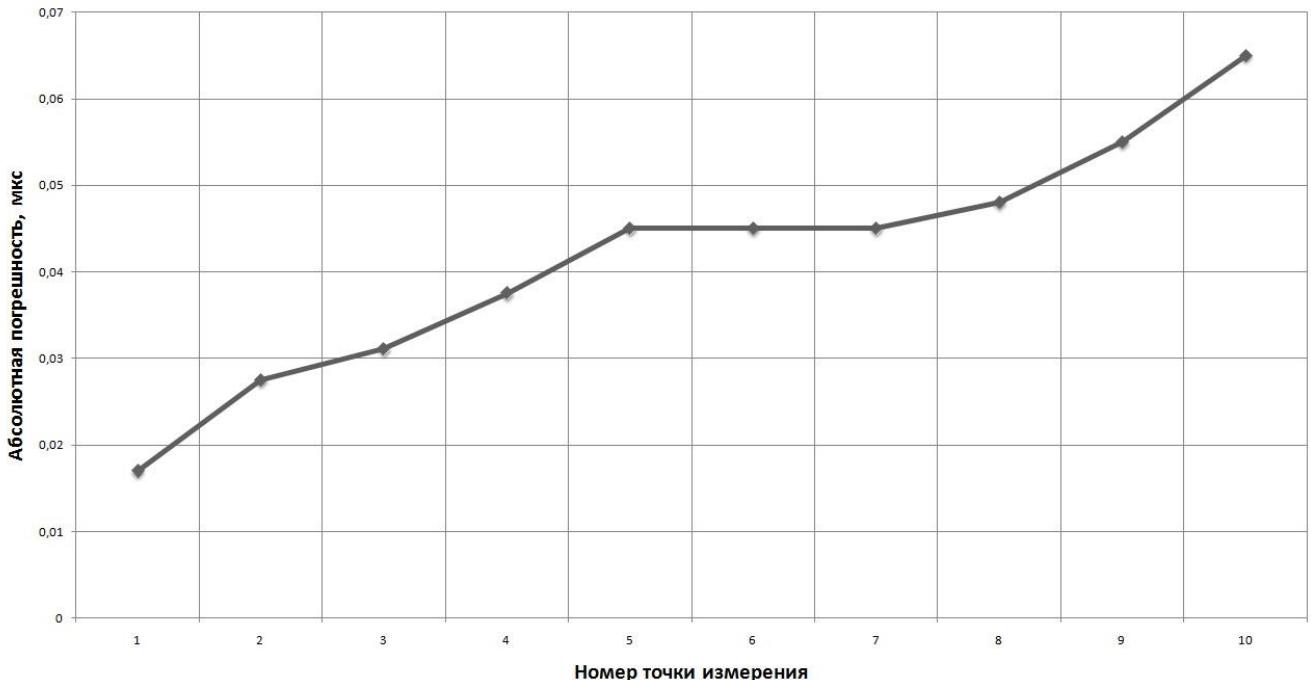


Рисунок 4. Динамическая характеристика погрешности разработанного БОИИ

Анализ полученной зависимости наглядно демонстрирует малую дисперсию погрешности, лежащей в пределах от 0,017 до 0,065 мкс (со среднеквадратическим отклонением 0,01388 мкс), а также линейность полученной характеристики, что говорит о стабильности метрологических характеристик разработанного блока обработки измерительной информации во всем диапазоне измерения.

Также по статистическому ряду нормализованных значений погрешности и характеристикам погрешности рабочего эталона была построена вероятностная оценка количественного результата идентификации основной погрешности блока обработки измерительной информации. Для этого установлен вид распределения случайной составляющей погрешности, оценены его параметры и построена ее композиция с неисключенными систематическими составляющими. В результаты получены следующие значения (протокол расчета приведен в приложении диссертации): верхняя граница свертки возможных значений основной погрешности БОИИ: 0,049 мкс; нижняя граница: -0,032 мкс.

Также была проведена оценка вариации случайной составляющей погрешности БОИИ в 40 точках диапазона, результаты измерений $\hat{\xi}_n(n)$ в которых представлены на Рисунке 5. Подобная оценка дает дополнительную информацию о разбросе значений погрешности по всей ширине диапазона измерений.

