

УДК 621.8

## Совершенствование обработки резанием консольно закрепленных деталей на станках токарной группы с ЧПУ

Жарков Н.В., Павлов Г.А.

В представленной статье предложен метод повышения точности движения инструмента и заготовки при токарной обработке консольно закрепленных деталей. Одной из причин, ограничивающих повышение точности при обработке консольно закрепленных деталей, является несвоевременная подача корректирующих сигналов в систему управления приводом. В реальном приводе управлять временем подачи корректирующих сигналов на сегодняшний день не представляется возможным, поскольку регистрация, обработка и передача сигнала по каналам обратных связей требует определенного времени. В результате отставания сигнала обратной связи происходит задержка коррекции инструмента по ходу обработки и появляется дополнительная составляющая погрешности. При использовании компьютерной модели процесса резания в контуре управления появляется возможность формировать и подавать сигнал обратной связи в канал управления без задержки, что дает возможность приводу с опережением корректировать движение инструмента.

*Ключевые слова:* заготовка, инструмент, модель, моделирование, резание, точность, эффективность.

## The improving of cutting cantilever-fixed parts on CNC lathes

Zharkov N.V., Pavlov G.A.

The paper presents the method of improving movement accuracy of the tool and the blank when turning cantilever-fixed parts. One of the reasons limiting accuracy improvement in cantilever-fixed parts turning is an untimely sending correction signals to the control actuator. In a real drive it is impossible to check the time of sending correction signals, since registration, processing and transmission of the signal via feedback channels takes a certain amount of time. As a result of the feedback signal falling, there is a tool correction delay in the turning process. It results in the additional error component. When using a computer model of the cutting process in the guidance loop, it is possible to create and send a feedback signal to the control channel without any delay. This lets the actuator adjust the tool movement in advance.

*Keywords:* blank, tool, model, modeling, cutting, accuracy, efficiency.

### Введение

В современном машиностроении наиболее перспективным направлением в обработке металлов резанием, является применение высокоточного и высокопроизводительного оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ).

Станки токарной группы с ЧПУ являются достаточно сложным технологическим комплексом, включающими в себя станок и систему ЧПУ. При работе данного оборудования происходит взаимодействие большого

числа различных устройств, от правильного функционирования которых зависит точность выполнения заданной программы. При этом важно не только обеспечить функционирование станка, но и обеспечить заданную точность установленную технической документацией. В силу того, что станки с ЧПУ являются достаточно сложным технологическим комплексом, они позволяют проводить компенсацию погрешностей как самого станка, так и погрешностей, возникающих во время обработки резанием.

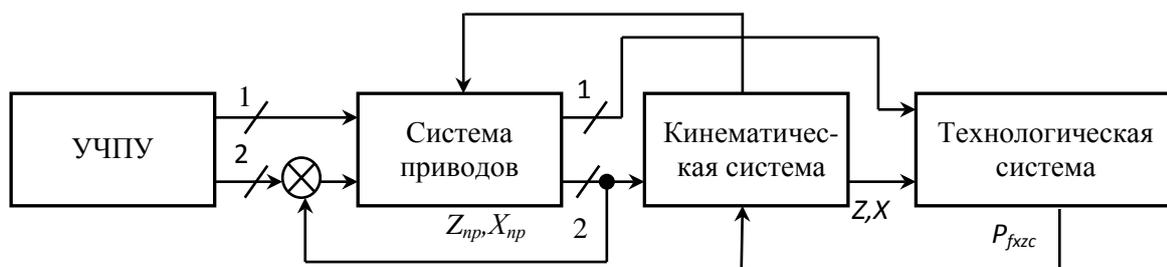


Рис. 1. Комбинированная схема процесса токарной обработки.

Целью работы является рассмотрение возможности построения системы приводов токарного станка с учетом процесса резания. Для учета особенностей влияния звеньев структурной схемы, не охваченных обратной связью, в контур управления введем модель.

### Постановка задачи управления точностью обработки

При обработке на станках с ЧПУ имеются предпосылки достижения более высоких точностей, чем при обработке на станках с ручным управлением. Этот результат определяется как точностными особенностями станков, так и отличиями в конструкции и в построении технологического процесса.

