

УДК 621.914.3

ВЛИЯНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАНКОВ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

д-р техн. наук, доц. И.А. КАШТАЛЬЯН

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассмотрена задача повышения эффективности использования станков и станочных комплексов с числовым программным управлением посредством введения в процесс резания кинематической неустойчивости регулированием подачи в функции пути. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния параметров нестационарного резания на эксплуатационные характеристики передачи винт-гайка качения. Показано, что режим изменения подачи в функции пути оказывает влияние на закон распределения погрешности позиционирования исполнительного органа станка. Обоснована возможность использования энтропийной погрешности и энтропийного коэффициента стабильности для оценки точности позиционирования при различных режимах разгона (замедления).

Введение. Научно-технический прогресс в машиностроении неразрывно связан с широким внедрением станков и станочных комплексов с числовым программным управлением (ЧПУ). Относительная доля оборудования с ЧПУ в станочном парке предприятий машиностроения постоянно возрастает, и в этой связи все более актуальными становятся вопросы их эффективной эксплуатации. В ряде случаев эту задачу решают путем преднамеренного введения в процесс резания кинематической неустойчивости. 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; 2]. 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 и скоростью резания. В результате колебательные процессы в технологической системе меняют свой характер, что оказывает влияние на эксплуатационные характеристики отдельных узлов и механизмов станка. Прежде всего, это касается механизмов привода подач. Например, периодическое изменение подачи в функции пути оказывает влияние на жесткость передачи винт-гайка качения, а также на ее демпфирующую способность. От этих характеристик зависит точность позиционирования исполнительного органа станка, которая для станков с ЧПУ играет особую роль и характеризуется ошибкой выхода в заданную точку.

Основная часть. Привод подач современных станков с ЧПУ характеризуется короткой кинематической цепью, состоящей обычно из электродвигателя и передачи винт-гайка качения (ВГК). При воздействии на такую передачу циклических нагрузок ее жесткость и демпфирующая способность со временем изменяются. Но от указанных характеристик в значительной мере зависят долговечность передачи и точность позиционирования исполнительного органа станка. В связи с этим возникает необходимость в исследовании влияния параметров переменной подачи на статистические показатели точности позиционирования. Полученные результаты могут быть использованы при выборе законов и диапазонов регулирования подачи в целях повышения эффективности применения станков с ЧПУ, а также при создании адаптивных систем, в которых в качестве управляющего воздействия используется подача.

В качестве объекта исследования был выбран токарный полуавтомат мод. 1А751Ф3 класса точности П с микропроцессорным устройством ЧПУ типа КМ 65. Станок вертикальной компоновки 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 ВГК. Параметры передачи: условный диаметр резьбы $d_0 = 63$ мм; диаметр шариков $d_1 = 6$ мм; шаг резьбы $p_p = 10$ мм. Дискретность задания размеров составляет 0,001 мм по всем координатам.

Исследование точности позиционирования проводили для продольной координаты правого суппорта (ось Z) при различных изменениях подачи. Для измерений использовали штриховую меру (стеклянную линейку длиной 600 мм) и оптический микроскоп с ценой деления шкалы $1 \pm 0,2$ мкм.

Эксперимент проходил в три этапа. На первом этапе осуществляли исследование точности позиционирования с модулированной подачей. Параметры модулированного изменения подачи $S_{\min}$, $S_{\max}$, I_1 , ΔS

задавали в кадре управляющей программы 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. Подачу 180 мм/мин прерывали с частотой $f_n = 2,5$ Гц на время, которое затрачивается на фиктивное перемещение L_A , равное 0,4 мм. Величина перемещения резца между прерываниями подачи L_B при этом была 0,8 мм. На третьем этапе перемещение по исследуемой координате выполняли с постоянной подачей $S = 150$ мм/мин, равной средней величине модулированной подачи при отношении $S_{\min} / S_{\max} = 0,5$.

Точность позиционирования оценивали 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 определяли по результатам измерений, выполненных в контрольных точках отдельно для положительного и отрицательного направлений движения. Контрольными точками служили границы интервалов, на которые был разбит контролируемый участок $\bar{L}_z$. Длину интервалов l_u выбирали в зависимости от длины рабочего перемещения, которая для исследуемой координаты Z была принята равной 40 мм (при числе контролируемых точек $q = 11$).

