

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Методические указания
к выполнению разделов курсового проекта
для студентов направления
15.04.05. «Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств»
очной и очно-заочной форм обучения



Севастополь
СевГУ
2018

УДК 621.9.06.(075.8)

Р е ц е н з е н т:

Н.И. Покинтелица - д.т.н., профессор, зав. кафедрой ПТО

Составитель: Е.А. Левченко

Технологический мониторинг технологического оборудования: метод. указания к выполнению разделов курсового проекта для студентов направления 15.04.05. «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» очной и очно-заочной форм обучения / Сост. Е.А. Левченко. – Севастополь: СевГУ, 2018. – 51 с.

Настоящие методические указания предназначены для оказания помощи студентам при выполнении разделов курсового проекта. В методических указаниях изложена методика выполнения разделов курсового проекта, рассмотрены вопросы диагностики и мониторинга технологического оборудования и средств оснащения. Приведена методика расчета с использованием современных технологий.

УДК 621.9.06.(075.8)

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры «Технология машиностроения», протокол № 8 от 07 марта 2017 г.

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Цель и сроки курсового проектирования.....	5
2. Объем и содержание курсового проекта.....	5
2.1. Проработка исходных данных задания.....	5
2.2. Описание диагностируемого оборудования.....	5
2.3. Структура диагностического цикла	6
2.3.1. Системный подход при диагностике и мониторинге производственного процесса.....	6
2.4. Повреждения в элементах технологической системы.....	7
2.5. Разработка структуры цикла обеспечения надежности обработки детали.....	8
2.5.1. Оценка точности технологической операции, выполняемой на станке, как диагностического признака повреждения элементов конструкции станка	8
2.5.2. Разработка алгоритма определения параметров качества обработанных деталей	13
2.6. Разработка алгоритма диагностирования режущего инструмента (РИ) ..	13
2.6.1. Количественные показатели надежности РИ.....	14
2.6.2. Расчет силовых параметров обработки для выявления диагностического признака состояния инструмента.....	23
2.6.3. Разработка системы мониторинга состояния инструмента	38
2.7. Разработка алгоритма диагностирования станка	39
2.7.1. Диагностика мощности, потребляемой приводом главного движения станка с разработкой функциональной схемы работы.....	39
2.7.2. Разработка общей схемы диагностики станка с ЧПУ	43
2.7.2. Разработка системы мониторинга оценки диагностического состояния станка с ЧПУ	44
Библиографический список.....	47
Приложение 1	48
Приложение 2	49
Приложение 3	50

ВВЕДЕНИЕ

Диагностика в ее различных аспектах и приложениях может способствовать повышению эффективности производства.

Одной из задач, решаемых любой технологической системой, является контроль. При обработке на станках с ручным управлением оператор контролирует в основном параметры обрабатываемой детали: измеряет размеры, при необходимости – шероховатость, волнистость. Иное содержание приобретает контроль в условиях автоматизированного трудосберегающего технологического процесса. Помимо измерения выходных параметров, для надежного функционирования автоматизированного оборудования необходимо обеспечить диагностирование состояния станка и инструмента в реальном времени, всего технологического процесса. Требуют диагностирования и мониторинга процессы транспортирования и базирования заготовок и инструмента, уборки стружки и др.

Контроль и диагностирование также осуществляются при обработке на станках с ручным управлением. Оператор следит за состоянием инструмента, подсознательно прислушивается к шумам работающих механизмов станка, замечая отклонения от нормальной работы. Сенсорно-мониторные действия оператора выполняют органы чувств: глаза замечают признаки катастрофического износа резца; уши фиксируют возникновение тонального шума в зоне резания или изменение уровня звука, что может быть предвестником разрушения инструмента (например, «скрип» сверла); пальцы фиксируют аномальный рост температуры шпиндельных подшипников.

Роль современного мониторинга является определяющей в создании автоматизированного технологического оборудования и гибких производственных комплексов.

Проектирование современных систем диагностики и контроля автоматизированного производства – это сложная инженерная задача, которая решается совместными усилиями многих специалистов с привлечением средств вычислительной техники и систем автоматизированного проектирования.

Круг вопросов, решаемых студентами в процессе курсового проектирования систем мониторинга технологического оборудования и систем техоснащения, отражает специфику учебного проекта. Однако принимаемые решения в рамках творческого поиска оптимального варианта диагностирования проектируемого узла должны быть подчинены главной цели разработке системы мониторинга и контроля прогрессивной конструкции станка.

1. ЦЕЛЬ И СРОКИ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Цель курсового проекта – систематизация и закрепление теоретических знаний студентов, развитие умения принимать самостоятельные технические решения, совершенствование расчетно-графических навыков, а также умения работать с научно-технической и учебно-методической литературой, вычислительной техникой.

Курсовой проект выполняется студентами направления 15.04.05. «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в течение одного семестра в рамках рабочей программы дисциплины «Технологический мониторинг технологического оборудования».

2. ОБЪЕМ И СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Курсовой проект (КП) состоит из графической части в объеме 4 листов формата А1 (594×841 мм) и 30 - 50 страниц (А4) расчетно-пояснительной записки, в начале которой помещают титульный лист, задание на КП и содержание, а в конце – список литературы и приложение. КП предусматривает выбор в соответствии с заданием базового варианта современного станка с ЧПУ, подробное изучение его кинематики, системы управления, а также конструкции, и системы мониторинга одного из важнейших узлов этого станка – либо привода главного движения, либо привода подачи.

Основные этапы проектирования

2.1. Проработка исходных данных задания

Задания курсовое проектирование выдаются на кафедре «Технология машиностроения». Для студентов дневного обучения номера вариантов определяются руководителем проекта, а для студентов заочной формы обучения – по двум последним цифрам номера зачетной книжки, либо руководителем проекта.

2.2. Описание диагностируемого оборудования

Первой важной характеристикой станка с ЧПУ является его компоновка и комплектация. В разделе описания диагностируемого оборудования необходимо представить:

- ✓ общее описание конструкции станка и его предназначение;
- ✓ техническую характеристику с представлением всех основных параметров комплектации станка;
- ✓ представление графического изображения основных узлов станка;
- ✓ полная характеристика и анализ кинематической схемы станка с представлением описания приводов главного движения и подачи.

2.3. Структура диагностического цикла

2.3.1. Системный подход при диагностике и мониторинге производственного процесса

Методологическими приемами системного подхода являются системный анализ и синтез производственного процесса. **Анализ – расчленение процесса на элементы (подсистемы), более доступные для решения конкретных задач, служащих общей цели – достижению эффективности производства** (рис. 2.3.1).

В рамках каждой подсистемы выполняется анализ альтернативных решений. Синтез – соединение различных подсистем в единое целое (в систему) на основе достижения необходимых параметров качества деталей. Синтез неразрывно связан с анализом.

Системный подход требует рассматривать эффективность каждого этапа жизненного цикла – каждой подсистемы. Из них складывается эффективность мониторинга и диагностирования элементов технологической системы.

Обработка серийных деталей на автоматизированном оборудовании производится по уже отлаженному технологическому процессу. Однако при этом не всегда удастся обеспечить регламентированное качество деталей и другие показатели эффективности. Связано это с тем, что элементы технологической системы подвергаются в процессе обработки изнашиванию, тепловым, силовым и динамическим воздействиям, которые вызывают соответствующие повреждения в станке, инструменте и приспособлении. Погрешности обработки из-за этих повреждений добавляются к исходным погрешностям траектории формообразования и настройки станка. При достижении суммарной погрешностью предельного значения наступает параметрический отказ технологической системы.

В связи с тем, что значения составляющих и суммарных погрешностей являются случайными величинами, как и случайны функции их изменения, исключается возможность их программной компенсации в процессе обработки. Поэтому при обработке серийных деталей на автоматизированных станках также должна функционировать система обеспечения заданных параметров качества деталей. Она состоит из ряда подсистем: подсистемы определения параметров качества деталей, повреждений в станке и инструменте, подсистемы принятия решений по результатам выявленных повреждений и, наконец, подсистемы реализации принятых решений по управлению процессом обработки. Между подсистемами существуют информационные связи, направленные на достижение главной цели обработки. Информационная связь реализуется системой диагностирования. Все действия в подсистемах, выполняемые в реальном времени обработки, входят в структуру **диагностирования технологических систем**.

Конечным этапом разработки раздела является схематическое представление системного анализа производственного процесса с подробным рассмотрением каждой из подсистем с представлением полного описания взаимосвязей для реализации мониторингового контроля за работой технологической системы.

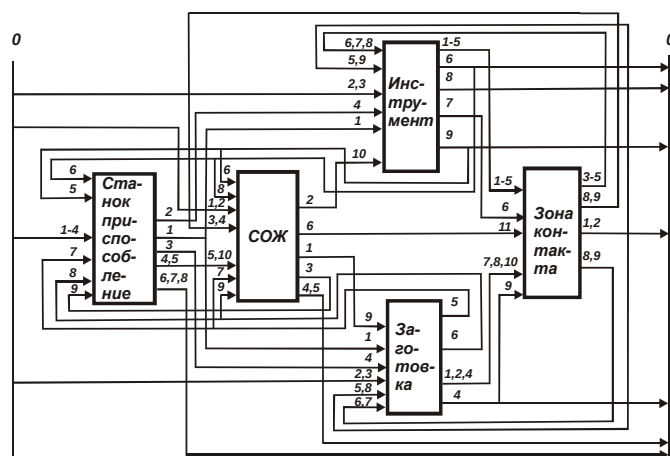


Рис. 2.3.1. Системный подход к анализу связей между подсистемами

2.4. Повреждения в элементах технологической системы

В соответствии с методическим алгоритмом разработки систем диагностирования, первым этапом является установление и изучение возможных повреждений в элементах технологической системы. Выполнение этого этапа позволяет:

- ✓ определить критерий состояния и критерий отказа объекта диагностирования;
- ✓ установить удельный вес влияния каждого повреждения на выходные параметры X . Уровень влияния повреждений на X зависит от скорости процессов, вызывающих повреждения.

По скорости протекания процессы, сопровождающие обработку резанием и вызывающие повреждения, можно разделить на три скоростные группы: быстропротекающие процессы, процессы средней скорости и медленные процессы. Классификация процессов по скорости протекания и видам повреждений, вызванных ими, приведена на рис. 2.4.1. На нем отмечены временные характеристики каждой скоростной группы процессов и вызванных ими повреждений.

Быстропротекающие процессы, возникающие при обработке деталей, имеют периодичность изменения, измеряемую долями секунды и секундами.

Средней скорости процессы имеют периоды нарастания до отказа, измеряемые минутами, часами, а *медленные* — месяцами и годами. Отмечены обратимые и необратимые процессы и повреждения, зависящие и не зависящие от времени.

Все процессы трех скоростных групп, представленные в классификации, изменяют положение режущей кромки резца относительно базовых поверхностей обрабатываемой детали, изменяют траекторию движения размерного формообразования. Это нарушает размерную точность, повышает шероховатость и волнистость обработанной детали, что приводит к параметрическим отказам. Функциональные отказы в классификации не рассматриваются.

В разделе 2.4. необходимо представить полную характеристику с детальным описанием возможных повреждений элементов технологической системы, вызывающих возможный отказ работы оборудования и элементов техоснащения. Пример возможных повреждений представлен на рис. 2.4.1.



Рис. 2.4.1. Классификация процессов, вызывающих повреждение

2.5. Разработка структуры цикла обеспечения надежности обработки детали

2.5.1. Оценка точности технологической операции, выполняемой на станке, как диагностического признака повреждения элементов конструкции станка

Теоретический раздел

Определение точности механической обработки основывается на положениях теории вероятности и математической статистики. Статистический метод расчета точности обработки применим в условиях изготовления большого чис-

ла (не менее 25 - 50) одинаковых деталей, обрабатываемых как настроенных станках (главным образом), так методом пробных проходов и промеров.

Сущность метода в том, что по замерам исследуемых размеров строятся кривые распределений фактических размеров и обрабатываются в соответствии с теорией вероятности и математической статистики. Всю совокупность измерений интересующего нас размера в партии деталей разбивают на ряд групп. В каждую группу входят величины размеров, результаты измерений которых находятся в пределах установленного интервала (количество интервалов берется в пределах 7-11). Величины интервалов откладывают по оси абсцисс, а количество деталей, размеры которых находятся в пределах каждого интервала (частота m или отношение m к количеству деталей в партии m/n) – по оси ординат (рис. 2.5.1).

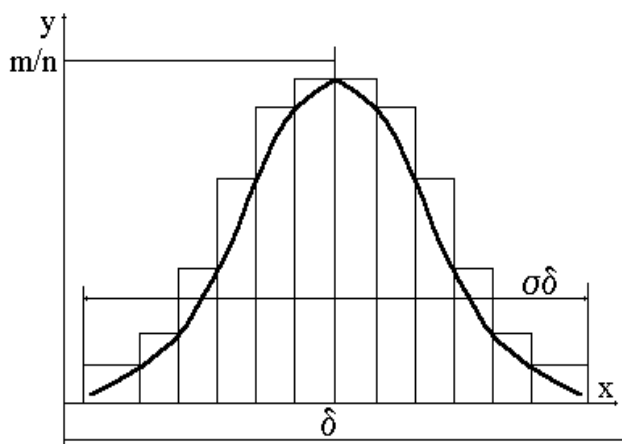


Рис. 2.5.1. Кривая распределения фактических размеров

После соединения нанесенных точек получают кривую, определяющую полигон распределения.

Диапазон предельных значений отклонения от настроенного размера (от $\min$ до $\max$) – поле рассеяния. Эта величина может служить приближенной мерой точности исследуемого процесса, чем уже поле рассеивания, тем точнее исследуемый технологический процесс.

Вид кривой рассеяния определяется количеством и характером факторов, влияющих на исследуемую величину, при различных условиях обработки заготовок рассеивание их действительных размеров подчиняется различным математическим законам. Многочисленные исследования показали, что распределение действительных размеров заготовок, обрабатываемых на настроенных станках, чаще всего подчиняется закону нормального распределения. Влияние каждой погрешности на их сумму ничтожно мало и примерно одинаково, т.е. в состав их суммы входит большое число взаимно независимых случайных величин. Соответствие закону нормального распределения тем точнее, чем больше слагаемых. При механической обработке это условие соблюдается, поскольку результирующая погрешность обработки обычно представляет собой сумму большого числа погрешностей, зависящих от станка, приспособления, инструмента и заготовки, которые являются взаимно-независимыми случайными величинами.