При компенсации погрешностей самого станка на основе информации, обо всей технологической системе полученной с помощью аналитических расчетов или экспериментальных исследований, компенсируется с помощью постоянно действующих программ коррекции, заложенных в память станка с ЧПУ и неизменных в процессе работы оборудования. Такие возможности позволяют повысить начальную точность оборудования и позволяют поддерживать точность оборудования в заданных пределах во время его эксплуатации.

При компенсации погрешностей во время обработки необходимо получать информацию непосредственно во время работы оборудования, которая поступает непрерывно от систем обратной связи с датчиками, измеряющими: погрешности, возникающие в процессе эксплуатации оборудования; погрешности, вызываемые внешними воздействиями на ста-

нок; погрешности, возникающие непосредственно во время обработки деталей на станке.

Использование обратных связей позволяет компенсировать не только систематическую, но и случайную составляющую погрешности и проводить эту компенсацию непосредственно в процессе работы оборудования.

Выделим четыре компонента, обеспечивающие выполнение технологического процесса: УЧПУ, система приводов, кинематическая система и технологическая система. Комбинированная схема процесса токарной обработки представлена на рис.1.

В практике создания систем автоматического управления металлорежущих станков основополагающим остается системный подход, заключающийся в разбиении системы на отдельные элементы и звенья, их подробном описании и исследовании поведения системы в целом. Изменяя количество звеньев, методы формирования сигналов, появляются возможности существенно влиять на поведение системы, управлять динамикой, повышать точность и качество функционирования.

В этой связи особый интерес представляет задача управления точностью механической обработки, поскольку сам процесс резания достаточно изучен и появилось множество моделей, описывающих различные особенности его поведения.

### Динамическая модель процесса резания

В качестве примера рассмотрим модель процесса продольного точения с учетом внутренних связей в объекте управления, обусловленных действием упругих деформаций станочной системы и заготовки. Регули-

руемыми параметрами являются скорость продольной подачи и глубина резания, а выходными - упругие деформации технологической системы и заготовки. При рассмотрении установившегося режима обработки упругие деформации и усилие резания постоянны, в переходных режимах эти величины переменны и происходит это за счет изменения во времени площади срезаемого припуска, которая определяется произведением текущей толщины  $a(t)$  и глубины резания  $b(t)$ .

Для определения в переходных режимах переменных величин усилия резания  $\Delta P(t)$  по соответствующим осям, воспользуемся зависимостью приведенной в [2], в которую входят параметры срезаемого слоя  $b(t)$  и  $a(t)$ ,

$$\begin{aligned}\Delta P_x(t) &= Km_x \Delta a(t) + Kn_x \Delta b(t) \\ \Delta P_y(t) &= Km_y \Delta a(t) + Kn_y \Delta b(t); \\ \Delta P_z(t) &= Km_z \Delta a(t) + Kn_z \Delta b(t),\end{aligned}\quad (1)$$

где  $Km_x, Km_y, Km_z$  – коэффициенты для составляющих силы резания по приращению приведенной толщины среза  $\Delta a(t)$ ;  $Kn_x, Kn_y, Kn_z$  – коэффициенты для составляющих силы резания по приращению приведенной глубины среза  $\Delta b(t)$ .

Считая, что упругая система станка безинерционная и составляющие упругих перемещений вдоль осей  $U_x, U_y, U_z$  постоянны, определим их величины:

$$\begin{aligned}\Delta U_x &= K_x \Delta P_x(t); \\ \Delta U_y &= K_y \Delta P_y(t); \\ \Delta U_z &= K_z \Delta P_z(t),\end{aligned}\quad (2)$$

где  $K_x, K_y, K_z$  – коэффициенты податливости технологической системы по соответствующим осям при действии силы резания, учитывающие деформации шпиндельной и суппортной групп.

Так для случая установки заготовки в патроне без поджатия центром коэффициент податливости определяется выражением [2].

$$K_c = l^3 / 3EJ,$$

где  $l$  – длина заготовки в мм,  $E$  – модуль упругости материала в  $H/mm^2$ ,  $J$  – момент инерции поперечного сечения заготовки.

Учитывая, что разработка системы управления проводится для токарного станка с ЧПУ мод. ТПУ – 125М, виброустойчивость которого подтверждена практикой использования, а также по данным литературы [1, 2], можно сделать предположение о том, что постоянные времени упругой системы станка, заготовки и процесса резания, могут быть на порядок меньше времени запаздывания и определяются выражением  $\tau = 1/n_{\text{min}}$ , где  $n_{\text{min}}$  – число оборотов шпинделя.

