

ТОЧНОСТЬ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ СТАНКОВ С ЧПУ ПРИ РАБОТЕ С ПЕРЕМЕННОЙ ПОДАЧЕЙ

Канд. техн. наук, доц. КАШТАЛЬЯН И. А.

Белорусский национальный технический университет

В современном машиностроительном производстве задачу повышения эффективности использования оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ) решают в ряде случаев путем преднамеренного введения в процесс резания кинематической нестабильности. Чаще – это закономерное изменение подачи или скорости резания. Например, на станках с ЧПУ токарной группы за счет модулированного изменения подачи добиваются повышения производительности, точности и виброустойчивости процесса обработки нежестких заготовок, а периодическое прерывание подачи эффективно используется для кинематического дробления стружки [1]. При этом в процессе резания на силовые воздействия циклического характера, обусловленные неконтролируемыми изменениями физико-механических свойств материала заготовки и инструмента, припуска на обработку, неоднородностью пластической деформации и т. п., накладываются силовые воздействия, вызываемые переменной подачей. В результате колебательные процессы в станочной системе меняют свой характер, что оказывает влияние на эксплуатационные характеристики привода подач.

Привод подач современных станков с ЧПУ характеризуется короткой кинематической цепью, состоящей обычно из электродвигателя и передачи винт-гайка качения. Передача винт-гайка качения – наиболее уязвимое звено в кинематической цепи и при воздействии нагрузок циклического характера со временем меняет свои эксплуатационные характеристики. Прежде всего, это касается жесткости передачи и ее демпфирования. От указанных характеристик в значительной мере зависят долговечность передачи и точность позиционирования исполнительного органа станка. В связи с этим возникает необходимость в определении влияния параметров переменной подачи на статистиче-

ские показатели точности позиционирования. Полученные результаты могут быть использованы при выборе диапазона регулирования подачи с целью повышения эффективности использования станков с ЧПУ, а также при создании адаптивных систем, у которых в качестве управляющего воздействия используется подача.

В качестве объекта исследования был выбран исполнительный механизм токарного полуавтомата мод. 1А751Ф3 с микропроцессорным устройством ЧПУ КМ 65. Станок имеет вертикальную компоновку и оснащен двумя крестовыми суппортами с четырехпозиционными револьверными головками. Перемещение каждого суппорта в продольном и поперечном направлениях осуществляется комплектными приводами с высокомоментными двигателями постоянного тока через передачу винт-гайка качения. Параметры передачи: условный диаметр резьбы $d_0 = 63$ мм; диаметр шариков $d_1 = 6$ мм; шаг резьбы $p = 10$ мм. Дискретность задания размеров составляет 0,001 мм по всем координатам. Класс точности станка – П по ГОСТ 8–82.

Для проведения экспериментов в технологическое программное обеспечение устройства ЧПУ были включены программные модули, реализующие различные изменения подачи в функции пути (линейное и модулированное изменение подачи, прерывание подачи, поддержание подачи на оборот в условиях бесступенчатого регулирования частоты вращения шпинделя и др.).

По алгоритму модулированного изменения подачи управляющее устройство ступенчато (приращениями ΔS по мере отработки участков между приращениями подачи Δl) увеличивает подачу от S_{\min} до S_{\max} , а затем также ступенчато снижает ее [2]. Длина пути разгона

(замедления) при этом $l_i = n_s \Delta l$, где n_s – число приращений скорости подачи при ее изменении от S_{\min} до S_{\max} . При разгоне число приращений скорости подачи n_s определяется по следующей зависимости: $n_s = (S_{\max} - S_{\min}) / \Delta S$. Величина ΔS принималась из ряда 0,1; 0,2; 0,3 мм/мин и т. д. Величина Δl выбиралась кратной длине перемещения исполнительного органа станка при подаче устройством ЧПУ одного импульса.

По алгоритму прерывания подачи управляющее устройство периодически через определенное число импульсов n_B , поступающих на привод подачи, выдавало импульсы n_A , которые на привод подач не поступали (отрабатывались фиктивно) [2]. В результате периодически, после перемещения исполнительного органа станка на величину $L_B = n_B Z_0$, устройство ЧПУ обрабатывает фиктивное перемещение $L_A = n_A Z_0$, где Z_0 – дискрета (величина перемещения исполнительного органа станка при обработке одного импульса, выдаваемого устройством ЧПУ на привод подач). Время отработки фиктивного перемещения L_A (выдержка времени) определялось скоростью минутной подачи S , заданной в кадре управляющей программы (УП). Частота прерываний подачи при этом определялась как $f_n = S / 60(L_A + L_B)$.