Уравнение прямой нормального распределения

$$J = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot l \cdot \frac{-(L_i - L_{cp})^2}{2\sigma^2}, \quad (2.5.1)$$

где σ – среднее квадратичное отклонение, мм;

L_i – контролируемый размер i -й детали;

L_{cp} – средний размер детали в партии.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (L_i - L_{cp})^2 \cdot m_i}, \quad (2.5.2)$$

где m – частота (количество заготовок данного интервала размеров), шт.;

n – количество деталей в партии, шт.

Кривая, характеризующая закон нормального распределения показана на рис. 2.5.2.

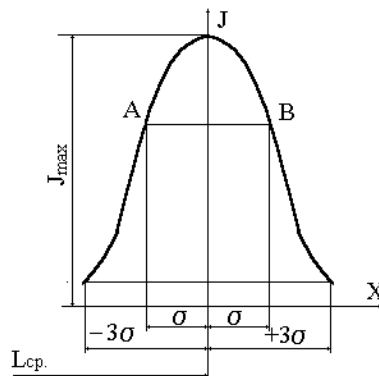


Рис. 2.5.2. Кривая, характеризующая закон нормального распределения размеров

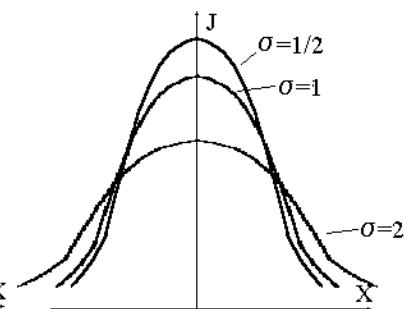


Рис. 2.5.3. Кривые распределения размеров с различными отклонениями

Среднее арифметическое средних действительных размеров деталей партии характеризует положение центра группирования размеров. Анализ кривой распределения показывает:

- а) кривая нормального распределения имеет две точки перегиба (А и Б);
- б) кривая приближается к оси абсцисс, на расстоянии $\pm 3\sigma$ 99,73% всей площади ограничивается кривой;
- в) среднее квадратичное отклонение σ показывает, насколько плотно сгруппированы возможные значения действительных размеров деталей около центра группирования, т.е. является мерой точности обработки, с увеличением σ значение ординаты J_{max} уменьшается, а поле рассеивания 6σ возрастает, что свидетельствует о большем рассеивании размеров и следовательно, о меньшей точности обработки (см. рис. 2.5.3).

Практически принято считать, что на расстоянии $\pm 3\sigma$ от вершины кривой, ветви пересекаются с осью абсцисс, и в этих пределах заключена вся площадь кривой (100 %), т.е. все размеры деталей партии находятся в пределах 3σ , можно написать условие работы без брака:

$$\delta = 6 \cdot \sigma, \quad (2.5.3)$$

где δ – допуск на исследуемый размер, мм.

При $\delta > 6\sigma$ и $\delta = 6\sigma$ брак отсутствует, при $\delta < 6\sigma$ возможен брак (исправимый и неисправимый).

При правильно построенном технологическом процессе по мере перехода от обдирочной к получистой, чистовой и отделочной обработке величина σ должна уменьшаться, как показано на рис. 2.5.4, т.е. $\delta_1 > \delta_2 > \delta_3$.

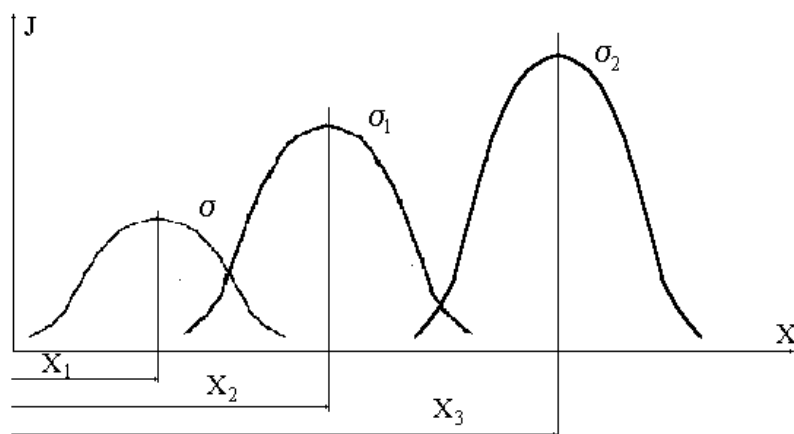


Рис. 2.5.4. Уменьшение среднеквадратичного отклонения размеров в зависимости от вида обработки

Кроме перечисленных характеристик, кривая нормального распределения характеризуется также:

- коэффициентом асимметрии A , который находится по формуле

$$A = \frac{1}{n\sigma^{3/2}} \sum_{i=1}^N (L_i - L_{cp})^3. \quad (2.5.4)$$

Коэффициент асимметрии характеризует скошенность кривой нормального распределения. При $A = 0$ она симметрична, при $A > 0$ вытянут правый, а при $A < 0$ – левый участок спада кривой.

- коэффициентом эксцесса E , который находится по формуле

$$E = \frac{1}{n\sigma^2} \sum_{i=1}^N (L_i - L_{cp})^4. \quad (2.5.5)$$

Он характеризует степень пика экспериментальной кривой $P(x)$ по сравнению с $P(x)$ для нормального распределения. Если $E > 0$, то $P(x)$ имеет более острый пик, чем при нормальном распределении, если $E < 0$, то пик менее острый.

- вспомогательными коэффициентами

$$U_3 = \sqrt{\frac{6(n-1)}{(n+1)(n+3)}}; U_4 = \sqrt{\frac{24(n-2)(n-3)}{(n-1)^2(n+3)(n+5)}}.$$

Эти коэффициенты служат для проверки гипотезы о нормальном распределении контролируемого размера.

Таким образом, построение кривых распределения дает информацию о правильном построении технологического процесса и настройке станка на заданный размер.

Если исходная кривая распределения размеров через некоторое время становится более пологой, это свидетельствует о появлении случайных погрешностей, снижающих точность обработки, следует проверить твердость и размеры заготовок, состояние станка, приспособления.

Если кривая распределения при неизменной ее форме через некоторое время с момента начала работы сместилась, это свидетельствует об изменении настроечного размера и необходимости его корректировки.

В тех случаях, когда нарушено условие работы без брака ($6\sigma < \delta$), т.е. когда поле рассеяния размеров деталей превосходит поле допуска ($6\sigma > \delta$), появляется вероятность брака, процент которого необходимо установить и решить допустимость его; в ряде случаев идут на небольшой процент брака, в частности, когда потери из-за брака полностью окупаются значительным сокращением себестоимости обработки, упрощением технологического процесса и сокращением его цикла.

Вероятный процент брака всей партии обработанных деталей вычисляют следующим образом. Принимают с погрешностью не более 0,27 %, что все детали партии имеют действительные размеры в пределах поля рассеивания, считают, что площадь, ограниченная кривой нормального распределения и осью абсцисс (см. рис. 2.5.5), равна единице и выражает собой 100 % деталей партии, тогда площадь заштрихованных участков представляет собой количество заготовок (в долях единицы или в процентах), размеры которых выходят за пределы допуска.

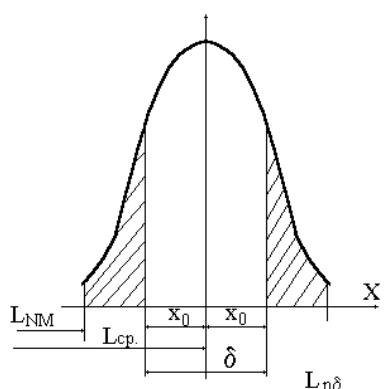


Рис. 2.5.5. Вероятностный процент брака обработанной партии деталей

Для определения количества годных деталей необходимо найти площадь $\Phi(Z)$, ограниченную кривой и осью абсцисс на длине равной полю допуска, т.е. найти удвоенное значение интеграла, определяющего половину площади кривой Гаусса и абсциссой.

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{z^2}{2}} dz, \quad (2.5.6)$$

$$\text{где } Z = \frac{L_i - L_{cp}}{\sigma}.$$

На основе результатов подобных расчетов для предотвращения брака принимают меры, приводящие к уменьшению случайного рассеяния размеров

(уменьшение σ за счет использования точного оборудования, наиболее современных методов обработки и рационального построения технологического процесса, применения высокостойкого инструмента).

Варианты расчета для оценки точности технологической операции представлены в прил. 1.

2.5.2. Разработка алгоритма определения параметров качества обработанных деталей

При разработке алгоритма определения параметров качества необходимо принять характер оценки точности технологической операции, а также значения параметров поверхностного слоя готовой детали. В алгоритме должны быть представлены факторы, которые могли бы повлиять на возникновение брака из партии изделий. При определении параметров качества нужно учитывать их возможные изменения в процессе эксплуатации детали. Для сохранения размеров трущихся деталей необходимо создать при изготовлении эксплуатационный резерв точности.

2.6. Разработка алгоритма диагностирования режущего инструмента (РИ)

Основная задача диагностирования процесса резания и инструмента состоит в своевременном определении предельного состояния или отказа инструмента для его замены и тем самым восстановления работоспособности автоматизированных станков и станочных комплексов. Определение текущего состояния инструмента проводится в целях управления процессом резания: коррекции траектории движения инструмента, изменения режимов резания и др.

Системы диагностирования должны выполнять: измерение параметров диагностических признаков состояния и отказа инструмента; распознавание текущего состояния инструмента; принятие решений по замене инструмента или управлению технологическим процессом; прогнозирование остаточной стойкости инструмента.

Анализ причин возникновения различных видов отказа инструмента показывает, что все отказы можно разделить на **прогнозируемые** (ожидаемые) и **непрогнозируемые** (неожиданные) (рис. 2.6.1).

Отказы прогнозируются тогда, когда обработка заданного материала осуществляется инструментом с оптимальными параметрами начального состояния при оптимальных условиях резания. В этом случае наступают отказы, главным образом, вследствие изнашивания режущего участка инструмента до величины допускаемого износа в течение принятого периода стойкости. При прерывистом резании наряду с изнашиванием прогнозируются отказы вследствие выкрашивания режущего участка из-за термоциклических или усталостных изменений в инструментальном материале или других причин, свойственных про-

цессу прерывистого резания. Прогнозируемые отказы, как правило, устраняются переточкой инструмента.

Непрогнозируемые отказы случаются тогда, когда обработка ведется при отличающихся от оптимальных условий эксплуатации или параметрах начального состояния инструмента. Для таких случаев характерны отказы не только в виде интенсивного изнашивания или выкрашивания, но и отказы в виде сколов, поломок, а также значительного пластического разрушения режущего участка инструмента.

Неожиданно может наступить отказ при работе инструмента с переменными условиями в течение одного периода его стойкости. Работа инструмента при одних условиях может вызвать изменения в параметрах его состояния, неблагоприятные для работоспособности инструмента при других условиях. Поскольку эти изменения трудно прогнозируются, они приводят к неожиданному отказу.



Рис. 2.6.1. Структура отказов инструмента

2.6.1. Количественные показатели надежности РИ

Надежность инструмента зависит от скорости нарастания износа. Выход износа на назначенную допускаемую величину означает отказ инструмента. Случайный характер изнашивания инструмента определяет случайный характер его наработки до отказа.

$$F(T) = P(T \leq T_i).$$

Функция $F(T)$, называемая интегральным законом распределения, имеет следующие свойства.

1. $F(T)$ — неубывающая функция своего аргумента, т.е. при $T_2 > T_1$ $F(T_2) > F(T_1)$. Отсюда следует, что чем больше принята T_i , тем больше вероятность отказа инструмента.

2. При $T_i \rightarrow 0$ функция распределения стремится к нулю $F(0) \approx 0$.

3. При $T_i \rightarrow +\infty$ $F(T) = F(+\infty) = 1$.

Если принять любое значение T_i , то событие $T \leq T_i$ означает отказ в течение времени T_i , а вероятность $P(T \leq T_i)$ — вероятность отказа за время T_i (ордината на графике $F(T)$). Статистически вероятность отказа за время T_i определяется как отношение числа отказов $n(T_i)$ к наработке до отказа менее T_i к общему числу отказов N :

$$\bar{F}(T_i) = \frac{n(T_i)}{N}.$$

Основным показателем безотказности инструмента является *вероятность безотказной работы* $P(T)$. Это вероятность того, что наработка до отказа T не будет ниже некоторого назначенного значения T_i , т.е. T попадет на участок графика от T_i до $+\infty$. Если задано время T_i , то все случаи, когда работоспособное состояние сохраняется при $T > T_i$, относятся к безотказной работе.

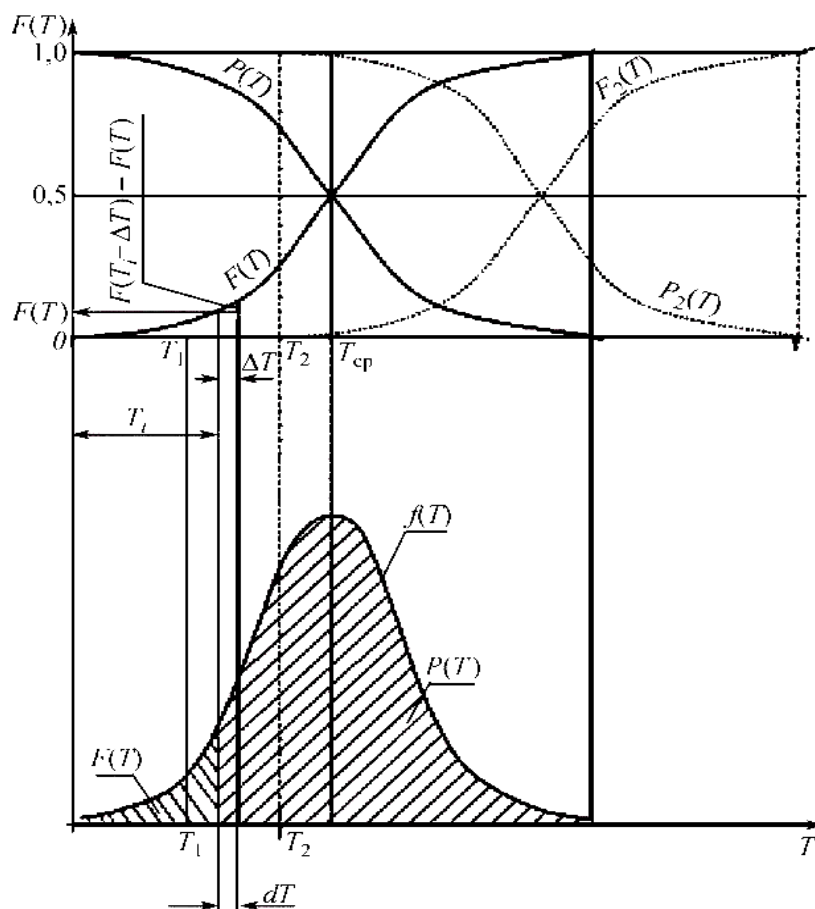


Рис. 2.6.1. Функции распределения и плотность распределения наработки до отказа

Статистически вероятность безотказной работы в течение времени T_i рассчитывается как отношение числа отказов с наработкой больше T_i к общему числу отказов:

$$P(T_i) = \frac{N - n(T_i)}{N} = 1 - \frac{n(T_i)}{N}.$$

Тогда $P(T_i) = P(T > T_i) = 1 - F(T_i)$.

