СТАНКИ И ИНСТРУМЕНТЫ

УДК 621.9.06:536.75

КИНЕМАТИКА ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ НА СТАНКАХ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕГУЛИРОВАНИИ СКОРОСТИ ГЛАВНОГО ДВИЖЕНИЯ И ПОДАЧИ

канд. техн. наук, доц. И.А. КАШТАЛЬЯН
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассмотрена задача повышения эффективности использования станков и станочных комплексов с числовым программным управлением путем введения в процесс резания кинематической нестабильности регулированием подачи и скорости резания в функции пути. Представлены программные модули, реализующие способ управления, при котором параметр, используемый в качестве управляющего воздействия (подача или скорость резания), изменяется приращениями в функции пути, а уровень сигнала управления между приращениями остается постоянным и определяется частотой управляющих импульсов (формируется в функции времени). Приведены теоретические зависимости для расчета текущих значений параметров, характеризующих кинематику процесса нестационарного резания. Для линейного изменения подачи в функции пути и для согласованного изменения подачи и скорости резания представлены результаты численных и экспериментальных исследований. Обозначена область рационального использования полученных теоретических и экспериментальных зависимостей.

Введение. Научно-технический прогресс в машиностроительном производстве 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. Одним из путей решения этой задачи является применение методов обработки, основанных на преднамеренном введении в процесс резания кинематической нестабильности, которая достигается главным образом регулированием подачи и скорости резания. Такие методы применяют при торцовом и фасонном точении, обработке нежестких заготовок на станках различных типов, кинематическом дроблении стружки, а также при синтезе структуры циклов сверления, контурного фрезерования и врезного шлифования [1, 2].

Анализ конструктивных особенностей широкой номенклатуры деталей различных классов, формообразование которых производится на станках с ЧПУ, показал, что целесообразно реализовать те изменения подачи и скорости резания, которые являются универсальными, т.е. могут быть использованы как типовые решения при выполнении различных технологических операций механической обработки. К ним следует отнести линейное изменение скорости резания и подачи в функции пути, а также модулированное изменение подачи [3].

Программные модули, реализующие указанные изменения подачи и скорости резания, были включены в технологическое программное обеспечение микропроцессорного устройства ЧПУ КМ 65 [4, 5]. При их разработке реализован способ управления, при котором параметр, используемый в качестве управляющего воздействия (подача или скорость резания), изменяется приращениями в функции пути, а уровень сигнала управления между приращениями остается постоянным и определяется частотой управляющих импульсов (формируется в функции времени).

Увеличение (уменьшение) частоты вращения шпинделя и минутной подачи в функции пути осуществляется приращениями Δn и ΔS соответственно по мере обработки участков Δl между их приращениями [4]. Управляющие устройства при этом реализуют следующие зависимости:

$$n_к = n_н \pm l\Delta n / \Delta l;$$

$$S_к = S_н \pm l\Delta S / \Delta l,$$

где $n_н$ и $n_к$ – начальная и конечная частота вращения шпинделя, об/мин; $S_н$ и $S_к$ – начальная и конечная скорости подачи, мм/мин; l – длина перемещения, на которой частота вращения шпинделя изменяется от $n_н$ до $n_к$, а подача – от $S_н$ до $S_к$.

Величина ΔS принимается из ряда 0,1; 0,2; 0,3 мм/мин и т.д. Величина Δl находится из выражения: $\Delta l = \pm l \Delta S / (S_к - S_н)$ и принимается кратной длине перемещения исполнительного органа станка при подаче устройством ЧПУ одного импульса. Знак «плюс» или «минус» указывает соответственно на увеличение или уменьшение частоты вращения шпинделя и подачи. Число приращений n_s подачи и частоты вращения шпинделя на участке длиной l определяется из соотношения: $n_s = l / \Delta l$. Величина Δn находится из выражения: $\Delta n = \Delta l (n_к - n_н) / l$ и принимается из ряда 0,2; 0,2; 0,3 об/мин и т.д.

