

Автоматическое измерение размеров на токарных станках с ЧПУ с использованием режущего инструмента

Svetlana Kolevaa, Milko Encheva, Tamas Szecsib

перевод Портной П.В.

В статье исследованы возможности измерения размеров деталей с использованием режущего инструмента, который обрабатывал поверхности детали. Описана основная схема измерительного устройства и его применение для измерения размеров. Метод приводит к более эффективной обработке на токарных станках с ЧПУ. Применение метода приводит к автоматическому регулированию размеров, которое в противном случае потребовало бы специализированного измерительного оборудования или привело бы к увеличению времени простоя станка, автоматической динамической настройки режущего инструмента и автоматической проверки допуска с использованием контрольных поверхностей. Сообщается о теоретическом анализе погрешностей измерений и методе прогнозирования точности измерений с использованием самого режущего инструмента. Представлены экспериментальные результаты применения системы для измерений в прямом измерении с использованием режущего инструмента на токарных станках с ЧПУ.

1. Введение

Чтобы обеспечить точность обработки деталей, требуется большое количество инспекционных операций, требующих различного измерительного оборудования как по типу диапазона. Некоторые из проверок выполняются на самом станке из-за большей точности размеров. Это приводит к увеличению времени простоя станка, что приводит к снижению производительности и увеличению удельных затрат на эксплуатацию. Целью современного станкостроения является сокращение времени, необходимого для проверки обрабатываемых деталей на станке с использованием обычного измерительного оборудования и автоматизации измерительных процедур во время обработки [1,2]. Автоматический контроль качества операций обработки на токарных станках с ЧПУ осуществляется в основном с помощью электроконтактного оборудования для измерения координат. Использование такого оборудования позволяет измерять размеры заготовки или режущего инструмента [2,3,4,8,9].

Одним из способов уменьшения времени для измерения процедур непосредственно на станке с ЧПУ является использование самого режущего инструмента в качестве измерительного инструмента. Принцип основан на том, что механическая обработка и измерение выполняются одной и той же точкой режущего инструмента, поэтому две точки одинаковы (рис. 1).

Используются две независимые измерительные системы. Первый (обозначенный как 1 на рис. 1) предназначен для периодического определения фактического положения определяющей размер точки режущего инструмента. Это используется для компенсации систематических ошибок. Вторая система предназначена для измерения поверхности заготовки (обозначенной как 3) с помощью режущего инструмента (обозначенного как 2) путем регистрации контакта между ними. Это происходит после обработки поверхности; режущий инструмент медленно приближается к обрабатываемой поверхности и в момент их контакта друг с другом посылается сигнал в систему ЧПУ станка для регистрации текущего положения режущего инструмента относительно оси вращения шпинделя [8]. Его принцип основан на существовании электрической цепи в момент контакта. Его преимущество заключается в том, что шпиндельный блок не должен быть электрически изолирован [6,7,10]. Так как положение наконечника инструмента измеряется относительно оси вращения шпинделя, координата A соответствует диаметру обрабатываемой поверхности. Измерение осевых размеров выполняется таким же образом, но позиции регистрируются по отношению к базовой поверхности заготовки или относительно начала координат системы координат станка.

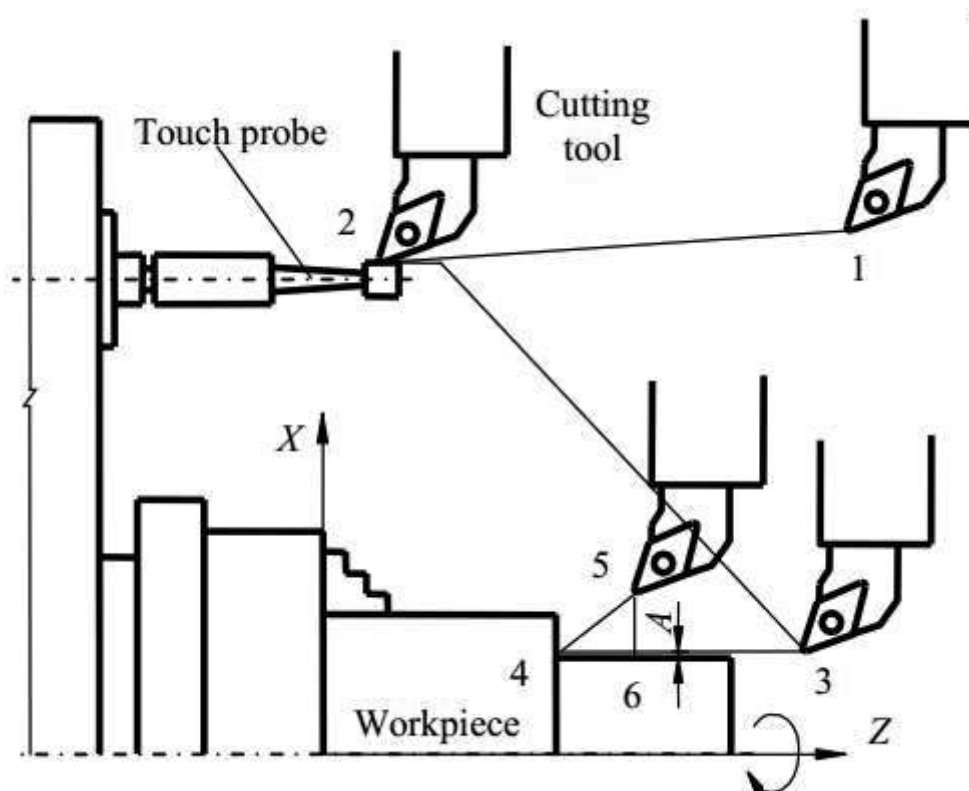


Рисунок 1. Измерение размера заготовки с помощью режущего инструмента

2. Возможности метода

Измерительные операции за пределами станка с использованием общего назначения и специальных устройств в принципе могут выполняться с большей точностью, чем на самом станке. Поэтому необходимо определить случаи, когда измерение на самом станке оправдано:

- Измерительные операции, требующие специализированного измерительного оборудования;
- Одновременная автоматизация измерений и статистический анализ измеренных данных с целью повышения эффективности контроля качества;
- Частичное или полное облегчение оператора станка процедур инспекции для управления несколькими станками или во время так называемых «беспилотных технологий»;
- Контроль качества с использованием автоматического осмотра перед обработкой. Использование режущего инструмента в качестве измерительного инструмента имеет ряд преимуществ [3,4,5]; самые важные из них:
 - Во время измерений нет ограничений в отношении метода зажима заготовки;
 - Нет необходимости устанавливать какое-либо дополнительное измерительное оборудование в башню станка;
 - Нет необходимости использовать специализированное измерительное оборудование для поверхностей со специальной конфигурацией или ограниченным доступом к ним;
 - Можно автоматизировать процессы настройки и переустановки станка;
 - Возможно предварительное измерение заготовки для равномерного распределения разрешений на механическую обработку или для оптимизации количества путей резания;
 - Можно установить систему координат заготовки автоматически;
 - Он позволяет настраивать станок с помощью тестовых разрезов;
 - Это позволяет автоматически компенсировать износ режущего инструмента и термические деформации;
 - Можно компенсировать постоянные и регулярные ошибки, вызванные механическими деформациями.

3. Анализ ошибок при измерении заготовки с помощью режущего инструмента

Целью измерения заготовки с помощью режущего инструмента является определение координат точки M определения размеров. Это точка, относящаяся к режущей кромке инструмента, которая определяет размер и форму поверхности в заданном направлении. Измеряемые координаты точки M используются для определения координат запрограммированной точки P . Последний является искусственной точкой, связанной с частью режущего инструмента (режущая кромка, центр носа инструмента, опорные точки инструмента и т. Д.); его траектория запрограммирована в программе ЧПУ (рис. 2).

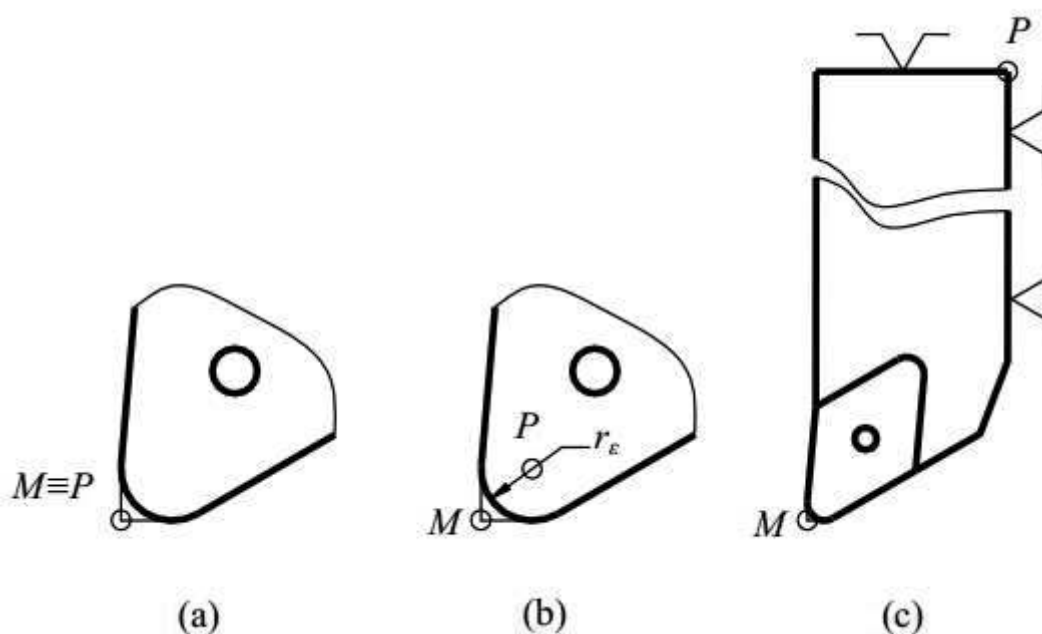


Рисунок 2. Расположение определяющих размер (M) и запрограммированных (P) точек; (a) M и P совпадают; (b) P находится в центре носа инструмента; (c) P находится в привязке инструмента

Во время программирования предполагается, что M находится в определенном положении относительно P . В действительности это достигается после первоначальной настройки режущего инструмента и поддерживается периодическими переустановками. Определение P выполняется путем введения абсолютной системы координат заготовки; он связан с опорными поверхностями заготовки. Поэтому точность определения M оказывает прямое влияние на точность определения P относительно абсолютной системы координат. Если $P = M$ (рис. 2 (a)), траектории определяющей размер точки и программной точки одинаковы. Если P находится в центре радиуса носа инструмента (рис. 2 (b)), его траектория эквидистантна траектории M . Во время перемещения слайдов станка траектория P рассчитывается системой ЧПУ.

