

МОНИТОРИНГ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ОБРАБОТКЕ ТОЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЛОЖНОГО КОНТУРА

А.А. Серегин, А.Г. Кравцов

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия

В статье представлены результаты теоретического и экспериментального исследования, проведенного с целью вскрытия основных причин образования погрешностей геометрии деталей сложной формы на «холодном» станке. Решение данной задачи способствует повышению точности обработки деталей сложной формы как на станках с ЧПУ, так и на полуавтоматах с копировальными устройствами. Предлагаемая система мониторинга повышает качество эксплуатации технологических систем в целом. Авторами разработан новый аналитический метод для оценки качества изделий, получаемых на станках с ЧПУ. Предлагаемая методика включает следующие пункты:

1. Оценка состояния технологической системы станка по результатам испытаний на точность отработки программы и проверки на жесткость.

2. Контроль состояния станка на основе анализа технологической точности обработки. В качестве математического обеспечения здесь выступают полученные зависимости технологической точности от геометрической.

3. Управление точностью обработки по результатам контроля за счет коррекции программы для системы ЧПУ и изменения режимов обработки.

Проведена полномасштабная оценка причин и последствий потенциальных погрешностей станков с ЧПУ, которая позволила предложить альтернативные технологические решения и уменьшить дисперсию погрешностей обработанных поверхностей сложноконтурных деталей. Внедрение результатов проведенных исследований в производство позволяют повысить уровень технологического обеспечения точности поверхностей сложного контура и функциональных возможностей используемого оборудования. Анализ результатов экспериментальной проверки показал, что предложенные решения позволили повысить уровень технологического обеспечения точности деталей сложной формы от 53 до 78 %.

Ключевые слова: геометрическая точность, дрейф нуля станка, остаточное силовое смещение исполнительных узлов технологической системы, погрешность обработки деталей сложной формы, технологическая точность.

Постановка задачи исследования. Одним из предпочтительных методов настройки станков с ЧПУ на размер является обработка пробной детали с последующим размерным анализом. В этом случае производят обработку заготовки по управляющей программе. Далее, полученную деталь измеряют и корректируют управляющую программу. В частности, отмечают истинное положение нуля станка. Все эти действия производят в начале смены на «холодном» станке, так как в производственных условиях невыгодно прогревать станок в течение 2 или 3 часов для осуществления настройки.

При дискретности систем управления 0,002 мм наиболее важной погрешностью станка, оказывающей значительное влияние на процесс обработки, является погрешность, называемая «дрейф нуля станка» **ZD** (zero drift). Под **ZD** понимают смещение исходного положения исполнительного узла станка (с которого начинается отработка программы) от его первоначального положения. **ZD** вызывает погрешность обработки в виде изменения размеров каждой последующей детали относительно размеров первой детали.

Согласно известным исследованиям [1], закон изменения **ZD** близок к экспоненциальному. При этом длительность процесса регистрации отклонений составляет от 2 до 5 часов, и после окончания работы система станка возвращается в исходное положение. Необходимо отметить, что в случае непрерывной работы станка в течение такого промежутка времени регистрируют,

как правило, тепловые деформации станка [2, 3], являющимися процессами средней скорости. Однако погрешность типа **ZD** можно наблюдать и на «холодном» станке. Это обстоятельство делает актуальными исследования, направленные на определение компонент **ZD**, зависящих от быстропротекающих и медленных процессов. Именно эти процессы являются определяющими при настройке технологической системы станка методом пробной детали.

Быстропротекающие процессы зависят от жесткости станка и характера трения в его направляющих [4]. Медленные процессы связаны с износом направляющих [5] и, соответственно, также связаны с процессами трения. Таким образом, жесткость и трение являются определяющими физическими факторами, влияющими на значение **ZD** наблюдаемое на «холодном» станке.

Цель настоящей работы – определение основных компонент, суммирование которых формирует значение «дрейфа нуля» на «холодном» станке.