Вероятность отказа $F(T_i) = 1 - P(T_i)$.

На рисунке 2.6.1. показана зависимость $P(T)$. Точка пересечения $F(T)$ и $P(T)$ определяет среднюю (медианную) наработку до отказа. В этой точке $P(T)$ и $F(T)$ равны 0,5.

Каждому инструменту в зависимости от его надежности соответствует своя кривая $P(T)$. Для более надежного — кривая $P_2(T)$ и соответственно $F_2(T)$. Это означает, что при $T < T_2$ вероятность отказов равна 0, а вероятность безотказной работы равна 1. Точка T_2 определяет срок эксплуатации без отказов.

Вероятность безотказной работы в течение времени T_i может быть найдена через плотность распределения случайной величины — наработки до отказа.

Вычислим вероятность попадания наработки до отказа T на участок от T_i до $T_i + \Delta T$:

$$P(T_i < T < T_i + \Delta T) = F(T_i + \Delta T) - F(T_i).$$

Это приращение функции распределения на участке ΔT . Тогда средняя вероятность приращения на участке ΔT при $\Delta T \rightarrow 0$ дает производную от функции распределения

$$\lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{F(T_i + \Delta T) - F(T_i)}{\Delta T} = F'(T_i).$$

Обозначим $F'(T_i) = f(T)$. Функция $f(T)$ — производная функции распределения $F(T)$ — характеризует плотность, с которой распределяются значения случайной величины наработки до отказа. Эта функция называется плотностью распределения наработки до отказа $f(T)$ и отображается кривой

Вероятность попадания наработки до отказа на элементарный участок $\Delta T \rightarrow dT$ равна $f(T)dT$. Это следует из предыдущего соотношения. $f(T)dT$ — площадь элементарного прямоугольника, опирающегося на отрезок dT . Тогда вероятность попадания наработки до отказа (вероятность отказа) на участок от T_1 до T_2 равна сумме элементов вероятности на этом участке, т.е. интегралу

$$P(T_1 < T < T_2) = \int_{T_1}^{T_2} f(T) dT,$$

определяющему площадь под кривой плотности распределения на участке $T_1 - T_2$.

Выразим функцию распределения через плотность распределения. По определению $F(T_i) = P(T < T_i) = P(-\infty < T < T_i)$. Отсюда

$$F(T) \int_{-\infty}^{T_i} = f(T) dT.$$

Эта формула определяет вероятность того, что наработка до отказа не превышает некоторого значения T_i , т.е. вероятность отказа $F(T)$ равна площади под кривой $f(T)$ на участке от $-\infty$ до T_i . Тогда вероятность безотказной работы в течение времени T_i будет равна площади под кривой $f(T)$ на участке от T_i до $-\infty$ и рассчитывается по формуле

$$P(T_i) = 1 - \int_{-\infty}^{T_i} f(T) dT.$$

Таким образом, получено выражение для определения вероятности безотказной работы через плотность распределения наработки до отказа. Для определения этого главного показателя безотказности плотность распределения наработки до отказа получают в результате статистических исследований.

Рассмотрим еще один показатель надежности.

Для анализа причин отказов, например, партии режущего инструмента, работающего в технологической системе, определяют такой показатель надежности, как *интенсивность* отказов $\lambda(T)$ — вероятность отказа в единицу времени ΔT после времени T при условии, что до этого времени отказов не было. Интенсивность отказов выражают формулой

$$\lambda(T) = \frac{f(T)}{P(T)}.$$

Для определения статистической оценки интенсивности отказов правую и левую часть формулы умножим на ΔT :

$$\lambda(T) \Delta T = \frac{f(T) \Delta T N}{P(T) N},$$

где N — число объектов, работоспособных в момент времени T ; $f(T)\Delta T$ — вероятность попадания наработки до отказа на участок ΔT , вероятность отказа на этом участке; $f(T)\Delta TN$ — среднее число отказов за время ΔT ; $P(T)N$ — среднее число случаев безотказной работы.

Тогда статистически интенсивность отказов определится как

$$\bar{\lambda}(T) = \frac{n(\Delta T)}{N_{\text{ср}}(\Delta T)\Delta T},$$

где $\frac{n(\Delta T)}{\Delta T}$ — число отказов в единицу времени.

$$N_{\text{ср}}(\Delta T) = \frac{N(T) + N(T + \Delta T)}{2},$$

где $N(T) + N(T + \Delta T)$ — число случаев безотказной работы соответственно в начале и конце интервала ΔT .

Зависимость интенсивности отказов от времени может иметь три зоны, каждая из которых отображает особенности отказов, изменяющиеся с течением времени работы партии объектов (рис. 2.6.2.).

В зоне I $\lambda(T + \Delta T) < \lambda(T)$. Интенсивность отказов здесь высокая, но уменьшающаяся с течением времени и связана с наличием дефектов, приобретенных при изготовлении объектов. Происходит отбор ненадежных объектов. Это зона приработки. В зоне III, где $\lambda(T + \Delta T) > \lambda(T)$, повышение интенсивности отказов связано с повреждениями, приобретенными при эксплуатации за длительный период времени. Например, усталостные повреждения приводят к отказу.

Зона II — основной временной участок работы, где $\lambda(T + \Delta T) = \lambda(T)$. Интенсивность отказов стабильна и отказы носят в основном случайный характер.

Ясно, что склонность элементов технологической системы к изменению состояния с течением времени работы удобно оценивать по зависимости $\lambda(T)$. $\lambda(T)$ используется в различных областях деятельности человека.

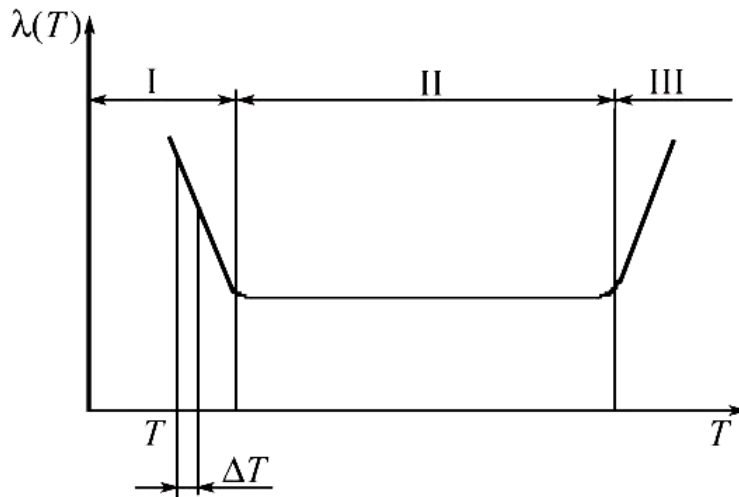


Рис. 2.6.2. Зависимость интенсивности отказов от времени

Практическая часть раздела 2.6.1

При известной функции $f(T)$ — плотности вероятности распределения наработки до отказа — может решаться ряд практических задач. Рассмотрим некоторые из них, но прежде получим математические зависимости для их решения.

Положим, что $f(T)$ подчиняется нормальному распределению

$$f(T) = \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(T-mT)^2}{2\sigma_T^2}},$$

тогда функция распределения, интегральный закон, имеет вид

$$F(T) = \int_{-\infty}^T f(T) dT = \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^T e^{-\frac{(T-mT)^2}{2\sigma_T^2}} dT,$$

где mT — математическое ожидание наработки до отказа; σ_T — среднее квадратическое отклонение наработки до отказа.

Нормальное распределение случайных величин довольно часто используется в задачах надежности. Нарботка восстанавливаемых изделий до ремонта и невосстанавливаемых изделий до отказа в ряде случаев приближенно распределена по нормальному закону. Нормальное распределение часто используется для приближенных расчетов в тех случаях, когда имеет место биномиальное распределение или распределение Пуассона. Точного соответствия теоретического закона фактическому распределению наработки до отказа здесь не может быть, так как наработка — это положительная величина, а при нормальном распределении случайная величина может принимать и отрицательные значения. Однако если у нормально

распределенного события коэффициент вариации мал $\left(v = \frac{\sigma_T}{mT} < \frac{1}{3} \right)$,

то вероятность $P(T \leq 0) = \int_{-\infty}^0 f(T) dT$ получения отрицательных значе-

ний, как будет показано далее, настолько мала, что ею можно пренебречь. В этом случае можно воспользоваться нормальным распределением и для существенно положительных величин. Тогда достоверно, что T может принимать любые численные значения в пределах от 0 до $+\infty$, поэтому

$$P(0 < T < +\infty) = \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2\pi}} \int_0^{+\infty} e^{-\frac{(T-mT)^2}{2\sigma_T^2}} dT = 1.$$

Вероятность попадания T в интервал $T_1 - T_2$ будет

$$P(T_1 < T < T_2) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{T_1}^{T_2} e^{-\frac{(T-mT)^2}{2\sigma_T^2}} dT.$$

Для расчета этой вероятности произведем замену переменной T :

$$\frac{T - mT}{\sigma_T \sqrt{2}} = x,$$

тогда

$$T = mT + \sigma_T \sqrt{2}x, \quad dT = \sigma_T \sqrt{2}dx.$$

Получим

$$P(T_1 < T < T_2) = \frac{1}{\sigma_T \sqrt{2\pi}} \int_{\frac{T_1 - mT}{\sigma_T \sqrt{2}}}^{\frac{T_2 - mT}{\sigma_T \sqrt{2}}} e^{-x^2} \sigma_T \sqrt{2} dx = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{T_1 - mT}{\sigma_T \sqrt{2}}}^{\frac{T_2 - mT}{\sigma_T \sqrt{2}}} e^{-x^2} dx.$$

Неопределенный интеграл $\int e^{-x^2} dx$ не выражается через элементарные функции. Для вычисления его пользуются таблицами так называемой функции Лапласа, или интеграла вероятностей:

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx.$$

С помощью функции Лапласа может быть выражена вероятность

$$P(T_1 < T < T_2) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{\frac{T_1 - mT}{\sigma_T \sqrt{2}}}^{\frac{T_2 - mT}{\sigma_T \sqrt{2}}} e^{-x^2} dx = \frac{1}{2} \left[\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{T_2 - mT}{\sigma_T \sqrt{2}}} e^{-x^2} dx - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{T_1 - mT}{\sigma_T \sqrt{2}}} e^{-x^2} dx \right] =$$

$$= \frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{T_2 - mT}{\sigma_T \sqrt{2}} \right) - \Phi \left(\frac{T_1 - mT}{\sigma_T \sqrt{2}} \right) \right]. \quad (2.6.1)$$

Функция Лапласа обладает рядом свойств.

1. $\Phi(0) = 0$.
2. $\Phi(\infty) = 1$.
3. $\Phi(-x) = -\Phi(x)$, т.е. функция Лапласа есть нечетная функция x .

Пример расчета вероятности безотказной работы РИ

Пример 1. Нарботка до отказа технологической системы имеет нормальное распределение с параметрами $mT = 100$ мин и $\sigma_T = 20$ мин. Определить вероятность безотказной работы режущего инструмента для ряда значений наработки. Для $T = 20$ мин (рис. 2.6.3). В табл. 2.6.1 приведены значения функции Лапласа $\Phi(x)$ для нескольких значений x .

Т а б л и ц а 2.6.1

Значения функции Лапласа

x	0,00	0,50	0,706	1,16	2,12	2,82	3,00
$\Phi(x)$	0,00	0,5205	0,681	0,899	0,9972	0,999	1,00

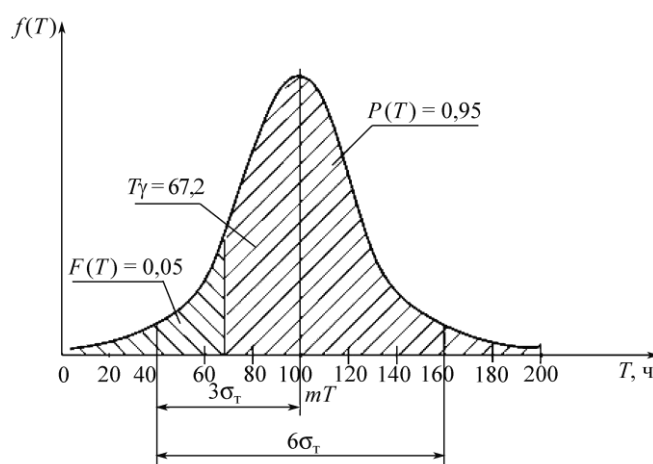


Рис. 2.6.3. Оценка вероятности работы РИ до отказа

$$\begin{aligned}
P(20 < T < \infty) &= \frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{\infty - 100}{20\sqrt{2}} \right) - \Phi \left(\frac{20 - 100}{20\sqrt{2}} \right) \right] = \\
&= \frac{1}{2} \left[\Phi(\infty) - \Phi \left(-\frac{80}{20 \cdot 1,415} \right) \right] = \frac{1}{2} [\Phi(\infty) + \Phi(2,82)].
\end{aligned}$$

В соответствии со свойствами функции Лапласа $\Phi(\infty) = 1$. По таблице 2.6.1 функция Лапласа $\Phi(2,82) = 0,999$, т.е. вероятность безотказной работы при наработке $T = 20$ мин (вероятность того, что T будет принимать значения больше 20 ч) близка к 1.

Аналогично решается задача для других значений наработки.

Для $T = 40$ ч

$$\begin{aligned}
P(40 < T < \infty) &= \frac{1}{2} \left[\Phi(\infty) - \Phi \left(\frac{40 - 100}{20\sqrt{2}} \right) \right] = \\
&= \frac{1}{2} \left[1 + \Phi \left(\frac{3}{1,415} \right) \right] = \frac{1}{2} [1 + 0,9972] = 0,9986.
\end{aligned}$$

Для $T = 120$ ч

$$\begin{aligned}
P(120 < T < \infty) &= \frac{1}{2} \left[\Phi(\infty) - \Phi \left(\frac{120 - 100}{20\sqrt{2}} \right) \right] = \\
&= \frac{1}{2} [1 - \Phi(0,706)] = \frac{1}{2} [1 - 0,681] = 0,159.
\end{aligned}$$

Исходя из организационно-технических соображений, принимаем регламентированную наработку T , например, наработку до смены инструмента или до подналадки станка. По полученному значению $P(T)$ – вероятности безотказной работы – оцениваем, достаточна ли надежность технологической системы.

