

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

На основе преобразования Лапласа впервые построена математическая модель аппаратных средств программного управления продольной подачей шлифовального круга. Минимизацией квадратичного критерия качества с использованием эталонной модели аппаратных средств синтезировано устройство обработки входной информации в условиях действия помех. Построена схема имитационного моделирования и установлена эффективность разработанных аппаратных средств.

Ключевые слова: математическая модель, структурно-логическая организация, информационный подход.

Введение. Внедрение в машиностроительное производство Украины современных информационных и энергосберегающих технологий базируется на разработке аппаратно-програмных средств повышения эффективности технологических процессов и, в частности, алмазного шлифования (АШ). Применение известных одномерных средств автоматизации процессов АШ имеет цель: сократить время обработки детали и получить заданную шероховатость ее обработанной поверхности. Традиционные технологии ориентированы на поддержание одномерными аппаратными средствами режимов шлифования, которые хранит их банк данных в виде программы обработки партии деталей.

Целью статьи является разработка эффективных аппаратных средств программного задания продольной подачи шлифовального круга (ШК). Достижение поставленной цели выполняется путем решения следующих задач:

- разработка схемы структурно-логического построения;
- разработка математических моделей компонентов;
- установление полосы неопределенности входного сигнала;
- синтез устройства обработки сигнала продольной подачи ШК;
- разработка схемы имитационного моделирования.

Разработка схемы структурно-логического построения. Величина продольной подачи задает скорость движения ШК вдоль обрабатываемой поверхности детали в течение его одного прохода. Выходной величиной привода продольной подачи ШК является угловая скорость вращения. Передаточная функция привода продольной подачи ШК описывается выражением [1]

$$W_1(p) = \frac{(b_1^* p + b_0^*) p}{a_7 p^7 + a_6 p^6 + a_5 p^5 + a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}, \quad (1)$$

$$\text{где } b_1^* = k_y k_{\mathcal{E}} K_{\text{шл}} K_{\text{мс}} T_{\text{дм}} k_M, \quad b_0^* = k_y k_{\mathcal{E}} K_{\text{шл}} K_{\text{мс}} k_M, \\ a_7 = \tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шл}} T_{\text{шл}} T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} T_M,$$

$$a_6 = \tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шл}} T_{\text{шл}} T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} + \\ + T_M [\tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шл}} T_{\text{шл}} (T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} + T_{\text{мс}} T_{\mathcal{E}} + T_{\mathcal{E}} T_{\text{дм}}) + \\ + T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} (\tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шл}} + \tau_{\text{мс}} T_{\text{шл}} + \tau_{\text{шл}} T_{\text{шл}})]$$

$$a_5 = \tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шл}} T_{\text{шл}} (T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} + T_{\text{мс}} T_{\mathcal{E}} + T_{\mathcal{E}} T_{\text{дм}}) + \\ + T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} (\tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шл}} + \tau_{\text{мс}} T_{\text{шл}} + \tau_{\text{шл}} T_{\text{шл}}) + \\ + T_M [\tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шл}} T_{\text{шл}} (T_{\text{мс}} + T_{\text{дм}} + T_{\mathcal{E}}) + T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} \times \\ \times (\tau_{\text{мс}} + \tau_{\text{шл}} + T_{\text{шл}}) + (\tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шл}} + \tau_{\text{мс}} T_{\text{шл}} + \tau_{\text{шл}} T_{\text{шл}}) \times \\ \times (T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} + T_{\text{мс}} T_{\mathcal{E}} + T_{\mathcal{E}} T_{\text{дм}})],$$

$$a_4 = \tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шл}} T_{\text{шл}} (T_{\text{мс}} + T_{\text{дм}} + T_{\mathcal{E}}) + \\ + T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} (\tau_{\text{мс}} + \tau_{\text{шл}} + T_{\text{шл}}) + (\tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шл}} + \tau_{\text{мс}} T_{\text{шл}} + \tau_{\text{шл}} T_{\text{шл}}) \times \\ \times (T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} + T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} + T_{\text{мс}} T_{\mathcal{E}}) T_M [\tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шл}} T_{\text{шл}} + T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} + \\ + (T_{\text{мс}} + T_{\mathcal{E}} + T_{\text{дм}}) (\tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шл}} + \tau_{\text{мс}} T_{\text{шл}} + \tau_{\text{шл}} T_{\text{шл}}) + \\ + (\tau_{\text{мс}} + \tau_{\text{шл}} + T_{\text{шл}}) (T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} + T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} + T_{\text{мс}} T_{\mathcal{E}})],$$