1. Теоретическое исследование. Точность обработки деталей сложного контура на станках с ЧПУ всегда заслуживала особого внимания. Известно [6], что погрешность обработки деталей на станках с ЧПУ складывается из большого вариативного числа переменных. Согласно основным положениям технологии машиностроения, эти факторы могут быть как конструктивными, зависящими от конструкции станка и его системы управления, так и технологическими, определяемыми выбранным инструментом, режимами резания, конструкцией приспособления и прочими факторами. Конструктивные факторы обуславливают погрешности механической системы станка и ошибки системы ЧПУ. И если последние можно скорректировать управляющей программой, то погрешности механической системы станка устранить невозможно, так как они состоят не только из собственно геометрических ошибок, но и являются отражением физических процессов, происходящих в системе станка.

Анализ производства деталей на станках с ЧПУ позволяет выделить следующие основные виды погрешностей, присущие этому виду оборудования: погрешность программирования; погрешность настройки станка; погрешность позиционирования; погрешность автоматической смены инструмента; геометрическая погрешность, возникающая от непрямолинейности, непараллельности и неперпендикулярности векторов перемещения исполнительных узлов станка; погрешность от упругих смещений; погрешность от быстропротекающих процессов; процессов, протекающих со средней скоростью; погрешность от медленно протекающих процессов. Необходимо учесть, что основная масса погрешностей является случайными величинами, изменяется во времени и имеет свойство векторов.

Согласно анализу литературных источников эта погрешность обусловлена: ошибкой интерполатора, погрешностью приводных двигателей, кинематическими погрешностями привода подачи, динамическими погрешностями, отклонением геометрии направляющих станка от номинальной, упругими перемещениями деталей приводов и исполнительных узлов. В то же время анализ результатов производственных испытаний станков показывает, что наибольший вклад в формирование ZD_N вносят погрешности привода подачи по N-й координате, динамические погрешности, погрешности геометрии и упругие перемещения, направленные по N-й координате. Исследованиями, проведенными авторами настоящей статьи, установлено, что погрешность типа **ZD**, представляет собой вектор, компоненты ZD_N которого заданы в координатах рабочего пространства станка.

Таким образом, общая погрешность обработки деталей сложного контура на станках с ЧПУ образует некоторый гипервектор **GV**, заданный в системе координат контролируемой поверхности. Компоненты данного вектора определяют по формуле

$$GV_N = \Theta_N \cdot ZD_N + \Sigma Var.$$

Здесь Θ_N – оператор перевода величины ZD_N в систему координат контролируемой поверхности; ΣVar – комплекс отклонений геометрии поверхности, носящих вероятностный характер.

Анализ процесса формирования погрешности **GV** позволил разработать модель точности обработки на станках с ЧПУ с учетом погрешности типа **ZD**. С помощью полученной модели определены математические зависимости, связывающие показатели технологической точности с параметрами станка и обработанных изделий. Рассмотрим основные блоки модели.

1.1. Математическая модель точности, учитывающая динамические процессы, происходящие в системе станка. Основой модели является алгоритм, приведенный в [7]. Погрешность Δ_n вектора перемещения узла станка (или его позиционирования), вызванную динамическими процессами, можно рассчитать по формуле

$$\Delta_n = [\Omega \sum_{n=1}^N \left\{ \begin{matrix} n \\ pq \end{matrix} \right\} S_p] \Delta x^q, \quad (1)$$

где Δ_n – отклонение точки окончания перемещения S или позиционирования узла, измеренное вдоль n -й координаты системы координат, связанной с данным узлом станка; S_p – компонента S , направленная вдоль p -й координаты; Ω – оператор, корректирующий значения амплитуды и частоты в коэффициентах связи $\left\{ \begin{matrix} n \\ pq \end{matrix} \right\}$ систем координат узлов, если колебания происходят с существенным отклонением от гармонического закона; Δx^q – пространственно-временная погрешность расположения точки начала вектора перемещения S (Δx^q находят как сумму погрешностей и приводят к исполнительному узлу в виде запаздывания, т. е. «погрешности по времени»); N – число координат, вдоль которых происходит перемещение, включая координату «время» (при условии, что коэффициенты $\left\{ \begin{matrix} n \\ pq \end{matrix} \right\}$, связывающие эти координаты, не равны нулю).

Результат произведения тензора отношений входных погрешностей, компоненты которого находятся в квадратных скобках уравнения (1), на Δx^q показывает, как геометрические погрешности и запаздывание по времени влияют на отклонение движения узла станка от номинального, с учетом его динамических характеристик.