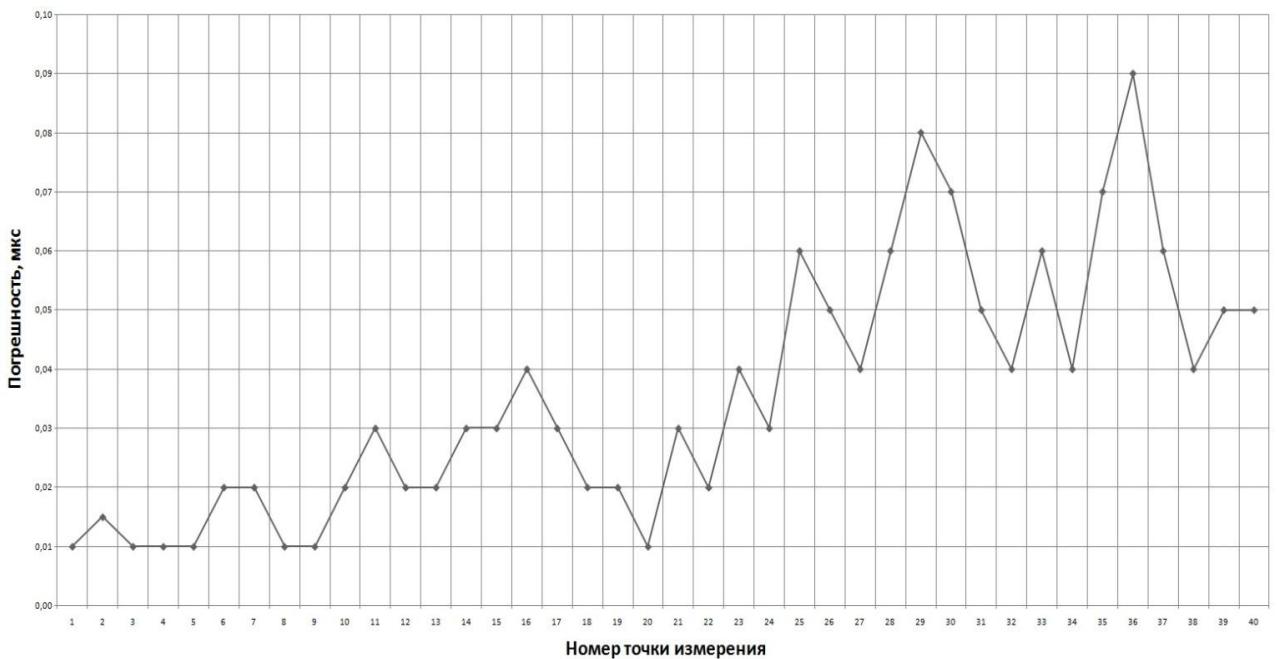


Рисунок 5. График функции случайной составляющей основной погрешности по 40 точкам

На основании анализа структурной и корреляционной функций процесса $\hat{\xi}_n(n)$ была выявлена нестационарность процесса изменения случайной погрешности в зависимости от точки диапазона. При этом необходимо отметить, что метод контурных оценок позволяет получить оценку метрологических характеристик в условиях большей неопределенности. За счет этого такая оценка является более предпочтительной.

В четвертой главе приводятся материалы разработки математической модели влияния износа режущего инструмента на неравномерность вращения шпинделя станка. Известно, что по мере затупления резца процесс снятия материала постепенно изменяет свой характер. Сила резания начинает испытывать большие колебания, непосредственно резец начинает не столько резать, сколько тереться о заготовку, существенно повышая температуру в зоне резания. Это в свою очередь влияет на равномерность вращения шпинделя станка, что в фазохронометрическом подходе несёт необходимую диагностическую информацию, как о состоянии станка, так и о процессе резания.

Модель основана на принципе, что система резец-деталь является сопряжённой, поэтому любые изменения неизбежно отражаются на обеих составляющих.

Динамическая модель системы резец-деталь, используемая при математическом моделировании приведена на Рисунке 6:

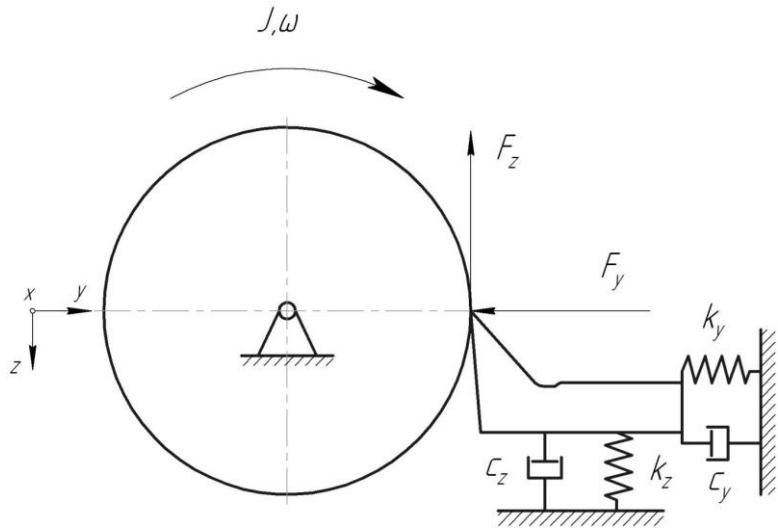


Рисунок 6. Динамическая модель системы резец-деталь

Введены следующие обозначения:

J – приведенный момент инерции системы деталь – элементы крепления – привод; ω – угловая скорость вращения шпинделя; k_y и k_z – коэффициенты жёсткости в радиальном и тангенциальном направлениях соответственно; c_y и c_z – коэффициенты демпфирования при резании в радиальном и тангенциальном направлениях соответственно; F_y и F_z – составляющие силы резания в радиальном и тангенциальном направлениях соответственно.

Зависимость угла поворота шпинделя от времени в модели взаимодействия заготовки и режущего инструмента с учетом нелинейной силы сопротивления движению резца и его вынужденных колебаний вдоль линии резания имеет вид:

$$\theta(t) = \Omega_n t + \frac{AR_D}{J\omega_0^2} (k_z - m_z \omega_0^2) \cdot \sin(\omega_0 t + \phi_0) + \frac{AR_D c_z}{J\omega_0} \left(\frac{3}{4} \gamma A^2 \omega_0^2 - 1 \right) \times \\ \times \cos(\omega_0 t + \phi_0) + \frac{1}{36J} \gamma A^3 R_D c_z \omega_0 \cos(3\omega_0 t + 3\phi_0),$$

где θ – угол поворота шпинделя; R_D – плечо силы в точке приложения; m – эффективная масса резца; γ – коэффициент нелинейности, зависящий от скорости резания и определяемый по эмпирической зависимости; A – амплитуда колебаний резца; ω_0 – угловая частота колебаний резца; ϕ_0 – фаза;

При этом предполагается, что скорость вращения шпинделя стабилизирована до номинального значения $\dot{\theta} = \Omega_n$, резец в простейшем частном случае стационарного динамического режима колебаний можно представить в виде гармонического осциллятора, а амплитуда колебаний принимается изменяющейся пропорционально износу.

Очевидно, что вращение детали, закреплённой в патроне шпинделя сложное, поскольку на равномерность вращения узлов и деталей главной кинематической цепи станка влияет множество факторов: неравномерность движения ротора электродвигателя и валов коробки передач, состояние опор шпинделя и т.п. Поэтому зависимость угла поворота шпинделя от времени отражает лишь неравномерность вращения, вызванную процессом резания.

Для удобства сопоставления результатов моделирования и результатов экспериментальных исследований был предложен принцип оценки относительной доли высокочастотных составляющих в спектре хронограммы вращения (Рисунок 7). Сама хронограмма при этом получается путём перехода от угла θ поворота шпинделя к интервалам времени, соответствующим достижению равномерно распределенных границ интервалов угла поворота.