$$a_3 = \tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шл}} T_{\text{шл}} + T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} + (T_{\text{мс}} + T_{\mathcal{E}} + T_{\text{дм}}) \times \\ \times (\tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шл}} + \tau_{\text{мс}} T_{\text{шл}} + \tau_{\text{шл}} T_{\text{шл}}) + \\ + (\tau_{\text{мс}} + \tau_{\text{шл}} + T_{\text{шл}}) (T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} + T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} + T_{\text{мс}} T_{\mathcal{E}}) + \\ + T_M [\tau_{\text{мс}} \tau_{\text{шл}} + \tau_{\text{мс}} T_{\text{шл}} + \tau_{\text{шл}} T_{\text{шл}} + \\ + T_{\text{мс}} T_{\text{дм}} + T_{\text{мс}} T_{\mathcal{E}} + T_{\text{дм}} T_{\mathcal{E}} + (\tau_{\text{мс}} + \tau_{\text{шл}} + T_{\text{шл}}) \times \\ \times (T_{\text{мс}} + T_{\text{дм}} + T_{\mathcal{E}})]$$

$$a_2 = \tau_{ms}\tau_{uun} + \tau_{ms}T_{uun} + \tau_{uun}T_{uun} + (\tau_{ms} + \tau_{uun} + T_{uun}) \times \\ \times (T_{ms} + T_{dm} + T_3) + T_{ms}T_{dm} + T_{ms}T_3 + T_{dm}T_3 + \\ + T_M(\tau_{ms} + \tau_{uun} + T_{uun} + T_{ms} + T_{dm} + T_3)$$

$$a_1 = \tau_{ms} + \tau_{uun} + \tau_{ms} + T_{uun} + \tau_{uun} + T_{uun} + 2T_M, a_0 = 2.$$

Поиск полюсов выражения (1) дал следующие результаты:

```
ans = 1.0e+004 *
-2.3826
-0.1338 + 0.7726i
-0.1338 - 0.7726i
-0.02026
-0.0800 + 0.0119i
-0.0800 - 0.0119i
-0.0130
```

Анализ полученных результатов позволяют сделать такие заключения:

- условию устойчивости привода удовлетворяют все корни характеристического уравнения;
- корни четыре, пять и шесть малы по величине. Они оказывают влияние на начало переходного процесса. Седьмой корень совпал по величине с нулем передаточной функции;
- привод продольной подачи ШК без потери точности представим такой передаточной функцией

$$W_2(p) = \frac{b_0^* p}{(T_6 p + 1)(\zeta_2 \partial_7 p + 1) \left(\frac{T_7}{\zeta_2} p + 1 \right)}, \quad (2)$$

где T_6, T_7, ζ_2 – вычисляются по полученным корням.

В основу разработки аппаратных средств положен метод отработки рассогласования между измеренным значением продольной подачи ШК и ее оптимальным значением, которое хранится в банке данных процесса АШ. Структурно-логическая организация аппаратными средствами обработки данных продольной подачи ШК представлена на рис. 1.

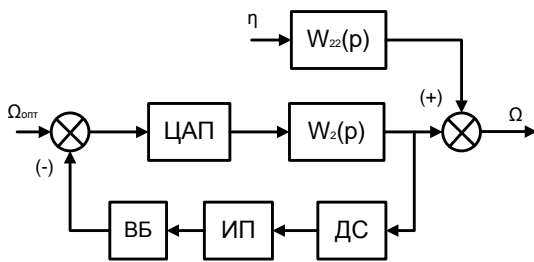


Рис. 1 – Структурно-логическая организация аппаратных средств

Разработка математической модели аппаратных средств. Выполним моделирование компонентов и анализ структурной схемы с целью получения выражения для передаточной функции. Специфика работы блоков ДС и ИП в составе аппаратных средств обработки данных продольной подачи ШК позволяет представить их пропорциональным звеном с запаздыванием [2]

$$W_3(p) = k_3 e^{-p\tau_3}, \quad (3)$$

где k_3, τ_3 – коэффициент передачи и запаздывание, причем $k_3 = 1/b_0^*$ выбирается из условия нормализации.

