

*А. Ф. ЕНИКЕЕВ*, канд. техн. наук, УкрГАЖТ (г. Харьков)

*И. С. ЗЫКОВ*, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ" (г. Харьков)

## СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ПРИВОДА ПОПЕРЕЧНОЙ ПОДАЧИ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

На основе дискретного преобразования Лапласа синтезирован замкнутый канал управления поперечной подачей шлифовального круга.

**Постановка проблемы.** Внедрение в машиностроительное производство Украины современных информационных и энергосберегающих технологий базируется на разработке технических средств автоматизации технологических процессов и, в частности, алмазного шлифования. Шлифовальные станки при обработке деталей используют в качестве приводных механизмов двигатели постоянного и переменного тока, которые являются энергоемкими объектами управления. Сокращение времени обработки шлифовальными станками деталей при сохранении заданных показателей качества их обработанных поверхностей снижает процент недостатка и дает предприятию существенную экономию электрической энергии [1].

**Разработка математической модели привода.** При разработке технических средств автоматизации процессов алмазного шлифования используется принцип координатного управления станками [2]. В основу разработки замкнутого канала для управления поперечной подачей шлифовального круга положен принцип управления по отклонению. Структурная схема этого канала представлена на рис. 1. Выполним анализ структурной схемы с целью получения выражения для передаточной функции канала.

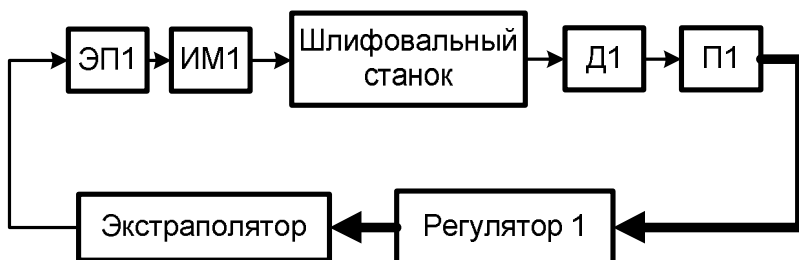


Рис. 1. Структурная схема канала

В динамическом отношении первичный преобразователь представим пропорциональным звеном с некоторой полосой нечувствительности ( $D_1$ ).

Специфика работы этого блока позволяет представить его аperiodическим звеном с запаздыванием

$$H_1(p) = \frac{D_1 k_{\text{П}} e^{-pt_{\text{П}}}}{T_{\text{П}} p + 1}, \quad (1)$$

где  $k_{\text{П}}$ ,  $t_{\text{П}}$ ,  $T_{\text{П}}$  – соответственно коэффициент передачи, запаздывание и постоянная времени блока П.

Погрешность дискретизации аналогового сигнала этим модулем находит свое количественное выражение в нестабильности его выходного кода. На рис. 2 представлена гистограмма разбросов выходного кода. Основные статистические параметры распределения погрешности следующие

$$\bar{X} = 0,840 \cdot 10^{-3}; \quad s = 0,4915; \quad A = 0,0835; \quad E = -0,644.$$

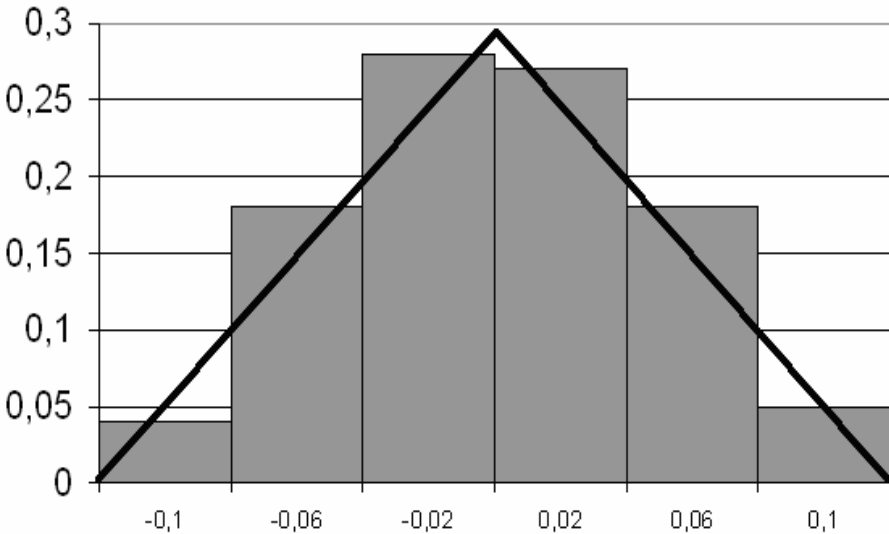


Рис. 2. Гистограмма разброса выходного кода блока П

Гистограмма после выполнения процедуры сглаживания описана треугольным законом распределения. Вероятность проявления выдвинутой гипотезы по критерию согласия Колмогорова составила 0,918 при  $\lambda = 0,487$ . Уравнение сглаженной кривой имеет вид

$$f_1(x) = \frac{1}{2s} e^{-\frac{|x|}{s}} \quad \text{при } x \in (-0,12, 0,12). \quad (2)$$