1.2. Блок модели, учитывающий жесткость станка. Согласно теоретическим положениям о жесткости станков [4], узел технологической системы можно представить как упруго-фрикционный модуль, состоящий из двух основных элементов – жесткости и трения. Значения этих элементов определяют в зависимости от действия внешних сил. Вектор остаточных силовых смещений можно определить с помощью интегральной суммы

$$L_q = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{k=1}^m F_i \right] \frac{1}{j}, \quad (2)$$

где L_q – остаточное силовое смещение узлов технологической системы по направлению q -й оси рабочего пространства станка (X ; Y или Z); F_i – силы трения, действующие в направляющих i -го узла по направлению X ; Y или Z ; j – жесткость i -го узла по направлению X ; Y или Z ; n – число узлов; m – порядковый номер слагаемого.

Остаточное силовое смещение определяет относительное положение инструмента и заготовки по окончании процесса резания, т. е. точность обработки и точность позиционирования после прекращения подачи. Значения остаточных смещений и погрешности обработки настолько значительны, что могут достичь величины допуска на обрабатываемый размер. В беззазорных упруго-фрикционных модулях необходимо учитывать составляющую погрешности, вызванную процессами реологии материалов узла станка. Процессы реологии необходимо учитывать при нахождении исполнительных узлов в одной и той же точке рабочего пространства станка в течение промежутка времени от 1 до 15 минут [8]. Например, при рабочей паузе программы или нулевом перемещении узла станка с ЧПУ компоненты вектора LF остаточных силовых смещений будут иметь вид

$$LF_q = L_q \pm \sum_{i=1}^n R[L_q], \quad (3)$$

где $\Sigma R[L_q]$ – суммарное реологическое смещение ответственных и базовых деталей технологической системы по направлению q -й оси.

Формула (2) не получила широкого распространения в практике станкостроения из-за несоответствия численных результатов и данных наблюдений. Однако этот факт вызван тем, что инженеры при расчете сил трения используют постоянные коэффициенты, а также не учитывают вторую компоненту формулы (3). Фрикционные режимы включают в себя изменение состояния поверхности, состояния микроструктуры, формы деталей и условий трения. Поэтому расчет коэффициента трения представляет собой сложную задачу [9]. Применительно к упруго-фрикционным модулям технологической системы используем модель расчета, приведенную ниже.

Рабочие поверхности деталей механизмов после приработки незначительно снижают шероховатость поверхности, что способствует уменьшению коэффициента трения f_i . Но с образованием выпуклостей, впадин и задиrow на рабочей поверхности f_i в местах задиrow может изменяться скачкообразно на один порядок. Процессы трения влияют на точность позиционирования узлов.

Эти изменения снижают точность технологической системы. Количественную зависимость изменения коэффициента трения определяем из модели, приведенной в [10]

$$f_i = [\mu_{CM}(D + R) + I], \quad (4)$$

где μ_{CM} – коэффициент смазки; D – компонент, определяющий сопротивление движению в местах локализации дефектов, когда контурное давление деформирует материал деталей узла станка на такую глубину, что величина деформации не зависит от коэффициента трения [9]; I – компонент, характеризующий скачкообразное изменение F_i [11, 12]; R – составляющая f_i , вызванная изменением мгновенного механического сопротивления относительно перемещению. При рассмотрении моделей для металлорежущего оборудования R , как правило, мало и ей можно пренебречь.

Далее, расчет сил трения F_i производят по известным зависимостям. Поскольку f_i есть функция времени, то и F_i будут представлять собой функцию, изменяющуюся во времени.

Величину остаточных смещений включают в уравнения баланса точности станка, который составляют следующим образом. На основе компоновочной формулы станка [13] выделяют оси координат, по которым происходит движение в процессе обработки. С каждой осью связывают матрицу перемещений и поворотов [14]. Находят уравнения движения по осям координат. На основе уравнений движения составляют матрицу Якоби [14] и определяют коэффициенты связи систем координат узлов технологической системы [15].