Для каждой j -й контролируемой точки вычисляли:

- отклонения f_{ij} от значения первого отсчета δ_{11} , т.е. $f_{ij} = \delta_{11} - \delta_{ij}$, где δ_{ij} – отсчет в j -й точке при i -м подходе (с учетом знака);
- среднее арифметическое значение отклонений $\bar{f}_j$:

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

где n_j – число подходов к j -й точке;

- среднее квадратическое отклонение координаты позиционирования σ :

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

Накопленное отклонение при этом определяется следующим образом:

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

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

Основные статистические характеристики распределений погрешностей позиционирования (среднее арифметическое значение $\bar{x}$ и среднее квадратическое отклонение σ) вычисляли при выборке большого объема ($n = 100$). Полученные эмпирические распределения сравнивали с распределением по закону Гаусса. Удовлетворительность соответствия проверяли по критерию согласия Пирсона (χ^2) [4].

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

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 таких критериев использова-

лись энтропийный коэффициент стабильности C_H и энтропийная величина погрешности Δ_H , которые определяются по выборке, содержащей конечное число конкретных значений случайной величины [5; 6].

Таблица 1

Параметры распределений погрешностей позиционирования

Режим перемещения	Параметры подачи	Параметры распределения	
		x , мм	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 $L_A = 0,4$ мм $L_B = 0,8$ мм	0,52	2,08
Постоянная подача	$S = 150$ мм/мин	0,75	1,68

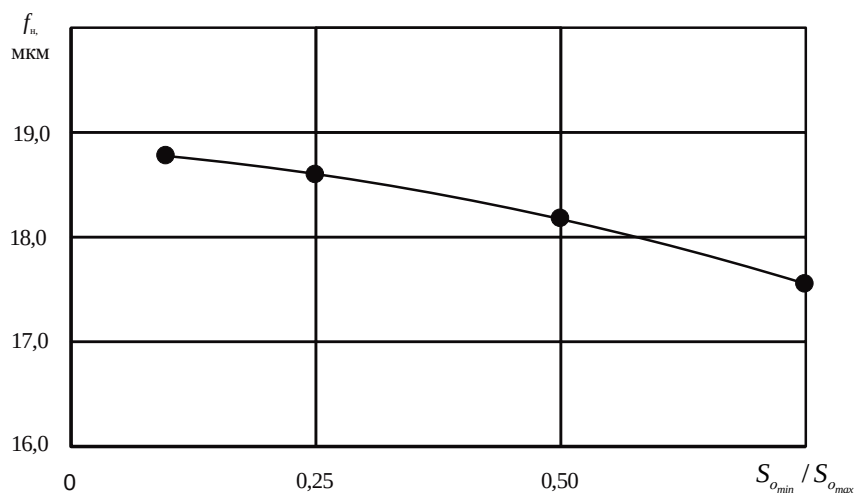


Рис. 1. Зависимость накопленной погрешности позиционирования f_n от отношения $S_{o_{\min}} / S_{o_{\max}}$ при модулированном изменении подачи

Зависимости C_H и Δ_H от соотношения между пиковыми величинами модулированной подачи представлены на рисунке 2. Значения C_H и Δ_H определяли для параметров переменной подачи, приведенных в таблице 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.