С учетом полосы Δ_1 нечувствительности первичного преобразователя вокруг номинальной характеристики имеем такую передаточную функцию блоков ДС и ИП

$$W_4(p) = \Delta_1 k_3 e^{-p\tau_3}. \quad (4)$$

Для последующего анализа динамики аппаратных средств обработки данных продольной подачи ШК представляет интерес установление полосы нечувствительности блоков ДС и ИП вокруг номинальной характеристики преобразования. Погрешность дискретизации находит свое количественное выражение в нестабильности выходного кода. Для оценивания метрологических характеристик блоков ДС и ИП выполнена статистическая обработка экспериментальных данных. На рис. 2 представлена гистограмма разброса выходного кода. Объем выборки составил 153 измерения. Основные статистические параметры этого распределения следующие

$$\bar{O} = 0, \quad \sigma = 0.036142, \quad A = 0, \quad E = -0.504.$$

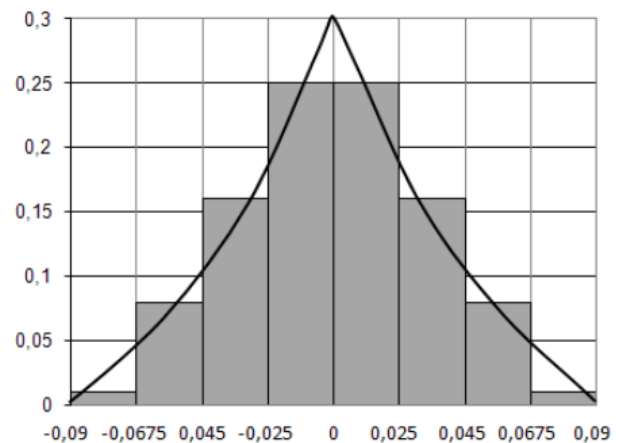


Рис. 2 – Гистограмма разброса выходного кода

Гистограмма разброса выходного кода после выполнения процедуры сглаживания описана экспоненциальным законом распределения, который по виду достаточно близкий к треугольному. Вероятность проявления выдвинутой гипотезы по критерию согласия Колмогорова составляет 0.918 при $\lambda = 0.419$. Уравнение сглаженной кривой, после применения программы *Stat graft*, имеет вид

$$f_1(x) = \frac{1}{2\sigma} e^{-\frac{|x|}{\sigma}} \quad \text{при} \quad x \in (-0.09, 0.09). \quad (5)$$

Воспользуемся информационным подходом при определении погрешности проведенных исследований. Для полученного закона распределения погрешности имеем

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

Отсюда энтропия погрешности

$$H\left(\frac{x}{x_r}\right) = -\int_{-0.1}^{0.1} \frac{1}{2\sigma} e^{-\frac{|x|}{\sigma}} \left(-\ln 2\sigma - \frac{|x|}{\sigma}\right) dx = \ln\left(2\sigma e^{\frac{\mu_1}{\sigma}}\right).$$

Следовательно, энтропийный интервал неопределенности выходного кода блоков ДС и ИП составил

$$\Delta_1 = \sigma e^{\frac{\mu_1}{\sigma}} = 0.036142.$$

Этот интервал определяет полосу нечувствительности блоков ДС и ИП вокруг номинальной характеристики преобразования. Динамика устройства обработки сигнала и экстраполятора исследована в работе [3]. Передаточная функция аппаратных средств обработки данных продольной подачи ШК после преобразований получилась в таком виде

$$W_5(p) = \frac{b_0^* \tau_r p (\tau_4 p + 1)}{a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + 1}, \quad (6)$$

где $a_4 = T_6 T_7^2 \tau_3$,

$$a_3 = T_6 \zeta_2 T_7 \left(\frac{T_7}{\zeta_2} + \tau_3\right) + (T_6 + \zeta_2 T_7) \frac{T_7}{\zeta_2} \tau_3,$$

$$a_2 = T_6 \zeta_2 T_7 + \frac{T_7}{\zeta_2} \tau_3 + (T_6 + \zeta_2 T_7) \left(\frac{T_7}{\zeta_2} + \tau_3\right) + \Delta_1 \tau_r,$$

$$a_1 = T_6 + \zeta_2 T_7 + \frac{T_7}{\zeta_2} + \tau_3.$$

Методика анализа частотных характеристик аппаратных средств состоит из следующих вычислительных процедур:

- создаем tf-объект по выражению для передаточной функции;
- определяем полюса с использованием команды `roots(W)` или `pole(W)`;
- определяем нули с использованием команды `roots(W)` или `zero(W)`;
- строим переходную функцию командой `step(W)`;
- строим импульсную переходную функцию командой `impulse(W)`;
- диаграмму Боде получим, используя для этого команду `bode(W)`;
- запас стойкости по амплитуде и фазе можно установить, используя для этого команду `margin(W)`;
- определяем частотный годограф Найквиста, выполнив для этого команду `nyquist(W)`;
- аналогичные результаты анализа можно получить, используя команду `ltiview(W)`, с соответствующими настройками в меню «Plot Configuration».

Результаты анализа выражения (5) представлены на рис. 3.

Продольную подачу ШК представим в таком виде

$$S_{ip}(t) = \frac{4S_{ip}}{\pi} \sum_{k=1}^n \frac{1}{2k-1} \cos\left[\frac{(2k-1)\Omega}{2}(t_1-t_2)\right] \sin(2k-1)\Omega t. \quad (7)$$

Продольная подача ШК представляет собой скорость перемещения исполнительного механизма. Сле-

довательно, ее будем рассматривать как производную или скорость изменения выходного сигнала канала на соответствующий привод ШС

$$S'_{np}(t) = \frac{4S_{ip}\Omega}{\pi} \sum_{k=1}^n \cos\left[\frac{(2k-1)\Omega}{2}(t_1-t_2)\right] \cos(2k-1)\Omega t. \quad (8)$$

Преобразуем последнее выражение путем замены гармонических составляющих суммой экспоненциальных сигналов

$$S'_{np}(t) = \sum_{k=1}^n B_{2k-1} \left[e^{j(2k-1)\Omega t} + e^{-j(2k-1)\Omega t} \right], \quad (9)$$

$$\text{где } B_{2k-1} = \frac{2S_{ip}}{\pi} \cos\left[\frac{(2k-1)\Omega}{2}(t_1-t_2)\right].$$

Для вычисления интеграла Дюамеля применим обратное преобразование Лапласа к уравнению (6). После преобразований получим

$$W_6(t) = \sum_{k=5}^8 B_k e^{-p_k t}, \quad (10)$$

$$\text{где } B_k = \frac{b_0^* \tau_r p (\tau_4 p + 1)}{4a_4 p^3 + 3a_3 p^2 + 2a_2 p + a_1} \Bigg|_{p=p_k}.$$

Расчет корней характеристического уравнения передаточной функции аппаратных средств дал такие результаты:

```
ans = 1.0e+004 *
-4.1866 + 0.3820i
-4.1866 - 0.3820i
-2.3318
-0.1339
```

Интеграл свертки на основе выражений (9) и (10) дал уравнение, которое описывает динамику выходного сигнала канала обработки данных продольной подачи ШК

$$y_{nd}(t) = \sum_{k=5}^8 B_k e^{-p_k t} \sum_{i=1}^n \frac{\hat{A}_{2i-1} T_k}{\sqrt{1+T_k^2(2i-1)^2 \Omega^2}} \left[e^{j \arctan T_k (2i-1)\Omega} - e^{-j \arctan T_k (2i-1)\Omega} \right]. \quad (11)$$

Синтез устройства обработки сигнала. Для вычисления дискретной передаточной функции привода поперечной подачи ШК раскладываем выражение (2) на простые дроби

$$\frac{W_2(p)}{p} = \frac{A_4}{(p+1/T_6)} + \frac{A_5}{(p+1/\zeta_2 T_7)} + \frac{A_6}{(p+\zeta_2/T_7)}, \quad (12)$$

$$\text{где } A_4 = \frac{b_0^* T_7}{T_6 T_7 (\zeta_2^2 + 1) - \zeta_2 (T_6^2 - T_7^2)} + \frac{b_0^* \zeta_2}{(\zeta_2 T_5 - T_4)(1 - \zeta_2^2)},$$

$$A_5 = \frac{b_0^* \zeta_2}{(\zeta_2 T_7 - T_6)(\zeta_2^2 - 1)}, \quad A_6 = \frac{b_0^* T_7}{\zeta_2 (T_6^2 - T_7^2) - T_6 T_7 (\zeta_2^2 + 1)}.$$