1.3. Порядок включения уравнений поверхностей сложной формы в баланс точности станка. Решение задач по анализу погрешности формообразования поверхностей сложного контура основано на векторно-матричном аппарате преобразования координат объекта [14, 15]. Для поверхности сложной формы объектом выступают точки ее образующей линии, заданные вектором ρ . Способ образования, константы и функции, описывающие образующую, ее кинематические изменения (погрешности) отражены в относительных перемещениях исполнительных узлов станка. Указанные изменения $\Delta\rho_n$ определяют в системе координат элемента технологической системы задающего движение исполнительному узлу станка и в координатах изделия определяют в виде:

$$\Delta P_n = J_n^m K_n \Delta\rho_n e^n, \quad (5)$$

где J_n^m – якобиан перехода между системами координат узлов станка; e^n – векторы, характеризующие базис (репер) в каждой точке системы координат ведущего элемента (если они заданы как функции от базиса системы координат исполнительного узла станка, то матрицу Якоби J_n^m из формулы (5) исключают); K_n – коэффициенты разложения вектора ρ по заданному пространственно-временному базису e^n . Суммирование в уравнении (5) производят по повторяющимся индексам. Расчет осуществляют в виде последовательного перехода от неподвижных деталей несущей системы станка к узлам, совершающим движение формообразования, согласованное с уравнением, описывающим образующую и ее кинематические изменения [16].

Наибольшую сложность представляет составление функциональной зависимости поверхности в системе координат изделия при смещении начала кривой, профилирующей поверхность, на величину ZD . В общем случае функция изменяется. Например, в случае обработки эвольвенты может произойти изменение самой основы – эволюты.

1.4. Зависимость технологической точности от геометрической. Геометрическая точность технологической системы это ожидаемые погрешности готовых изделий. Ее связь с технологической точностью носит вероятностный характер. Для вскрытия этой связи необходимо разделить систематические и случайные погрешности, характеризующие технологический процесс. На основе известных работ [17–20] по точности технологических процессов разработана методика разделения систематических и случайных погрешностей. Она приведена ниже.

Решение задачи разделения систематической и случайной составляющих возможно различными способами [18, 19]. Наиболее известный способ – сглаживание исходной реализации размеров полиномом по методу наименьших квадратов. Другой распространенный способ выделения собственно случайной составляющей – метод скользящей средней. Для разделения систематической и случайной составляющих суммарной погрешности можно воспользоваться также спектральным методом, пригодным в тех случаях, когда априори известны теоретические значения корреляционных и взаимно корреляционных функций погрешностей размеров. Для обработ-

ки данных по технологической точности используем дисперсионный метод разделения суммарной погрешности обработки, для которого разработаны критерии оценки систематической и случайной составляющих погрешности обработки.

Из курса технологии машиностроения известно, что закон распределения погрешности размеров партии деталей для конкретного периода производственного процесса совпадает с законом Гаусса, но имеет экспоненциальную зависимость от времени. Основываясь на этом, определим точность технологического процесса изготовления партии деталей. Алгоритм разделения систематической и случайной составляющих погрешности обработки состоит из следующих шагов расчета:

1. Расчет моментов первого и второго порядков общей погрешности, подчиняющиеся экспоненциальному закону распределения во времени.
2. Расчет дисперсии суммарной погрешности обработки.
3. Разложение дисперсии погрешности обработки на три составные части.
 - 3.1. Расчет дисперсии погрешности обработки вызванной изменением функции математического ожидания, обусловленной влиянием систематических факторов.
 - 3.2. Расчет дисперсии погрешности обработки вызванной изменением функции среднего квадратичного отклонения, обусловленной влиянием случайных факторов, параметры рассеяния которых изменяются в течение рассматриваемого периода производственного процесса.
 - 3.3. Расчет дисперсии погрешности обработки вызванной постоянной составляющей функции, обусловленной случайными факторами, параметры которых не изменяются во времени.
4. Определение трех временных показателей.
 - 4.1. Расчет отношения величин, найденных по шагу 3.1 алгоритма к дисперсии суммарной погрешности обработки.
 - 4.2. Расчет отношения величин, найденных по шагу 3.2 алгоритма к дисперсии погрешности обработки.
 - 4.3. Расчет отношения величин, найденных по шагу 3.3 алгоритма к дисперсии погрешности обработки.
5. Определение значений показателей систематической и случайных составляющих погрешности обработки.
 - 5.1. Расчет показателя систематической составляющей погрешности обработки при изменении уровня настройки по степенному закону и постоянном мгновенном рассеянии.
 - 5.2. Определение условий, при которых доля систематической составляющей, вызванной изменением уровня настройки, в общей погрешности обработки будет наибольшей.