Зависимость для определения толщины среза от скорости продольной подачи, упругих деформаций технологической системы и заготовки, с учетом данных приведенных в [2], имеет вид:

$$a(t) = x(t) - x(t - \tau) - K_\phi [U_y(t) + U_y(t - \tau)],$$

где  $x(t)$  и  $x(t - \tau)$  – координаты вершины резца в текущий момент времени и в момент времени  $(t - \tau)$ ;  $K_\phi = ctg\phi$  – коэффициент, учитывающий составляющую упругой деформации по оси  $Y$ ,  $\phi$  – главный угол резца в плане.

Используя выражения (1), (2), а также зависимости определения текущих значений толщины  $a(t)$  и глубины резания  $b(t)$ , запишем систему уравнений движения объекта в операторной форме:

$$\left. \begin{aligned}P_x(p) &= Km_x a(p) + Kn_x b(p); \\ P_y(p) &= Km_y a(p) + Kn_y b(p); \\ P_z(p) &= Km_z a(p) + Kn_z b(p); \\ U_x(p) &= K_x \cdot P_x(p); \\ U_y(p) &= K_y \cdot P_y(p); \\ U_z(p) &= K_z \cdot P_z(p); \\ a(p) &= \frac{1}{p} (1 - e^{-p\tau}) U_{np}(p) - \\ &\quad - (1 - e^{-p\tau}) U_x - K_\phi (1 - e^{p\tau}) U_y(p); \\ b(p) &= \frac{1}{p\tau} \left[ (1 - e^{-p\tau}) b_n(p) + \right. \\ &\quad \left. + (1 - e^{-p\tau}) c_n(p) \right] - U_y(p).\end{aligned}\right\} \quad (3)$$

Знак  $\Delta$  приращений для упрощения записи опущен.