В ответственных случаях при высоких требованиях к надежности технического объекта решается обратная задача.

Пример 2. Для условий примера 1 требуется определить наработку T_γ , в течение которой с вероятностью $P(T) = \gamma = 0,95$ отказа не произойдет. (Эту наработку еще называют *гамма-процентной наработкой*, тогда γ выражают в процентах.)

По формуле (2.6.1)

$$P(T_{\gamma} < T < \infty) = \frac{1}{2} \left[\Phi(\infty) - \Phi\left(\frac{T_{\gamma} - 100}{20\sqrt{2}}\right) \right] = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \Phi\left(\frac{T_{\gamma} - 100}{28,3}\right) = 0,95;$$

$$0,45 = -0,5\Phi\left(\frac{T_{\gamma} - 100}{28,3}\right)$$

с учетом свойств функции Лапласа запишем $0,9 = \Phi\left(\frac{100 - T_{\gamma}}{28,3}\right)$.
По таблице 3.5 для $\Phi(x) = 0,9$ имеем

$$1,16 = \frac{100 - T_{\gamma}}{28,3}. T_{\gamma} = 67,2 \text{ ч.}$$

Таким образом, в задаче установлено, что безотказная работа с вероятностью 0,95 будет выполняться в течение 67,2 ч. Вероятность отказов за это время работы равна 0,05 (см. рис. 2.6.3).

Если принято, что вероятность безотказной работы инструмента должна быть высокой, равной 0,95 ($P(T) = 0,95$), то через каждые 67,2 ч необходимо предупредительно менять инструмент или выполнять подналадку. Попадание наработки в интервал от 0 до 67,2 ч означает отказ, вероятность появления которого равна 0,05. $F(T) = 0,05$.

Значение 67,2 ч – это назначенная наработка, при достижении которой работа инструмента прекращается независимо от его состояния. Назначенная наработка устанавливается для таких объектов, переход которых в предельное состояние недопустим в связи с возможными тяжелыми последствиями. Поэтому вероятность безотказной работы в течение назначенной наработки не должна сильно отличаться от единицы. Назначенная наработка определяется для предупредительной подналадки или смены инструмента.

Исходные данные для расчета вероятности безотказной работы представлены в прил. 2.

2.6.2. Расчет силовых параметров обработки для выявления диагностического признака состояния инструмента

Основная задача диагностирования процесса резания и инструмента состоит в своевременном определении предельного состояния или отказа инструмента для его замены и тем самым восстановления работоспособности автоматизированных станков и станочных комплексов. Определение текущего состояния инструмента проводится в целях управления процессом резания: коррекции траектории движения инструмента, изменения режимов резания и др.

Системы диагностирования должны выполнять: измерение параметров диагностических признаков состояния и отказа инструмента; распознавание текущего состояния инструмента; принятие решений по замене инструмента или

управлению технологическим процессом; прогнозирование остаточной стойкости инструмента.

Из теории резания известно, что сила сопротивления относительно движению режущего инструмента в обрабатываемой заготовке складывается из следующих составляющих:

- ✓ сопротивления пластическому деформированию и разрушению металла в зоне стружкообразования и в поверхностном слое детали;
- ✓ сопротивления стеканию (трению) стружки по передней поверхности инструмента;
- ✓ сопротивления образовавшейся стружки деформации изгиба и ломания;
- ✓ сопротивления движения инструмента, возникающего на задних его поверхностях.

Изменение каждой из перечисленных составляющих силы резания вызывается не только изменением факторов процесса резания, но и изменением при обработке соответствующих параметров состояния инструмента, детали и стружки. Поэтому каждая составляющая могла бы играть роль диагностического признака изменения, связанного с ней параметра состояния.

Физические представления о процессе резания и работе инструмента позволяют прогнозировать возможность использования силовых диагностических признаков для различных изменяющихся параметров состояния.

Для наглядности прогнозы по основным параметрам состояния резцов сведены в табл. 2.6.1.

В табл. 2.6.1. большая предполагаемая информативность диагностического признака отмечена полным кругом, меньшая – эллипсом.

Взаимосвязь параметров состояния объектов процесса резания, прослеживаемая на рис. 2.6.4, позволяет осознанно подходить к выбору диагностических признаков диагностируемых параметров. Однако окончательное заключение о практическом применении того или иного признака можно сделать лишь путем сопоставления их информативности, выявленной в результате экспериментальных исследований. Только эксперимент при конкретных условиях резания позволяет учесть возможные, часто непредсказуемые особенности работы инструмента и взаимосвязи параметров его состояния с предполагаемыми диагностическими признаками. Это может быть проиллюстрировано следующими примерами.

Как видно в табл. 2.6.1, составляющие силы резания P_x , P_y , P_z являются информативными диагностическими признаками развития очага износа резцов по задней поверхности, что подтверждается экспериментальными зависимостями, приведенными на рис. 2.6.5.

Силовые диагностические признаки параметров состояния инструмента

Изменяющийся параметр состояния	Диагностический признак				
	P_z	P_y	P_x	A_R	f_R
Износ инструмента по задним поверхностям	0	○	○	○	
Износ инструмента по передней поверхности	○	0	0		
Выкрашивание или скалывание режущей кромки	○	○	○		
Изменение формы стружки		0	0	○	0
Образование нароста	0				

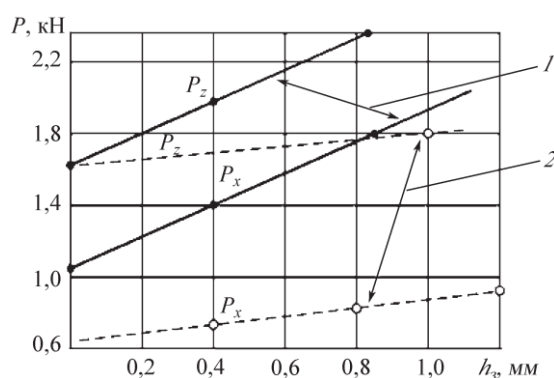


Рис. 2.6.5. Изменение составляющих сил резания с ростом износа:
1 – резание без нароста; 2 – резание с наростом

Графики зависимостей $P_x = f(h_3)$ и $P_z = f(h_3)$, полученные при точении молибденового сплава на скорости резания $v = 102$ м/мин при отсутствии нароста на резце, обнаруживают достаточно высокую информативность составляющих силы P_x и P_z . Но если снизить v , то при прочих равных условиях информативность их существенно снижается. Объясняется это тем, что при меньших скоростях создаются условия, благоприятствующие образованию нароста. Нарост, нависая над задней поверхностью, уменьшает контакт площадки износа с поверхностью резания детали, а вместе с этим – и рост составляющих сил, вызываемый износом h_3 .

На рис. 2.6.6 приведена схема сил, действующих на узлы и детали токарного станка, которая позволяет наметить места установки датчиков сил и определить их конструктивное решение.

На токарном станке вертикальная составляющая силы резания P_z , действующая на заготовку диаметром D , перенесенная в центр заготовки (рис. 2.6.7) создает момент сопротивления резанию $M_{ср} = P_z/2$, который через систему пе-

редач преодолевается крутящим моментом электродвигателя. Между моментом на заготовке и моментом на валу двигателя существует функциональная связь, которая позволяет использовать двигатель как датчик для определения силы. Эта же сила P_z в центре заготовки, а затем перенесенная в центр передней опоры шпинделя, действует на нее, вызывая деформации деталей подшипника. Функциональная связь между силой и этими деформациями позволяет использовать подшипник как датчик для определения силы. Используют также деформируемые силой детали патрона и центра задней бабки.

В то же время P_z действует на резец. Она деформирует державку резца, в которой может быть установлен датчик для ее определения. Воспринимается сила опорой вращения револьверной резцовой головки подобно тому, как опорой шпинделя. Здесь, а также под основанием резцовой головки, могут быть установлены датчики силы.

Составляющая силы резания P_x действует в осевом направлении на передний радиально-упорный подшипник шпинделя, а ее реакция – на резец и резцовую головку. Силовое замыкание показано на рис. 2.6.6 штриховой линией и стрелками. Оно позволяет определить места расположения и конструкции датчиков для измерения P_x . При продольной подаче резца сопротивление перемещению суппорта преодолевается двигателем подачи.

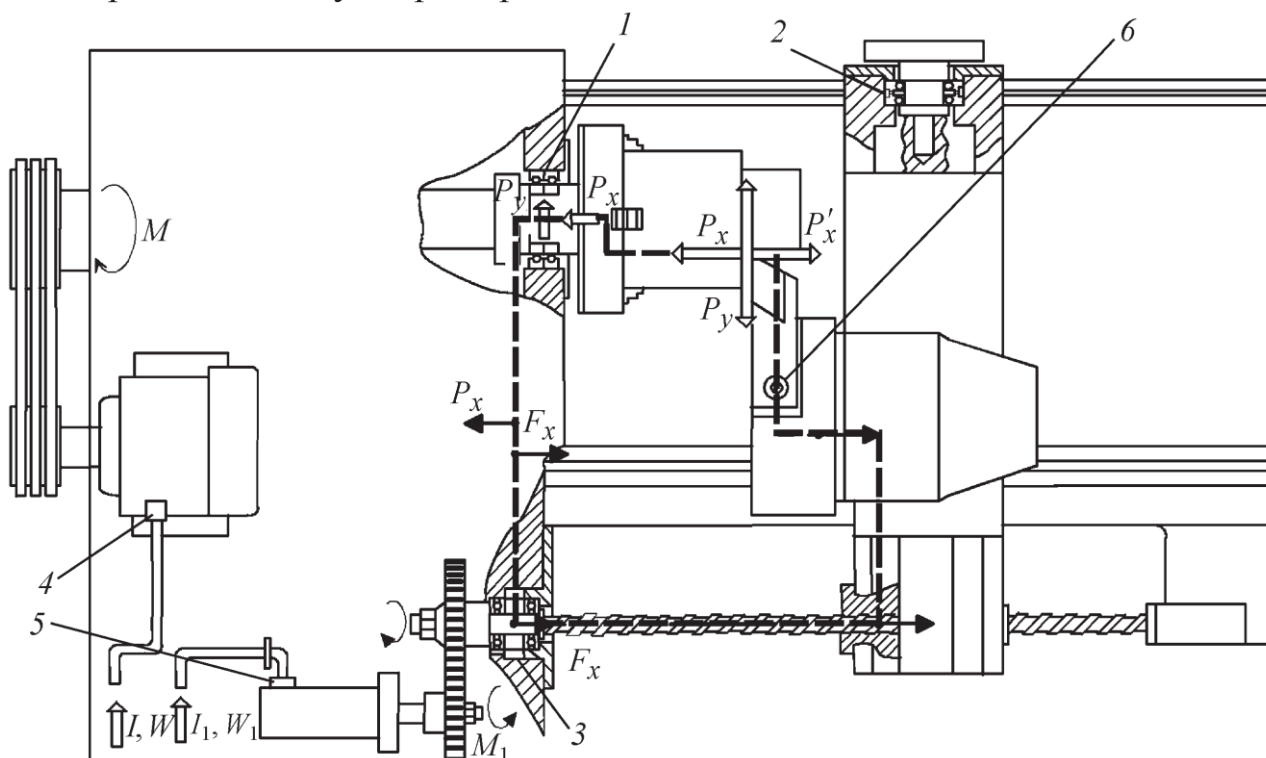


Рис. 2.6.6. Силы, действующие при резании на узлы токарного станка:
1 – тензометрический подшипник; 2, 3 – тензометрические опоры ходовых винтов;
4, 5 – датчики мощности приводов; 6 – датчик силы в державке резца

Он создает крутящий момент для вращения ходового винта, обеспечивающий на гайке тяговое усилие, необходимое для подачи суппорта. Опоры

винта, так же, как и двигатель подачи, могут быть использованы в качестве датчиков усилий. Аналогично определяются возможные места установки датчиков для определения составляющей силы резания P_y .

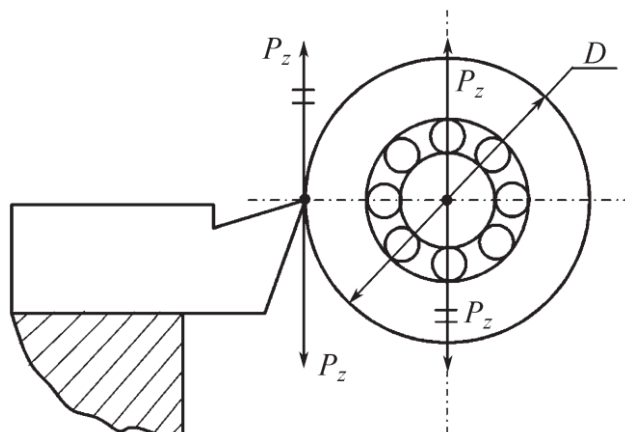


Рис. 2.6.7. Схема действия составляющей силы резания P_z на резец, деталь и передний подшипник шпинделя

Пример расчета силовых параметров (точение)

Исходные данные выбору геометрических параметров режущего инструмента представлены в [2] и требуют согласования с руководителем КП.

Рассмотрим процесс несвободного резания, при котором снятие припуска осуществляется радиусной и прямолинейной частями главной режущей кромки. Сечение остаточного выступа (неровности) на обработанной поверхности оформляется радиусными боковыми сторонами (рис. прил. 3, а). Данный случай имеет место при соблюдении следующих соотношений: $t \geq r(1 - \cos \varphi)$, $s \leq 2r \sin \varphi_1$.

На переднюю поверхность инструмента действуют сила трения F_{Π} и нормальная сила N . Эти силы определяют силу стружкообразования R (рис. 2.6.8). Силы R_z и R_y являются соответственно горизонтальной (тангенциальной) и вертикальной (радиальной) составляющими силы R . Так как сила сдвига R_c является проекцией равнодействующей силы R на условную плоскость сдвига AB , то угол между силами R_z и R_c равен углу наклона условной плоскости сдвига β_1 .

На заднюю поверхность инструмента действуют сила трения F_1 и нормальная сила N_1 (рис. 2.6.9).

Под действием силы P резец внедряется в обрабатываемый материал и производит его смятие. По мере перемещения резца длина площадки смятия $l_{\text{см}}$ увеличивается и на элемент будущей стружки действует возрастающая сила. Увеличение этой силы идёт до тех пор, пока не произойдёт скалывание элемента по плоскости 1–1 под углом β_1 . Эта плоскость называется *плоскостью скалывания*, а угол – *углом скалывания*.