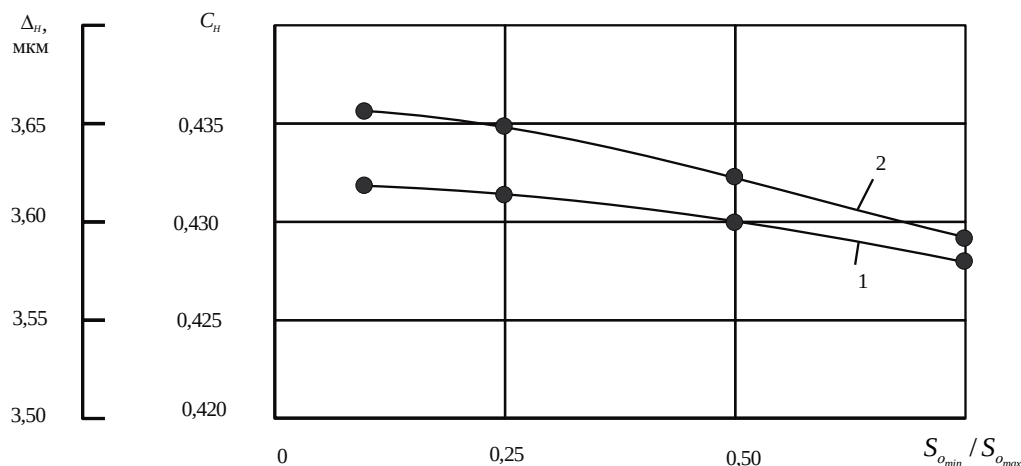


Рис. 2. Зависимости энтропийного коэффициента стабильности C_H (1) и энтропийной погрешности Δ_H (2) от отношения $S_{o_{min}} / S_{o_{max}}$ при модулированном изменении подачи

Результаты анализа этих зависимостей свидетельствуют о том, что режим изменения подачи в пределах аттестуемой длины влияет на закон распределения погрешности позиционирования. Причем изменение закона распределения связано с величиной энтропийной погрешности Δ_H и величиной 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 от 3,36...3,83 мкм. Для модулированного изменения подачи величины C_H и Δ_H укладываются 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 ВГК, трение в направляющих, увеличение относительной величины отдельных компонентов погрешности.

Эксплуатационные характеристики передачи ВГК исследовали на примере продольной координаты Z правого суппорта токарного станка с ЧПУ мод. 1A734Ф3. Параметры передачи, кроме поясненных выше d_0 , d_1 и p_p , следующие: коэффициент, учитывающий погрешности изготовления резьбы винтового механизма $k_z = 0,8$; угол контакта шариков с винтом и гайкой $\alpha_{ш} = 45^\circ$; угол подъема резьбы $\beta_p = \arctg[p/(\pi d_0)] = 2^\circ 54'$; угол трения $\rho_m = \arctg \mu = 0^\circ 3'$, где μ — коэффициент трения качения ($\mu = 85 \cdot 10^{-5}$). Масса суппорта с револьверной головкой, оснащенной режущим инструментом, и гайкой передачи ВГК $m_c = 486$ кг.

Обрабатывали заготовки детали типа цилиндр из стали 40ХН (длина 150 мм, наружный диаметр 200 мм, внутренний диаметр 162 мм). Заготовка, закрепленная в патроне консольно, вращалась с частотой 250 об/мин. Инструментами, установленными в револьверной головке левого суппорта, предварительно обрабатывали наружные и внутренние поверхности заготовки. При этом на наружной цилиндрической поверхности оставлялся припуск 1,5 мм на сторону, который снимали проходным резцом, установленным в револьверной головке правого суппорта. Это позволило исключить циклические нагрузки, вызываемые неравномерностью припуска.

Эксперименты проводили в три этапа. На *первом этапе* осуществлялось продольное точение правым суппортом с модулированной подачей, которая периодически плавно увеличивалась от $S_{o_{min}} = 0,2$ мм/об до $S_{o_{max}} = 0,4$ мм/об, а затем снижалась до первоначального значения; длина пути разгона (замедления) при этом была равна 0,75 мм. В результате за время обработки одной заготовки приводом продольной координаты правого суппорта производилось 100 циклов изменения подачи. На *втором этапе* заготовки обрабатывали с прерыванием подачи. По мере перемещения резца в осевом направлении на 1,5 мм подача величиной 0,375 мм/об периодически прерывалась на время одного оборота заготовки. Как и в предыдущем случае, число циклов изменения подачи было равно 100. На *третьем этапе* заготовки обрабатывались с постоянной подачей 0,3 мм/об, равной среднему значению модулированной подачи.