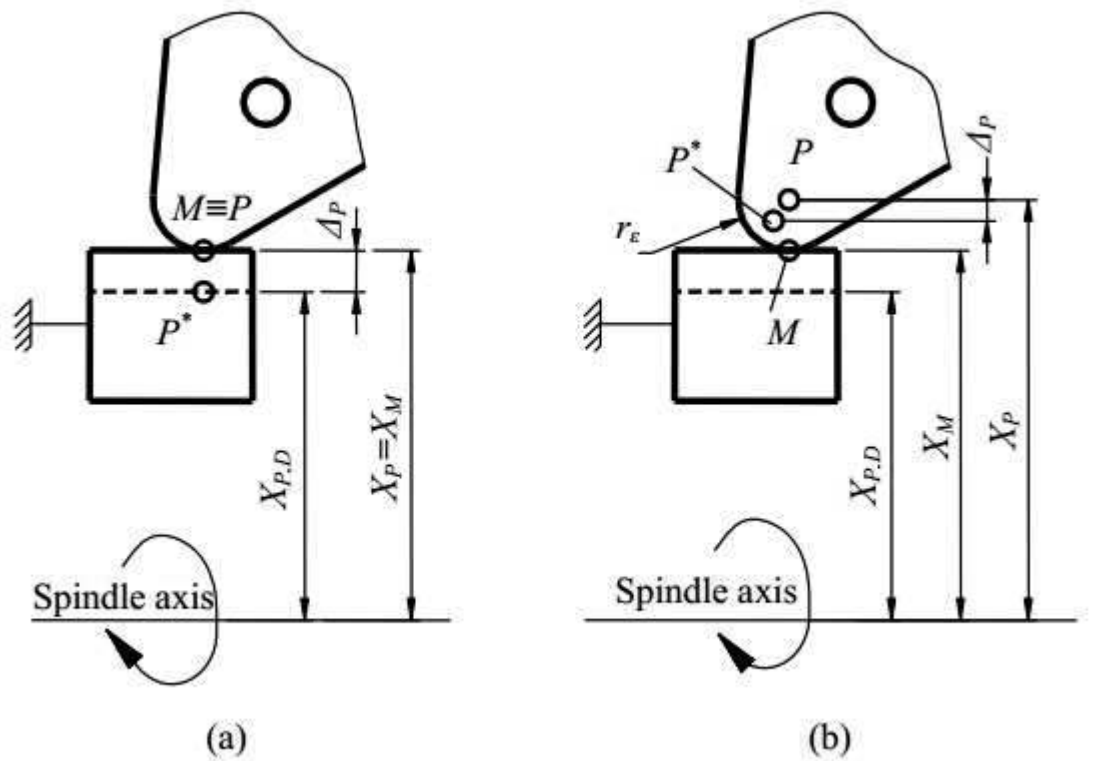


Рисунок 3. Ошибка, вызванная отсутствием координации между определяющими измерение и запрограммированными точками; (а) М и Р совпадают; (б) Р находится в центре носа инструмента

Из-за того, что Р определяется через М, ошибка определения М непосредственно отражается на ошибке определения Р. На рис. 3 показана графическая модель ошибки определения М в случаях, когда Р = М (рис. 3 (а)) и когда Р находится в центре носа инструмента (рис. 3 (б)), поэтому его смещение относительно М равно радиусу носа инструмента r_ϵ ($a = r_\epsilon$).

Ошибки в схеме измерения приводят к различию между позицией активации, зарегистрированной системой X_P (координатная точка, за которой следует система), и предопределенной позицией активации координатного устройства $X_{P,D}$. Это различие вводится как коррекция Δ_P , и это приводит к смещению Р в положение, показанное как Р* на рис. 3. Его значение может быть определено как:

$$\Delta_P = X_P - X_{P^*} = X_M - X_{P,D} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta_P &= X_P - X_{P^*} = X_P - (X_{P,D} + a) = \\ &(X_P - a) - X_{P,D} = X_M - X_{P,D} \end{aligned} \quad (2)$$

где а определяет положение Р относительно М ($a = 0$ при $P = M$ и $a = r_a$ при $P \neq M$). (1) основано на фиг.3 (а) и (2) - согласно фиг.3 (б).

Общая ошибка определения положения М:

$$\Delta_M = X_M - X_{P,D} \quad (3)$$

Эта ошибка была исследована в [3] и образована следующими элементарными ошибками:

- Ошибка $\Delta_P = \Delta_M$ в определении Р, что приводит к отсутствию соответствия между Р и М, которое вытесняет Р и траекторию М и вызывает ошибки обработки;
- Ошибки от предварительной настройки режущего инструмента, его изнашивания и тепловых деформаций в технологической системе изменяют положение М и для компенсации этих ошибок необходимо применять периодическую переустановку для координации положений М и Р.

Ошибка измерения - это разница между диаметром и номинальным профилем и диаметром, полученным с помощью фактических измерений. Специфические элементарные ошибки, связанные с этим типом размерных измерений, могут быть сгруппированы в следующее:

- Ошибка привела к отсутствию или изменению проводимости между режущим инструментом и заготовкой;
- Ошибка, влияющая на форму обрабатываемого профиля на измеренный размер;
- Ошибка, вызванная смещением оси системы координат обрабатываемой поверхности относительно оси вращения шпинделя;
- Ошибка, вызванная тем, что режущий инструмент входит в корни неравномерности обрабатываемой поверхности.