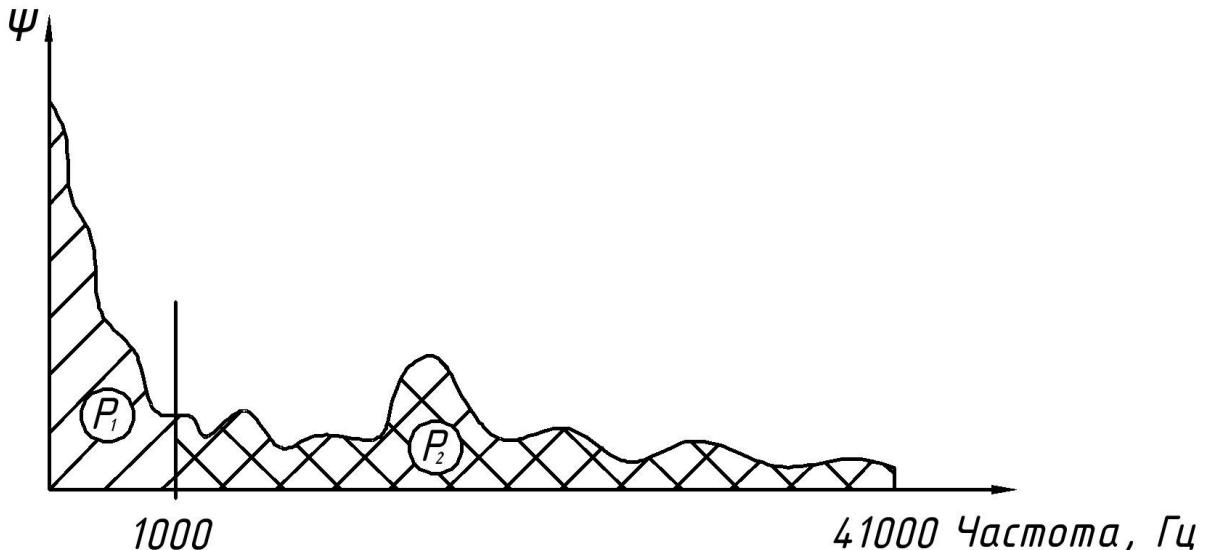


Рисунок 7. Принцип оценки относительной доли высокочастотных составляющих в спектре хронограммы вращения

Известно, что в колебаниях до 1000 Гц для такого типа станков содержится информация о техническом состоянии самого токарного станка, о неравномерности работы электродвигателя станка, дефектах зубчатого зацепления, смазки и т.п. При этом колебания, связанные с износом токарного инструмента, являются высокочастотными. Поэтому, поделив мощность спектра из области высокочастотных колебаний (область P_2) на общую мощность спектра колебаний (область $P_1 +$ область P_2), можно получить некоторое процентное соотношение Ψ :

$$\Psi = \frac{P_2}{P_1 + P_2} \cdot 100\% ,$$

где P_1 - общая мощность спектра колебаний, Вт; P_2 - мощность спектра из области высокочастотных колебаний, Вт.

В результате проведения вычислительного эксперимента было выявлено, что по мере изнашивания режущего инструмента возрастает доля Ψ мощности высокочастотных составляющих колебаний в спектре хронограммы вращения шпинделя станка. Это может быть принято за основу при выборе критерия затупления режущего инструмента.