В соответствии с таблицей z-преобразований имеем такое выражение

$$z \left\{ \frac{W_2(p)}{p} \right\} = \frac{A_4 z}{z-l_5} + \frac{A_5 z}{z-l_6} + \frac{A_6 z}{z-l_7}, \quad (13)$$

$$\text{где } l_5 = e^{-\frac{T_0}{T_6}},$$

$$l_6 = e^{-\frac{T_0}{\zeta_2 T_7}},$$

$$l_7 = e^{-\frac{\zeta_2 T_0}{T_7}}.$$

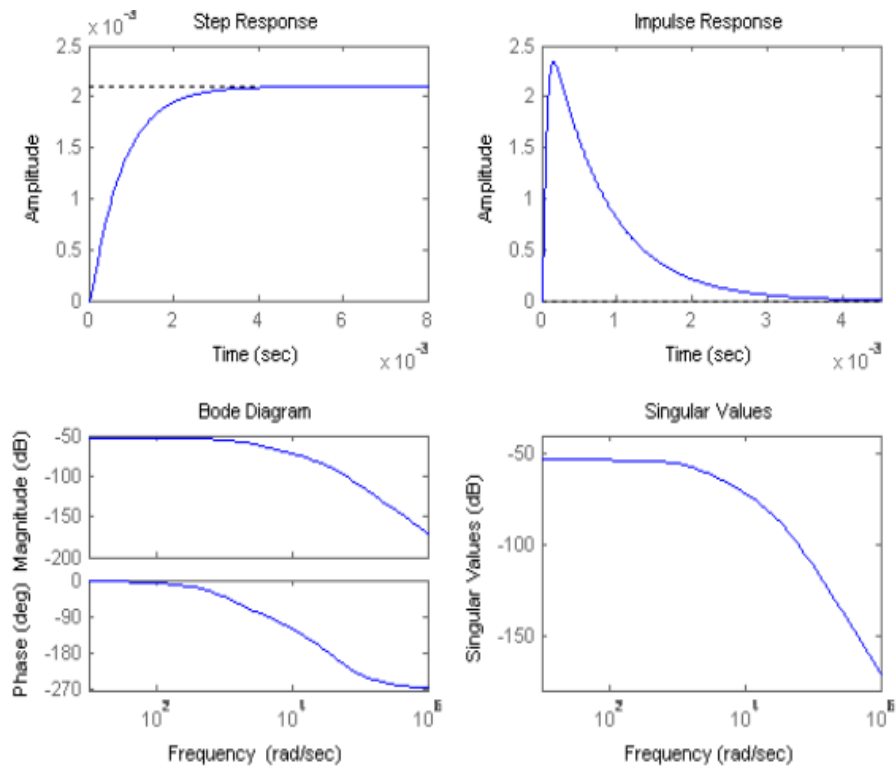


Рис. 3 – Частотные характеристики аппаратных средств обработки данных продольной подачи ШК

Дискретная передаточная функция привода после преобразований получилась в виде отношения двух степенных полиномов

$$W_7(z^{-1}) = \frac{b_1^{\circ} z^{-1} + b_2^{\circ} z^{-2} + b_3^{\circ} z^{-3}}{1 + a_1^{\circ} z^{-1} + a_2^{\circ} z^{-2} + a_3^{\circ} z^{-3}}, \quad (14)$$

где $b_1^{\circ} = A_4 + A_5 + A_6$,

$$b_2^{\circ} = -[A_4(l_6 + l_7) + A_5(l_5 + l_7) + A_6(l_5 + l_6)],$$

$$b_3^{\circ} = l_5 l_6 + l_5 l_7 + l_6 l_7, \quad a_1^{\circ} = -(l_5 + l_6 + l_7);$$

$$a_2^{\circ} = l_7(l_5 + l_6) + l_5 l_6, \quad a_3^{\circ} = -l_5 l_6 l_7.$$

Будем считать, что дискретное время запаздывания аппаратных средств по входному сигналу, равное сумме запаздываний указанных блоков, составляет $2T_0$. Соответственно, порядок математической модели составляет $d = 3$. С учетом этого запаздывания дискретная передаточная функция аппаратных средств получилась в таком виде

$$W_7(z^{-1}) = z^{-2} \frac{b_1^{\circ} z^{-1} + b_2^{\circ} z^{-2} + b_3^{\circ} z^{-3}}{1 + a_1^{\circ} z^{-1} + a_2^{\circ} z^{-2} + a_3^{\circ} z^{-3}} = z^{-2} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}. \quad (15)$$