Для полученного закона распределения погрешности модуля, который измеряет величину поперечной подачи шлифовального круга, имеем

$$\ln f_1(x) = -\ln 2s - \frac{|x|}{s}.$$

Отсюда, энтропия погрешности данного модуля

$$H_{\frac{X}{x_i}} = \ln(2s e^s).$$

Следовательно, энтропийный интервал неопределенности составляет

$$D_1 = s e^s = 0,05.$$

Этот интервал определяет полосу нечувствительности входного модуля канала. Выходной сигнал экстраполятора нулевого порядка является ступенчатым. Тогда передаточная функция такого устройства имеет вид [3]

$$H_2(p) = \frac{1 - e^{-pt_r}}{p}. \quad (3)$$

Регулятор 1 построим на базе микроконтроллера. Обобщенная передаточная функция вычислительного блока как некоторого произвольного цифрового фильтра имеет такой вид [3]

$$H_3(p) = \frac{1}{t_r} (1 - e^{-pt_r}). \quad (4)$$

Передаточная функция блоков ЭП1 и ИМ1 получена таком виде

$$H_4(p) = \frac{k_M T_{k1}^2}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}. \quad (5)$$

где  $a_4 = t_{\text{тв}} T_{\text{тв}} T_{\text{Э}} T_{\text{дт}} T_{\text{М}}$ ,  $a_3 = T_{\text{М}} [(t_{\text{тв}} + T_{\text{тв}}) T_{\text{Э}} T_{\text{дт}} + t_{\text{тв}} T_{\text{тв}} (T_{\text{Э}} + T_{\text{дт}})] + t_{\text{тв}} T_{\text{тв}} T_{\text{Э}} T_{\text{дт}}$ ;

$a_2 = T_{\text{М}} [T_{\text{Э}} T_{\text{дт}} + t_{\text{тв}} T_{\text{тв}} + (t_{\text{тв}} + T_{\text{тв}}) (T_{\text{Э}} + T_{\text{дт}})] + (t_{\text{тв}} + T_{\text{тв}}) T_{\text{Э}} T_{\text{дт}} + t_{\text{тв}} T_{\text{тв}} (T_{\text{Э}} + T_{\text{дт}})$

$a_1 = T_{\text{М}} (T_{\text{Э}} + T_{\text{дт}} + t_{\text{тв}} + T_{\text{тв}}) + T_{\text{Э}} T_{\text{дт}} + t_{\text{тв}} T_{\text{тв}} + (t_{\text{тв}} + T_{\text{тв}}) (T_{\text{Э}} + T_{\text{дт}})$ ,

$a_0 = t_{\text{тв}} + T_{\text{тв}} + T_{\text{Э}} + T_{\text{дт}}$ .

Блоки П1, Р1 и ЭП1 вносят запаздывание в работу канала для управления поперечной подачей шлифовального круга. Будем считать, что дискретное время запаздывания канала по управляющему воздействию, равное сумме запаздываний указанных блоков, составляет  $2T_0$ . Соответственно порядок математической модели рассматриваемого канала составляет  $d = 3$ . С учетом этого запаздывания дискретная передаточная функция замкнутого канала для управления поперечной подачей шлифовального круга получилась в таком виде

$$H_5(z^{-1}) = z^{-2} \frac{b_0^0 + b_1^0 z^{-1} + b_2^0 z^{-2} + b_3^0 z^{-3}}{1 + a_1^0 z^{-1} + a_2^0 z^{-2} + a_3^0 z^{-3}} = z^{-2} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}. \quad (6)$$

В основу разработки цифрового регулятора 1 поперечной подачи шлифовального круга положим принцип его синтеза на базе эталонной модели замкнутого канала. Закон управления цифрового регулятора в системах с эталонной моделью имеет такой вид

$$D(z^{-1}) U_t = H(z^{-1}) G_t - F(z^{-1}) y_t, \quad (7)$$

где  $G_t$  – задающее воздействие замкнутого канала в момент времени  $t = nT_0$ ;  $D(z^{-1}), H(z^{-1}), F(z^{-1})$  – полиномиальные выражения относительно оператора сдвига.