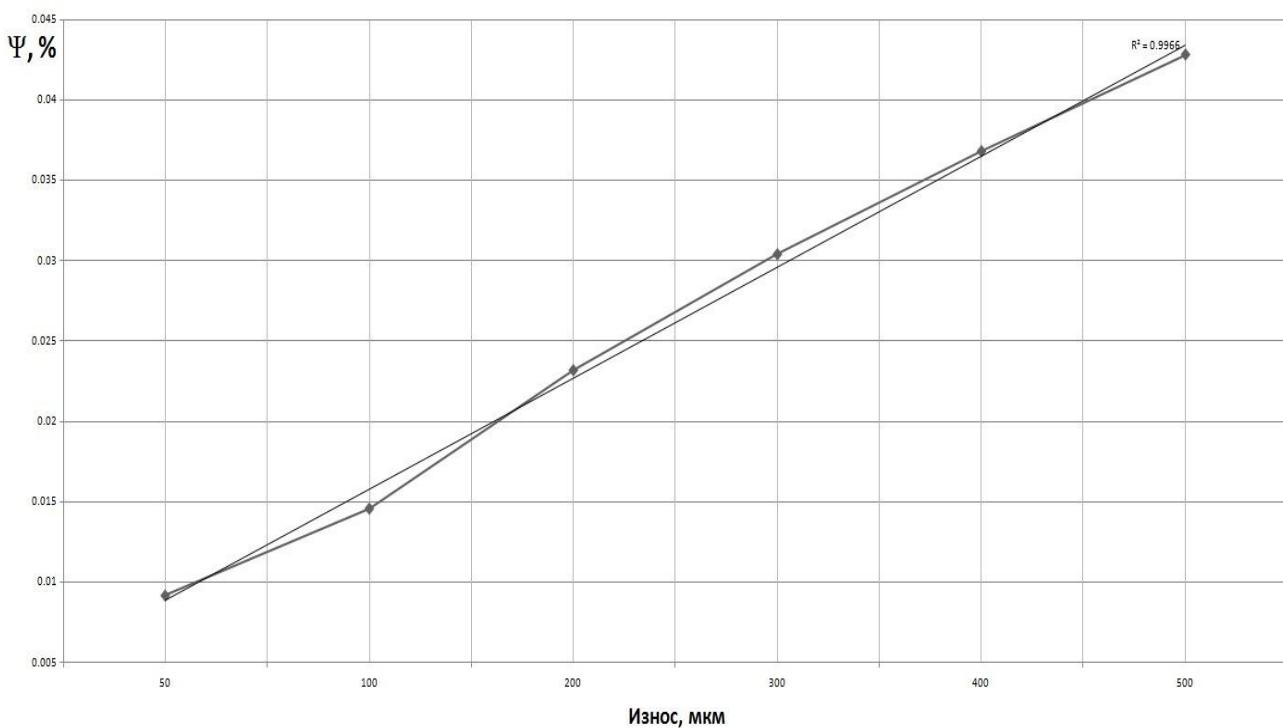


Рисунок 8. График изменения параметра Ψ по мере изнашивания режущего инструмента, полученный в результате моделирования

Согласно результатам математического моделирования значение параметра Ψ увеличивается практически линейно (величина достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9966$) по мере увеличения износа по задней поверхности (Рисунок 8).

В пятой главе описываются экспериментальные исследования процесса резания на токарном станке с ЧПУ G.D.W. 240 CNC на производственной базе АО «Раменский приборостроительный завод» фазохронометрическом представлении. По итогам были сделаны следующие выводы:

- фазохронометрическая метод применим в цеховых условиях для контроля различных параметров токарной обработки;
- подтверждена чувствительность фазохронометрической системы по отношению к процессам, возникающим при врезании инструмента в заготовку;
- в фазохронометрическом представлении исследована разница между холостым ходом шпинделя станка и работой под нагрузкой (при резании);
- фазохронометрический метод применительно к вопросам изучения процесса резания за счет своей прецизионности и высокой чувствительности имеет большой потенциал для использования в задачах анализа параметров токарной обработки и выбора оптимальных.

Также путем реализации двух экспериментов с разными параметрами процесса резания были получены результаты исследования процесса износа инструмента в фазохронометрическом представлении. Основной эксперимент был осуществлен на станке 16К20Ф3 с режимами резания, при которых в процессе обработки режущая кромка токарной пластины CNMG 12 04 08-ММ существенно износилась. Конечное состояние пластины было оценено при помощи оптического измерительного микроскопа. Измерительная информация при этом была обработана методом нахождения оценки доли Ψ мощности

высокочастотных составляющих колебаний в спектре хронограммы вращения шпинделя станка (Рисунок 9).