Будем так же считать, что случайное возмущение приложено к механической части двигателя. Передаточная функция по возмущению исследуемых аппаратных средств описывается уравнением [2]

$$W_l(p) = \frac{k_l p}{T_l p + 1}, \quad (16)$$

где k_l, T_l – коэффициент передачи и постоянная времени механической части двигателя. Для вычисления z-преобразования передаточной функции по возмущению раскладываем ее на простые дроби

$$\frac{W_l(p)}{p} = \frac{A_7}{p} + \frac{A_8}{\left(p + \frac{1}{T_l}\right)}, \quad (17)$$

где $A_7 = k_l$, $A_8 = -k_l T_l$.

В соответствии с таблицей z-преобразований имеем такое выражение

$$z \left\{ \frac{W_l(p)}{p} \right\} = \frac{k_l z}{z-1} - \frac{k_l T_l z}{z-l_8}, \quad (18)$$

где $l_8 = e^{-\frac{T_0}{T_l}}$.

Дискретная передаточная функция по возмущению после преобразований получилась в виде отношения двух степенных полиномов

$$W_8(z^{-1}) = \frac{k_l z^{-1} [1 - T_l + (T_l - l_8) z^{-1}]}{1 - (1 + l_8) z^{-1} + l_8 z^{-2}} = \frac{C(z^{-1})}{E(z^{-1})}. \quad (19)$$

После получения выражений для дискретных передаточных функций перейдем к синтезу устройства обработки сигнала продольной подачи ШК. Его синтез в условиях действия помех выполним на основе минимизации квадратичного критерия качества и с использованием эталонной математической модели. Процедура синтеза приведена авторами к установлению параметров степенных полиномов $R_l(z^{-1})$, $H(z^{-1})$, $D(z^{-1})$ и $F(z^{-1})$, при которых основной контур устройства устойчив. Полином $R_l(z^{-1})$ определяет динамику переходного процесса при устранении ошибки рассогласования основного контура. Поскольку величиной погрешности ε_{avr} можно задать, а величина Δ_1 интервала неопределенности уже

определена в результате статистической обработки экспериментальных данных, то полином $R_1(z^{-1})$ имеет такой вид

$$R_1(z^{-1}) = \frac{\Delta_1 k_l z^{-1} [1 - T_l + (T_l - l_8) z^{-1}]}{\varepsilon_{\text{авт}}} \quad (20)$$

Параметры степенного полинома $H(z^{-1})$ определяются следующим образом

$$H(z^{-1}) = z^{-3} (h_1 z^{-1} + h_2 z^{-2} + h_3 z^{-3}), \quad (21)$$

где

$$h_1 = \frac{\Delta_1 k_l (1 - T_l) b_1^\circ}{\varepsilon_{\text{авт}} a_1^\circ},$$

$$h_2 = \frac{\Delta_1 k_l [(1 - T_l) b_2^\circ + b_1^\circ (T_l - l_8)]}{\varepsilon_{\text{авт}} a_2^\circ},$$

$$h_3 = \frac{\Delta_1 k_l [(1 - T_l) b_3^\circ + b_2^\circ (T_l - l_8)]}{\varepsilon_{\text{авт}} a_3^\circ}.$$

Представим входной сигнал аппаратных средств функцией Хэвисайда, которая имеет амплитуду S_{np} . Соответственно этот сигнал в форме z -преобразования имеет вид

$$G_t = \frac{S_{np} z}{z - 1}. \quad (22)$$

Для установившегося режима работы устройства обработки сигнала (ошибка рассогласования равняется нулю) имеем

$$G_t H(z^{-1}) = y_t F(z^{-1}). \quad (23)$$

После преобразований получим полином $F(z^{-1})$ в таком виде

$$F(z^{-1}) = f_0 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2}, \quad (24)$$