Со стороны резца на элемент стружки действует сила смятия $P_{\text{см}}$:

$$P_{\text{см}} = \sigma_{\text{см}} \cdot f_{\text{см}} = \sigma_{\text{см}} \cdot l_{\text{см}} \cdot b,$$

где $\sigma_{см}$ – предел прочности обрабатываемого материала на смятие; b – ширина среза; $l_{см}$ – длина площадки смятия.

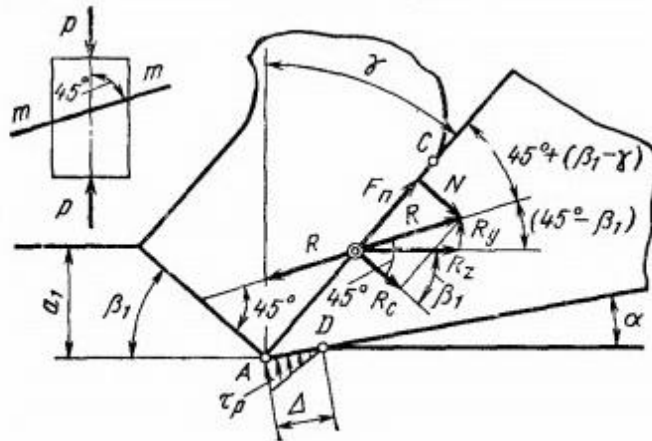


Рис. 2.6.8. Схема действия сил на передней поверхности инструмента

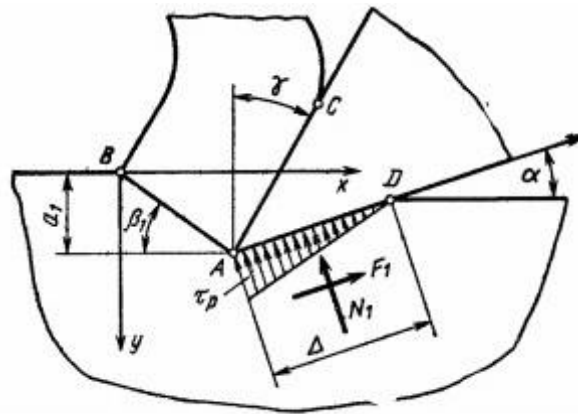


Рис. 2.6.9. Схема действия сил на задней поверхности инструмента

Элемент удерживается силой $P_{ск}$

$$P_{ск} = \tau_{ск} f_{ск} = \tau_{ск} \cdot l_{ск} \cdot b, \quad l_{ск} = a / \sin \beta_1,$$

где $\tau_{ск}$ – предел прочности обрабатываемого материала на сдвиг (скалывание).

$$P'_{см} = P_{см} \cos(\beta_1 - \gamma) \geq P_{ск}.$$

Периодический характер образования стружки вызывает колебания силы резания, что делает процесс резания динамически неустойчивым.

Силы резания определяются по формулам

$$R_z = \tau_p a_1 b_1 \left(1 + \frac{1}{B}\right);$$

$$R_y = \tau_p a_1 b_1 \left(\frac{1}{B} - 1\right);$$

$$F_n = \tau_p a_1 b_1 \left(\frac{\cos \gamma + \sin \gamma}{B} - \cos \gamma + \sin \gamma \right);$$

$$N = \tau_p a_1 b_1 \left(\frac{\cos \gamma - \sin \gamma}{B} + \cos \gamma + \sin \gamma \right);$$

$$F_1 = 0,625 \tau_p \rho_1 b \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}};$$

$$N_1 = 0,625 \frac{\tau_p \rho_1 b}{\mu_1} \sqrt{\frac{B}{\sin \alpha}},$$

где τ_p – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, Н/м²;

$$a_1 = \frac{s}{c'} \sin \arctg \frac{c'}{[1 - a'(1 - \cos \varphi)] \operatorname{ctg} \varphi + a'(\sin \varphi + b')} - \text{толщина среза, м;}$$

Ширина среза

$$b_1 = \frac{c' t}{\sin \arctg \frac{c'}{[1 - a'(1 - \cos \varphi)] \operatorname{ctg} \varphi + a'(\sin \varphi + b')}};$$

$$a' = r/t; \quad c' = 1 - a' \left(1 - \sqrt{1 - b'^2} \right);$$

$$B = \frac{(\operatorname{Pe} B - 2) \operatorname{erf}(0,5 \sqrt{\operatorname{Pe} B}) + 1,125 \sqrt{\operatorname{Pe} B} \exp(-0,25 \operatorname{Pe} B)}{\sqrt{\operatorname{Pe} B} [\sqrt{\operatorname{Pe}} + 0,325 F D^{0,3} (1 - \sin \gamma)^{0,25}]} +$$

$$+ \frac{0,665 \operatorname{erf}(0,5 \sqrt{\operatorname{Pe} B})}{\sqrt{\operatorname{Pe} B}} + \frac{0,145 F^{0,8} D^{0,25} \operatorname{erf}^{0,25}(0,5 \sqrt{\operatorname{Pe} B})}{\operatorname{Pe}^{0,5} B^{0,2} (1 - \sin \gamma)^{0,95}} +$$

$$+ \frac{\operatorname{Pe} B (1 - \sin \gamma)^{0,4} [\cos \gamma + \sin \gamma - B (\cos \gamma - \sin \gamma)]}{(\cos \gamma + B \sin \gamma) [\operatorname{Pe} (1 - \sin \gamma)^{0,4} + 0,225 F D^{0,3}]} - 1;$$

где $P_e = \frac{\nu a_1}{a}$ – критерий Пекле, характеризующий степень влияния режимных условий процесса νa_1 по сравнению с влиянием теплофизических свойств обрабатываемого материала a ; $F = \frac{\lambda_p}{\lambda} \beta \varepsilon$ – критерий, отражающий влияние геометрии инструмента и отношения теплопроводностей инструментального и обрабатываемого материалов; $D = a_1 / b_1$ – критерий, характеризующий геометрию сечения среза; $\operatorname{erf} x = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-x^2} dx$ – интеграл вероятности; μ_1 – коэффициент трения на задней контактной площадке.

Величину B можно определить расчётным путем, пользуясь прил. 3.

При приближённых расчётах средний коэффициент трения можно приравнять к μ_1 .

Тогда

$$\mu = \mu_1 = \frac{\cos \gamma + \sin \gamma - B \cos(\cos \gamma - \sin \gamma)}{\cos \gamma - \sin \gamma + B \cos(\cos \gamma + \sin \gamma)}.$$

Процессы резания характеризуются наличием трёх основных быстро движущихся по отношению к стружке и детали плоских источников тепла шириной b_1 и длиной $AB = \frac{a_1}{\sin \beta_1}$, $AC = 1$ и $AD = \Delta$ (рис. 2.6.10).

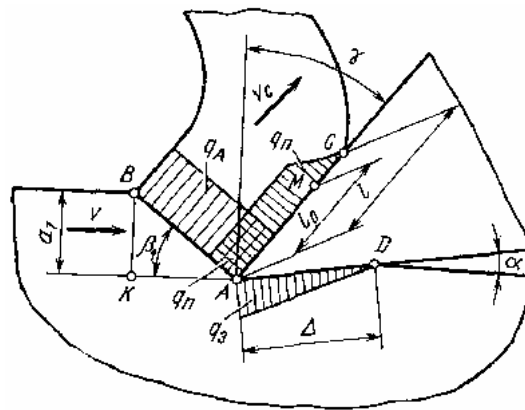


Рис. 2.6.10. Схема распределения суммарных интенсивностей тепловыделения в плоскости сдвига и на контактных поверхностях инструмента

Величину предельного значения силового параметра $F(h_3)$ и значение силового параметра острозаточенного инструмента определяем следующим образом:

$$F(h_3) = \rho_1 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + B^2}} \right);$$

$$F(h_3 = 0) = \frac{B}{\cos \gamma + \sin \gamma},$$

где ρ_1 – радиус скругления режущей кромки резца.

Диагностический признак состояния инструмента выбирается по максимальному значению коэффициента информативности:

$$K = \frac{F(h_3) - F(h_3 = 0)}{F(h_3 = 0)},$$

где $F(h_3)$ – предельное значение силового параметра; $F(h_3 = 0)$ – значение силового параметра острозаточенного инструмента.

**Пример расчета силовых параметров обработки
(фрезерование)**

Теоретический раздел расчета силовых параметров представлен [1, стр. 163 - 188]. Выбор схемы фрезерования требует согласования с руководителем КП.

На рис. 2.6.11, *а* представлена схема варьирования взаимного положения инструмента и заготовки для моделирования видов и схем фрезерования, что обеспечивается сочетанием назначаемых значений ширины B и глубины t фрезерования, диаметра фрезы $D_{фр}$, а также параметра X_e при указанных направлениях движения резания $\bar{v}_p$ и движения подачи $\bar{v}_s$. Оставляющие силы резания F_z и F_y рассматриваются действующими на зуб фрезы в плоской декартовой системе координат y, z . Производные от сил F_z и F_y силы F_v и F_h определяются в плоской декартовой системе координат v, h с соответствующим после расчета знаком: F_h по координате h , F_v по координате v .

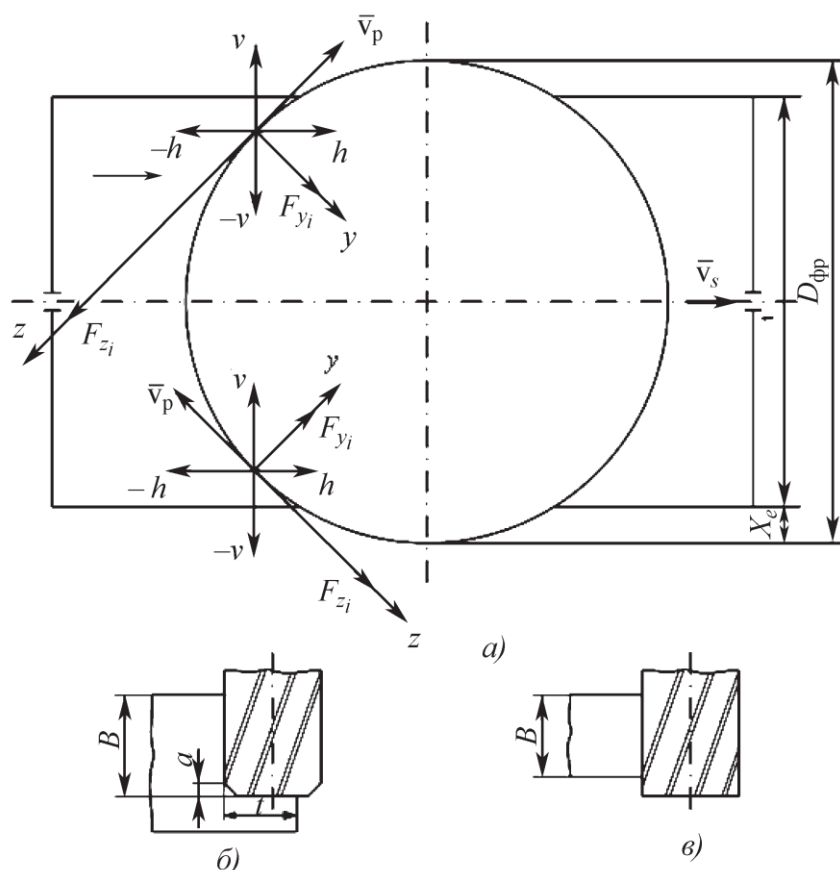


Рис. 2.6.11. Варьирование взаимного положения инструмента и детали для моделирования видов и схем фрезерования (*а*) при обработке уступа (*б*) и цилиндрическом фрезеровании (*в*)

На рис. 2.6.11, *б, в* обозначены факторы B и t , а также высота фаски a зуба фрезы при обработке уступа (*б*) и цилиндрическом фрезеровании (*в*).

Варьирование представленных факторов и параметра X_e позволяет моделировать следующие варианты фрезерования:

$$\begin{array}{l|l}
 0 \leq X_e < \frac{D_{\text{фр}}}{2} \\
 a = 0
 \end{array} \quad \left| \begin{array}{l} \text{— встречная схема цилиндрического фрезерования;} \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l|l}
 0 \leq X_e < \frac{D_{\text{фр}}}{2} \\
 a \neq 0
 \end{array} \quad \left| \begin{array}{l} \text{— встречная схема фрезерования при обработке уступов;} \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l|l}
 \frac{D_{\text{фр}}}{2} \leq X_e < D_{\text{фр}} \\
 a = 0
 \end{array} \quad \left| \begin{array}{l} \text{— попутная схема цилиндрического фрезерования;} \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l|l}
 \frac{D_{\text{фр}}}{2} \leq X_e < D_{\text{фр}} \\
 a \neq 0
 \end{array} \quad \left| \begin{array}{l} \text{— попутная схема фрезерования при обработке уступов;} \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l|l}
 X_e + t < D_{\text{фр}} \\
 a \neq 0
 \end{array} \quad \left| \begin{array}{l} \text{— торцовое фрезерование;} \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l|l}
 X_e = 0 \\
 D_{\text{фр}} = t \\
 a = 0
 \end{array} \quad \left| \begin{array}{l} \text{— цилиндрическое фрезерование по смешанной схеме;} \end{array} \right.$$

$$\begin{array}{l|l}
 X_e = 0 \\
 D_{\text{фр}} = t \\
 a \neq 0
 \end{array} \quad \left| \begin{array}{l} \text{— фрезерование пазов по смешанной схеме фрезерования.} \end{array} \right.$$

Исходные данные для расчета и графического моделирования силовых параметров при фрезеровании:

v [м/мин] — скорость;

B [мм] — ширина;

t [мм] — глубина;

$S_{\text{мин}}$ [мм/мин] — минутная подача;

$D_{\text{фр}}$ [мм] — диаметр фрезы;

Z — количество зубьев фрезы;

a [мм] — высота фаски зубьев;

h_3 [мм] — ширина фаски износа по главной задней поверхности;

ω [°] — угол наклона лезвия зубьев фрезы;

X_e [мм] — переменный параметр;

K_1 — поправочный коэффициент на обрабатываемый материал;

K_2 — поправочный коэффициент на геометрию инструмента;

K_3 — поправочный коэффициент на СОТС.

1. Проверка исходных данных и их корректировка:

а) $X_p = D_{\text{фр}} - X_e - t$, при $X_p < 0$ — корректировка исходных данных;

б) $\frac{B}{a} \geq 3$ — ограничение отношения ширины фрезерования и высоты фаски;

в) $a \leq 0,5$ — ограничение на высоту фаски;

г) $\omega \leq 45^\circ$ — ограничение на угол ω .

2. Расчет радиуса фрезы: $R = \frac{D_{\text{фр}}}{2}$.