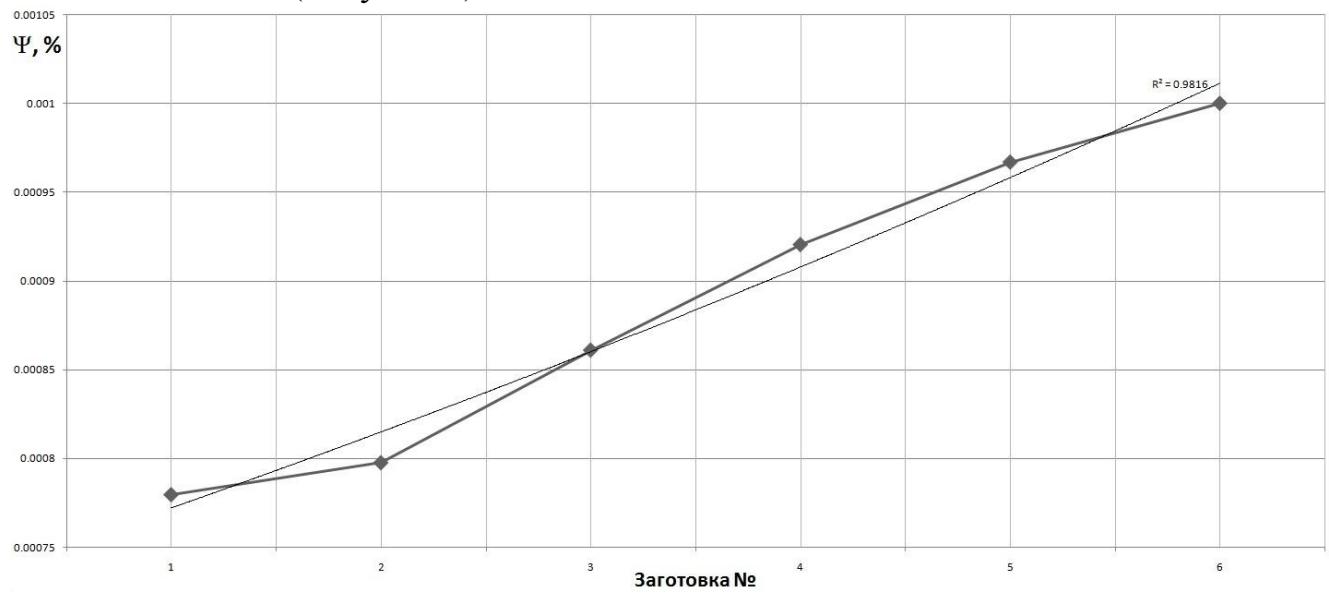


Рисунок 9. Изменение параметра Ψ мощности высокочастотных составляющих в спектре хронограммы по мере изнашивания инструмента

Были сделаны выводы о качественной взаимной корреляции полученной зависимости и результатов математического моделирования, что доказывает эффективность фазохронометрического метода в вопросах мониторинга текущего состояния режущего инструмента в процессе обработки. Характер графика также хорошо согласуется с классическим представлением об износе токарного инструмента.

В шестой главе описано прогнозирование эволюции фактического состояния режущей кромки токарного инструмента в процессе обработки на основании хронометрических измерений.

Помимо качества измерительной информации, используемой в качестве исходных данных, важнейшую роль играет выбор метода прогнозирования. В данной работе было предложено применение комбинации подхода аддитивного регрессионного моделирования и псевдоградиентного метода.

Было предложено прогнозировать непосредственно изменение оценки Ψ относительной доли высокочастотных составляющих в спектре хронограммы вращения, которое коррелировано с износом режущего инструмента. Прогнозирование выполнялось по 200 точкам с глубиной прогноза 25%, что соответствует 8 минутам в пересчете на время обработки. Результат представлен на Рисунке 10.

На графике представлен исходный массив данных (черная кривая), а также график прогноза (красная кривая). Максимальное относительное отклонение результатов прогноза при этом составило 0,2 %, что свидетельствует об эффективности предложенного решения.

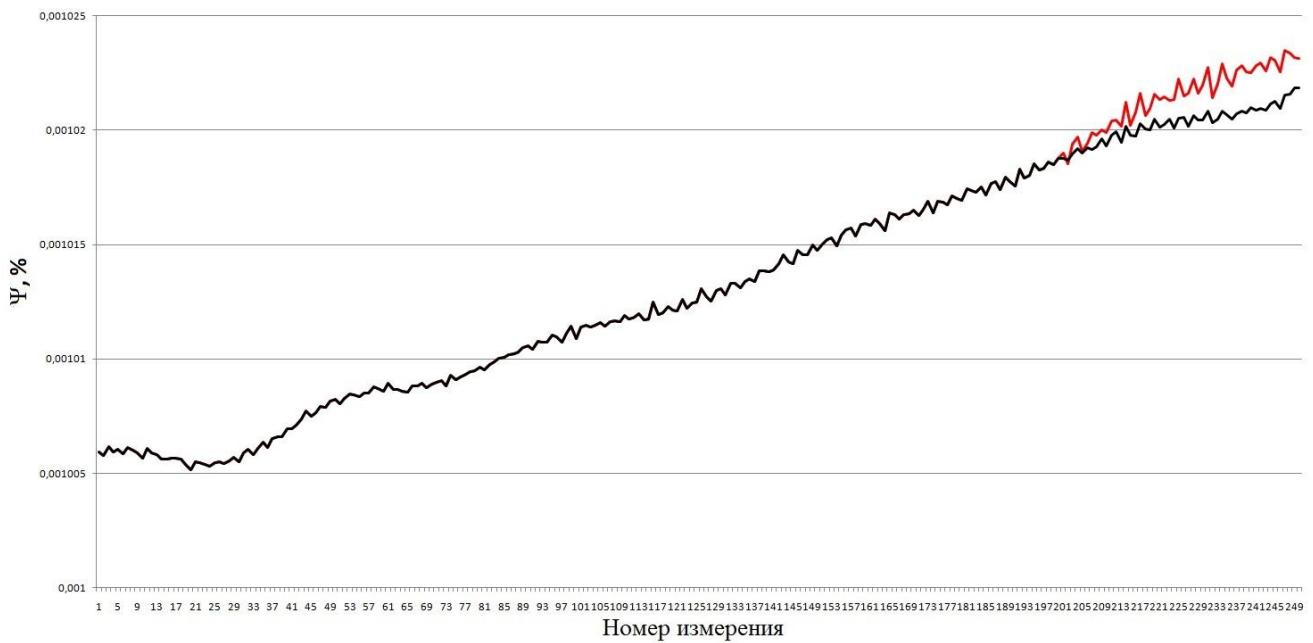


Рисунок 10. Прогнозирование изменения оценки Ψ относительной доли высокочастотных составляющих спектра хронограммы вращения