Структурная схема замкнутого канала для управления поперечной подачей шлифовального круга с цифровым регулятором (7) представлена на рис. 3.

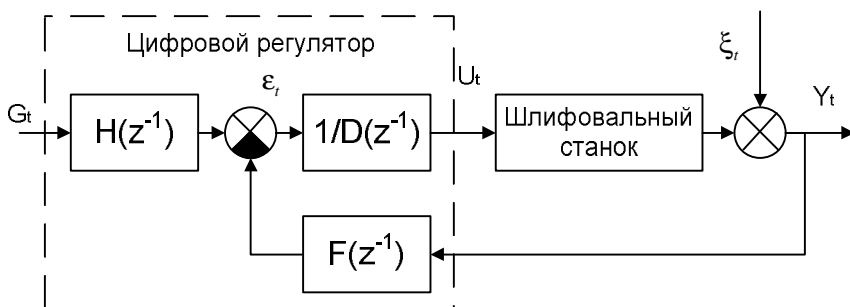


Рис. 3. Структурная схема канала

Синтез цифрового регулятора сведен к задаче определения параметров полиномов  $D(z^{-1})$ ,  $H(z^{-1})$  и  $F(z^{-1})$  таким образом, чтобы замкнутый основной контур был устойчивым. В условиях неполной входной информации синтез цифрового регулятора 1 выполним на основе минимизации квадратичного критерия оптимальности [3]

$$J = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{\infty} [y_i^2 - P_1 U_i^2]. \quad (8)$$

Полином  $R_1(z^{-1})$  определяет динамику переходного процесса основного контура цифрового регулятора при устранении ошибки рассогласования.

Поскольку величиной ошибки  $e_{\text{доп}}$  можно задаться, а ширина  $\Delta_1$  интервала неопределенности уже определена в результате статистической обработки экспериментальных данных, то полином  $R_1(z^{-1})$  приобретает такой вид

$$R_1(z^{-1}) = \frac{\Delta_1 k_M T_M (1-l_4)}{e_{\text{доп}}} z^{-1}. \quad (9)$$

Полином  $H(z^{-1})$  имеет вид

$$H(z^{-1}) = z^{-3} (h_0 + h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + h_3 z^{-3}), \quad (10)$$

где  $h_0 = \frac{\Delta_1 k_M T_M (1-l_4)}{e_{\text{доп}}} b_0^0$ ,  $h_1 = \frac{\Delta_1 k_M T_M (1-l_4) b_1^0}{e_{\text{доп}} a_1^0}$ ,  $h_2 = \frac{\Delta_1 k_M T_M (1-l_4) b_2^0}{e_{\text{доп}} a_2^0}$ ,

$$h_3 = \frac{\Delta_1 k_M T_M (1-l_4) b_3^0}{e_{\text{доп}} a_3^0}.$$

Полином  $F(z^{-1})$  получен в таком виде

$$F(z^{-1}) = f_0 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2}, \quad (11)$$

где  $f_0 = 1$ ,  $f_1 = \frac{a_1^0 + 1}{a_1^0}$ ,  $f_2 = \frac{a_1^0 a_2^0 + a_1^0 + a_2^0}{a_1^0 a_2^0}$ .

Полином  $D(z^{-1})$  получен в следующем виде

$$D(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2}, \quad (12)$$

где его коэффициенты имеют такие значения

$$g_0 = \frac{b_0^0}{a_0^0}, \quad g_1 = \frac{b_1^0 - \frac{b_0^0 a_1^0}{a_0^0} + \frac{b_0^0 (a_1^0 + 1)}{a_1^0}}{a_0^0},$$

$$g_2 = \frac{b_2^0 + \frac{b_1^0 (a_1^0 + 1)}{a_1^0} + \frac{b_2^0 (a_1^0 a_2^0 + a_1^0 + a_2^0)}{a_1^0 a_2^0} - \frac{b_0^0 a_2^0}{a_0^0} - a_1^0 \left[ b_1^0 - \frac{b_0^0 a_1^0}{a_0^0} + \frac{b_0^0 (a_1^0 + 1)}{a_1^0} \right]}{a_0^0}.$$

Передаточная функция оптимального регулятора 1 получена в таком виде

$$H_{\text{опт}}(z^{-1}) = \frac{H(z^{-1})B(z^{-1})}{b_0^0 A(z^{-1}) + D(z^{-1})B(z^{-1})}. \quad (13)$$

После подстановки коэффициентов полиномов  $A(z^{-1})$ ,  $B(z^{-1})$ ,  $D(z^{-1})$  и  $F(z^{-1})$  в выражение (13) и преобразований имеем

$$H_{\text{опт},1}(z^{-1}) = 767,113 \frac{2,3 - 3,453z^{-1} + 1,33z^{-2}}{0,262 + 0,008z^{-1} + 0,2182z^{-2}}. \quad (14)$$

По выражениям (6), (9), (10), (11), (12) и (14) в среде *Matlab* собрана имитационная модель замкнутого канала (рис. 4). График выходного сигнала представлен на рис. 5.