При практической реализации приведенного выше алгоритма установлено, что для практических расчетов можно рассматривать изменение погрешностей по линейной зависимости. Анализ данных производственной статистики показывает, что доля систематической составляющей погрешностей обработки колеблется от 25 до 30 %.

2. Объект исследования. Статистические методы наблюдений за большим количеством станков применять нецелесообразно, так как это сопряжено с большими сложностями сбора эмпирической информации. Лучше проводить испытание двух-трех станков, а выводы делать по результатам сбора эмпирической информации на основе данных обычных и ускоренных испытаний, проведенных в производственных условиях.

В качестве объектов проводимых исследований были выбраны многоцелевой токарный обрабатывающий центр ST-10Y и фрезерно-расточной станок TM-1P производства фирмы Haas Automation, а также станок 400V Стерлитамакского завода ООО НПО «Станкостроение» компании «СТАН». Оценку **ZD** производили по схеме, представленной на рис. 1 (натурная фотография эксперимента). В приспособлении, установленном на столе станка, закрепляли спиральный диск, со спиралью, профилированной по эвольвенте с переменным значением эволюты. Точность профиля спирали оценивали на координатно-измерительной машине. В шпинделе станка на специальной оправке крепили два штатива с индикаторами МИГ 2 (цена деления 0,002 мм), прошедшими ежегодную аттестацию. Индикаторы устанавливали под углом $90^\circ \pm 30'$ между измерительными наконечниками. Настройку станка производили так, чтобы измерительные наконечники периодически касались боковой грани спирали диска. Профиль спирали проверяли с точностью до 0,001 мм на координатно-измерительной машине модели ХО 55 ТМ 1 производства фирмы Wenzel.

Исследования проводили на холостом ходу станка, без обработки спирали. При определении **ZD** станок работал в автоматическом режиме по программе, разработанной для обработки поверхности эволютоидного контура. Станком выполнялся весь цикл запрограммированных рабочих перемещений. Период отработки цикла программы равнялся 5 минутам 32 секундам. После завершения цикла измеряли относительное положение шпинделя и стола станка по осям X и Y после их возврата в исходное положение. Для осуществления регистрации измерений в начало программы включали цикл с нулевым перемещением.



Рис. 1. Проверка возврата узлов в ноль станка при использовании криволинейного шаблона

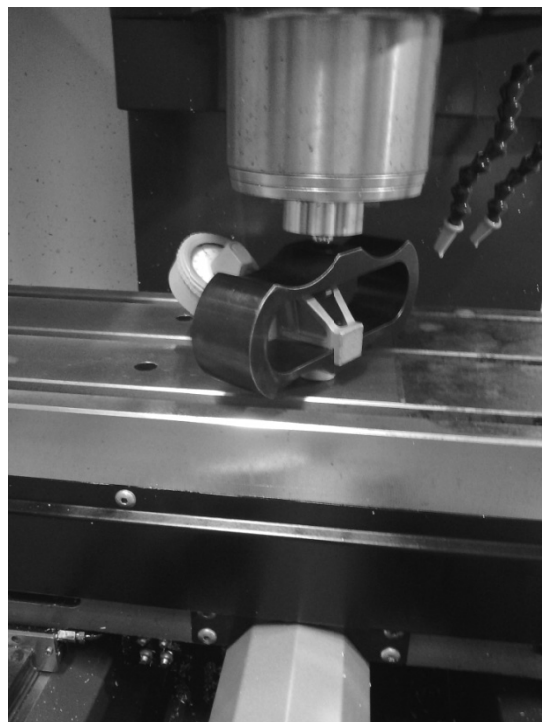


Рис. 2. Проверка жесткости и эффекта упругого последствия системы станка

Проверку зависимостей (2) и (3) производили с помощью аттестованного динамометра по направлениям перемещений рабочих органов станка X; Y и Z (рис. 2). Регистрацию величины реологического смещения ответственных и базовых деталей технологической системы станка производили через 1 секунду после достижения максимального усилия нагружения. Усилие нагружения принимали равным максимально возможной силе резания, действующей в системе исследуемого станка. Падение жесткости станка вследствие процессов последствия упругой системы отмечали в промежутке времени до 15 минут.