Теоретические и экспериментальные исследования показывают [4,5], что доминирующая ошибка при измерении размеров с использованием режущего инструмента обусловлена разницей между траекториями оси вращения шпинделя во время обработки и измерения размеров.

В зависимости от углового положения обрабатываемой детали положение точек, лежащих на поверхности, будет иметь различное расстояние от оси вращения. Они являются функцией разности между двумя траекториями и могут быть описаны с использованием полигармоник, расположенных симметрично со средним диаметром D_{av} относительно оси вращения (рис. 4).

Измерения размеров с помощью режущего инструмента могут выполняться либо одним импульсом, либо последовательностью импульсов в результате контактов между режущим инструментом и обрабатываемой деталью за один оборот.

3.1. Измерение размера с использованием одного сигнала (рис. 4 (а))

При использовании одного импульса, помимо различий в траекториях шпинделя, на измерения будут также влиять отклонения формы обрабатываемой поверхности в поперечном сечении, которые не вызваны смещением оси шпинделя относительно ось вращения. Точность измерения зависит от соотношения между периферийной скоростью заготовки и радиальной скоростью подачи режущего инструмента.

При измерении с радиальным движением подачи возможны две возможные предельные ситуации. Первый из них заключается в использовании низкой радиальной скорости подачи на оборот, при которой контакт между режущим инструментом и заготовкой формируется самым большим радиусом относительно оси вращения (D_{\max} на фиг. 4). Если радиальная скорость подачи f_r составляет 0,001 мм / об., Самая внешняя точка поверхности регистрируется шагом 0,001 мм. Этот вариант приводит к ошибке измерения:

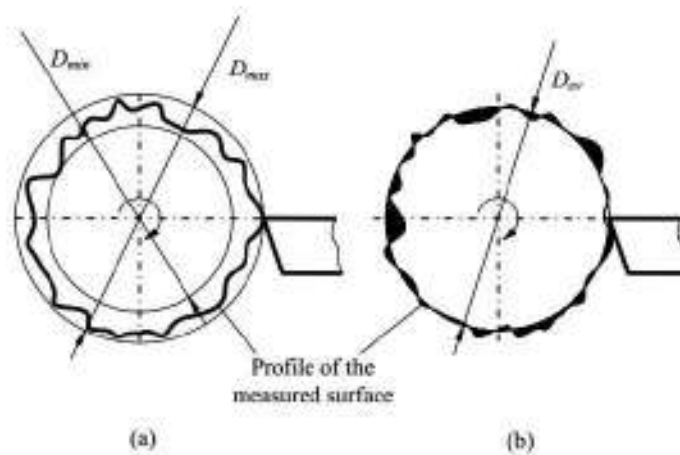
$$\Delta_f = e + \Delta\phi \quad (4)$$

где e - смещение оси шпинделя во время измерений, а $\Delta\phi$ - ошибка профиля. Недостаток точности и высокий простой из-за низких скоростей подачи являются двумя основными недостатками этого метода. Кроме того, шаг $\Delta f = 0.001$ мм может быть достигнут только при определенных условиях. Например, с минимальной доступной скоростью подачи $f_r = 0.01$ мм / об. Такие шаги не могут быть достигнуты. Достижение таких небольших шагов возможно только при использовании подачи стола (скорость подачи в мм / мин) и некоторых скоростей шпинделя, где значение шага можно рассчитать как:

$$\Delta f = k \frac{f_{r,\min}}{n} \quad (k = 1 \dots 6) \quad (5)$$

где $f_{r,\min}$ - минимальная доступная радиальная скорость подачи, а n - скорость шпинделя в об / мин.

При минимальном доступном значении минутной подачи $f_{\min} = 1$ мм / мин и $k = 1$, шпиндель должен вращаться с 1000 об / мин.



4. Измерения с использованием одного импульса (а) и серии импульсов (б)

Второе предельное условие достигается при высоких скоростях подачи за оборот, что может привести к контакту между режущим инструментом и самой внутренней точкой макропрофиля обрабатываемой поверхности (D_{\min} на фиг. 4). Значение скорости подачи определяется теоретически из условия, что в течение $1 / 2p$ части оборота заготовки режущий инструмент должен достигать самой внутренней точки профиля заготовки, определяемой p -й гармоникой. Это можно выразить математически:

$$\frac{1}{2pn} = \frac{u}{f_r} \quad (6)$$

где n - скорость шпинделя в об / мин, а u - длина, которую режущий инструмент перемещает во время измерения. Отсюда:

$$f_r = 2pnu \quad (7)$$

Описанные факторы образуют ошибку измерения:

$$\Delta_2 = e + \frac{\omega_{\Delta\phi}}{\sqrt{m}} \quad (8)$$

где $\omega_{\Delta\phi}$ - разброс отклонения формы профиля, а m - количество повторных экспериментов.

Этот вариант имеет более высокую точность с несколькими измерениями ($m > 1$). Кроме того, в качестве несистематической ошибки при ее добавлении к другим несистематическим ошибкам его вес становится намного ниже. Основным недостатком этого метода является увеличение времени измерения за счет многочисленных измерений и высокая скорость вращения на обрабатываемой поверхности. Преимущество измерения измерения с

использованием простого импульса в обоих случаях заключается в том, что для этого требуется простое устройство управления цикл измерения.