Переход именно к прогнозированию износа режущего инструмента осуществлен через переопределение оси ординат графика $\Psi(t)$. Для этого необходимо определить значение параметра Ψ_{max} , при котором достигается критический износ инструмента, а затем перестроить шкалу ординат от 0 до максимального значения износа h_{max} . То есть значению Ψ_{max} соответствует h_{max} . При этом в данном случае принимается допущение о линейности изменения износа в течение времени обработки. Использование же дополнительных данных о характере процесса изнашивания режущего инструмента способно привести к увеличению достоверности прогнозирования. Определение Ψ_{max} и h_{max} выполняется один раз при настройке системы мониторинга для работы с неизменными параметрами обработки, при этом максимальное значение износа измеряется методом оптической микроскопии.

Подобный общий подход к прогнозированию проиллюстрирован на Рисунке 11. В определенный момент времени τ_n производится прогноз (выделен красным) на время, соответствующее 25% от τ_n . Соответствующий максимальному значению прогноза уровень износа h_n является прогнозируемым значением износа в момент времени $1,25\cdot\tau_n$.

Прогнозируемый уровень износа h_n может быть использован оператором для оценки остаточного ресурса инструмента с целью его своевременной замены, либо в качестве информации для системы ЧПУ станка с целью прекращения операций обработки при достижении критических значений износа.

По результатам исследований и вычислительных экспериментов можно сделать вывод, что система мониторинга состояния токарного инструмента в процессе обработки может быть реализована на базе подхода к прогнозированию, предложенного в диссертации.



Рисунок 11. Иллюстрация общего подхода к прогнозированию износа режущего инструмента

Таким образом, получив первоначальные данные о параметре Ψ в момент достижения предельного состояния инструмента, возможно оценивать как текущее состояние инструмента в любой момент времени в процессе обработки, так и прогнозировать его состояние на достаточно продолжительное время.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработан комплекс технических средств и измерительная технология мониторинга фактического технического состояния режущей кромки токарных пластин непосредственно в процессе обработки на базе фазохронометрического метода. Определены критерии, виды, а также геометрические характеристики износа токарного инструмента.

2. Разработаны технические требования к системе информационно-метрологического сопровождения процесса обработки деталей на металорежущих станках, в частности допускаемая относительная погрешность измерения интервалов времени для определения износа в процессе обработки не должна превышать $5 \cdot 10^{-3} \%$, временная задержка не более 10 мкс в едином опорном времени.

3. Разработана математическая модель влияния износа режущего инструмента на неравномерность вращения шпинделя станка, учитывающая зависимость угла поворота шпинделя от времени с учетом нелинейной силы сопротивления движению резца и его вынужденных колебаний вдоль линии резания.

4. Разработана фазохронометрическая система получения измерительной информации для изучения процесса резания и износа режущего инструмента в процессе технологических операций, основными элементами которой являются первичный преобразователь (угловой энкодер), блок обработки, построенный на базе аналоговых компараторов, одноплатная ЭВМ. Также проведена оценка метрологических характеристик разработанной системы получения

измерительной информации. Верхняя граница свертки возможных значений основной погрешности блока обработки измерительной информации составила 0,049 мкс, нижняя - -0,032 мкс. Подтверждена стабильность метрологических характеристик разработанного блока обработки измерительной информации во всем диапазоне измерений.

5. Предложен критерий оценки состояния режущего инструмента по мере изнашивания состоящий в росте доли мощности высокочастотных составляющих колебаний в спектре хронограммы вращения шпинделя станка.

Также в работе показан переход к прогнозирующему мониторингу износа инструмента путем предиктивного моделирования параметра Ψ в процессе обработки. Для этого применяется комбинация методов аддитивного регрессионного моделирования и псевдоградиентного метода. Достигнута реализация с горизонтом прогноза до 25%, что во временном выражении соответствует уровню 5-15 мин.

