

## КАЧЕСТВО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ВРЕЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КУСОЧНО-ПОСТОЯННЫХ АЛГОРИТМОВ

**В.Г. Щетинин**

Самарский государственный технический университет  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244  
E-mail: schetinin\_v@mail.ru

*Рассматриваются вопросы управления технологическим процессом врезного шлифования при наличии ограничений на фазовые координаты по качественным показателям. Проанализированы предельные возможности кусочно-постоянного управления. Оценена потеря производительности при применении таких алгоритмов.*

**Ключевые слова:** *врезное шлифование, кусочно-постоянное управление, потеря производительности, ограничения на фазовые координаты.*

Автоматизация процесса врезного шлифования (ПВШ) является актуальной задачей, стоящей перед конструкторами и технологами при решении проблем оптимизации технологического процесса, повышения качества обрабатываемых изделий и сокращения временных затрат. Одним из вариантов является применение систем автоматического управления технологическим процессом (САУТП) [1, 2] и алгоритмов управления, обладающих свойствами адаптации к вариации параметров технологического процесса и оборудования. При этом целесообразно оценить достижимое качество процесса и потери производительности по сравнению с оптимальными.

Рассмотрим задачу автоматизации технологического процесса врезного шлифования при управлении по каналу поперечной подачи в соответствии с допущениями и ограничениями, описанными в [1]:

- ТПВШ моделируется динамическим звеном первого порядка;
- коэффициент передачи постоянен и равен единице;
- постоянная времени остается неизменной в процессе одного цикла обработки;
- скорость съема металла в конце первого участка постоянна;
- управление процессом осуществляется за счет изменения скорости привода подачи.

Упрощенная математическая модель ПВШ описывается системой дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} T \frac{d^2 S}{dt^2} + \frac{dS}{dt} &= V_c; \\ \frac{dS}{dt} &= V_\partial, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $S$  – величина текущего припуска;

$V_c, V_\partial$  – соответственно скорость подачи и скорость съема металла;

$T$  – постоянная времени ТПВШ.

Алгоритм управления на чистовом участке обработки имеет вид

$$V_c = \begin{cases} V_c, & S_k \leq S \leq 1; \\ 0, & 0 \leq S \leq S_k, \end{cases} \quad (2)$$

где  $S_k$  – припуск на выхаживание.

Реализация САУТП в рассматриваемом случае представляется в виде системы программного управления, обеспечивающей кусочно-постоянное управление в функции текущего значения припуска на обработку [1, 2].

Основным технологическим ограничением является ограничение по прижогам [1], которое обычно описывается в фазовом пространстве «скорость – припуск» в виде

$$V_{\partial} - T_p^{-1}S - V_{\partial k} \leq 0; \quad S \in [0, S_k], \quad (3)$$

где  $T_p = \frac{S_k}{V_{\partial \max} - V_{\partial k}}$  – параметр («постоянная времени») программы;  $V_{\partial \max}, V_{\partial k}$  – соответственно максимальное начальное и предельно допустимое в конце значения скорости съема металла;  $S_k$  – величина критического припуска на чистовую обработку, соответствующая границе прижоговой области при скорости  $V_{\partial \max}$ . Для общности результатов введем относительные единицы:

$$\theta = T_p, \quad s = \frac{S}{S_k}, \quad S_k = 1, \quad v_1 = \frac{V_1 T_p}{S_k}, \quad v_{\max} = \frac{V_{\partial \max} T_p}{S_k} = \frac{V_{\partial \max}}{V_{\partial \max} - V_{\partial k}}, \quad \xi = \frac{T_c}{T_p}. \quad (4)$$

При записи (1)–(3) в относительных единицах в соответствии с (4) задача поиска управления может быть сформулирована так.

Необходимо определить минимальное время  $\tau_{\min}$ , за которое можно перевести систему

$$\left. \begin{aligned} \dot{v} &= -\xi^{-1}v + \xi^{-1}v_c \\ \dot{s} &= v \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

из точки  $s = 1, v = v_{\max}$  в область  $s = 0, 0 \leq v \leq v_{\max} - 1 = v_0$  с помощью управления  $v_c$  из заданного класса допустимых управлений

$$\dot{v}_c(s) \in V_u = \begin{cases} v_1, & s_p < s \leq 1; \\ 0, & 0 \leq s \leq s_p \end{cases} \quad (6)$$