Модулированное изменение подачи заключается в периодическом ее увеличении от S_{min} до S_{max}, а затем снижении до первоначального значения. Изменение подачи между ее пиковыми значениями производится приращениями величиной ΔS по мере обработки участков Δl между приращениями. Для этого устройство ЧПУ поочередно реализует зависимость $S_{max} = S_{min} + n_s \Delta S$ и зависимость $S_{min} = S_{max} - n_s \Delta S$, где n_s – число приращений скорости подачи при ее изменении от S_{min} до S_{max} [5]. Длина пути разгона (замедления) l_1 при этом определяется из выражения: $l_1 = n_s \Delta l$. Величина ΔS назначается из ряда 0,1; 0,2; 0,3 мм/мин и т.д. Величина Δl принимается кратной единице дискретности (перемещению исполнительного органа станка при подаче устройством ЧПУ одного импульса).

При таком способе регулирования подачи за время τ_s исполнительный орган станка перемещается на расстояние l_{τ_s}, которое определяется по следующей зависимости [5]:

$$l_{\tau_s} = \frac{\Delta l}{\Delta S}\left(e^{\frac{\Delta S}{\Delta l}\tau_s} S_н + \Delta S - S_н \right). \tag{1}$$

Тогда текущее значение подачи на оборот $S_о$ в момент времени τ_s устанавливается из соотношения [5]:

$$S_о = \frac{S_н \Delta l}{\Delta S}\left(1 - 1/e^{\frac{\Delta S}{\Delta l}\tau_о} \right) e^{\frac{\Delta S}{\Delta l}\tau_s}, \tag{2}$$

где $\tau_о$ – время одного оборота заготовки.

Текущие значения подачи на оборот $S_о$ и скорости резания v при согласованном изменении частоты вращения шпинделя и минутной подачи рассчитываются по следующим формулам [6]:

$$S_о = \frac{\left(e^{\frac{\Delta S}{\Delta l}\tau_s} S_н + \Delta S \right)\Delta S}{n_н \Delta S + \left(e^{\frac{\Delta S}{\Delta l}\tau_s} S_н + \Delta S - S_н \right)\Delta n}; \tag{3}$$

$$v = \frac{\pi D}{1000}\left[n_н + \left(e^{\frac{\Delta S}{\Delta l}\tau_s} S_н + \Delta S - S_н \right)\Delta n / \Delta S \right]. \tag{4}$$

Процесс резания при таком управлении является нестационарным и определяется текущими значениями скорости резания v и минутной подачи S, а также ускорениями движения резания v' и подачи S'.

Текущее значение минутной подачи S определяется из выражения (1) как производная от пути l_{τ_s} по τ_s, т.е. $l'_{\tau_s} = f'(\tau_s)$, или

$$S = l'_{\tau_s} = e^{\frac{\Delta S}{\Delta l}\tau_s} S_н. \tag{5}$$

Тогда ускорение подачи определяется из выражения (5) как производная от S по τ_s, т.е.

$$S' = S_н \frac{\Delta S}{\Delta l} e^{\frac{\Delta S}{\Delta l}\tau_s}.$$

Соответственно ускорение скорости резания определяется из выражения (4) как производная от v по τ_s, т.е.

$$v' = S_н \frac{\pi D \Delta n_ш}{1000 \Delta l} e^{\frac{\Delta S}{\Delta l}\tau_s}.$$

Физика процесса резания определяется размерами сечения срезаемого слоя, скоростью деформирования и рабочими углами инструмента.

