УДК
621.992.7

В.А. Тимирязев, А.В. Мухин, А.А. Иванов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ САМОПРОГРАММИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ

На примере токарной обработки рассмотрены способы осуществления самопрограммирования траектории перемещения режущего инструмента на станках с ЧПУ, основанные на применения систем адаптивного управления, обеспечивающих регулирование продольной подачи в соответствии с действующей при резании нагрузки.

Ключевые слова: самопрограммирование, траектория, адаптивное управление, токарная обработка, стандартные циклы, управляющая программа, программирование, подача, припуск, проходы.

На токарных станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах количество проходов и траектория относительного перемещения режущего инструмента обычно определяются заранее на этапе разработки управляющей программы (УП). При этом в ряде случаев используют стандартные циклы продольного или поперечного точения с автоматическим разделением задаваемого припуска на проходы [1]. Примеры программирования и выполнения стандартных циклов точения приведены на рис. 1.

На рис. 1 представлены примеры программирования и выполнения стандартных циклов многопроходного продольного и поперечного точения, применяемые на токарных станках с ЧПУ класса (CNC).

Величину продольной подачи F.. и частоту вращения шпинделя S... задают в предшествующем кадре программы.

При задании размеров детали в приращениях кадр стандартного цикла (рис. 1, *б*) принимает вид:

N... G75 U... W... K...H... F... LF

Применение на станках с ЧПУ адаптивных систем, обеспечивающих регулирование подачи в зависимости от нагрузки

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 12. С. 222–224.
© 2016. В.А. Тимирязев, А.В. Мухин, А.А. Иванов.

Постоянный цикл многопроходного продольного точения (рис. 1, *а*) определяет подготовительная функция G82	**Постоянный цикл многопроходного поперечного точения (рис. 1, *б*) определяет подготовительная функция G75**
формат кадра	формат кадра
N... G82 X...Z...R...L...D...H...LF	N... G75 X... Z... K...H... F.. LF
где X, Z – конечные размеры цилиндрической ступени, задаваемые в абсолютных размерах; R – наибольший диаметр конического участка; L – координата конечной точки конического участка; D –глубина резания на проход; H – припуск, оставляемый на чистовой проход	где X, Z – конечные размеры обрабатываемого контура, задаваемые в абсолютных размерах; K – глубина резания, задаваемая на проход; H – припуск, оставляемый на последний, чистовой проход; F – задаваемая поперечная подача

позволяет реализовать процесс формирования траектории перемещения режущего инструмента на принципе самопрограмми-

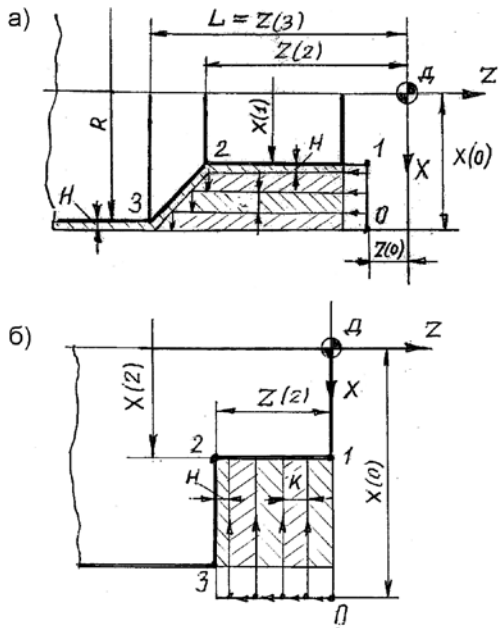

Рис. 1. Схема обработки с использованием постоянных циклов точения: а) продольного; б) поперечного

рования. Это дает возможность по-новому решить задачу автоматического распределения припуска, обеспечив оптимальную глубины резания на каждом из выполняемых проходов [2, 3].

Сущность задачи самопрограммирования, обеспечивающего автоматического распределения припуска на проходы, заключается в определении и поддержании в процессе каждого прохода оптимальной глубинны резания. Критериями выбора оптимального значения глубинны резания являются достижение наибольшей производительности, при которой имеют место минимальные затраты штучного времени $T_{шт} \Rightarrow \min$, или достижение наименьшей себестоимости обработки $C \Rightarrow \min$.

Глубина резания t_i на каждом из проходов должна быть выбрана так, чтобы при фактической величине общего припуска и конкретных условиях резания была обеспечена минимизация одной из целевых функций: функции времени $T = f(s, v, t)$ или функции стоимости $C = y(s, v, t)$.