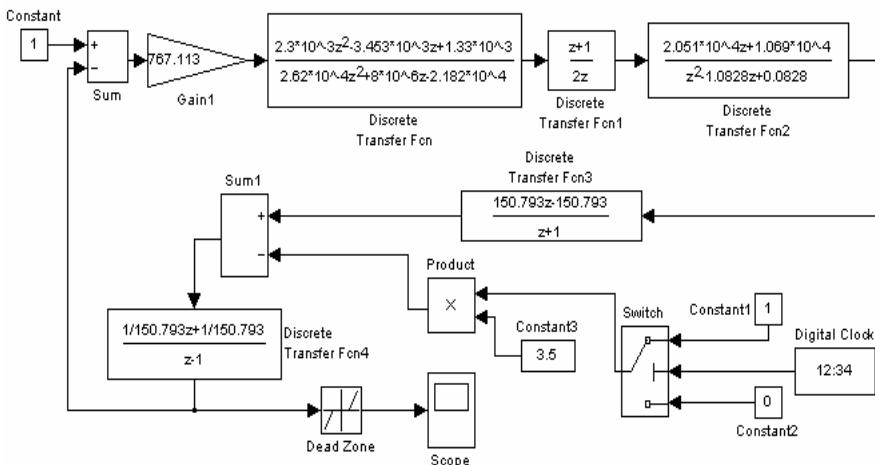


Рис. 4. Имитационная модель в среде *Matlab* замкнутого канала для управления поперечной подачей шлифовального круга

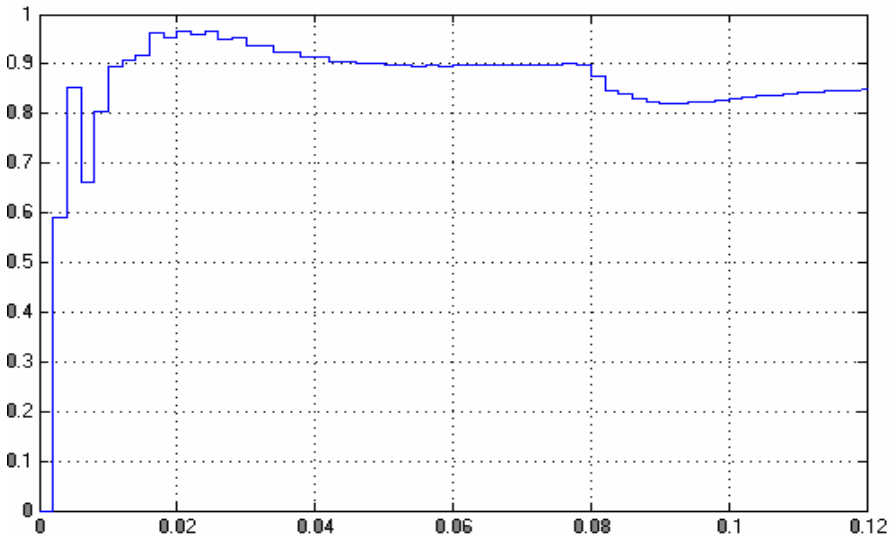


Рис. 5. График выходного сигнала канала

**Выводы.** На основании анализа графика имеем повышение быстродействия замкнутого канала благодаря цифровому регулятору. Так же просматривается небольшая ошибка переуправления в начале переходного процесса, которая по истечении некоторого времени становится нулевой. В целом разработанный замкнутый канал удовлетворяет требованиям системы координатного управления шлифовальными станками по точности и быстродействию.

**Список литературы:** 1. Рубашкин И.Б., Алешин А.А. Микропроцессорное управление режимом металлообработки. – Л.: Машиностроение, 1989. – 160 с. 2. Еникеев А.Ф. Оптимальное управление технологическим процессом алмазного шлифования. – Краматорск: ДГМА, 2001. – 160 с. 3. Романенко В.Д., Игнатенко Б.В. Адаптивное управление технологическими процессами на базе микроЭВМ: Учебное пособие. – К.: Вища шк., 1990. – 334 с.

*Поступила в редколлегию 13.11. 2008 г.*