Исследование точности позиционирования проводилось для продольной координаты правого суппорта (ось Z) при различных изменениях подачи. Измерения проводились с помощью штриховой меры (стеклянная линейка длиной 600 мм) и оптического микроскопа с ценой деления шкалы $1 \pm 0,2$ мкм.

Эксперимент проходил в три этапа. На первом этапе осуществлялось исследование точности позиционирования с модулированной подачей. Параметры модулированного изменения подачи S_{\min} , S_{\max} , l_1 , ΔS задавались в кадре УП совместно с другой геометрической и технологической информацией. Путем их варьирования достигались различные соотношения между S_{\min} и S_{\max} (размахи между их величинами). Причем верхняя пиковая величина подачи оставалась постоянной и равной 200 мм/мин. На

втором этапе был реализован режим прерывания подачи. Подача 180 мм/мин прерывалась с частотой $f_n = 2,5$ Гц на время, которое затрачивается на фиктивное перемещение L_A , равное 0,4 мм. Величина L_B при этом была 0,8 мм. На третьем этапе перемещение по исследуемой координате выполнялось с постоянной подачей $S = 150$ мм/мин, равной средней величине модулированной подачи при отношении $S_{\min} / S_{\max} = 0,5$.

Точность позиционирования определялась следующими статистическими показателями: алгебраической разностью наибольшего и наименьшего (на контролируемом участке) среднеарифметических отклонений фактических положений от запрограммированных; величиной рассеяния отклонений при многократном подходе к запрограммированному положению [3]. Первый показатель характеризуется накопленным отклонением f_n , второй – среднеквадратическим отклонением σ .

Статистические показатели определялись по результатам измерений, выполненных в контрольных точках отдельно для положительного и отрицательного направлений движения. Контрольными точками 1, 2, ..., k являлись границы интервалов, на которые был разбит контролируемый участок L_z . Длина интервалов l_n выбиралась в зависимости от длины рабочего перемещения и для исследуемой координаты Z была принята равной 40 мм (при числе контролируемых точек $k = 11$).

Для каждой контролируемой точки j вычислялись:

отклонения f_{ij} от величины первого отсчета Δ_{11} , принятой за нулевое: $f_{ij} = \Delta_{11} - \Delta_{ij}$, где Δ_{ij} – отсчет в j -й точке при i -м подходе (с учетом знака);

среднее арифметическое отклонение

$$\bar{f}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{ij},$$

где n – число подходов к j -й точке;

среднеквадратическое отклонение координаты позиционирования σ

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_{ij} - \bar{f}_j)^2}.$$

Накопленное отклонение при этом определяется

$$f_n = \bar{f}_{\max} - \bar{f}_{\min},$$

где $\bar{f}_{\max} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \bar{f}_{j_{\max}}$; $\bar{f}_{\min} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \bar{f}_{j_{\min}}$.

Основные статистические характеристики распределений погрешностей позиционирования (среднее арифметическое значение \bar{x} и среднее квадратическое отклонение σ) вычислялись при выборке большого объема ($n = 100$). Полученные эмпирические распределения сравнивались с распределением по за-

кону Гаусса. Удовлетворительность соответствия проверялась по критерию согласия Пирсона на χ^2 [4].

Гистограммы и параметры распределений погрешностей позиционирования в точке на расстоянии 200 мм от фиксированной точки станка (определяется относительно начала координат станка) приведены в табл. 1. Зависимость накопленной погрешности позиционирования от соотношения между пиковыми величинами модулированной подачи представлена на рис. 1.