6. При помощи метода контурных оценок экспериментально определены метрологические характеристики разработанного блока обработки измерительной информации. При этом выявлена малая дисперсия оценки погрешности во всем диапазоне измерений (пределы от 0,017 до 0,065 мкс, СКО 0,01388 мкс) а также линейность полученной динамической характеристики (величина достоверности аппроксимации прямой $R^2 = 0,9352$).

7. Результаты исследований могут быть использованы в качестве базы для создания подобных систем мониторинга на станках других групп (сверлильных, фрезерных и проч.), а также опыт работы может быть использован в вопросах оптимизации режимов резания.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Сырицкий А.Б. Определение износа режущей кромки токарного инструмента в процессе обработки // Труды Международной научно-технической конференции «Современные научные технологии, оборудование и инструменты в машиностроении», 2014. С. 154 – 162. (0,375 п.л.)

2. Болдасов Д.Д., Лазарев Н.Ю., Сырицкий А.Б. Измерительный блок фазохронометрической системы мониторинга процесса токарной обработки// Приборы. 2015. №10. С.6 – 9. (0,5 п.л. / 0,2 п.л.)

3. Сырицкий А.Б., Болдасов Д.Д. Фазохронометрическая система мониторинга износа режущего инструмента // Металлообработка. 2015. №5. С. 2 – 10. (0,9375 п.л. / 0,65 п.л.)

4. Потапов К.Г., Сырицкий А.Б. Оценка износа резца на основе измерения неравномерности вращения шпинделя токарного станка // Вестник МГТУ Станкин. 2014. №4. С. 107-112. (0,625 п.л. / 0,3125 п.л.)

5. Потапов К.Г., Сырицкий А.Б., Реализация измерительной фазохронометрической системы для диагностики технического состояния токарных станков // Приборы. 2014. №5. С. 18-22. (0,5 п.л. / 0,25 п.л.)

6. Комшин А. С., Потапов К. Г., Сырицкий А. Б. Оценка технического состояния станка УТ16П фазохронометрическим методом // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 2. (1,3125 п.л. / 0,4375 п.л.)

7. Комшин А.С., Сырицкий А.Б. Измерительно-вычислительные технологии эксплуатации металлорежущего оборудования и инструмента // Мир измерений. 2014. №12. С. 3 – 9. (0,9 п.л. / 0,45 п.л.)
8. Сырицкий А.Б., Болдасов Д.Д., Потапов К.Г. Применение фазохронометрического метода при диагностике металлорежущего оборудования токарной группы // СТИН. 2016. №1. С. 5 – 10. (0,875 п.л. / 0,3 п.л.)
9. Сырицкий А.Б. Фазохронометрическая система мониторинга состояния режущей кромки токарных пластин // Молодежный научно-технический вестник. Электрон. журн. 2013. № 1. (0,375 п.л.)
10. Комшин А.С., Обухов И.В., Сырицкий А.Б. О возможности оценки постоянной составляющей систематической погрешности средств измерений посредством обработки результатов измерений // Приборы. 2016. №2. С.24 – 29. (0,75 п.л. / 0,25 п.л.)
11. Сырицкий А.Б. Информационно-измерительная система получения данных о техническом состоянии режущего инструмента // Труды XXVI Международной инновационно-ориентированной конференции молодых учёных и студентов (МИКМУС-2014), 2014. С. 208-209. (0,25 п.л.)
12. Сырицкий А.Б. Метод оценки износа резца на основе измерения неравномерности вращения шпинделя токарного станка // Тезисы докладов IV Международной молодежной научной школы-конференции «Современные проблемы физики и технологий», 2015. С. 211 – 212. (0,125 п.л.)
13. Сырицкий А.Б. Информационно-метрологическое сопровождение операций токарной обработки на основе фазохронометрического подхода // Сборник материалов XII Всероссийского совещания-семинара «Инженерно-физические проблемы новой техники», 2016. С. 210 – 213. (0,25 п.л.)
14. Сырицкий А.Б. Прецизионные измерительные фазохронометрические технологии в области токарной обработки // Материалы Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы -2015» (МНТК «ИМТОМ-2015»), 2015. С. 191 – 193. (0,125 п.л.)
15. Патент № 2561236 РФ, МПК6 G01M1/00. Способ диагностирования циклических машин – металлорежущих станков фазохронометрическим методом/ А.С. Комшин, К.Г. Потапов, А.Б. Сырицкий, М.И. Киселёв, В.И. Пронякин; Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. N 2013158894/28; Заяв. 30.12.2013; Опубл. 27.08.2015.