Структурная схема, соответствующая системе уравнений (3) показана на рис. 2

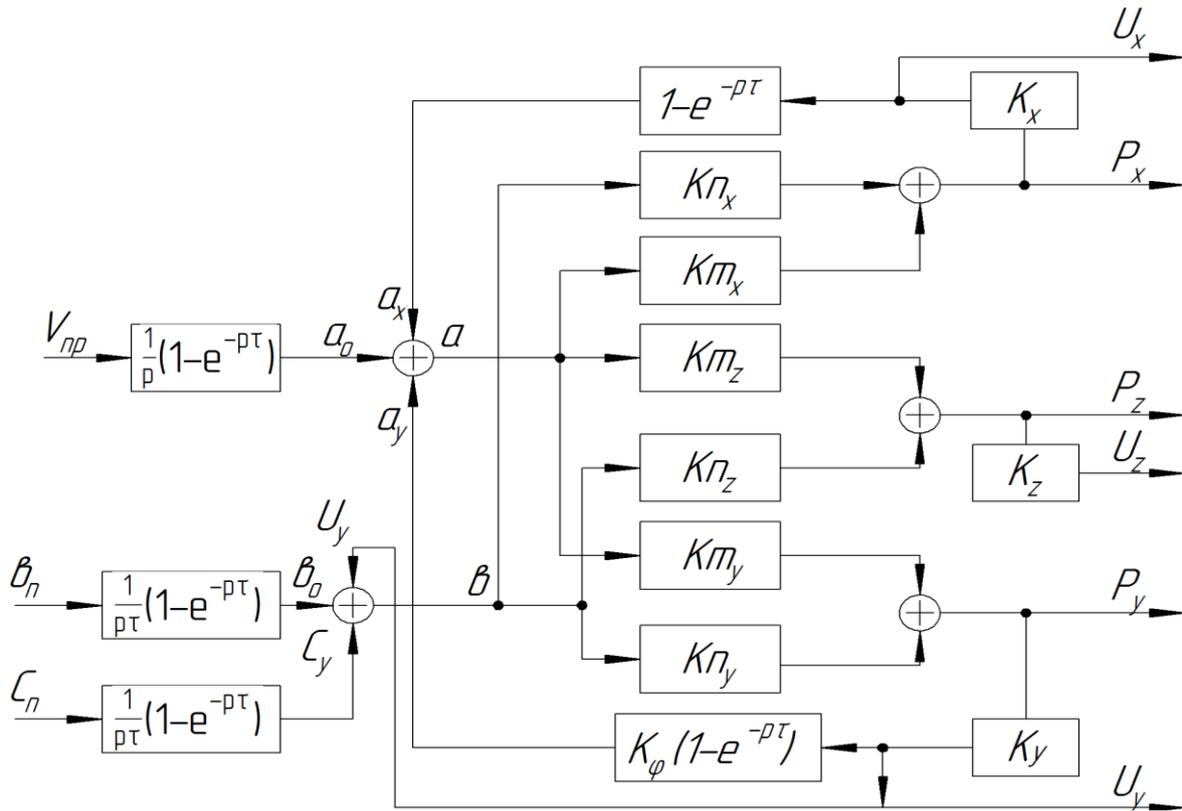


Рис. 2. Структурная схема процесса резания.

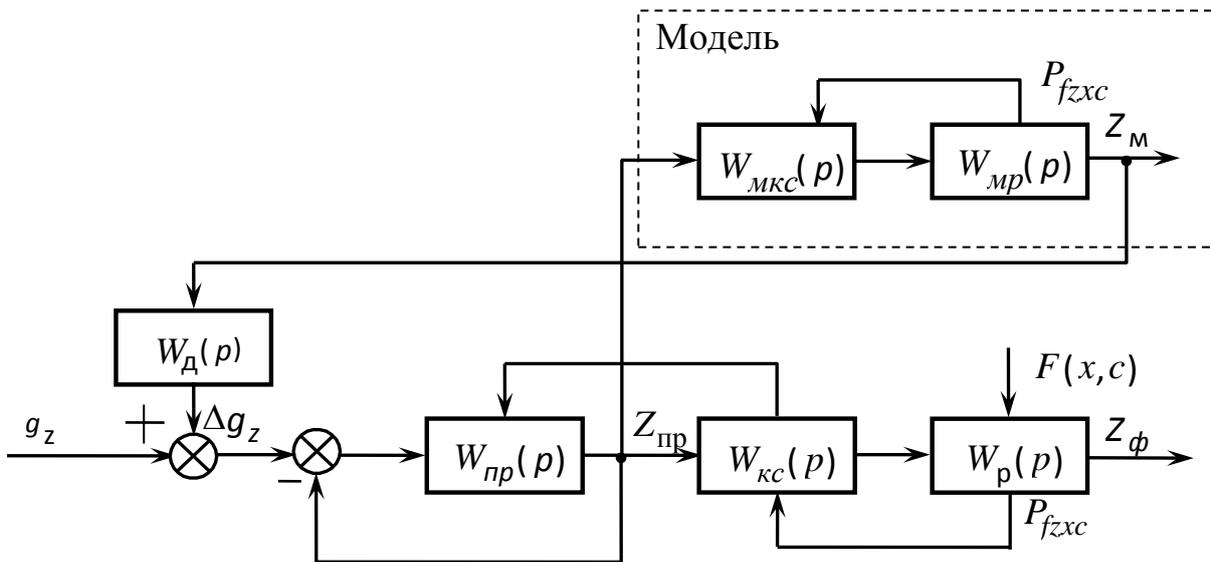


Рис. 3. Структурная схема привода с параллельной моделью процесса обработки.

Как видно из рис.2, процесс резания представляет собой самостоятельное звено, входными параметрами которого являются скорость продольной подачи и глубина резания, а выходными упругие деформации изготавливаемой детали и составляющие силы резания по трем взаимно перпендикулярным

осям. Практически, модель может использоваться в качестве объекта управления, при проведении аналитических исследований автоматизированных систем управления и может применяться как дополнительное регулирующее звено, для управления точностью обработки

Предлагаемый метод использования модели процесса резания для управления точностью обработки основан на внесении дополнительных корректирующих сигналов в систему управления приводом, формируемых по результатам моделирования. Для этого используется компьютерная модель привода, включающая в качестве одного из звеньев процесс обработки резанием. Подача корректирующих сигналов в привод происходит в режиме реального времени, для чего включение компьютерной модели и станка происходит одновременно, в результате чего обеспечивается синхронное движение инструмента в модели и в станочной системе. Сигналы обратных связей формируются также синхронно, но их подача в канал управления приводом происходит по-разному. В компьютерной модели время прохождения сигналов обратных связей может регулироваться за счет использования звеньев задержки или опережения, поэтому коррекция привода может осуществляться по мере необходимости.