При этом глубина резания должна быть определена так, чтобы исключить возможность поломки инструмента и не допустимой перегрузки звеньев технологической системы.

Автоматическое распределение припуска на проходы может быть достигнуто при различных схемах формирования траектории перемещения режущего инструмента. Реализация способа самопрограммирования траектории основана на измерении параметров нагрузки, действующей в технологической системе в процессе резания. Такими параметрами могут быть составляющие силы резания, крутящий момент на шпинделе, мощность или ток, потребляемый двигателем главного движения, а также размер динамической настройки или упругие перемещения на замыкающем звене.

На рис. 2 представлены графики изменения продольной подачи s и характерные фрагменты формирования траектории перемещения режущего инструмента, на основе которых осуществляется самопрограммирование траектории и автоматическое распределение припуска на проходы.

В начальный момент врезания (см. рис. 2, *а*) инструмент выводится в соответствии с заданной программой на размер, при котором достигается требуемая точность детали A_{Δ}. При этом инструмент перемещается в осевом направлении с начальной подачей s_{max}. По мере врезания происходит увеличение нагрузки и соответствующее уменьшение продольной подачи s. В момент, когда глубина резания достигает предельного, значения t_{max} и продольная подача соответственно снизится до s_{min}, по-

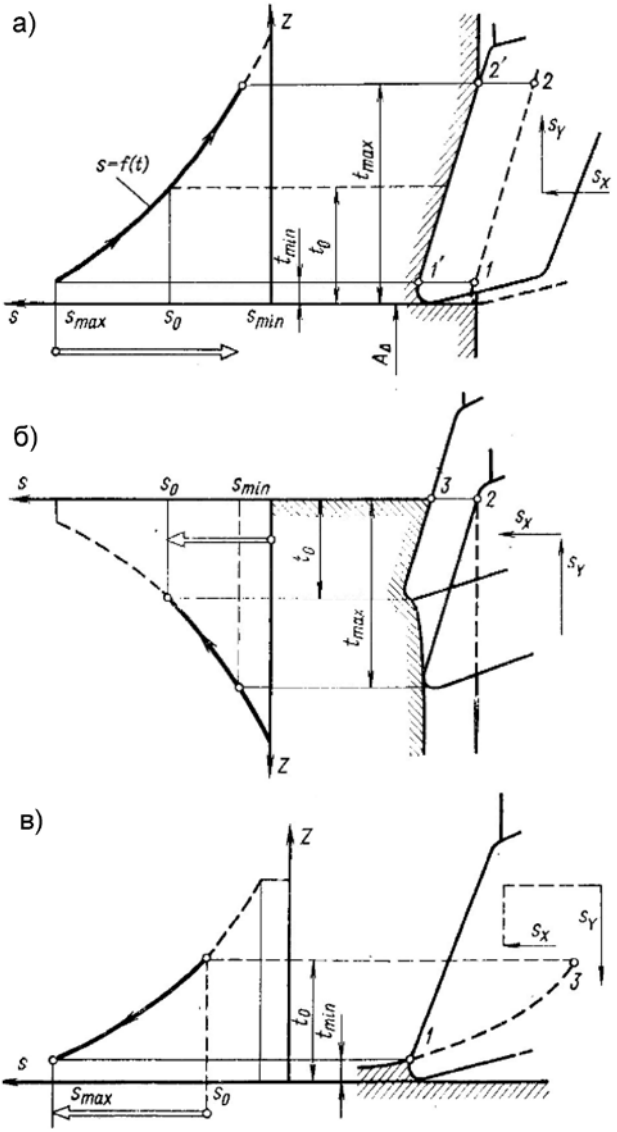

Рис. 2. Схемы самопрограммирования траектории перемещения инструмента при адаптивном управлении циклом работы токарного станка с ЧПУ: а) врезание резца на наибольшую глубину t_{max}; б) траектория перемещения резца при выходе с наибольшей глубины t_{max} на оптимальную t_o глубину резания; в) траектория перемещения резца при выходе с наименьшей глубины t_{min} на большую глубину резания

дается команда на изменение размера статической настройки в сторону уменьшения глубины резания. В результате подача S_X в осевом направлении прекращается и резец перемещается в поперечном направлении.