Резание с переменной подачей ведет к изменению толщины среза *a*, которая зависит от главного угла в плане φ и при стационарном резании определяется по известной зависимости [7]:

$$a = S_о \cdot sin\varphi. \tag{6}$$

Подставляя в (6) значение $S_о$ из (2), получим зависимость для определения текущего значения толщины среза a при точении с переменной подачей:

$$a = \frac{S_н \Delta l}{\Delta S} sin\varphi \left(1 - 1/e^{\frac{\Delta S}{\Delta l}\tau_о}\right) e^{\frac{\Delta S}{\Delta l}\tau_s}. \tag{7}$$

Первая производная функции $a = f(\tau_s)$, представленной зависимостью (7), является скоростью изменения толщины среза, т.е.

$$a' = S_н Sin\varphi \left[e^{\frac{\Delta S}{\Delta l}\tau_s} - e^{\frac{\Delta S}{\Delta l}(\tau_s - \tau_о)} \right].$$

Скорость относительного сдвига при резании определяется по известной зависимости [7]:

$$v_{деф} = \frac{\varepsilon v}{\Delta x \xi}, \tag{8}$$

где ε – величина относительного сдвига; Δx – ширина зоны стружкообразования; ξ – коэффициент усадки стружки; v – скорость резания.

Подставив в (8) вместо v его значение из (4), получим зависимость для определения текущего значения скорости относительного сдвига $v_{деф}$ при линейном изменении скорости резания и подачи в функции пути:

$$v_{деф} = \frac{\varepsilon \pi D}{1000 \Delta x \xi} \left[n_н + \left(e^{\frac{\Delta S}{\Delta l}\tau_s} S_н + \Delta S - S_н \right) \frac{\Delta n}{\Delta S} \right].$$

Вследствие переменных значений векторов скоростей главного движения и подачи происходит изменение рабочих углов резания. В результате процесс резания характеризуется углами заточки инструмента (задним α, передним γ, главным в плане φ и наклона главной режущей кромки λ); текущими значениями кинематических углов режущего лезвия $\alpha_к$, $\gamma_к$, $\varphi_к$, $\lambda_к$, а также скоростями их изменения. При точении с постоянной подачей кинематические углы режущего лезвия – задний $\alpha_к$ и передний $\gamma_к$ отличаются от углов заточки α и γ на величину угла скорости резания η_p (угол между направлениями скоростей результирующего движения резания и главного движения). Значения $\alpha_к$ и $\gamma_к$ определяются из соотношений: $\alpha_к = \alpha - \eta_p$ и $\gamma_к = \gamma + \eta_p$. Величина η_p зависит от подачи $S_о$, диаметра обработки D, угла в плане φ и определяется по следующей формуле [7]:

$$\eta_p = arctg\left(\frac{S_о \cdot sin\varphi}{\pi D}\right). \tag{9}$$

Подставив в (9) значение $S_о$ из (2), получим зависимость для определения текущего значения угла η_p при точении с переменной подачей в режиме разгона:

$$\eta_p = arctg\left[\frac{Sin\varphi \cdot S_н \Delta l}{\pi D \Delta S}\left(1 - 1/e^{\frac{\Delta S}{\Delta l}\tau_o}\right)e^{\frac{\Delta S}{\Delta l}\tau_s}\right].$$

Зависимость для определения текущего значения угла скорости резания η_p при согласованном изменении подачи и скорости резания может быть получена путем подстановки в (9) значения S_o из (3).

Численный анализ полученных теоретических зависимостей проводился для линейного изменения подачи в функции пути и для согласованного изменения подачи и скорости резания. В обоих случаях рассматривался режим разгона. При этом значения параметров кинематической нестабильности процесса резания и других параметров, входящих в полученные теоретические зависимости, были приняты следующими: $S_н$ = 50 мм/мин; $n_н$ = 250 об/мин; ΔS = 0,1 мм/мин; Δn = 0,1 об/мин; Δl = 0,05 мм; D = 182 мм; τ_o = 0,004 мин; $\varphi = 95°$. Результаты численного анализа представлены на рисунках 1 – 3.