На каждом этапе обрабатывали пять партий заготовок по 6000 шт. При обработке первой детали из партии с помощью проволоочных тензодатчиков, наклеенных на державку резца, измеряли осевую составляющую P_x силы резания. Было установлено, что при точении с модулированной подачей сила P_x периодически изменяется в пределах от 305,4 до 431,8 Н, а при точении с прерыванием подачи – от 0 до 412,2 Н.

В начале каждого этапа регулировали натяг в передаче ВГК. При этом силу предварительного натяга рассчитывали по формуле [7]:

$$Q_H = \frac{M_{xx}}{d_0 \operatorname{tg}(\beta_p + \rho_m) k_z \sin \alpha_{ин} \cos \beta_p},$$

где M_{xx} – момент холостого хода, Н/м.

Предварительный натяг создавали поворотом одной полугайки передачи относительно другой с последующей фиксацией их положения. Момент холостого хода измеряли на специальном стенде. После обработки каждой партии заготовок определяли коэффициент жесткости $j_{жс}$ передачи, коэффициент демпфирования h_0 и точность позиционирования суппорта.

Коэффициент демпфирования находили из соотношения

$$h_0 = \frac{\psi}{2\pi} \sqrt{m_c j_{жс}},$$

где ψ – коэффициент относительного рассеяния энергии в передаче ВГК; m_c – масса суппорта с револьверной головкой, режущим инструментом и гайкой винтового механизма, кг.

Коэффициент ψ вычисляли по зависимости [8]:

$$\psi = 2\lambda_z \frac{4\pi^2}{4\pi^2 + \lambda_z^2},$$

где λ_z – логарифмический коэффициент затухания колебаний, определяемый по соответствующим осциллограммам.

Затухающие колебания регистрировали с помощью измерительного комплекса, состоящего из индуктивного датчика, блока измерений малых перемещений БИМП-2, шлейфового осциллографа и ПЭВМ. Коэффициент жесткости устанавливали по графику зависимости деформации δ_p резьбового соединения от осевой нагрузки $P_o(j_{жс} = P_o / \delta_p)$. Точность позиционирования устанавливали по накопленному отклонению фактических положений от запрограммированных f_n и среднеквадратическому отклонению σ при многократном подходе к запрограммированному положению. Значения f_n и σ определяли по методике, приведенной выше.

Значения отклонений f_n и σ , определенные после обработки очередной партии заготовок при различных режимах перемещения суппорта и $n_n = 60$, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Статические характеристики погрешностей позиционирования

Количество обработанных заготовок n_z , шт.	Осциллирующее изменение подачи		Прерывание подачи		Постоянная подача	
	f_n	σ	f_n	σ	f_n	σ
	мкм		мкм		мкм	
0	16,3	1,42	16,1	1,41	16,2	1,42
6000	16,8	1,49	16,9	1,53	16,7	1,46
12000	17,3	1,55	17,6	1,62	16,9	1,51
18000	18,1	1,71	18,7	1,78	17,2	1,59
24000	18,8	1,83	19,5	1,89	17,6	1,66
30000	19,2	1,95	20,4	2,01	17,9	1,74

Закономерности изменения коэффициентов жесткости $j_{жс}$ и демпфирования h_0 в зависимости от количества обработанных заготовок представлены соответственно на рисунках 3 и 4. Графики строились по средним значениям из 30 измерений.