3.2. Измерение размера с использованием серии сигналов за один оборот (рис. 4 (b))

Последний импульс серии, который дает команду для регистрации измерения, определяется из условия:

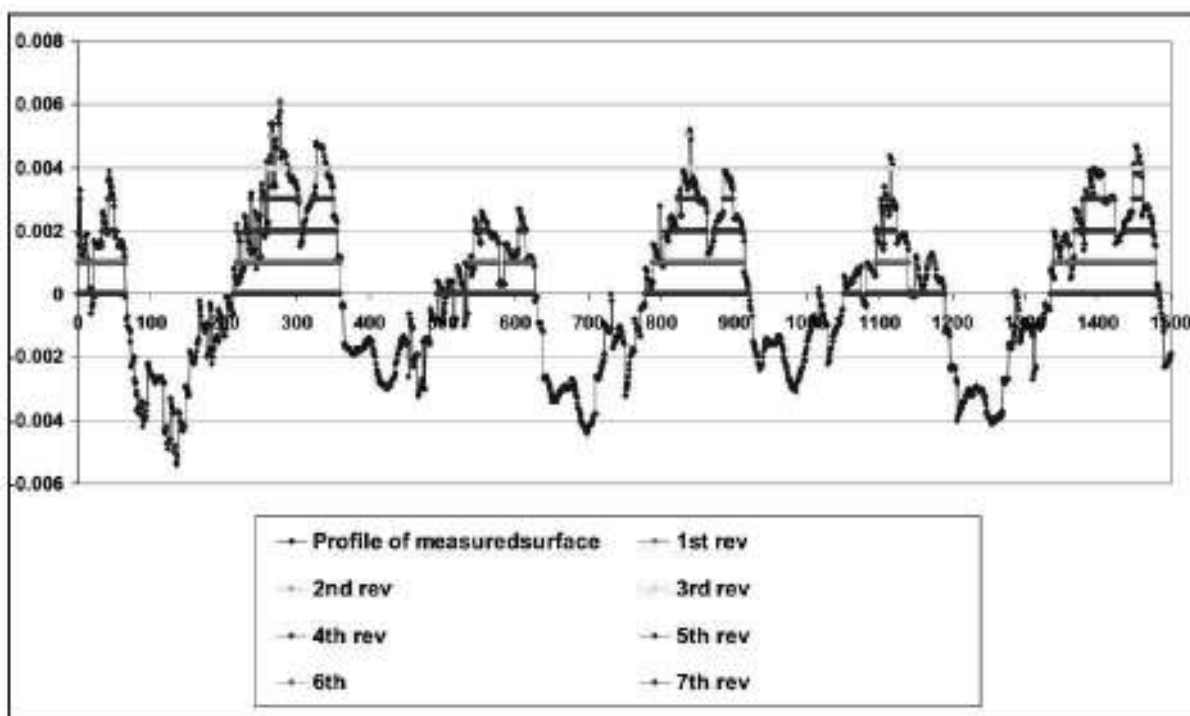
$$\sum t_p \approx 0.5t_{rev} \quad (9)$$

где t_p - время действия p -й гармоники, а t_{rev} - время вращения одного шпинделя.

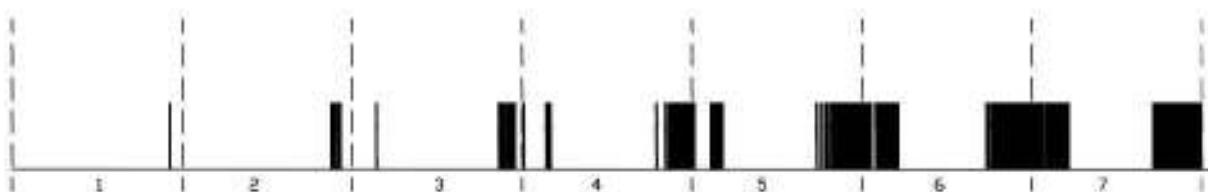
Основным фактором, определяющим точность измерения, является разброс положения шпинделя в каждом обороте, который формируется из гармоник с периодом T , большим, чем 2π . Максимальная погрешность измерения Δ_M равна величине результирующего отклонения, вызванного этими гармониками:

$$\Delta_M = e_{\Sigma}(T > 2\pi) \quad (10)$$

Фиг.5 показывает реальное измерение жизни положения точек обрабатываемого профиля по отношению к оси среднего диаметра профиля и последовательность контактов при радиальной скорости подачи 0.001 mm / об. При подходе заготовки режущим инструментом, в зависимости от траектории шпинделя, между инструментом и заготовкой будут различные контактные точки (сектора) и их числовые изменения с каждой последующей революцией. Следует отметить, что важно, чтобы периоды и фазы полигармонического сигнала, описывающего траекторию оси шпинделя, имеют первый контакт, поскольку траектория может быть разной в каждом обороте. На рисунке 5 показаны пять оборотов (один оборот соответствует 300 произвольным точкам по оси абсцисс), а контактные точки между инструментом и заготовкой отмечены разными цветами в зависимости от скорости подачи. Независимо от того, когда первый контакт сделан, он достигает около 50% контактов в течение одного оборота в одном и том же положении, поэтому система будет выдавать сигнал, регистрирующий достигнутые координаты в одном и том же месте каждый раз.



5. Контакты между инструментом и обрабатываемой поверхностью



6. Выходной сигнал от контактной измерительной системы

Так как во время каждого контакта между инструментом и заготовкой имеется электрический контур, за один оборот заготовки система для регистрации контактов выдает серию чередующихся «0» (без контакта) и «1» (контакт). Последовательность зависит от профиля обрабатываемой поверхности и траектории оси шпинделя (рис. 6). С помощью инструмента, последовательно приближающегося к заготовке, количество контактов увеличивается с каждым оборотом заготовки.