Одновременно были произведены экспериментальные исследования по проверке соответствия теоретически полученных зависимостей технологической точности станка от геометрической. Во время обработки пробных деталей проводили измерения **ZD**. Полученные значения **ZD**, вызванные рабочими нагрузками в станке, сравнивали с теоретическими.

3. Результаты эксперимента. Эмпирическая проверка работы станков показала, что **ZD** может достигать значений, превышающих допуск на изготовление спирали от 1,5 до 2 раз. Вскрыто существенное отличие закономерности распределения величины **ZD** от экспоненциального закона. Закономерность распределения **ZD** носит ярко выраженный стохастический характер. Закон распределения **ZD** близок к нормальному. Отклонения распределения **ZD** от закона Гаусса имеют свою специфику и связаны с конструктивными особенностями технологической системы и режимами обработки.

Наиболее важным результатом считаем исследование явления последствия упругой системы станка. В ходе проведения экспериментов отмечено, что последствие системы станка проявляется уже через одну секунду после нагружения, а не через одну минуту, как это отмечается в известных работах [4, 8].

Выводы

1. Проведен полномасштабный анализ причин отклонения позиционирования исполнительных узлов от нуля программы на «холодном» станке.
2. Впервые оценка «дрейфа нуля» была проведена по всему объему рабочего пространства и по направлениям перемещения исполнительных узлов станка.
3. Разработаны теоретические основы расчета величины «дрейфа нуля» с учетом процессов динамики, трения, жесткости и последствия упругой системы станка.
4. Получены математические зависимости технологической точности станка от геометрической. Разработан алгоритм разделения систематических и случайных погрешностей обработки.
5. Доказано, что отклонение от нуля программы находится в прямой связи с режимами обработки и комбинации направлений подачи исполнительных узлов при обработке поверхностей сложного контура.

Литература

1. Авдеев, В.Б. Исследование дрейфа «0» системы ЧПУ токарного полуавтомата / В.Б. Авдеев // Изв. вузов. Машиностроение. – 1978. – № 2. – С. 175–179.
2. Кравцов, А.Г. Экспериментальное исследование тепловой проводимости контакта в стыковых соединениях металлорежущих станков / А.Г. Кравцов, А.В. Харитонов // Машиностроение: сб. науч. тр. – Оренбург: ОГУ, 1997. – С. 89–91.
3. Dmitriev, V.M. Assessing the Thermal Rigidity of a Metal-Cutting Machine / V.M. Dmitriev // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38, iss. 2. – С. 94–97. DOI: 10.3103/S1068798X18020065
4. Чернянский, П.М. Последствие механической системы станков / П.М. Чернянский // Вестник машиностроения. – 2013. – № 1. – С. 57–59.
5. Проников, А.С. Надежность машин / А.С. Проников. – М.: Машиностроение, 1978. – 592 с.
6. Игонин, Г.А. Расчет и баланс составляющих погрешности контурной обработки на фрезерных станках с ЧПУ / Г.А. Игонин, М.И. Коваль // Станки и инструмент. – 1985. – № 6. – С. 7–10.
7. Серегин, А.А. Математическая модель точности станка с учетом колебаний его рабочих органов / А.А. Серегин // СТИН. – 2007. – № 4. – С. 2–6.
8. Ивасышин, Г.С. Влияние упругого последствия на контактную жесткость металлорежущих станков и автоматических роторных линий / Г.С. Ивасышин // Изв. вузов. Машиностроение. – 1988. – № 12. – С. 122–125.
9. Ряховский, А.М. К расчету коэффициента трения конструкционных материалов / А.М. Ряховский // Трение и износ. – 1989. – Т. 10, № 5. – С. 851–860.
10. Seregin, A.A. Safe installation of Blank with Clamp Wear / A.A. Seregin // Russian Engineering Research. – 2010. – Т. 30. № 6. – С. 561–563. DOI: 10.3103/S1068798X10060067
11. Кудинов, В.А. О скачке силы трения при переходе от покоя к скольжению / В.А. Кудинов // СТИН. – 1993. – № 6. – С. 2–6.
12. Пожбелко, В.И. Динамическое моделирование силы трения в расчетах станков на плавность малых перемещений / В.И. Пожбелко // СТИН. – 2002. – № 8. – С. 5–9.
13. Врагов, Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков. Основы компонетики / Ю.Д. Врагов. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
14. Серегин, А.А. Некоторые вопросы динамики и точности механизмов / А.А. Серегин // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1990. – № 3. – С. 12–15.
15. Серегин, А.А. Определение точности механических систем станков / А.А. Серегин // Станки и инструмент. – 1991. – № 1. – С. 29–31.
16. Bushuev, V.V. Role of the Machine Tool's Kinematic Structure in Ensuring Machining Precision / V.V. Bushuev, V.V. Molodtsov // Russian Engineering Research. – 2010. – Vol. 30, no. 10. – P. 1053–1059. DOI: 10.3103/S1068798X10100199
17. Zeroudi, N. Prediction of tool deflection and tool path compensation in ball-end milling / N. Zeroudi, M. Fontaine // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2015. – Vol. 26, no. 3. – P. 425–445. DOI: 10.1007/s10845-013-0800-8
18. Fan, K.C. Prediction of machining accuracy degradation of machine tools / K.C. Fan, H.M. Chen, T.H. Kuo // Precision Engineering. – 2012. – Vol. 36, no. 2. – P. 288–298. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2011.11.002