Изменение размера статической настройки производится до момента выхода на оптимальную глубину резания t_o (см. рис. 2, *б*). При выводе инструмента из заготовки уменьшается нагрузка и соответственно возрастает продольная подача $s \to s_o$. Когда продольная подача достигает значения $s = s_o$ перемещение резца в поперечном направлении прекращается и производится точение с $t = t_o$. Если в процессе точения на проход отклонения глубины резания находятся в пределах $\Delta t \le t_{max} - t_{min}$ и соответственно продольная подача не выходит за установленные значения $S_{min} < S < S_{max}$, то обработка производится без изменения статической настройки. Когда в процессе точения глубина резания уменьшается до $t < t_{min}$ и соответственно продольная подача достигает значения $s = s_{max}$, инструмент выводится из заготовки и по прямоугольному циклу подается в место необходимого входа (рис. 2, *в*).

Для реализации представленных схем формирования траектории необходимо применять резцы с углом в плане $\varphi < 90°$. При такой геометрии инструмента обеспечивается постепенное нарастание силы резания и исключается возможность врезания с подачей S_{max} по всей длине режущей кромки. Это позволяет точно определить характерные моменты резания с глубиной t_{min}, t_o и t_{max}, когда длина контакта главной режущей кромки с деталью ограничивается соответственно точками 1, 2, 3.

Важным моментом настройки системы является определение задаваемых уставок S_o, S_{min}, S_{max}. При известном законе управления $s = f(t)$, например по P_z, верхнее и нижнее значения подачи могут быть определены по формуле:

$$S_{min} = \left| \frac{P_{Zз}}{C_Z v^{n_z} t^{x_z} k_z} \right|^{\frac{1}{Y_z}} \qquad (1)$$

где $P_{Zз}$ – величина задаваемой уставки; C_Z – коэффициент, характеризующий условия обработки.

Назначая t_{max} необходимо учитывать допускаемую в станке нагрузку $P_{пр} < P = f(t_{max}, S_{min})$, а также ограничения по длине l режущей кромки: $t_{max} < l \cos\varphi$. В свою очередь, при назначении S_{max} необходимо учитывать ограничения по шероховатости поверхности $S_{max} < S_V$. Оптимальное значение подачи S_o опреде-

ляется в соответствии с принятыми критериями целевых функций времени $T = f(s, v, t)$ и стоимости $C = y\ (s, v, t)$ [4].

Зная значения подач S_o и S_{min}, можно определить наибольшую t'_{max} и наименьшую глубину резания t'_{min}, получаемую на последнем проходе,

$$t'_{min} = t_{Smin} - t_{So},\ t'_{max} = t_{Smin},$$

где t_{So} и t_{Smin} – глубины резания, соответствующие оптимальному и нижнему значению подачи.

При управлении по P_Z наибольшее и оптимальное значения глубины резания на проход, определяемые соответствующими значениями подач S_{min} и S_o могут быть рассчитаны по формулам:

$$t_{max} = \left| \frac{P_{Z_з}}{C_Z v^{n_Z} S_{min}^{y_Z} k_Z} \right|^{\frac{1}{x_Z}} \tag{2}$$

и

$$t_O = \left| \frac{P_{Z_з}}{C_Z v^{n_Z} S_O^{y_Z} k_Z} \right|^{\frac{1}{x_Z}} \tag{3}$$

Рассчитанные предельные значения продольной подачи S_{max} и S_{min} на практике могут быть несколько изменены с учетом накладываемых ограничений. Например, при назначении S_{min} необходимо учитывать соотношение t_{max} и длины режущей кромки резца, а также условия схода стружки и возможность появления вибраций. Задаваемый диапазон продольной подачи Δs, $S_{max} - S_{min}$ должен быть больше диапазона регулирования Δs, необходимого для стабилизации размера динамической настройки. Если диапазон регулирования подачи Δs соответствует изменению глубины резания $\Delta t = t_o$, то соотношение между тремя фиксированными подачами S_{max}, S_o, S_{min} имеет вид

$$S_O = \frac{S_{max}^y S_{min}^y}{\left(S_{min}^y - S_{max}^y\right)^{1/Y}}. \tag{4}$$

В зависимости от принятой схемы формирования траектории направления перемещения инструмента могут быть параллельны оси вращения детали или параллельны ее контуру. Число проходов n, необходимое для снятия имеющегося припуска Z, зависит, таким образом, от заданного значения уставки P_{Z3}, от принятого оптимального значения продольной подачи и от ус-

ловий обработки. Для случая управления размером $A_д$ по главной составляющей силы резания P_Z число проходов составит:

$$n = \frac{C_Z v^{n_Z} S_O^{y_Z} k_Z}{P_{Z_з}}. \qquad (5)$$

При управлении размером $A_д$ по одному из силовых параметров, например по мощности, току или крутящему моменту, число проходов определяется аналогично. Из выражения (5) видно, что с увеличением задаваемой уставки P_{Z3} число проходов n уменьшается. А с увеличением заданного оптимального значения подачи $S_о$ число проходов увеличивается.