Число оборотов, через которое достигается достаточное количество контактов, зависит от ошибки профиля обрабатываемой поверхности, отклонения положения оси шпинделя во время обработки и измерения и скорости подачи режущего инструмента.

Чтобы доказать вышеприведенную инструкцию, эксперимент выполняется с помощью режущего инструмента, приближающегося к обрабатываемой детали и контактирующего с ней. Используемый токарный станок с ЧПУ - это машина типа SE063; заготовка зажимается в патроне с тремя челюстями, а режущая пластина имеет тип VBMT160408. Для регистрации контактов

использовался цифровой осциллограф, на который были представлены два сигнала: один представляет собой сигнал одного импульса на оборот от фотоэлектрического преобразователя системы обратной связи шпинделя, а другой - от системы для регистрации контактов. Осциллограф был связан с компьютером для записи и анализа сигналов. Одновременная запись сигналов позволяет анализировать их во время каждого оборота заготовки, а также для определения числа оборотов от первого контакта между инструментом и заготовкой до тех пор, пока инструмент не достигнет самой внутренней точки профиля обрабатываемой поверхности. Записи сигналов показаны на рисунке 7 (сигнал от обратной связи шпинделя зеленый, а сигнал от контактов - желтый).

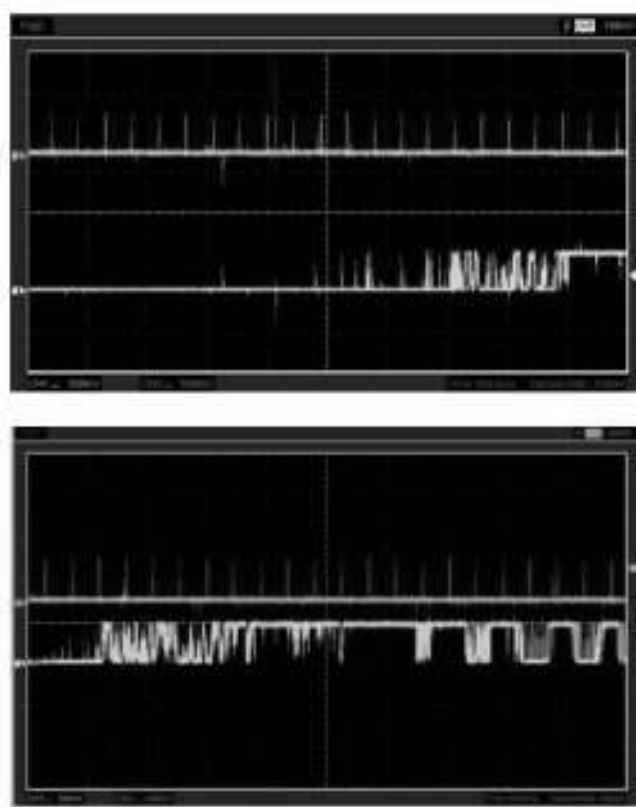


Рисунок 7. Записанный сигнал от датчика обратной связи шпинделя (зеленый) и от контактной измерительной системы (желтый)

Из записей видно, что после первого момента контакта между заготовкой и режущим инструментом изначально из системы записи контактов выбрасываются только автономные сигналы. С увеличением оборотов их плотность увеличивается. Сигнал обратной связи от фотоэлектрического преобразователя появляется как один импульс в начале каждого оборота шпинделя. Достижение самой глубокой (самой глубокой) точки профиля обрабатываемой поверхности, на которой контактный сигнал становится постоянным, достигается в течение 7-11 оборотов после первого контакта. Скорость подачи составляла 0,001 мм / об, что означает, что радиальное

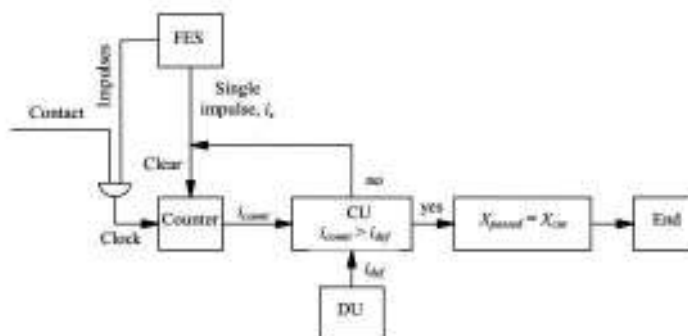
расстояние между контактом с первой и последней точкой на профиле составляло 7-11 мкм.

Эксперименты проводились с различными скоростями вращения шпинделя в диапазоне 600-1000 об / мин. Количество оборотов, необходимых для достижения самой внутренней точки на обрабатываемой поверхности, не зависело от скорости шпинделя. Увеличение радиальной скорости подачи пропорционально уменьшает количество требуемых оборотов шпинделя.

Постоянный контакт между инструментом и заготовкой можно рассматривать как прямую линию с высоким потенциалом. После нескольких дополнительных оборотов из-за уменьшения упругих деформаций в технологической системе от упругих деформаций (формирования небольшой радиальной канавки на обрабатываемой поверхности) электрический контакт между инструментом и заготовкой начал уменьшаться. Пики, возникающие в результате этого эффекта на рисунке, следует игнорировать.