19. Rahou, M. *Time Compensation of Machining Errors for Machine Tools NC based on Systematic Dispersion* / M. Rahou, A. Cheikh, F. Sebaa // *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*. – 2009. – Vol. 3, no. 8. – P. 849–855. – scholar.waset.org/1999.8/10608.

20. Stryczek, R. *A metaheuristic for fast machining error compensation* / R. Stryczek // *Journal of Intelligent Manufacturing*. – 2016. – Vol. 27, iss. 6. – P. 1209–1220. DOI: 10.1007/s10845-014-0945-0

Серегин Андрей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения, металлообрабатывающие станки и комплексы», Оренбургский государственный университет, aasdom@yandex.ru.

Кравцов Александр Григорьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения, металлообрабатывающие станки и комплексы», Оренбургский государственный университет, teplo1955@mail.ru.

Поступила в редакцию 15 ноября 2018 г.

DOI: 10.14529/engin180405

MONITORING OF TECHNOLOGICAL SYSTEMS WHEN CUTTING COMPLEX CONTOURED SURFACES

A.A. Seregin, aasdom@yandex.ru,

A.G. Kravtsov, teplo1955@mail.ru

Orenburg State University, Orenburg, Russian Federation

The article presents results of the theoretical and experimental research that we conducted to determine the main reasons of errors in the geometry of complex parts on “cold” machine tools. The solution of this problem helps to improve the accuracy of cutting complex parts on CNC machines and semiautomatic machines with copiers. The proposed monitoring system improves the quality of technological systems in general. We developed a new analytical method for assessing the quality of products cut on CNC machine tools. The proposed methodology includes the following:

1. Assessing the state of technological systems of machines based on the results of testing the program accuracy and rigidity.
2. Controlling the state of machines based on the analysis of technological accuracy of cutting. The obtained dependences of the technological accuracy on the machine accuracy give mathematical support to the problem.
3. Controlling the accuracy of cutting by adjusting control programs and changing cutting modes.

We fully assessed causes and consequences of potential errors of CNC machines. This allowed us to propose alternative technological solutions and reduce the dispersion of errors of machined surfaces of complex contoured parts. Implementation of the research results in production will improve the level of technological support for the accuracy of complex contoured surfaces and the functionality of the equipment. We analyzed the results of experimental verification and established that the proposed solutions made it possible to increase the level of technological support for the accuracy of complex parts from 53 to 78 %.

Keywords: machine accuracy, zero drift of machine tools, residual force displacement of the executive units of technological systems, errors in cutting of complex parts, technological accuracy.

References

1. Avdeev V.B. [The Study of the Drift “0” of the System of the CNC Lathe]. *Bulletin of higher educational. Series “Engineering”*, 1978, no. 2, pp. 175–179. (in Russ.)
2. Kravtsov A.G., Kharitonov A.V. [Experimental Study of the Thermal Conductivity of the Con-

tact in the Joints of Metal-Cutting Machines]. *Mashinostroenie: sb. nauch. tr.* [Machine-Building: a Collection of Scientific Papers, Orenburg State University]. Orenburg, 1997, pp. 89–91. (in Russ.)