Адаптивная система, осуществляющая самопрограммирование траектории, должна так распределять общий припуск Z, чтобы при выполнении каждого из проходов имел место наибольший съем металла в единицу времени. Для решения этой задачи необходимо автоматически выводить режущий инструмент на такой размер $A_с$, при котором обработка детали происходит с оптимальной подачей. Важным моментом является определение рационального диапазона регулирования продольной подачи, т.е. правильное назначение ее предельных величин. Значительное смещение допустимых предельных значений подачи в крайних направлениях может привести к снижению производительности вследствие уменьшения съема металла в единицу времени.

Применение адаптивных систем, обеспечивающих автоматическое распределение припуска на проходы путем самопрограммирования траектории, позволяет существенно упростить расчет и разработку управляющей программы на станках с ЧПУ. Станки, оборудованные такими системами, позволяют получить более высокую производительность при работе на оптимальных режимах резания и нагрузках независимо от изменения ряда случайных факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Островский М.С.*, *Мнацаканян В.У.*, *Тимирязев В.А.* Программирование обработки деталей горных машин на станках с ЧПУ. Учебное пособие. – М.: Горная книга, 2009. – 336 с.

2. *Тимирязев В.А.* Применение адаптивных систем на станках с программным управлением. – М.: НИИМАШ, 1974. – 127 с.

3. *Соломенцев Ю.М.*, *Митрофанов В.Г.*, *Тимирязев В.А. и др.* Адаптивное управление технологическими процессами на металлорежущих станках. Монография. – М.: Машиностроение, 1980. – 536 с.

4. *Тимирязев В. А.*, *Кутин А. А.*, *Гололобова А. А.* Управление точностью и производительностью процессом механообработки на многоцелевых станках с ЧПУ. Монография. – М.: МГТУ «Станкин», 2013. – 50 с. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Тимирязев Владимир Анатольевич[1] – доктор технических наук, профессор,
Мухин А.В. [1] – аспирант,
Иванов А.А.[1] – аспирант,
МГТУ «СТАНКИН», e-mail: timwa38@mail.ru.

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 12, pp. 222–224.

UDC 621.992.7

V.A. Timiryazev, A.V. Mukhin, A.A. Ivanov

ADAPTABLE CONTROL IN AUTOPROGRAMMING OF CUTTING TOOL PATH ON A NUMERICAL CONTROL LATHE

For example, turning discussed ways to implement the self-programming the path of the cutting tools on CNC machines, based on the use of adaptive control systems, ensuring the regulation of longitudinal feed in accordance with the current load at cutting

Key words: self-programming, trajectory, adaptive control, turning, standard cycles, control software, programming, supply, stock, walkways.

AUTHORS

Timiryazev V.A.[1], Doctor of Technical Sciences, Professor,
Mukhin A.V.[1], Graduate Student,
Ivanov A.A.[1], Graduate Student,
[1] Moscow State University of Technology «STANKIN»,
127055, Moscow, Russia, e-mail: timwa38@mail.ru.

REFERENCES

1. Ostrovskiy M. S., Mnatsakanyan V. U., Timiryazev V. A. *Programmirovanie obrabotki detaley gornykh mashin na stankakh s ChPU.* Uchebnoe posobie (Programming of mining machine parts cutting on numerical control lathes. Educational aid), Moscow, Gornaya kniga, 2009, 336 p.

2. Timiryazev V. A. *Primenenie adaptivnykh sistem na stankakh s programmnym upravleniem* (Use of adaptable systems on numerical control lathes), Moscow, NIIMASh, 1974, 127 p.

3. Solomentsev Yu. M., Mitrofanov V. G., Timiryazev V. A. *Adaptivnoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami na metallorezhushchikh stankakh*. Monografiya (Adaptable control of process flows on cutting machines. Monograph), Moscow, Mashinostroenie, 1980, 536 p.

4. Timiryazev V. A., Kutin A. A., Gololobova A. A. *Upravlenie tochnost'yu i proizvoditel'nost'yu protsessom mekhanoobrabotki na mnogotselevykh stankakh s ChPU.* Monografiya (Machining accuracy and productivity handling on multioperation machines with the numerical program control. Monograph), Moscow, MGTU «Stankin», 2013, 50 p.