3. Расчет угла поворота фрезы при реализации фактора B :

$$\psi_B = \frac{(B-a)\text{tg } \omega 180}{\pi R}.$$

Рассчитанное значение ограничивается вторым знаком после запятой и округляется до 0,5 или целого числа.

4. Расчет угла поворота зуба фрезы при реализации фактора t :

$$\psi_t = 180 - \arccos \frac{R - X_e}{R} - \arccos \frac{R - X_p}{R},$$

где $X_p = D_{\text{фр}} - t - X_e$.

Следует из выражения одних круговых функций через другие:

$$\arccos x = 180 - \arccos(-x) = 90 - \arcsin x.$$

Значения угла ψ_t ограничиваются вторым знаком после запятой и округляются до 0,5.

5. Расчет торцового шага ψ_z : $\psi_z = \frac{360}{Z}$. Округляется до 0,5 или целого числа.

6. Расчет полного угла контакта ψ_k : $\psi_k = \psi_t + \psi_B$.

7. Определение разрешенной дискреты Δ .

Если $\frac{\psi_z}{\Delta}, \frac{\psi_t}{\Delta}, \frac{\psi_B}{\Delta}, \frac{\psi_k}{\Delta}$ — целое число, то Δ разрешено; Δ задается по умолчанию, разрешенные дискреты выводятся на дисплей и задаются оператором.

8. Определение максимального количества одновременно работающих зубьев фрезы Z_j : $j = \frac{\Psi_k}{\Psi_z}$. Если $j \leq 1$, то $Z_j = 1$. Если $j > 1$, то

$Z_j = x + 1$, где x — целая часть числа.

9. Расчет угла поворота фрезы при наличии смещения X_e :

$$\Psi_0 = \arccos \frac{R - X_e}{R}.$$

10. Расчет подачи на зуб S_z :

$$S_z = \frac{S_{\min}}{nZ}, \text{ где } n = \frac{1000v}{\pi D_{\text{фр}}}.$$

11. Определение значений функций $\xi_i = f(\psi_i)$, где ξ_i — угол поворота точки приложения результирующего вектора силы резания на лезвии инструмента; ψ_i — мгновенный угол поворота зуба фрезы:

а) задание ψ_i :

$$\psi_i = i\Delta, \text{ где } i = 0, 1, \dots, n_\psi, n_\psi = \frac{\Psi_k}{\Delta};$$

б) нахождение ξ_i .

Если $\psi_i \geq \psi_B$, то

$$\xi_i = \begin{cases} \frac{\psi_i}{2} + \psi_0 & \text{при } 0 \leq \psi_i \leq \psi_B; \\ \psi_i - \frac{\psi_B}{2} + \psi_0 & \text{при } \psi_B < \psi_i \leq \psi_t; \\ \frac{\psi_i - \psi_t}{2} + \psi_t - \frac{\psi_B}{2} + \psi_0 & \text{при } \psi_t < \psi_i \leq \psi_k. \end{cases}$$

Если $\psi_t < \psi_B$, то

$$\xi_i = \begin{cases} \frac{\psi_i}{2} + \psi_0 & \text{при } 0 \leq \psi_i \leq \psi_t; \\ \frac{\psi_B}{2} + \psi_0 & \text{при } \psi_t < \psi_i \leq \psi_B; \\ \frac{\psi_t}{2} + \frac{\psi_i - \psi_B}{2} + \psi_0 & \text{при } \psi_B < \psi_i \leq \psi_k. \end{cases}$$

12. Расчет мгновенных значений силовых параметров F_{z_i}, F_{y_i} . Используются мультипликативные степенные функции:

$$F_{z_i} = \left[C_{F_z} + \left(\frac{2X_e}{R} \right)^3 \right] a_{\xi_i}^{X_{F_z}} B_{\psi_i}^{Y_{F_z}} K_{1_z} K_{2_z} K_{3_z} + C_{h_z} a_{\xi_i}^{X_{h_z}} B_{\psi_i}^{Y_{h_z}} h_3^{m_z} K'_{1_z} K'_{2_z} K'_{3_z};$$

$$F_{y_i} = \left[C_{F_z} + \left(\frac{2X_e}{R} \right)^{2,5} \right] a_{\xi_i}^{X_y} B_{\psi_i}^{Y_y} K_{1_y} K_{2_y} K_{3_y} + C_{h_y} a_{\xi_i}^{X_{h_y}} B_{\psi_i}^{Y_{h_y}} h_3^{m_y} K'_{1_y} K'_{2_y} K'_{3_y};$$

(В данных формулах используется переменная $\left(\frac{2X_e}{R} \right)^n$, которая учитывает увеличение силовых параметров при переходе от встречной к попутной схеме.)

а) расчет мгновенной толщины срезаемого слоя $a_{\xi_i} : a_{\xi_i} = S_z \sin \xi_i$;

б) расчет мгновенной ширины фрезерования B_{ψ_i} .

Если $\psi_i \geq \psi_B$, то

$$B_{\psi_i} = \begin{cases} \frac{\pi R \psi_i}{\operatorname{tg} \omega 180} & \text{при } 0 \leq \psi_i \leq \psi_B; \\ \frac{\pi R \psi_B}{\operatorname{tg} \omega 180} & \text{при } \psi_B < \psi_i \leq \psi_i; \\ \frac{\pi R \psi_B}{\operatorname{tg} \omega 180} - \frac{\pi R (\psi_i - \psi_i)}{\operatorname{tg} \omega 180} & \text{при } \psi_i < \psi_i \leq \psi_k. \end{cases}$$

Если $\psi_i < \psi_B$, то

$$B_{\psi_i} = \begin{cases} \frac{\pi R \psi_i}{\operatorname{tg} \omega 180} & \text{при } 0 \leq \psi_i < \psi_i; \\ \frac{\pi R \psi_i}{\operatorname{tg} \omega 180} & \text{при } \psi_i < \psi_i \leq \psi_B; \\ \frac{\pi R \psi_i}{\operatorname{tg} \omega 180} - \frac{\pi R (\psi_i - \psi_B)}{\operatorname{tg} \omega 180} & \text{при } \psi_B < \psi_i \leq \psi_k. \end{cases}$$

13. Расчет мгновенных значений силовых параметров F_{h_i} и F_{v_i} :

$$\begin{aligned} F_{h_i} &= F_{z_i} \cos \xi_i + F_{y_i} \sin \xi_i \\ F_{v_i} &= F_{z_i} \sin \xi_i - F_{y_i} \cos \xi_i \end{aligned} \quad \text{при } 0 \leq \xi_i \leq \xi_k.$$

Примечание: ξ_i может быть больше 90° , поэтому требуется расчет с учетом функций суммы и разности углов. Например, $\cos(\xi - 90) = \cos\xi \cos 90 + \sin\xi \sin 90 = \sin\xi$ и т.д.

Приведенная выше методика позволяет рассчитывать мгновенные значения рассматриваемых силовых параметров при участии в работе одного зуба фрезы. Если в работе одновременно участвуют несколько зубьев фрезы, дальнейшее нахождение суммарных мгновенных значений $F_{z_i\Sigma}$, $F_{y_i\Sigma}$, $F_{v_i\Sigma}$, $F_{h_i\Sigma}$ осуществляется следующим образом.

Расчеты суммарных силовых параметров ограничиваются торцовым шагом $\psi_z = \frac{360}{Z}$, так как периодически повторяются с периодом ψ_z .

1. Расчет суммарной мгновенной силы $F_{z_i\Sigma}$:

$$F_{z_i\Sigma} = \sum_{k=1}^n F_{z_{ik}}$$

2. Расчет суммарной мгновенной силы $F_{y_i\Sigma}$:

$$F_{y_i\Sigma} = \sqrt{(\pm F'_{v_i\Sigma})^2 + (F'_{h_i\Sigma})^2},$$

$$\text{где } F'_{v_i\Sigma} = \sum_{k=1}^n \pm F_{y_{ik}} \cos \xi_{ik}; \quad (2.6.2)$$

$$F'_{h_i\Sigma} = \sum_{k=1}^n F_{y_{ik}} \sin \xi_{ik}. \quad (2.6.3)$$

Сила F_{y_i} берется с минусом, если $0 < \xi_i < 90$ (I четверть рис.2.6.12 а). Если $90 \leq \xi_i \leq 180$ (II четверть рис.2.6.12 а), то сила F_{y_i} положительная.

Формулы (2.6.2) и (2.6.3) находятся после приведения векторов силы F_{y_i} к центру плоской прямоугольной декартовой системы координат, как показано на рис.2.6.12 а.

3. Расчет суммарных мгновенных сил $F_{v_i\Sigma}$, $F_{h_i\Sigma}$ (см. рис.2.6.12 б):

$$F_{v_i\Sigma} = \sum_{k=1}^n F_{z_{ik}} \sin \xi_{i\Sigma k} - \sum_{k=1}^n F_{y_{ik}} \cos \xi_{i\Sigma k};$$

$$F_{h_i\Sigma} = \sum_{k=1}^n F_{z_{ik}} \cos \xi_{i\Sigma k} + \sum_{k=1}^n F_{y_{ik}} \sin \xi_{i\Sigma k}.$$

Для расчета мгновенных суммарных сил $F_{v_i\Sigma}$ и $F_{h_i\Sigma}$ необходимо определять угловую координату точки приложения на окружности с радиусом $R_{\text{фр}}$ суммарных сил. Угловая координата соответствует суммарному углу $\xi_{i\Sigma}$, как показано на рис.2.6.12 б.

Если $F'_{v_i\Sigma} \leq 0$ (см. рис.2.6.12 б, четверть I), то

$$\xi_{i\Sigma} = \arcsin \frac{F'_{hi\Sigma}}{\sqrt{(-F'_{vi\Sigma})^2 + (F'_{hi\Sigma})^2}}.$$

Если $F'_{vi\Sigma} > 0$ (см. рис. 2.6.12б, четверть II), то

$$\xi_{i\Sigma} = \frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{F'_{vi\Sigma}}{\sqrt{(F'_{vi\Sigma})^2 + (F'_{hi\Sigma})^2}}.$$

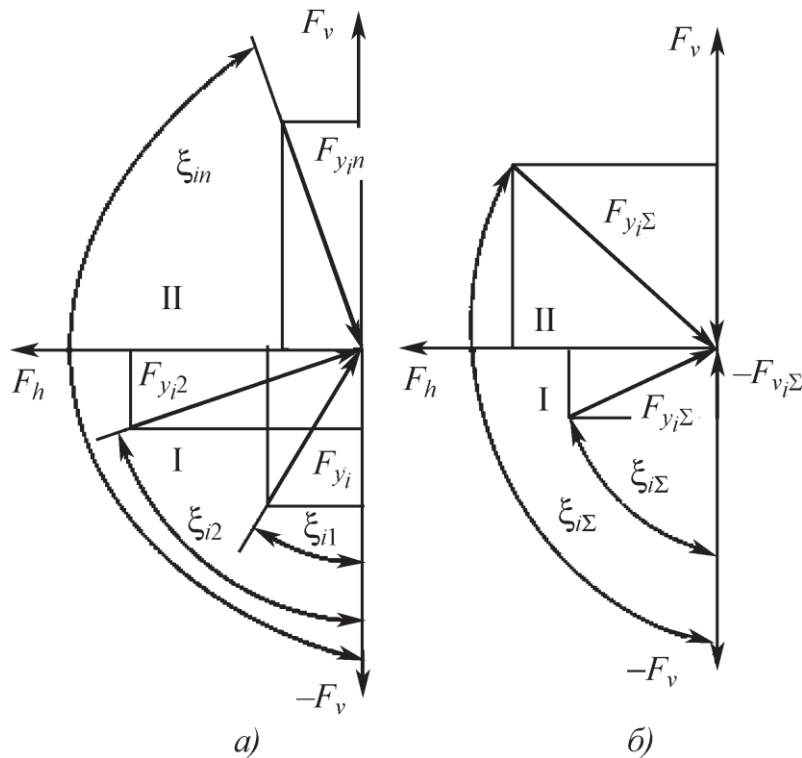


Рис 2.6.12 Векторы сил, действующих на зубья фрезы при участии в работе нескольких зубьев фрезы для расчета суммарных мгновенных сил $F'_{vi\Sigma}$ (а), $F'_{hi\Sigma}$ и для расчета угловой координаты $\xi_{i\Sigma}$ (б)

Диагностический признак состояния инструмента выбирается по максимальному значению коэффициента информативности:

$$K = \frac{F[h_3] - F(h_3 = 0)}{F(h_3 = 0)},$$

где $F[h_3]$ — предельное значение силового параметра; $F(h_3 = 0)$ — значение силового параметра острозаточенного инструмента.

Структура алгоритма диагностирования состояния фрез, где применима вышеизложенная методика расчета и выбора силового диагностического признака, подобна однопараметрическому алгоритму

2.6.3. Разработка системы мониторинга состояния инструмента

Структура системы диагностирования режущего инструмента на станках с ЧПУ (пример)

Для разработки системы мониторинга состояния инструмента необходимо решить **следующие задачи**:

- ✓ определение моментов возникновения поломок инструмента для подачи команды на экстренную остановку привода подачи и смену инструмента;
- ✓ определение момента достижения предельного износа для подачи команды на смену инструмента после завершения технологического перехода данным инструментом;
- ✓ оценка текущего износа для проведения коррекции и прогнозирования ресурса стойкости режущего инструмента.
- ✓ представление общей структурной схемы реализации системы диагностирования инструмента с учетом его износа.

На рис. 2.6.13 показан пример многоканальной системы диагностирования инструмента. Количество каналов может определяться количеством акселерометров или количеством анализируемых частотных диапазонов.