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

При отсутствии входного сигнала имеем

$$D(z^{-1}) U_t = -F(z^{-1}) y_t. \quad (25)$$

С учетом того, что $y_t = W_7(z^{-1}) U_t$, имеем такое уравнение

$$D(z^{-1}) A(z^{-1}) = -F(z^{-1}) B(z^{-1}).$$

Отсюда, после преобразований получен полином $D(z^{-1})$ в виде

$$D(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2}, \quad (26)$$

где его коэффициенты имеют такие значения

$$g_0 = \frac{b_0^\circ}{a_0^\circ},$$

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

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

После преобразований получим передаточную функцию устройства обработки сигнала продольной подачи ШК в таком виде

$$W_9(z^{-1}) = \frac{0.04752 + 0.862z^{-1} - 0.823z^{-2}}{0.374 - 0.374z^{-1}}. \quad (27)$$

Разработка критерия для оценивания эффективности аппаратных средств. Управление продольной подачей аппаратные средства выполняют во время прямого или обратного хода ШК. Представим выходной сигнал в виде ограниченного ряда Фурье

$$v(t) = \sum_{i=1}^n A_{2i-1} \sin[(2i-1)\omega t]. \quad (28)$$

Оценим потери информации при дискретизации по времени аналогового сигнала, который описан выражением (28). Динамическая погрешность дискретизации по времени аналогового сигнала исследована в работе [1]. Там же получено такое выражение для ее описания

$$\Delta_{\text{диф}} = \int_0^T v(t) dt - T_0 \sum_{k=1}^m v(kT_0), \quad (29)$$

где m – количество интервалов дискретизации.

После преобразований выражения (29) имеем динамическую погрешность дискретизации гармонического сигнала в таком виде

$$\Delta_{\text{диф}} = T_{\text{д}} \left[\frac{1}{\pi} - \frac{1}{m} \sum_{k=0}^{0.5m-1} \sin\left(k \frac{2\pi}{m}\right) \right], \quad (30)$$

где T_{np} – время выполнения ШК одного прохода.

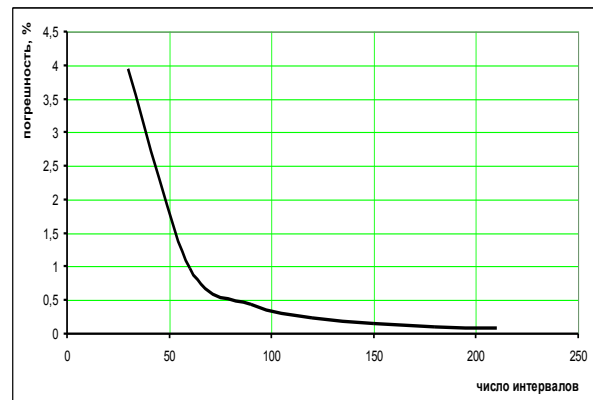


Рис. 4 – График погрешности дискретизации выходного сигнала

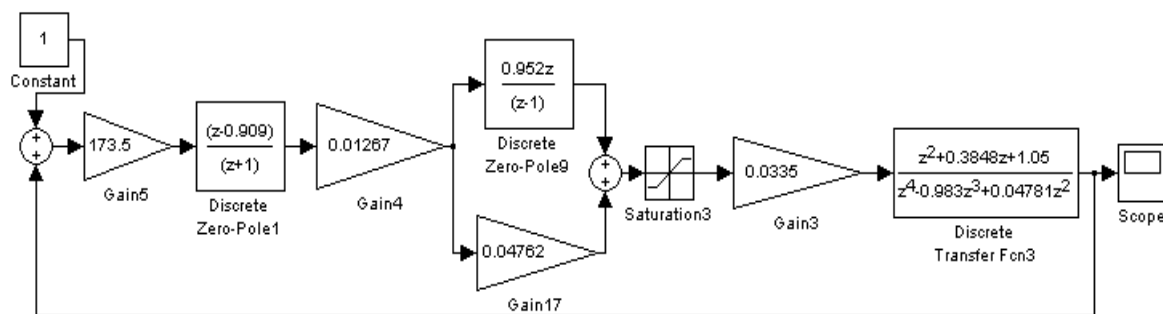


Рис. 5 – Схема имитационного моделирования процессов преобразования информации аппаратными средствами обработки данных продольной подачи ШК

После преобразований формулы (30) получим выражение для относительной погрешности дискретизации гармонического сигнала

$$\delta_{\text{дд}} = 1 - \frac{\pi}{m} \sum_{k=0}^{0.5m-1} \sin\left(k \frac{2\pi}{m}\right). \quad (31)$$