#### Анализ результатов моделирования

В реальном приводе управлять временем подачи корректирующих сигналов на сегодняшний день не представляется возможным, поскольку регистрация, обработка и передача сигнала по каналам обратных связей требует определенного времени  $\tau$ , пусть даже малого. В результате отставания сигнала обратной связи происходит задержка коррекции инструмента по ходу обработки и появляется дополнительная составляющая погрешности. При использовании компьютерной модели процесса резания в контуре управления появляется возможность формировать и подавать сигнал обратной связи в канал управления без задержки, что дает возможность приводу с опережением корректировать движение инструмента. Структурная схема автоматизированного привода с параллельной моделью резания показана на рис.3.

На схеме (рис.3) приняты следующие обозначения передаточных функций:  $W_{np}(p)$  – разомкнутого привода;  $W_{kc}(p)$  – кинематической системы для передачи движения инструмента по одной из осей;  $W_p(p)$  – процесса резания с компонентами технологической системы;  $W_{mkc}(p)$  – модели кинематической системы;  $W_{mp}(p)$  – модели процесса резания с компонентами технологической системы;  $W_o(p)$  – технологической системы внешнего корректирующего звена.

Проверка степени влияния параллельной модели на качество регулирования и точность изготовления деталей проводилась при исследовании привода станка с ЧПУ мод. ТПУ – 125М. Исходные данные для моделирования взяты из паспорта станка, а также по результатам замеров.

В модели представлена матрица силового взаимодействия по всем координатным осям, в которую введено чистое запаздывание на один оборот привода главного движения и соответственно координатных перемещений на один оборот.

Регулируемые координаты замкнуты по цепи главной обратной связи через модель процесса резания с учетом особенностей технологической системы и способа установки заготовки

Предусмотрены два варианта подачи корректирующего сигнала в виде дополнительной составляющей, а именно: на вход модели подается сигнал с реального привода; на вход модели подается сигнал с модели привода.

Моделирование проводилось в среде Simulink, интегрированного пакета Matlab. Исследовался процесс токарной обработки заготовок, установленных в патроне без поджатия центром. Величина срезаемого припуска соответствовала черновым и чистовым видам обработки. По результатам моделирования установлено, что использование параллель-

ной модели в качестве управляющего звена позволило повысить точность обработки в среднем в три пять раз по сравнению с существующим методом.

### Заключение

Введение параллельной модели процесса резания в контур управления позволяет формировать и подавать сигнал обратной связи в канал управления без задержки, что дает возможность приводу с опережением корректировать движение инструмента. Разработанная математическая модель структурной схемы системы приводов для станков токарной группы с параллельной моделью процесса резания в среде MATLAB + Simulink, может быть использована для исследования токарных станков с ЧПУ различных компоновок. Применение параллельной модели процесса резания при обработке на станках токарной группы с ЧПУ дает возможность повышать точность обработки, что приводит к улучше-

нию качества выпускаемой продукции, а также сказывается на ее эксплуатационных характеристиках.

### Литература

1. Вейц В.Л., Максаров В.В. Динамика технологических систем механической обработки резанием: Монография в 5-ти частях. Ч.5. Автоколебания в технологических системах механической обработки. – СПб.: СЗТУ – СпбИМаш, 2002. – 224 с.
2. Кудинов В.А. Динамика станков. – М.: «Машиностроение, 1967, 260 с.

### References

1. Weitz V.L., Maksarov V.V. The dynamics of technological systems of machining: Monograph in 5 parts. Part 5. Self-oscillations in the machining process systems. – St. Petersburg: SZTU – SpbIMash, 2002 – 224 p.
2. Kudinov V.A. Dynamics of machines. – Moscow: Mashinostroenie, 1967. – 260 p.

**Статья поступила в редакцию 21 января 2013 г.**

---

*Жарков Николай Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых». E-mail: zharkov\_nikola@mail.ru

*Павлов Георгий Андреевич* – магистрант кафедры «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых». E-mail: rpo\_tavr@mail.ru

---

*Zharkov Nikolay Vladimirovich* – Ph.D., Vladimir State University. E-mail: zharkov\_nikola@mail.ru

*Pavlov Georgiy Andreevich* – Master student, Vladimir State University. E-mail: rpo\_tavr@mail.ru