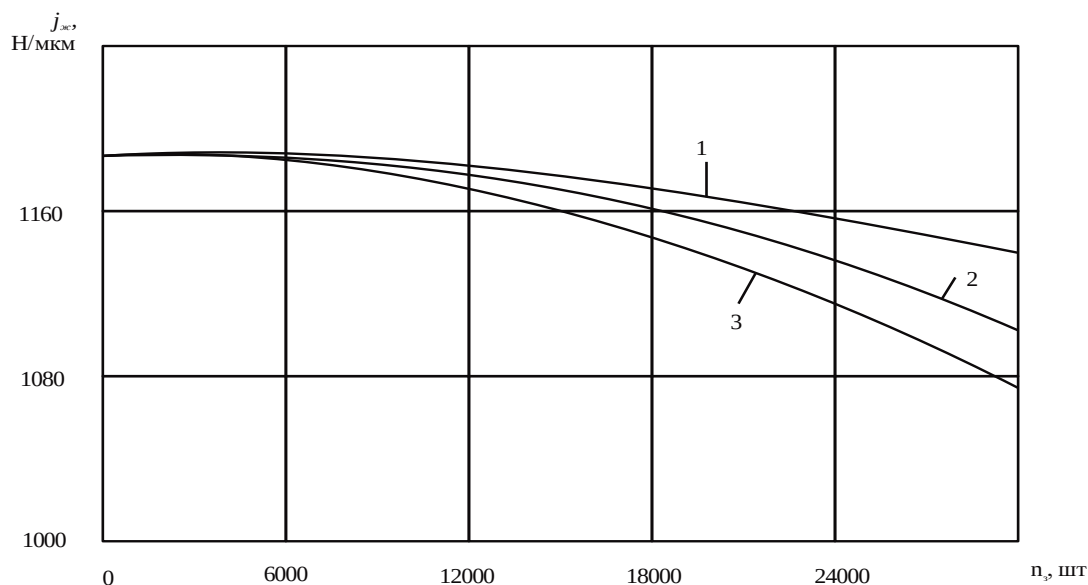


Рис. 3. Зависимость коэффициента жесткости $j_{жс}$ от количества заготовок n_z , обработанных на станке:
1 – с постоянной подачей; 2 – с модулированной подачей; 3 – с прерыванием подачи

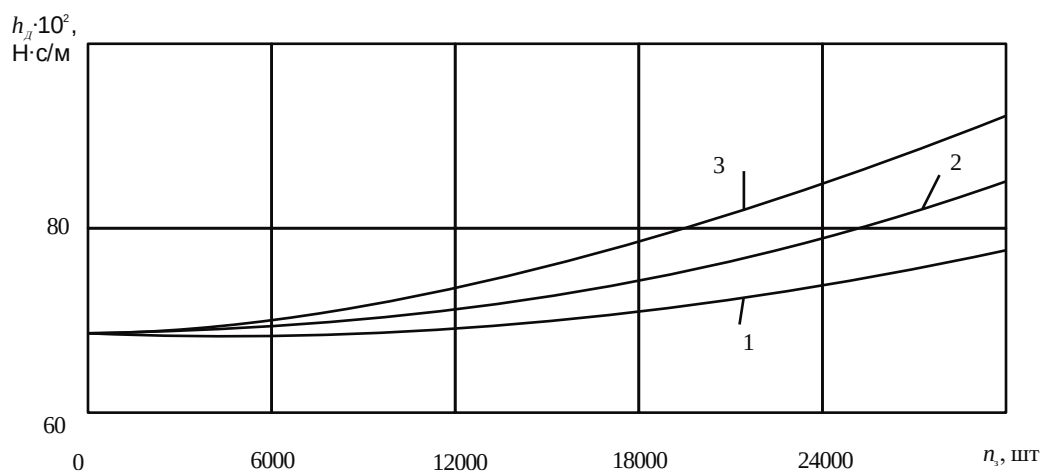


Рис. 4. Зависимость коэффициента демпфирования h_d от количества заготовок n_z , обработанных на станке:
1 – с постоянной подачей; 2 – с модулированной подачей; 3 – с прерыванием подачи

Как видно из экспериментальных данных, режим обработки с переменной подачей и его продолжительность (число обработанных заготовок) оказывают влияние на жесткость передачи и ее демпфирующую способность. Причем с увеличением числа обработанных заготовок значение $j_{жс}$ уменьшается, а значение h_d возрастает. Наиболее ярко это проявляется для режима обработки с прерыванием подачи. Уменьшение жесткости и увеличение демпфирующей способности передачи ВГК можно объяснить уменьшением фактической площади контакта тел качения с поверхностями винта и гайки, которое связано с увеличением остаточной деформации между сопрягаемыми элементами передачи (шариками и винтовой дорожкой) и некоторым их износом. Продолжительное воздействие на передачу циклической нагрузки, вызванной переменной подачей, приводит также к уменьшению точности позиционирования. Это хорошо согласуется с данными о жесткости передачи и демпфирующей способности.