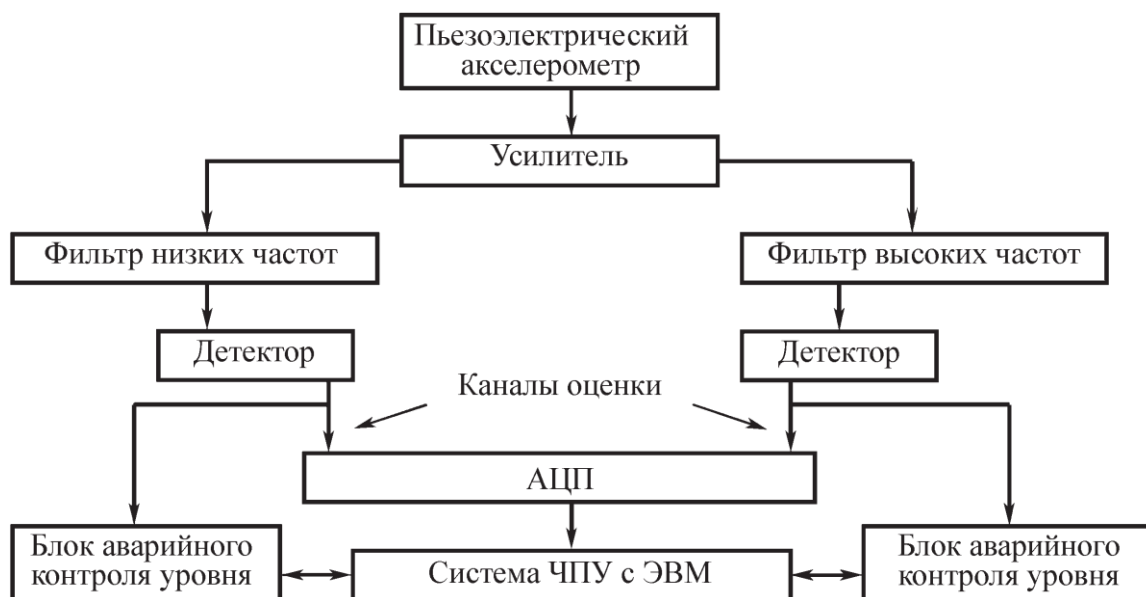


Рис. 2.6.13. Пример структурной схемы системы диагностирования состояния РИ

2.7. Разработка алгоритма диагностирования станка

2.7.1. Диагностика мощности, потребляемой приводом главного движения станка с разработкой функциональной схемы работы

Точность и производительность станка – основные показатели, которые определяют его эффективность и в конечном счете эффективность всей технологической системы. Точность станка зависит от точности движения узлов, несущих режущий инструмент и заготовку; точности движения узлов, участвующих в формообразовании и подверженных в процессе резания воздействию силовых, тепловых и динамических нагрузок. Отклонение движения от теоретической траектории, определение ее начала и конца, микроотклонения вследствие колебаний контролируются при эксплуатации датчиками, являющимися первичными преобразователями системы диагностирования.

Диагностирование позволяет распознавать текущее состояние станка, прогнозировать предельное состояние и планировать техническое обслуживание.

Мощность резания при продольном и поперечном точении рассчитывают соответственно по формулам

$$N_{рез} = \frac{P_z V}{60} + \frac{P_x S_n}{60 \cdot 1000} \text{ и } N_{рез} = \frac{P_z V}{60} + \frac{P_y S_n}{60 \cdot 1000}.$$

Мощность, потребляемую электродвигателем привода главного движения станка, определяют как

$$N_{эд} = \frac{P_z V}{60 \eta},$$

а мощность электродвигателей приводов подач

$$N_{эдпрод} = \frac{P_x S_n}{60 \cdot 1000 \eta} \text{ и } N_{эдпоп} = \frac{P_y S_n}{60 \cdot 1000 \eta}.$$

η – КПД приводов.

Из формул следует, что потребляемая мощность каждого электродвигателя будет изменяться в зависимости от изменения соответствующей ей составляющей силы резания. Естественно, что износ или выкрашивание инструмента, изменяющие силу резания, приведут к изменению момента и мощности. Основанный на этом метод контроля состояния инструмента находит распространение в связи со своей простотой. Достаточно измерить силу тока, протекающего в якоре электродвигателей постоянного тока, применяемых в приводах станков. Сила тока пропорциональна или мощности, или крутящему моменту на валу электродвигателя.

Асинхронный трехфазный двигатель привода главного движения станка как датчик контроля состояния инструмента и процесса резания.

В приводах главного движения станков в основном применяют трехфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором. Конструктивное исполнение их ротора, в отличие от двигателя постоянного тока, делает невозможным непосредственное измерение токов якоря с помощью датчиков тока, а соответственно и определение электромагнитного момента, передаваемого якорем на вал двигателя. На основе совокупности математических и компьютерных моделей *асинхронного двигателя* (АД) можно выполнить косвенное определение необходимых для диагностирования величин по значениям доступных непосредственному измерению физических переменных.

При использовании электродвигателя в качестве датчика состояния станочного оборудования между зоной контакта режущего инструмента с заготовкой и точками съема информации существует совокупность взаимосвязанных устройств, влияющих на информационные сигналы. Это обстоятельство существенно усложняет процесс анализа результатов измерений и выделения диагностических признаков. Для решения проблемы строятся различные модели электромеханической системы станка, инструмента и процесса резания.

Одной из основных задач является построение модели для определения момента на валу исполнительного трехфазного АД с короткозамкнутым ротором привода главного движения станка в процессе обработки заготовки по доступным для измерений параметрам привода. При этом в первом приближении предполагается, что электромагнитная система асинхронного двигателя является симметричной и промышленная трехфазная сеть, служащая источником электропитания, также считается полностью симметричной.

Доступными для непосредственного измерения величинами в данном случае являются: фазные токи $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$ в обмотке статора; напряжения $u_a(t)$, $u_b(t)$, $u_c(t)$ на фазах обмотки статора; значение угла φ сдвига начальной фазы тока относительно начальной фазы напряжения и частота (скорость) вращения ротора $n_2(t)$.

С учетом электрической и электромагнитной симметрии активная составляющая электромагнитной мощности P_1 (Вт), потребляемая двигателем от источника питания в процессе обработки заготовки, определяется выражением:

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi,$$

где m_1 – число фаз обмотки статора; U_1 , I_1 – действующие значения напряжения на фазе статора и тока фазы статора соответственно; $\cos$ – коэффициент мощности; φ – фазовый сдвиг между начальными фазами напряжения на обмотке статора $u_1(t)$ и тока в обмотке статора $i_1(t)$. Часть мощности P_1 рассеивается (теряется) в виде тепла на активных сопротивлениях фаз обмотки статора (электрические потери в обмотке статора)

$$P_{эл} = m_1 R_1 I_1^2, \text{ Вт}.$$

Другая часть теряется в виде магнитных потерь на перемагничивание (гистерезисные потери) и на вихревые токи в магнитопроводе статора

$$P_{m\sigma 1} = m_1 R_{m\sigma} I_m = m_1 E_1^2 / R_{m\sigma}, \text{ Вт}$$

Оставшаяся часть мощности P_1 передается электромагнитным полем со статора на ротор. Эту мощность называют электромагнитной

$$P_{эм} = P_1 - P_{эл1}, \text{ Вт}$$

Причем

$$P_{эм} = m_2 I_2^2 R_2 / S, \text{ Вт},$$

где R_2 – активное сопротивление фазы обмотки ротора (сопротивление стержня беличьей клетки); m_2 – число фаз обмотки ротора, принимаемое равным числу стержней при выполнении ротора в виде беличьей клетки; I_2 – действующее значение тока фазы ротора; $S = (n_1 - n_2) / n_1$ – скольжение; n_1 – скорость вращения магнитного поля (синхронная скорость); n_2 – скорость вращения ротора.

Часть электромагнитной мощности $P_{эм}$ рассеется в виде тепла на активных сопротивлениях обмотки ротора (электрические потери в обмотке ротора

$$P_{эл} = m_2 R_2 I_2^2, \text{ Вт}.$$

Магнитные потери в магнитопроводе ротора аналогичны магнитным потерям в магнитопроводе статора. Магнитные потери пропорциональны частоте изменения тока f_1 , а соответственно и магнитного потока. Поскольку частота ЭДС и токов в роторе $f_2 \ll f_1$ в рабочем режиме двигателя, то магнитные потери в роторе относительно малы. В практических расчетах машин общего исполнения магнитными потерями в роторе, как правило, пренебрегают. Без учета магнитных потерь в роторе оставшаяся часть мощности $P_{эм}$ превращается в механическую мощность, развиваемую ротором

$$P_{мх} = P_{эм} - P_{эл2} = m_2 I_2^2 R_2 (1 - S) / S = \text{Вт}.$$

Часть $P_{мх}$ теряется внутри самого двигателя в виде механических потерь на вентиляцию, на трение в опорах и т.д. Кроме того, существуют различные добавочные потери, например, от высших гармонических составляющих магнитного поля, пульсационные и т.п. Добавочные потери практически не поддаются расчету, и их условно принимают как 0,5 % от мощности P_1 при номинальной нагрузке.

Таким образом, полезная мощность на валу двигателя (выходная или вторичная) будет определяться выражением

$$P_2 = P_{мх} - P_{тр} - P_{доб}, \text{ Вт},$$

где $P_{тр}$ – собственные механические потери (на трение); $P_{доб}$ – добавочные потери двигателя.

Суммарные потери в двигателе $P_{\Sigma} = P_{\text{эл1}} + P_{\text{м21}} + P_{\text{эл2}} + P_{\text{тр}} + P_{\text{доб}}$ и соответственно $P_2 = P_1 - P_{\Sigma}$. При этом КПД двигателя $\eta = P_2 / P_1$.

Электромагнитный момент, развиваемый электромагнитными силами на роторе, определяется соотношением

$$M_{\text{э}} = P_{\text{мх}} / \Omega_2, \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $\Omega_2 = \pi n_2 / 30, \text{ рад} / \text{с}$ – угловая частота вращения ротора.

Выражение для электромагнитного момента можно представить в виде

$$M_{\text{э}} = P_{\text{эм}} / \Omega_1 = m_2 I_2^2 R_2 p / (S f_1 2\pi), \text{ Н} \cdot \text{м},$$

где $\Omega_1 = \pi n_1 / 30, \text{ рад} / \text{с}$ – угловая синхронная частота вращения основного поля машины; p – число пар полюсов двигателя.

Вращающий (выходной) момент на валу двигателя M_2 меньше электромагнитного момента $M_{\text{э}}$ на величину собственного момента сопротивления двигателя $M_T = (P_{\text{тр}} + P_{\text{доб}}) / \Omega_2, \text{ Н} \cdot \text{м}$, обусловленного внутренними потерями мощности $P_{\text{тр}}$ и $P_{\text{доб}}$.

Момент на валу двигателя определяется соотношением

$$M_2 = M_{\text{э}} - M_T, \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Учитывая относительно малые значения магнитных потерь в магнитопроводах статора и ротора и собственных механических потерь, обычно принимают упрощающие допущения: $P_{\text{мг1}} = 0, P_{\text{тр}} = 0$, с учетом которых электромагнитный момент и момент на валу двигателя можно определить приближенно из выражения

$$M_{\text{э}} = M_2 \approx m_1 I_1 (U_1 \cos \varphi - R_1 I_1) / (2\pi f_1), \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Приведенная модель позволяет по доступным для непосредственного измерения физическим переменным $i_a(t), i_b(t), i_c(t), u_a(t), u_b(t), u_c(t), \cos$ и f_1 приближенно определять значения электромагнитного момента $M_{\text{э}}(t)$ и момента $M_2(t)$ на валу двигателя, а также идентифицировать их с соответствующими диагностическими признаками.

Канал информационно-измерительной системы, реализующий описанный принцип оценки состояния станочного оборудования, может быть реализован на базе отдельных модулей, осуществляющих получение, преобразование и обработку информационных сигналов (рис. 2.7.1).

Исследуемый АД привода главного движения с рабочим органом (РО) подключается к трехфазной электрической сети посредством силового преобразователя (СП), выполняющего управляемое преобразование частоты. Модуль датчиков (МД) осуществляет измерение токов $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$ в обмотке статора и напряжений $u_a(t), u_b(t), u_c(t)$ на фазах обмотки статора. Блок управле-

ния (БУ) предназначен для запуска и останова двигателя. Информационные сигналы с датчиков поступают на *устройство сбора данных* (УСД), осуществляющее их преобразование в цифровые данные и передачу в *компьютер* (ПК) для хранения, обработки и визуализации.

Эффективность функционирования измерительного канала существенно зависит от параметров используемого измерительного оборудования, условий и режимов работы, а также используемых методов обработки полученных данных.

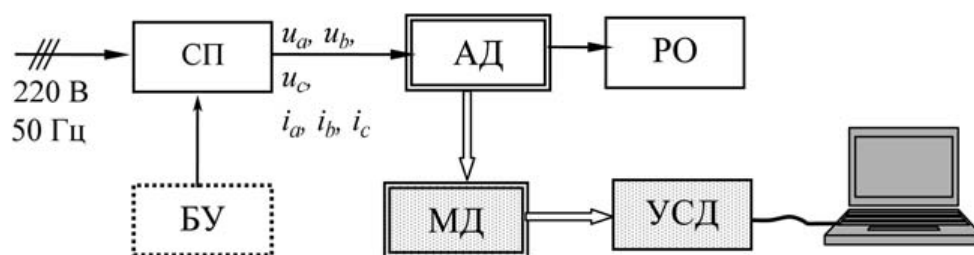


Рис. 2.7.1. Пример функциональной схемы канала информационно-измерительной подсистемы

2.7.2. Разработка общей схемы диагностики станка с ЧПУ

Диагностирование позволяет распознавать текущее состояние станка, прогнозировать предельное состояние и планировать техническое обслуживание. Для этого на станке монтируется ряд датчиков. Полученные сигналы позволяют обеспечить адаптивное управление процессом обработки – регулировать в реальном времени режимы резания. Основная задача, решаемая с помощью таких систем диагностирования, – обработка деталей требуемого качества.

В связи с этим диагностирование станков следует рассматривать как составную часть мероприятий по управлению качеством продукции, предусмотренных международным стандартом ИСО 9004. Стандарт определяет взаимосвязь видов деятельности, обеспечивающих качество продукции на различных этапах ее жизненного цикла. Большинство из них имеют отношение к диагностике.

Система обеспечения надежности технического объекта должна функционировать непрерывно. Так же как на стадии проектирования и изготовления, на стадии эксплуатации должны решаться вопросы повышения надежности. В основе их решения лежит принцип обратной связи между стадией эксплуатации и двумя предшествующими стадиями. Основной целью разработки схемы диагностирования состояния металлорежущего станка является обеспечение параметрической надежности технологической системы. Так же как у инструмента, у станка возможны два состояния: работоспособное и неработоспособное. Работоспособное состояние означает, что значение выходного параметра технологической системы X находится в пределах резерва точности. Если X выходит за пределы $X_{\max}$, то станок находится в неработоспособном состоянии (при ус-

ловии, что инструмент работоспособен). Вслед за определением неработоспособного состояния решается следующая задача диагностирования — определение причины отказа, места повреждения, вызвавшего отказ. На рис. 2.7.1. представлена сокращенная принципиальная схема диагностирования станка. Образы состояния станка формируют векторы выбранных диагностических признаков. Иначе говоря, на этапе обучения в память ПК будут заноситься эталонные образы, характеризующие каждый класс технического состояния системы. Они составляют базу данных системы диагностирования.