Таблица 1

Гистограмма и параметры распределений погрешностей позиционирования

Режим перемещения	Параметры подачи	Гистограмма распределения	Параметр распределения	
			\bar{x} , мкм	σ , мкм
Модулированное изменение подачи	$S_{\min} = 150$ мм/мин $S_{\max} = 200$ мм/мин $l_i = 1,0$ мм $\Delta S = 0,1$ мм/мин $\Delta l = 0,002$ мм		1,15	1,81
	$S_{\min} = 100$ мм/мин $S_{\max} = 200$ мм/мин $l_i = 1,0$ мм $\Delta S = 0,1$ мм/мин $\Delta l = 0,001$ мм		1,31	1,85
	$S_{\min} = 50$ мм/мин $S_{\max} = 200$ мм/мин $l_i = 0,75$ мм $\Delta S = 0,2$ мм/мин $\Delta l = 0,001$ мм		0,28	1,93
	$S_{\min} = 20$ мм/мин $S_{\max} = 200$ мм/мин $l_i = 0,9$ мм $\Delta S = 0,2$ мм/мин $\Delta l = 0,001$ мм		0,64	1,96
Прерывание подачи	$S = 180$ мм/мин $f_n = 2,5$ Гц $L_A = 0,8$ мм $L_B = 0,4$ мм		0,52	2,08
Постоянная подача	$S = 150$ мм/мин		0,75	1,68

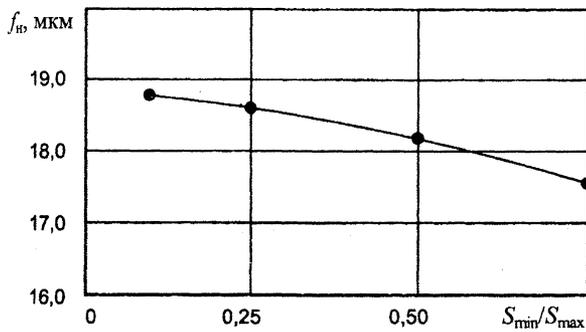


Рис. 1. Зависимость накопленной погрешности позиционирования f_n от отношения S_{\min}/S_{\max} при модулированном изменении подачи

В результате анализа экспериментальных результатов исследований установлено, что режим изменения подачи оказывает влияние на точность позиционирования. Например, при увеличении размаха между пиковыми величинами модулированной подачи установлен рост f_n и σ . Кроме того, при модулированной подаче с отношением $S_{\min}/S_{\max} < 0,5$ и прерывании подачи эмпирические распределения погрешностей позиционирования представляют собой функции с распределениями, отличными от нормального. В этом случае усложняется оценка максимальной погрешности и стабильности, появляется необходимость введения меры погрешности, которая могла бы сопоставить результаты эксперимента при различных изменениях подачи на участке позиционирования. В качестве такого критерия использовался энтропийный коэффициент стабильности C_H , который определялся по выборке, содержащей конечное число n конкретных значений случайной величины [5]:

$$C_H = H(\Delta) / [H(\Delta)]_{PB}, \quad (1)$$

где Δ – случайное отклонение (погрешность позиционирования); $H(\Delta)$ – энтропия закона распределения величины Δ , полученная в результате n измерений; $[H(\Delta)]_{PB}$ – энтропия при том же числе n равновероятных состояний.

Энтропия $H(\Delta)$ является функционалом закона распределения случайной величины $p(\Delta)$. Она учитывает особенности закона, определяет степень неопределенности полученных резуль-

татов. Для некоторого ряда n случайной величины Δ энтропия

$$H(\Delta) = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i, \quad (2)$$

где p_i – вероятность случайной величины Δ .

Для расчета величины энтропийной погрешности при этом используют зависимость [4]

$$\Delta_H = \frac{1}{2} \exp H(\Delta). \quad (3)$$

Когда состояния системы равновероятны, энтропия максимальна и равна

$$[H(\Delta)]_{PB} = \ln n. \quad (4)$$

На основании ограниченного числа измерений может быть построена гистограмма, которая в той или иной степени приближается к действительному непрерывному закону распределения, характеризуемому энтропией, определяемой [5]:

$$H(\Delta) = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(\Delta) \ln p(\Delta) dx, \quad (5)$$

где $p(\Delta)$ – плотность вероятности величины Δ ; x – переменная интегрирования (соответствует Δ на границах интервала интегрирования).

Поскольку гистограмма распределения погрешностей состоит из m интервалов (столбцов) с границами: $x_0, x_1, x_2, \dots, x_i, x_{i+1}, \dots, x_m$ и каждый интервал шириной $d_i = |x_i - x_{i+1}|$ включает n_{d_i} размеров, то на протяжении каждого из интервалов $p(\Delta) = \text{const} = n_{d_i} / nd_i$. Энтропия такого распределения

$$H(\Delta) = \sum_{i=1}^m \frac{n_{d_i}}{n} \ln \frac{nd_i}{n_{d_i}}. \quad (6)$$

Если принять, что ширина всех интервалов гистограммы $d_i = \text{const} = d$, то

$$H(\Delta) = \sum_{i=1}^m \frac{n_{d_i}}{n} \ln \frac{n}{n_{d_i}} + \ln d. \quad (7)$$