Среднеквадратическая погрешность дискретизации сигнала (28) оценивалась автором с учетом вкладов гармонических составляющих. Для получения ее оценки использовалось такое выражение

$$\delta_{\text{нд}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n A_{2i-1}^2}{\sum_{i=1}^n A_{2i-1}^2}} \delta_{(2i-1)\text{дд}}. \quad (32)$$

Результаты расчетов среднеквадратической погрешности дискретизации представлены на рис. 4. Задавая допустимым значением погрешности, получим с помощью графика минимально возможное количество интервалов дискретизации. Время выполнения ШК одного прохода известно. Период квантования вычисляем путем деления этого времени на выбранное количество интервалов дискретизации. Быстродействие аппаратных средств должно превышать рассчитанный период квантования. Так, например, время одного прохода ШК поверхности заготовки, длина которой 0.5 м, при продольной подаче 4.0 м/мин составляет 7.5 с. При ошибке дискретизации величиной 0.035 имеем 100 интервалов. Соответственно, длительность периода квантования входной информации равна 0.075 с.

Схема имитационного моделирования. На основе выражений (15), (19) и (27) собрана схема имитационного моделирования процессов преобразования информации аппаратными средствами обработки данных продольной подачи ШК (рис. 5).

Вывод. На основе метода обработки рассогласований между измеренным значением продольной подачи ШК и ее оптимальным значением, которое хранит банк данных процесса АШ, реализовано структурно-

логическое построение аппаратных средств. В результате анализа структурно-логической схемы с использованием дискретного преобразования Лапласа впервые построена математическая модель. В результате статистической обработки экспериментальных данных установлена зона нечувствительности датчика вокруг номинальной характеристики преобразования. На основе минимизации квадратичного критерия качества с использованием эталонной модели аппаратных средств синтезировано устройство обработки сигнала продольной подачи ШК. При этом синтезе учтено запаздывание аппаратных средств. Построена схема имитационного моделирования процесса обработки данных продольной подачи ШК. Время преобразования аппаратными средствами входного сигнала в виде единичной функции Хэвисайда составило 0.06 с. Вид выходного сигнала - аperiodический. Следовательно, производительность аппаратных средств обработки данных продольной подачи ШК удовлетворяет требованиям по быстродействию.

Список литературы: 1. Єнікєєв О.Ф. Комп'ютеризована система для підвищення ефективності алмазного шліфування / О.Ф.Єнікєєв, Т.Л. Щербак // Збірник наукових праць ІПМЕ НАН України. Випуск 63. –К.: 2012. – С. 32 – 40. 2. Єнікєєв А.Ф. Оптимальное управление технологическим процессом алмазного шлифования. – Краматорск: ДГМА, 2001. – 160 с. 3. Єнікєєв А.Ф. Синтез цифрового регулятора поперечної передачі шліфувального круга / А.Ф. Єнікєєв, І.С. Зыков. // Вестник Национального технического университета «ХПИ». –Харьков: No57, 2008. – С. 87 – 93.

Bibliography (transliterated): 1. Enikyeyev O.F., Shherbak T.L. *Komp'yuteryzovana systema dlya pidvy'shennya efektyvnosti almaznogo shlifuvannya*. Kiev: IPME NAN Ukrayiny. 2012. – pp. 32-40 Print. 2. Enikeev A.F. *Optimal'noe upravlenie teh-nologicheskim processom almaznogo shlifovaniya*. Kramatorsk: DGMA. 2001. – 160 p. Print 3. Enikeev A.F., Zykov I.S. *Sintez cifrovogo reguljatora poperechnoi peredachi shlifival'nogo kruga* Kharkov: NTU «KhPI». 2008. – pp. 87-93. Print.

Поступила (received) 25.03.2015

Єнікєєв Александр Фанілович – канд. техн. наук, доцент, Украинский государственный университет железнодорожного транспорта (УкрГУЖТ), (050)-194-33-57, (096)-245-32-83, e-mail: Al_enikeev@bigmir.net

Євсюкова Фатима Магометдиєвна – ст. преподаватель НТУ «ХПИ», (097)-941-22-99, e-mail: evsyukova_fatima@mail.ru

Шішенко Леонід Афанасьєвич – канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ», (067)-426-68-07