На втором этапе, этапе собственно диагностирования, должны быть решены две задачи. Первая – задача определения текущих диагностических признаков, т.е. должен быть сформирован вектор $W(T)$. Вторая – задача определения технического состояния станка, решаемая путем сравнения текущего вектора $W(T)$ с эталонными образцами, хранящимися в базе данных. На основании сравнения делается вывод о принадлежности диагностируемого станка к тому или иному классу состояний.

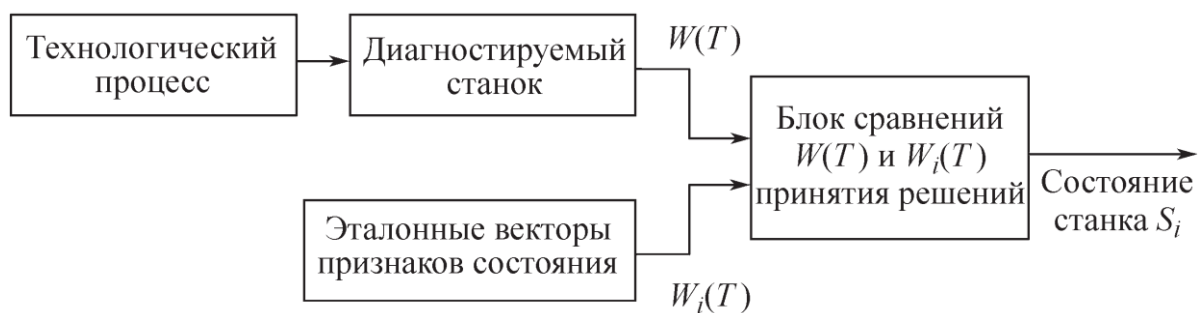


Рис. 2.7.1. Принципиальная схема диагностирования станка

2.7.2. Разработка системы мониторинга оценки диагностического состояния станка с ЧПУ

Реализация рассмотренных систем диагностирования станков с ЧПУ требует выполнения трудоемких подготовительных работ. В связи с этим диагностирование можно разделить на два периода: предэксплуатационный и эксплуатационный. Это соответствует предложенному методическому алгоритму диагностирования (рис. 2.7.2).

После выявления повреждений, определения их информативных диагностических признаков получают диагностические модели и определяют уставки. Алгоритмы эксплуатационного периода диагностирования приобретают традиционную форму: измерение выбранного диагностического признака (признаков), сравнение с уставкой, продолжение работы станка или принятие решения об устранении повреждения.

Задачи диагностирования переплетаются с задачами, решаемыми при испытании новых станков или после ремонта станков и технического обслуживания. Применение методов диагностирования позволяет сделать испытания более информативными. В свою очередь по результатам испытаний может быть принято решение о диагностировании ненадежного узла станка.



Рис. 2.7.2. Содержание действий в каждый период диагностирования

Учитывая то, что при разработке цикла диагностирования технологического оборудования были выбраны 3 основных направления оценки диагностических признаков, а именно: оценка точности технологической операции, состояние режущего инструмента, диагностирование мощности привода станка, поэтому при разработке системы мониторинга диагностического состояния станка необходимо руководствоваться следующими этапами разработки:

1. С помощью тензометрических датчиков проводится оценка и измерение составляющих сил резания в реальном времени.
2. Значения составляющих сил резания поступают на входы автономного вычислителя.
3. По величине составляющих сил резания вычислитель определяет текущий износ режущего инструмента в реальном времени.
4. Вычислитель формирует и передает в систему ЧПУ команду приостановить процесс резания и отвести инструмент (для предотвращения отказа), если величина износа режущего инструмента больше заданного критического значения.
5. Система ЧПУ получает команды от вычислителя и выполняет их дешифрацию и обработку.
6. По величине износа режущего инструмента для текущего технологического перехода вычислитель строит прогноз остаточной стойкости режущего инструмента для следующего технологического перехода.

7. Обработка продолжается, если прогнозируемая остаточная стойкость режущего инструмента больше или равна стойкости последующего технологического перехода.
8. В противном случае вычислитель принимает решение о приостановлении обработки и подналадке режущего инструмента или его замене.
9. В случае внезапного достижения критического значения износа режущего инструмента (что характеризует катастрофическое разрушение инструмента) останавливается процесс обработки, отводится инструмент и осуществляется его замена.
10. Вычислитель формирует и передает в систему ЧПУ следующие команды:
 - ✓ если прогнозируемая остаточная стойкость режущего инструмента меньше или равна заданному критическому значению – приостановить выполнение следующего технологического перехода и заменить режущий инструмент;
 - ✓ если прогнозируемая остаточная стойкость режущего инструмента близка к заданному значению $T_{\text{маш}}$ – оптимизировать технологические параметры процесса резания (величину подачи, скорость резания, обороты шпинделя и т.п.);
 - ✓ если мгновенное изменение величины износа режущего инструмента превышает допустимую (заданную) величину и абсолютная величина износа режущего инструмента близка к заданному критическому значению – ситуация распознается как поломка инструмента, выдается команда на экстренный останов процесса резания и замену инструмента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Диагностика автоматизированного производства / С.Н. Григорьев, В.Д. Гурин, М.П. Козочкин и др.; под. ред. С.Н. Григорьева. – М.: Машиностроение, 2011. – 600 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя: В 2-х т. Т. 2 / Под общ. ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – 4-е изд. – М.: Машиностроение, 1986. – 496 с.
3. Гребеник В.М., Цапко В.К. Надежность металлургического оборудования (оценка эксплуатационной надежности и долговечности): справочник. – М.: Металлургия, 1989. – 592 с.
4. Ширман А.Р., Соловьев А.Д. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. – М., 1996. – 276 с.
5. Голуб Е.С., Мадорский Е.З., Розенберг Г.Ш. Диагностирование судовых технических средств: справочник. – М.: Транспорт, 1993. – 150 с.
6. Техническая диагностика механического оборудования / В.А. Сидоров, В.М. Кравченко, В.Я. Седуш и др. – Донецк: Новый мир, 2003. – 125 с.
7. Ловчиновский Э.В., Вагин В.С. Эксплуатационные свойства металлургических машин. – М.: Металлургия, 1986. – 160 с.
8. Основы технической диагностики: В 2-х кн. Кн. 1. Модели объектов, методы и алгоритмы диагноза / Под ред. П.П. Пархоменко. – М.: Энергия, 1976. – 464 с.
9. Коллакот Р. Диагностика повреждений: пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 512 с.
10. Диагностирование механического оборудования металлургических предприятий: монография / В.Я. Седуш, В.М. Кравченко, В.А. Сидоров и др. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2004. – 100 с.
11. Седуш В.Я. Надежность, ремонт и монтаж металлургических машин: учебник. – 3-е изд., перераб. и доп. – К.: НМК ВО, 1992. – 368 с.
12. Коллакот Р.А. Диагностирование механического оборудования. – Л.: Судостроение, 1980. – 281 с.
13. Баркова Н.А. Введение в виброакустическую диагностику роторных машин и оборудования: учебное пособие. – СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2003. – 160 с.
14. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин. – 2-е изд., испр. – М.: Машиностроение, 2000. – 344 с.
15. Барков А.В., Баркова Н.А., Азовцев А.Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. – СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2000. – 169 с.
16. Справочник по балансировке / Под общ. ред. М.Е. Левита. – М.: Машиностроение, 1992. – 464 с.
17. Кравченко В.М., Сидоров В.А. Визуальное диагностирование механического оборудования: учеб. пособие. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2004. – 120 с.
18. Логов А.Б., Замараев Р.Ю. Математические модели диагностики уникальных объектов. – Новосибирск: СО РАН, 1999. – 228 с.
19. Ульяницкий В.Н. Техническая диагностика металлургического оборудования. – Алчевск: ДГМИ, 2004. – 186 с.
20. Кияновский Н.В. Новые разделы в теории и практике надежности машин. – Кривой рог: «Минерал», 1998. – 209 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Варианты диаметральных размеров деталей

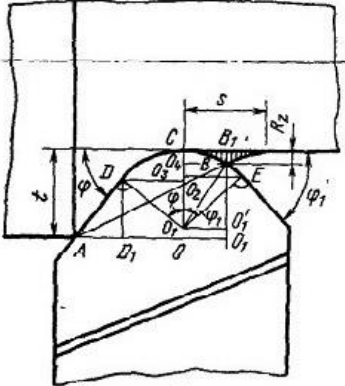
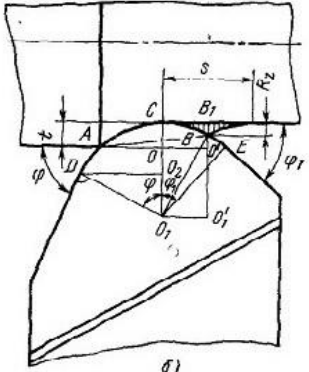
№	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8	d9	d10	d10	d12	d13	d14	d15
1	19,98	19,98	19,97	19,985	19,99	19,98	20,01	19,975	19,98	19,98	19,98	19,75	19,98	19,99	19,98
2	6,97	6,98	6,98	6,986	6,97	6,99	7,02	6,965	6,975	6,96	6,97	6,75	6,99	6,99	6,98
3	13,985	13,956	13,975	14	13,995	13,96	14,01	13,985	13,99	13,986	13,987	13,75	13,99	13,99	14,01
4	5,97	5,99	5,97	5,995	5,96	5,985	5,995	5,97	6	6	5,983	5,956	5,983	6,02	5,987
5	8,98	8,985	8,99	8,986	8,987	8,75	8,99	8,99	9,01	8,995	8,02	9	8,976	8,978	8,995
6	7,98	7,98	7,986	7,97	7,99	8,02	7,965	7,975	7,96	7,97	7,75	7,99	7,99	7,98	7,992
7	4,965	4,975	4,96	4,97	4,75	4,99	4,99	4,98	4,992	5,01	5	4,975	4,985	4,99	5
8	12,986	12,987	12,75	12,99	12,99	13,01	12,995	13,02	13	12,976	12,978	12,995	12,994	13,01	13,01
9	18,99	18,986	18,987	18,75	18,99	18,99	19,01	18,995	18,02	19	18,976	18,978	18,995	18,99	18,986
10	9,98	9,98	9,97	9,985	9,99	9,98	10,01	9,975	9,98	9,98	9,98	9,75	9,98	9,99	9,98

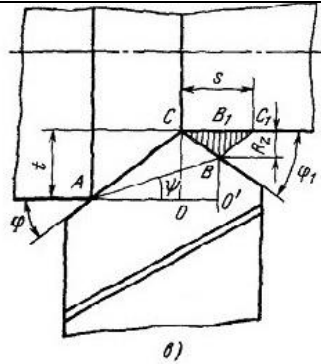
№	d16	d17	d18	d19	d20	d21	d22	d23	d24	d25	d26	d27	d28	d29	d30
1	19,99	20	20	19,97	19,975	19,99	20	20,03	20,01	19,98	19,965	19,99	19,975	19,98	19,97
2	6,992	7,01	7	6,975	6,985	6,99	7	7,02	7,04	6,985	6,965	6,995	6,985	6,99	6,97
3	13,995	14,02	14	13,976	13,978	13,995	13,994	14,01	14,01	13,976	13,973	13,99	13,955	13,98	13,99
4	6,01	5,97	5,98	5,97	5,96	5,98	5,99	5,95	5,98	6	5,964	5,97	5,98	5,99	5,975
5	8,994	9,01	9,01	8,976	8,973	8,99	8,955	8,98	9,01	8,98	8,965	8,99	8,975	8,98	8,97
6	8,01	8	7,975	7,985	7,99	8	8,02	8,04	7,985	7,965	7,995	7,985	7,99	7,97	7,98
7	5,02	5,04	4,985	4,965	4,995	4,985	4,99	4,97	4,965	4,975	4,96	4,97	6,75	6,99	6,99
8	12,976	12,973	12,99	12,955	12,98	12,99	12,986	12,987	12,75	12,99	12,99	13,01	12,995	13,02	13
9	18,99	18,986	18,987	18,75	18,99	18,99	19,01	18,995	18,02	19	18,976	18,978	18,995	18,99	18,986
10	9,99	10	10	9,97	9,975	9,99	10	10,03	10,01	9,98	9,965	9,99	9,975	9,98	9,97

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

№ вар	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ПРИМЕР 1															
$m(T)$, мин	105	95	90	85	80	110	115	120	125	130	140	150	160	180	200
σ_T , (T) мин	25	30	25	40	45	50	15	17	19	35	28	46	48	33	23
ПРИМЕР 2															
$P(T)$ $= \gamma$, %	0,9	0,85	0,95	0,78	0,8	0,75	0,88	0,96	0,97	0,83	0,9	0,95	0,97	0,7	0,75

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

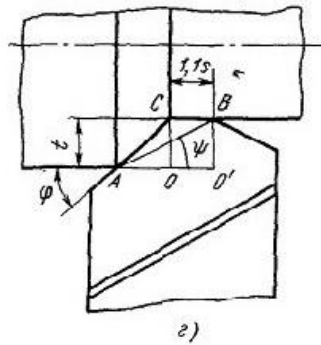
Схема обработки	Расчет величины В
 а) а – снятие припуска радиусной и прямолинейной частями главной режущей кромки	
 б) б – снятие припуска радиусной частью главной режущей кромки	$t < r(1 - \cos \varphi); \quad s \leq 2r \sin \varphi_1;$ $a_1 = \frac{s}{c'} \operatorname{sinarctg} \frac{c'}{\sqrt{2a' - 1 + a'b'}}; \quad b_1 = \frac{c't}{\operatorname{sinarctg} \frac{c'}{\sqrt{2a' - 1 + a'b'}}};$ $b = r \left[\arccos \left(1 - \frac{1}{a'} \right) + \arccos \sqrt{1 - b'^2} \right];$



б – работа проходным резцом

$$a_1 = \frac{s}{d'} \sin \arctg \frac{d'}{1 + \operatorname{ctg} \varphi - d'}; \quad b_1 = \frac{d' t}{\sin \arctg \frac{d'}{1 + \operatorname{ctg} \varphi - d'}};$$

$$b = \frac{t}{\sin \varphi} \left[1 + \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_1} (1 - d') \right],$$



г – работа проходным резцом
с режущей кромкой, параллельной
оси детали (резцы Колесова
для работы с большими подачами)

$$a_1 = s \sin \arctg \frac{1}{\operatorname{ctg} \varphi + 2,2 a' b'}; \quad b_1 = \frac{t}{\sin \arctg \frac{1}{\operatorname{ctg} \varphi + 2,2 a' b'}};$$

$$b = t \left[\frac{1}{\sin \varphi} + 2,2 a' b' \right].$$

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

*Методические указания
к выполнению разделов курсового проекта*

Составители: **Левченко** Елена Александровна

Редактор – О.В. Дмитриева

Изд. № 112/17. Объем 3,25 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»