Заключение. Экспериментально установлено, что режим изменения подачи в функции пути оказывает влияние на закон распределения погрешности и точность позиционирования исполнительного органа станка. Изменение закона распределения связано с величиной энтропийной погрешности Δ_H и величиной энтропийного коэффициента стабильности C_H позиционирования. Энтропийная оценка стабильности позволяет сопоставить эмпирические результаты для различных законов распределения, а также учесть эволюцию этих законов, когда позиционирование в течение одного рабочего хода осу-

ществляется на различных режимах. Это обстоятельство может быть использовано при прогнозировании точности формообразования деталей на оборудовании с ЧПУ.

Введение в процесс резания кинематической неустойчивости посредством периодического изменения подачи в функции пути оказывает влияние на эксплуатационные характеристики передачи ВГК при числе циклов изменения подачи больше, чем $0,8 \cdot 10^6$, что выражается в уменьшении ее контактной жесткости (на $1,5 \dots 3$ % при числе циклов изменения подачи в диапазоне $1,2 \cdot 10^6 \dots 1,8 \cdot 10^6$) и возрастании демпфирующей способности на $4,2 \dots 7$ %. Точность позиционирования исполнительного органа станка при этом снижается (накопленное отклонение f_n на $4 \dots 7$ %, а среднее квадратическое отклонение σ на $6 \dots 11$ %). Это особенно заметно при точении с прерыванием подачи и сравнительно большом числе (более $1,2 \cdot 10^6$) циклов ее изменения.

Результаты экспериментальных исследований могут быть использованы при выборе параметров переменной подачи в целях повышения виброустойчивости процесса обработки нежестких заготовок или кинематического дробления стружки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каштальян, И.А. Эффективные кинематически неустойчивые процессы формообразования на токарных станках с ЧПУ / И.А. Каштальян // Машиностроение: сб. науч. тр. – Вып. 18. – Минск: УП «Технопринт», 2002. – С. 310 – 316.
2. Kashtalyan, I.A. Entropic Accuracy in Assessment of Coordinate Displacement with Varying Advance on Turning Flexible Production Modules / I.A. Kashtalyan // Dynamics of Machine Aggregates: Proceedings of the 4-th International Conference, Trnava, Slovak Republic, 21 – 23 September 1998 / Slovak University of Technology. – Trnava, 1998. – P. 75 – 78.
3. Ратмиров, В.А. Управление станками гибких производственных систем / В.А. Ратмиров. – М.: Машиностроение, 1987. – 272 с.
4. Степнов, М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний / М.Н. Степнов. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
5. Новицкий, П.В. Основы информационной теории измерительных устройств / П.В. Новицкий. – Л.: Энергия, 1968. – 248 с.
6. Пашкевич, В.М. Оценка состояния механизмов по энтропии диагностических параметров / В.М. Пашкевич // Весці НАН Беларусі. Сер. Фіз.-тэхн. навук. – 2005. – № 3. – С. 50 – 56.
7. Кочергин, А.И. Конструирование и расчет металлорежущих станков и станочных комплексов / А.И. Кочергин. – Минск: Выш. шк., 1991. – 382 с.
8. Чернявский, П.М. Количественные оценки рассеивания энергии механических систем / П.М. Чернявский, В.И. Локтев // Изв. вузов. Машиностроение. – 1979. – № 3. – С. 14 – 19.

Поступила 05.02.2013

INFLUENCE OF CUTTING PROCESS KINEMATIC INSTABILITY ON PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF NUMERICALLY-CONTROLLED CUTTING MACHINES

I. KASHTALYAN

The problem of numerically-controlled machines and machine systems' efficiency increase by insertion of the kinematics instability in the cutting process by feed control in the function of path is considered. The results of experimental research of unstable cutting parameters influence on the performance characteristics of rolling screw-motion drive are presented. It is shown, that change mode of feed in the function of path has the influence on distribution of positioning error of machine executive unit. The possibility of using of entropic uncertainty and entropic factor of stability for positioning accuracy evaluation at various modes of acceleration (deceleration) is substantiated.