Согласно вышеприведенному обсуждению, чтобы подать сигнал в систему ЧПУ после достижения контакта между заготовкой и режущим инструментом за один оборот, необходимо разработать устройство, которое может регистрировать период, в течение которого система регистрации контактов активируется. Так как необходимо начинать подсчет импульсов после каждого оборота шпинделя, необходимо также иметь обратную связь от вращений шпинделя. Это хорошая идея использовать сигналы от фотоэлектрического преобразователя блока обратной связи шпинделя, который генерирует 1024 импульса на каждый оборот шпинделя. Один импульс из той же системы, который выдается в начале каждого оборота, может использоваться для начала подсчета количества контактов.

Устройство, которое подсчитывает импульсы при одном обороте шпинделя, в течение которого происходит контакт между заготовкой и режущим инструментом, и которое информирует систему ЧПУ о том, что радиальное положение достигнуто, схематически представлено на рис. 8.



8. Принципиальная схема устройства для подсчета импульсов

Его принцип заключается в том, что подсчитываются только те импульсы от фотоэлектрического датчика (FES), во время которых активна система регистрации контактов. Единичный импульс i_s начинает подсчитывать последовательность импульсов, а блок сравнения (CU) решает, превышает ли количество подсчитанных импульсов i_{count} , заданное определяющим модулем (DU), заранее определенное число i_{def} . Если условие не выполнено, счетчик устанавливается на ноль сигналом i_s , и отсчет начинается снова. Когда i_{count} становится больше, чем я определяю, устройство выдает сигнал системе ЧПУ о том, что радиальное положение достигнуто, и система ЧПУ регистрирует текущее положение поперечного слайда. При этом цикл измерения прекращается. Также может быть решение, в котором количество контактов подсчитывается в течение более одного оборота шпинделя.

Экспериментальное оборудование разработано для токарного станка с ЧПУ SE063 и содержит следующие элементы (рис. 9): система для регистрации контактов между заготовкой и режущим инструментом; устройство для анализа плотности контактов; датчик обратной связи для измерения линейного положения движений; персональный компьютер, связанный с устройством для анализа плотности контактов; персональный компьютер, связанный с преобразователем обратной связи.

Заготовка 1 обрабатывается на токарном станке с ЧПУ SE063. Заготовка удерживается в трех зажимном патроне со свободной длиной 120 мм. Его материал - мягкая сталь, диаметр обработанного D_M - 40 мм. Скорость шпинделя составляет 1000 об / мин, радиальная подача составляет 0,12 мм / об., А глубина резки - 0,25 мм. Режущая пластина имеет тип VBMT160404 - 2015. Измерения выполняются режущим инструментом 2, который обрабатывает поверхность. Контактный датчик 4 установлен в кармане башни 3, которая при контакте между инструментом и заготовкой посылает сигнал в систему для регистрации контактов (CRS, 9). Цель состоит в том, чтобы достичь минимум 50% контактов между инструментом и заготовкой во время одного оборота шпинделя перед отправкой сигнала для регистрации фактического положения режущего инструмента, то есть для регистрации размера обрабатываемой детали. Длина контакта рассчитывается устройством для измерения плотности (DMD, 10) контактов. Его принцип основан на зарядке конденсатора в течение периода контакта и разряде его при отсутствии контакта. Когда достигается определенный заряд, сигнал отправляется в регистрирующее устройство 6, которое регистрирует положение позиционного преобразователя 5 обратной связи. Эта процедура повторяется много раз с шагом в осевом направлении (Z), большим, чем радиус носа инструмента. Устройство для анализа плотности контактов связано с персональным компьютером 8, который позволяет не только записывать весь процесс, но и исследовать параметры в реальном времени: размерность

импульсов, плотность контактов, сигналы от шумов, количество оборотов до достижения постоянного контакта между заготовкой и инструментом и т. д. Устройство 6, которое регистрирует положение режущего инструмента после достижения необходимых контактов между заготовкой и инструментом, подключается к другому компьютеру 7, который хранит данные, представляет их в графической форме и выполняет статистический анализ с точки зрения технологического инженера.