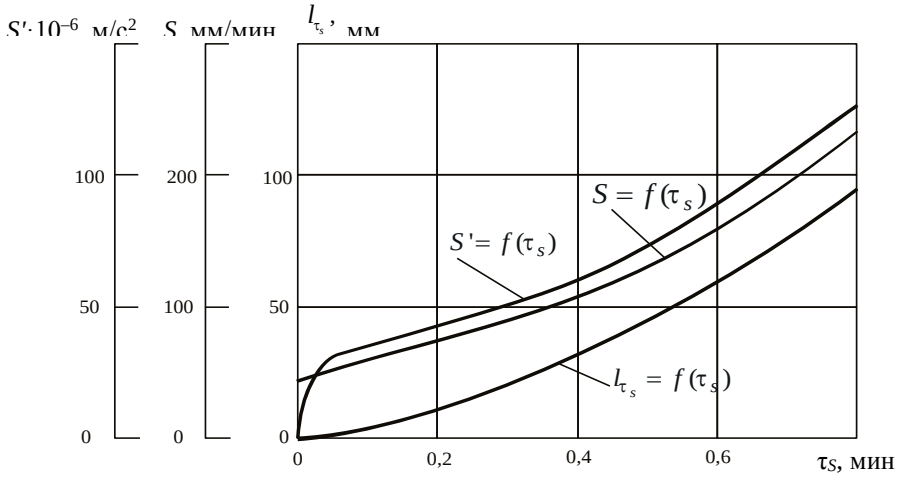

Рис. 1. Зависимости l_{τ_s}, S и S' от времени перемещения τ_s в режиме разгона при точении с переменной подачей

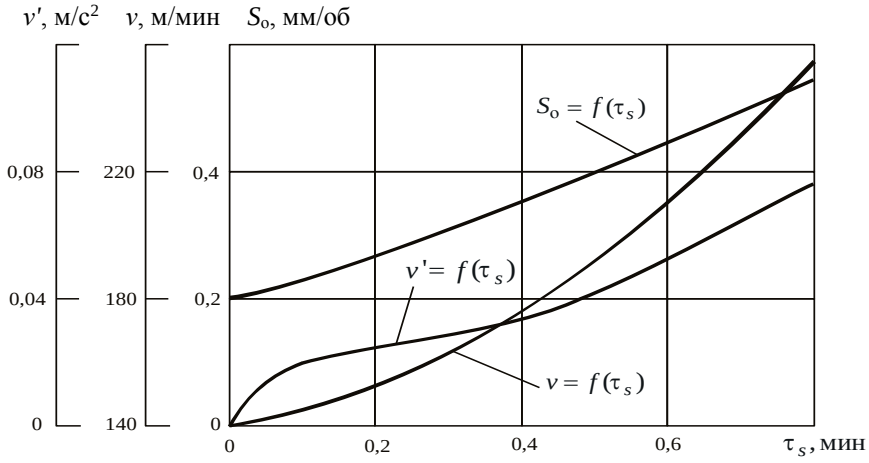

Рис. 2. Зависимости S_o, v и v' от времени перемещения τ_s при согласованном изменении подачи и частоты вращения шпинделя

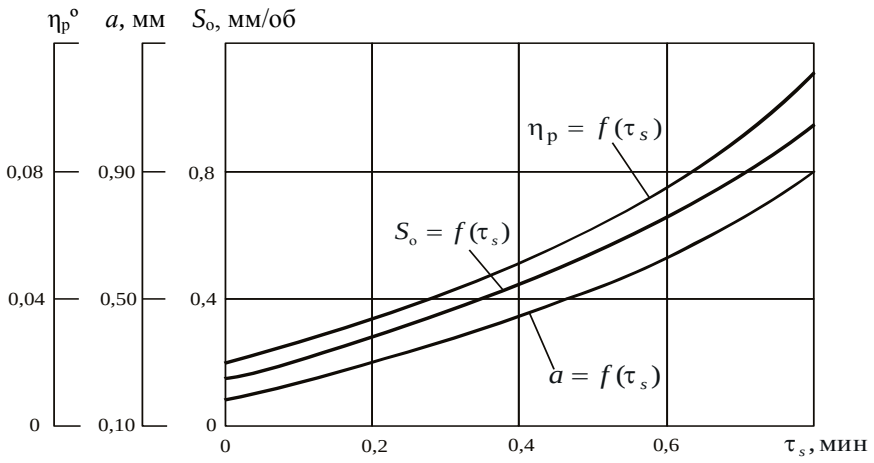

Рис. 3. Зависимости S_o, a и η_p от времени перемещения τ_s в режиме разгона при точении с переменной подачей