при выполнении ограничения

$$v - s - v_0 \leq 0 \quad (7)$$

для различных  $\xi \in [0, 1]; \Gamma \in [\Gamma_1, \Gamma_2]$ , где  $\Gamma = \frac{V_{\partial k}}{V_{\partial \max}}$ , т. е. необходимо определить

$$\tau_{\min} = \tau_{\min}(\xi, \Gamma).$$

Для решения поставленной задачи рассмотрено множество фазовых траекторий  $\Phi(s)$ , порождаемых управлениями из  $V_s$ ,

$$\Phi(s) = \left\{ v, s : s = 1 + v_1 \xi \ln \frac{v - v_1}{v_{\max} - v_1} - \xi(v_{\max} - v), \quad s \in [s_p, 1]; \quad s \in [0, s_p] \right\}, \quad (8)$$

где  $v_p$  – значение скорости съема в момент переключения, соответствующее  $s_p$ .

Множество траекторий  $\Phi_1(s)$ , переводящих систему в указанную область  $s=0, v \in (0, v_0]$ , при выполнении ограничения (6) является подмножеством  $\Phi(s)$ , т. е.  $\Phi_1(s) \subset \Phi(s)$  и должно удовлетворять следующим условиям:

$$\begin{aligned} \Phi_1(s = s_p) &= \{v_p, v_p - s_p - v_0 \leq 0\}; \\ \Phi_1(s = 0) &= \{v = v_k, 0 < v_k \leq v_0\}. \end{aligned} \quad (9)$$

Очевидно, что траектории с точкой переключения  $(v_p, s_p)$ , лежащей на ограничении, соответствует наименьшее время процесса. Следовательно, траектория, которой соответствует минимальное время процесса  $\tau_{\min}(\xi, \Gamma)$ , принадлежит множеству траекторий  $F_2(s) \subset F_1(s)$  с точкой переключения, лежащей на ограничении (6). Множество  $F_2(s)$  должно удовлетворять следующим условиям, вытекающим из (9):

$$\begin{aligned} F_2(s = s_p) &= \left\{ v_p, s_p : v_p = \frac{v_0 - \xi(v_0 - v_k)}{1 - \xi}, s_p = \frac{\xi(v_0 - v_k)}{1 - \xi} \leq 1 \right\}; \\ F_2(s = 0) &= \{v_k, 0 : v_k \in (0, v_0]\}. \end{aligned} \quad (10)$$

Таким образом, необходимо из всех траекторий множества  $F_2(s)$  отыскать траекторию, которой соответствует минимальное время процесса  $\tau_{\min}$ .

Исходя из соображений лучшей сходимости вычислительных процедур, условия (10) удобнее представить в параметрической форме, используя в качестве параметров момент переключения на выхаживание  $\Theta_{pp}$  и время выхаживания  $\Theta_{pt}$ :

$$\begin{aligned} F_2(s = s_p) &= \left\{ v_p, s_p : v_p = v_1 + (v_{\max} - v_1)e^{-\Theta_{pp}\xi^{-1}} = \frac{v_0 - \xi v_k}{1 - \xi}; \right. \\ s_p &= 1 - v_1 \Theta_{pp} - (v_{\max} - v_1)\xi \left(1 - e^{-\Theta_{pp}\xi^{-1}}\right) = \frac{\xi(v_0 - v_p)}{1 - \xi} \leq 1 \}; \\ F_2(s = 0) &= \left\{ v_k, 0 : v_k \in (0, v_0], s = s_p - v_p \xi \left(1 - e^{-\Theta_{pp}\xi^{-1}}\right) = 0 \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

Время, соответствующее каждой траектории из  $F_2(s)$ ,  $\tau = \Theta_{pp} + \Theta_{pt}$ .

Используя преобразованные условия (11), можно сформулировать задачу синтеза вычислительных алгоритмов поиска управления. Необходимо отыскать минимум функции

$$\tau = \Theta_p - \xi \ln \frac{(1 - \xi)v_k}{v_0 - \xi v_k} \quad (12)$$

при ограничениях

$$\left. \begin{aligned} 0 < v_k \leq v_0; \\ \frac{s_p + v_0 - v_{\max} e^{-\Theta_p \xi^{-1}}}{1 - e^{-\Theta_p \xi^{-1}}} \Theta_p + (1 - \xi)s_p + \xi(v_{\max} - v_0) - 1 = 0, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где

$$s_p = \frac{\xi(v_0 - v_k)}{1 - \xi} \leq 1. \quad (14)$$

Величину подачи  $v_1$  определяем как

$$v_1 = \frac{s_p + v_0 - v_{\max} e^{-\Theta_p \xi^{-1}}}{1 - e^{-\Theta_p \xi^{-1}}}. \quad (15)$$