Подставив в зависимость (1) величину $H(\Delta)$ из (7) и величину $[H(\Delta)]_{PB}$ из (4), получим

$$C_H = \left(\sum_{i=1}^m \frac{n_{d_i}}{n} \ln \frac{n}{n_{d_i}} + \ln d \right) / \ln n. \quad (8)$$

Энтропийная величина погрешности Δ_H при этом будет определяться по следующей зависимости:

$$\Delta_H = \frac{1}{2} \exp \left(\sum_{i=1}^m \frac{n_{d_i}}{n} \ln \frac{n}{n_{d_i}} + \ln d \right). \quad (9)$$

Зависимость (9) получена подстановкой C_H из (8) в (3).

Величины C_H и Δ_H определялись для гистограмм распределений, представленных в табл. 1. Например, при перемещении с прерыванием подачи ($S = 180$ мм/мин; $L_A = 0,4$ мм; $L_B = 0,8$ мм) $C_H = 0,442$; $\Delta_H = 3,83$ мкм. При перемещении с постоянной подачей $S = 150$ мм/мин $C_H = 0,413$; $\Delta_H = 3,36$ мкм. Зависимости C_H и Δ_H от соотношения между пиковыми величинами модулированной подачи представлены на рис. 2.

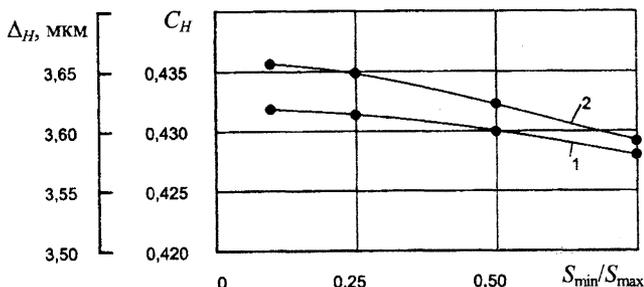


Рис. 2. Зависимости энтропийного коэффициента стабильности C_H (1) и энтропийной погрешности Δ_H (2) от отношения S_{\min}/S_{\max} при модулированном изменении подачи

Установлено, что режим изменения подачи в пределах аттестуемой длины влияет на закон распределения погрешности позиционирования. Причем изменение формы закона распределения связано с величиной энтропийной погрешности Δ_H и значением энтропийного коэффициента стабильности C_H . Для исследуемых режимов перемещения коэффициент энтропийной стабильности C_H изменяется от 0,413 (обработка с постоянной подачей) до 0,442 (обработка с прерыванием подачи), а величина энтропийной погрешности Δ_H соответственно в

пределах 3,36...3,83 мкм. Для модулированного изменения подачи величины C_H и Δ_H вкладываются в обозначенные диапазоны. Такую эволюцию энтропийных оценок законов распределения (C_H, Δ_H) можно объяснить изменением влияния ряда факторов на процесс позиционирования с переменной подачей. Это, прежде всего, упругие деформации в передаче винт-гайка качения, трение в направляющих, увеличение относительной величины отдельных компонентов погрешности.

ВЫВОД

Экспериментально установлено, что режим изменения подачи в функции пути оказывает влияние на точность позиционирования исполнительного органа станка. При модулированной подаче с соотношением $S_{\min}/S_{\max} < 0,5$ и прерывании подачи эмпирические распределения погрешностей позиционирования представляют собой функции с распределениями, отличными от нормального. Энтропийная оценка стабильности при этом позволяет сопоставить эмпирические результаты для различных законов распределения, а также учесть эволюцию этих законов, когда позиционирование в течение одного рабочего хода осуществляется на различных режимах. Это обстоятельство может быть использовано при прогнозировании точности формообразования деталей на оборудовании с ЧПУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подураев В. Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. – М.: Машиностроение, 1977. – 304 с.
2. Kashtalyan I. A. Improvement of Manufacturing Software for Microprocessor Program Controllers // Micro and Precision Mechanics: Proceedings of the 41th International Colloquium. – Ilmenau, 1996. – V. 1. – P. 441–444.
3. Ратмиров В. А. Управление станками гибких производственных систем. – М.: Машиностроение, 1987. – 272 с.
4. Степнов М. Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справ. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
5. Новицкий П. В. Основы информационной теории измерительных устройств. – Л.: Энергия, 1968. – 248 с.