Экспериментальная проверка результатов численного анализа выполнялась с использованием станка мод. 1А734Ф3, оснащенного микропроцессорным устройством ЧПУ КМ 65. Обрабатывались заготовки детали «Фланец» при консольном закреплении в трехкулачковом патроне. Обработка велась подрезно-проходным резцом с механическим креплением трехгранной режущей пластины из твердого сплава Т15К6. Геометрические параметры режущей части: $\varphi = 95°$; $\varphi_1 = 5°$; $\alpha = 8°$; $\gamma = 8°$; $r_в = 0{,}8$ мм.

Наружная цилиндрическая поверхность заготовки диаметром 182 мм обрабатывалась при постоянной глубине резания $t = 2$ мм. Значения параметров кинематической нестабильности процесса резания были приняты те же, что и при численном анализе теоретических зависимостей. Измерение частоты вращения заготовки осуществлялось тахогенератором ТП75-20-02, встроенным в двигатель привода главного движения. Для записи сигналов использовали шлейфовый осциллограф.

Сравнительная оценка численных и экспериментальных исследований показала, что полученные теоретические зависимости для определения кинематических параметров адекватно отражают процесс нестационарного резания. Разность в расчетных и экспериментальных значениях таких параметров, как скорость и ускорение, не составляла более 1,2 %. Это в равной степени относится и к главному, и вспомогательному движениям.

Выводы. Зависимости, представленные в работе, могут быть использованы для определения динамических характеристик технологической системы при различных методах механической обработки заготовок с включением в процесс резания кинематической нестабильности, а также при исследовании силовых характеристик движения станочных узлов. По величине ускорения и закону его изменения можно судить об уровне перегрузок и наличии ударов в подвижных соединениях исполнительного органа станка в процессе движения, что позволит прогнозировать надежность и долговечность технологического оборудования. Результаты исследований будут полезны также при создании адаптивных систем, у которых в качестве управляющего воздействия используются подача и скорость резания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подураев, В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания / В.Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1977. – 304 с.
2. Старков, В.К. Технологические методы повышения надежности обработки на станках с ЧПУ / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 1984. – 120 с.
3. Каштальян, И.А. Эффективные кинематически нестабильные процессы формообразования на станках с ЧПУ / И.А. Каштальян // Машиностроение: сб. науч. тр. – Минск: Технопринт, 2002. – Вып. 18. – С. 310 – 318.
4. Устройство числового программного управления: пат. 5128 Респ. Беларусь, МПК G05B 19/18, 19/416 / И.А. Каштальян, В.И. Резниченко, А.П. Пархутик; заявитель Бел. нац. техн. ун-т. – № а 19981074; заявл. 26.11.1998; опубл. 30.06.2003 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2003. – № 2. – С. 208.

5. Каштальян, И.А. Математические модели и алгоритмы управления нестационарными процессами формообразования на станках с ЧПУ / И.А. Каштальян // Автоматизация и современные технологии. – 2006. – № 6. – С. 18 – 24.
6. Каштальян, И.А. Циклы обработки отверстий на станках с ЧПУ с введением в процесс резания кинематической нестабильности / И.А. Каштальян // Теория и практика машиностроения. – 2005. – № 2. – С. 79 – 83.
7. Ящерицин, П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: учеб. для вузов / П.И. Ящерицин, М.Л. Еременко, Е.Э. Фельдштейн. – Минск.: Выш. шк., 1990. – 512 с.

Поступила 27.06.2008