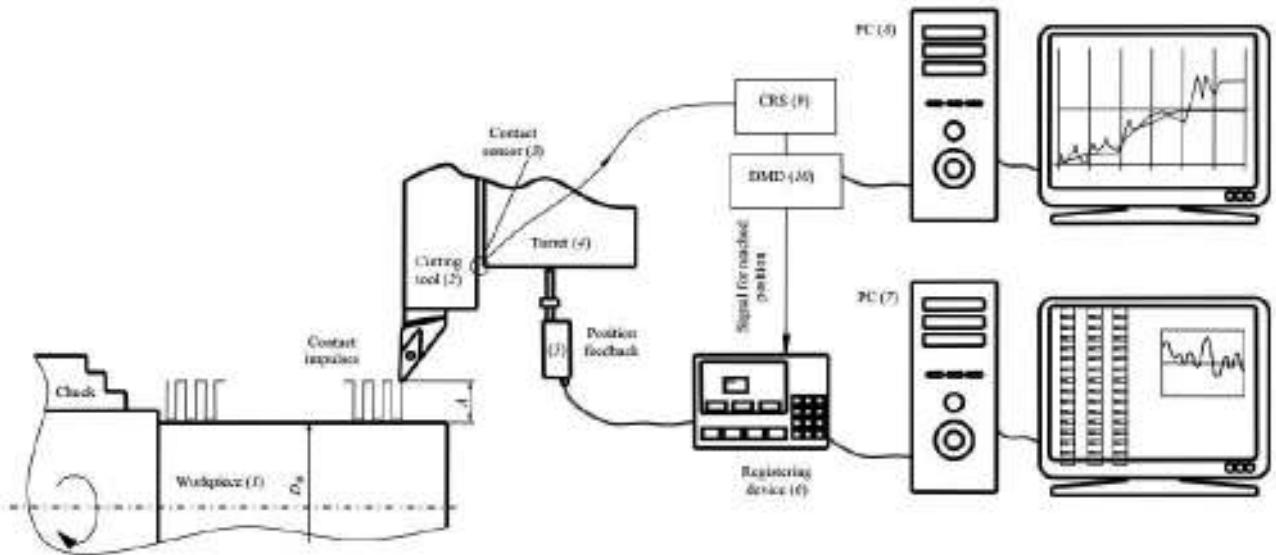


Рисунок 9. Схема экспериментального оборудования

Результаты измерений представлены графически на рис. 10; отклонение измеренных размеров составлено по сравнению с количеством повторных экспериментов N. Измерения повторялись после обработки обрабатываемой детали несколько раз. Разброс зарегистрированного положением системы режущего инструмента после достижения минимального контакта 50% между режущим инструментом и обрабатываемой деталью находился в диапазоне $\pm 2,2$ мкм.

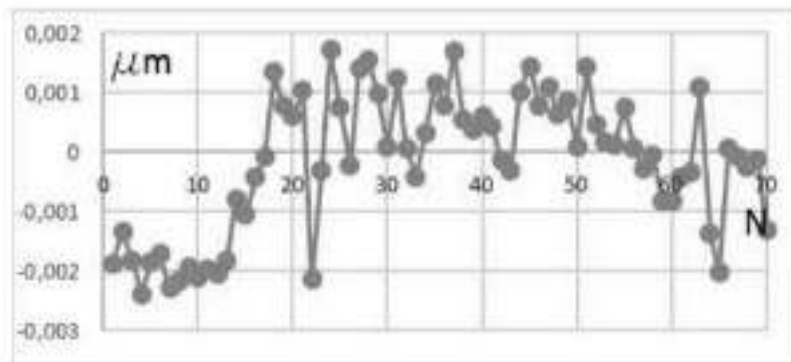


Рисунок 10. Измерение размеров обрабатываемой поверхности с использованием серии импульсов

4. Выводы

Измерение размера обрабатываемой поверхности с помощью самого режущего инструмента оправдано, когда целью является автоматизация контроля во время и после обработки, при одновременном контроле качества и статистическом анализе, чтобы избежать использования специальных измерительных приборов и во время управления несколькими станками.

Уровень координации положений запрограммированных и размерных точек режущего инструмента определяет ошибки, возникающие при измерении размера заготовки с помощью режущего инструмента. Измерение размера заготовки с помощью режущего инструмента возможно с использованием одного сигнала или серии сигналов от контактов между режущим инструментом и заготовкой в течение одного оборота шпинделя. В первом случае это самый большой диаметр поверхности, а во втором случае измеряется средний диаметр, при котором достигается 50% контакт между инструментом и обрабатываемой деталью.

Количество оборотов, необходимых для достижения достаточного контакта между инструментом и заготовкой, зависит от ошибки профиля измеряемой поверхности, от отклонения положения оси шпинделя во время измерений от ее положения во время обработки и от скорости подачи режущий инструмент. Экспериментально определено, что при радиальной скорости подачи 0,001 мм / об. Внутренняя точка измеренного профиля может быть достигнута в пределах 7-11 оборотов шпинделя. Разброс измеренного положения режущего инструмента с использованием разработанной системы составляет $\pm 2,2$ мкм.

Ссылки

[1] Georgiev, V., Salapateva, S., Chetrokov, I., 2005. "The possibilities of increasing the accuracy of active inspection of CNC lathes using adaptive accuracy control," AMTECH 2005. Rouse, Bulgaria, pp 386-391.

[2] Enchev, M., Koleva, S., 2013. "Application measuring part dimensions using the cutting tool," Scientific conference Sliven. Sliven, Bulgaria.

[3] Enchev, M., 2004. "Managing the efficiency of automatic inspection on CNC lathes," 4th International congress on manufacturing technologies. Varna, Bulgaria, pp 80-84.

[4] Enchev, M., 2006. "Automatic setup and re-setup of CNC lathes," Doctoral thesis. University of Rouse, Bulgaria.

[5] Koleva, S., 2013. "Analysis of the effect of the profile errors during inspection with the cutting tool ," Scientific conference of the University of Rouse. Rouse, Bulgaria.

[6] Koleva, S., Enchev, M., 2013. "Experimental investigation of the effect of the profile errors during inspection with the cutting tool ," Scientific conference of the University of Rouse. Rouse, Bulgaria.

[7] Nenov, G., Szecsi, T., 2001. "Increasing CNC machine tool productivity by using tool-part touch control," FAIM 2001. Dublin, Ireland, pp 104-114.

[8] Nenov, G., 1997. "Multi-contour systems for adaptive control," Doctoral thesis. University of Rouse, Bulgaria.

[9] Liu, Z., Venuvidov, P., Ostafiev, V., 1998. On-machine measurements of workpieces with the cutting tool. Integrated manufacturing systems 9/3, p. 168-172.

[10] Ostafiev, V., Venuvidov, P., 1997. "A new electromagnetic contact sensing technique for enhancing machining accuracy," IMECE 1997, pp 245-252.