Решая задачу для различных  $\xi \in (0,1]$ ,  $\Gamma \in [\Gamma_1, \Gamma_2]$ , можно найти  $\tau_{\min} = \tau_{\min}(\xi, \Gamma)$  и параметры управления по выражениям (14) и (15). Таким образом, решается не только задача отыскания минимального времени процесса, но и задача параметрического синтеза управления (6). Зависимости  $\tau_{\min} = \tau_{\min}(\xi, \Gamma)$  показаны на рис. 1.

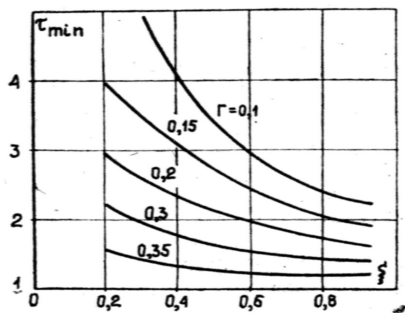


Рис. 1. Минимальное время процесса при вариациях параметров  $\xi$  и  $\Gamma$

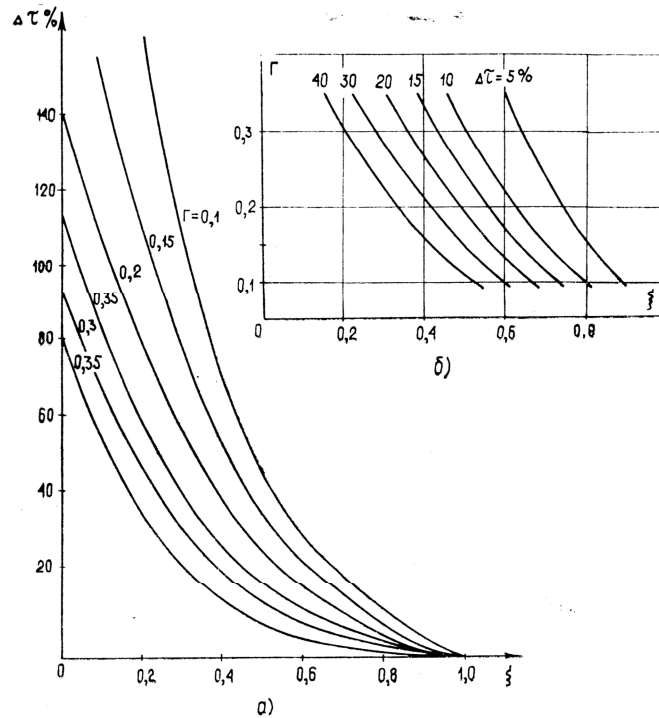


Рис. 2. Зависимость потерь производительности процесса шлифования от  $\xi$  и  $\Gamma$

Целесообразным является также сравнение времени процесса  $\tau_{\min}$  с граничным временем  $\tau_g$ , определяемым как время движения непосредственно по ограничению

(7)  $\tau_g = \ln \frac{v_{\max}}{v_0}$ . Относительное значение потерь времени обработки при шлифовании по ступенчатым алгоритмам по сравнению с граничным случаем можно определить как  $\tau_o = \frac{\tau_g - \tau_{\min}}{\tau_g}$ . Зависимости  $\tau_o = \tau(\xi, \Gamma)$  приведены на рис. 2, а, а поле равных потерь производительности в тех же координатах – на рис. 2, б.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Михелькевич В.Н.* Автоматическое управление шлифованием. – М.: Машиностроение, 1975. – 304 с.
2. *Медведев А.С.* Структурное моделирование и синтез системы автоматического управления процессом шлифования на координатно-шлифовальном станке: дисс. ... канд. техн. наук. – Самара, 2009. – 206 с.

*Статья поступила в редакцию 3 марта 2012 г.*

## THE QUALITY OF PLUNGE-FEED GRINDING PROCESS CONTROL UNDER THE USE OF PIECEWISE ALGORITHMS.

***V. G. Shchetinin***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

*The questions of control of technical processes of plunge-feed grinding under the restrictions on phase coordinates by quality factors are considered. The frontier of piecewise control is analyzed. The loss of efficiency under the use of such algorithms is estimated.*

***Keywords:*** *plunge-feed grinding, piecewise control, loss of efficiency, restrictions on phase coordinates.*