3. Dmitriev B.M. Assessing the Thermal Rigidity of a Metal-Cutting Machine. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, iss. 2, pp. 94–97. DOI: 10.3103/S1068798X18020065

4. Chernyanskiy P.M. [The Residual Effect of Mechanical Systems of Machines]. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Machine-Building], 2013, no. 1, pp. 57–59. (in Russ.)

5. Pronikov A.S. *Nadezhnost mashin* [The Reliability of the Machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 592 p. (in Russ.)

6. Igonin G.A., Koval M.I. [Calculation and Balance of Contour Machining Components on CNC Milling Machines]. *Stanki i instrument* [Machines and Tools], 1985, no. 6, pp. 7–10. (in Russ.)

7. Ivasishin G.S. [Effect of Elastic Aftereffect on the Contact Stiffness of Machine Tools and Automatic Rotary Lines]. *Bulletin of higher educational. Series "Engineering"*, 1988, no. 12, pp. 122–125. (in Russ.)

8. Seregin A.A. [Mathematical Model of the Accuracy of the Machine Taking into Account the Fluctuations of Its Working Bodies]. *STIN*, 2007, no. 4, pp. 2–6. (in Russ.)

9. Ryakhovsky A.M. [To the Calculation of the Coefficient of Friction of Structural Materials]. *Friction and Wear*, 1989, vol. 10, no. 5, pp. 851–860. (in Russ.)

10. Seregin A.A. Safe Installation of Blank with Clamp Wear. *Russian Engineering Research*, 2010, Vol. 30, no. 6, pp. 561–563. DOI: 10.3103/S1068798X10060067

11. Kudinov V.A. [The Jump of the Friction Force in the Transition from Rest to Slip]. *STIN*, 1993, no. 6, pp. 2–6. (in Russ.)

12. Pozhbelko V.I. [Dynamic Modeling of Friction Force in Calculations of Machines on Smoothness of Small Displacements]. *STIN*, 2002, no. 8, pp. 5–9. (in Russ.)

13. Vragov Yu.D. *Analiz komponovok metallovezhustchih stankov. Osnove componetiki* [Analysis of Configurations of Machine tools. The Basics of Comanaticce]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 208 p.

14. Seregin A.A. [Some Problems of Dynamics and Precision of Mechanisms]. *Problemy mashinostroeniya I nadezhnosti mashin* [Problems of Mechanical Engineering and Reliability of Machines], 1990. No. 3, pp. 12–15. (in Russ.)

15. Seregin A.A. [The Definition of Precision Mechanical Systems of Machines]. *Stanki i instrument* [Machines and Tools], 1991, no. 1, pp. 29–31. (in Russ.)

16. Bushuev V.V., Molodtsov V.V. Role of the Machine Tool's Kinematic Structure in Ensuring Machining Precision. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, no. 10, pp. 1053–1059. DOI: 10.3103/S1068798X10100199

17. Zeroudi N., Fontaine M. Prediction of Tool Deflection and Tool Path Compensation in Ball-End Milling. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2015, vol. 26, no. 3, pp. 425–445. DOI: 10.1007/s10845-013-0800-8

18. Fan K.C., Chen H.M., Kuo T.H. Prediction of Machining Accuracy Degradation of Machine Tools. *Precision Engineering*, 2012, vol. 36, no. 2, pp. 288–298. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2011.11.002

19. Rahou M., Cheikh A., Sebaa F. Time Compensation of Machining Errors for Machine Tools NC based on Systematic Dispersion. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 2009, vol. 3, no. 8, pp. 849–855. Available at: scholar.waset.org/1999.8/10608.

20. Stryczek R. A Metaheuristic for Fast Machining Error Compensation. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2016, vol. 27, iss. 6, pp. 1209–1220. DOI: 10.1007/s10845-014-0945-0

Received 15 November 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Серегин, А.А. Мониторинг технологических систем при обработке точных поверхностей сложного контура / А.А. Серегин, А.Г. Кравцов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2018. – Т. 18, № 4. – С. 48–56. DOI: 10.14529/engin180405

FOR CITATION

Seregin A.A., Kravtsov A.G. Monitoring of Technological Systems When Cutting Complex Contoured Surfaces. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 48–56. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin180405