

УДК 621.92

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ В ВОСПРОИЗВЕДЕНИИ ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ПОЗИЦИОННО-СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ЭКСТРАПОЛЯТОРОМ НУЛЕВОГО ПОРЯДКА

В.Е. Лысов, И.С. Сидоров

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: sidoov@rambler.ru

Позиционно-следящие системы с числовым программным управлением являются основными при синтезе электроприводов подачи металлорежущих станков, и в частности, координатно-расточных (КРС) особо высокой точности. В структуре таких систем команды от вычислителя ЧПУ передаются на усилители мощности, питающие электродвигатели подвижных органов станка, через экстраполятор нулевого порядка. Дискретность последнего вносит погрешность в воспроизведение задания в динамических режимах, которые характерны при обработке изделия со сложным профилем. В статье рассматривается оценка динамической погрешности от дискретности экстраполятора и даются рекомендации по формированию задания для реализации технологического процесса с постоянной (заданной) производительностью.

Ключевые слова: период дискретности, экстраполятор нулевого порядка, электропривод, передаточная функция, цифровая система.

Расчетная структурная схема дискретной системы, настроенной на технический оптимум [1], показана на рис. 1. Дискретность, вносимая экстраполятором, будем оценивать относительно непрерывной САУ, которая служит эталоном.

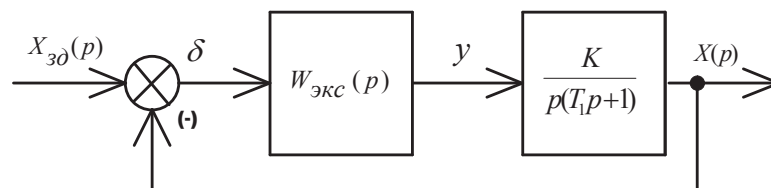


Рис. 1. Структурная схема электропривода

Оценка погрешности, вносимая экстраполятором, является важной составляющей в погрешности воспроизведения заданной траектории движения электропривода $X_{30}(p)$. Это особенно важно для прецизионных позиционно-следящих электроприводов, которыми оснащаются, например, координатно-расточные станки особо высокой точности [2]. Например, для станков класса С при перемещениях подвижного органа станка до 1250 мм погрешность должна составлять до 2 мкм [2]. При обработке сложной поверхности следящий электропривод

Владимир Ефимович Лысов (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».

Игорь Сергеевич Сидоров, аспирант.

должен воспроизводить гармонический сигнал [3]. При этом в процессе обработки нужно поддерживать постоянную скорость подачи инструмента (V_{30}), заданную для данного технологического процесса. Связь между круговой частотой ω_{30} , линейной скоростью V_{30} и сигналом задания X_{30} устанавливается зависимостью

$$\omega_{30} = \frac{V_{30}}{X_{30}}. \quad (1)$$

Анализ погрешности, вносимой экстраполятором нулевого порядка, будем проводить с помощью передаточной функции системы по ошибке в форме Z-преобразования с последующим переходом в область псевдочастот λ с использованием билинейного преобразования $Z = \frac{1+w}{1-w}$ [4]. Это, в свою очередь, позволяет использовать логарифмические амплитудно-фазовые частотные характеристики для исследования системы. Передаточная функция по ошибке в форме Z-преобразования имеет вид

$$W_{\delta}(z) = \frac{\delta(z)}{X_{30}(z)} = \frac{1}{1 + W_p(z)}. \quad (2)$$

В (2) передаточная функция системы в форме Z-преобразования в разомкнутом состоянии представлена зависимостью

$$W_p(z) = \frac{K[z(T - T_1 + T_1 d) + T_1(1 - d) - dT]}{(z - 1)(z - d)}. \quad (3)$$

В (3) принято: K – коэффициент передачи системы; T – период дискретности экстраполятора; $d = e^{-\frac{T}{T_1}}$; T_1 – постоянная времени апериодического звена. С учетом (3) зависимость (2) представим в виде

$$W_{\delta}(z) = \frac{\delta(z)}{X_{30}(z)} = \frac{(z - 1)(z - d)}{(z - 1)(z - d) + K[z(T - T_1 + T_1 d) + T_1(1 - d) - dT]}. \quad (4)$$

Аналитическое исследование зависимости (4) в общем виде не представляется возможным. Поэтому используем численный метод для оценки погрешности, вносимой экстраполятором. Дадим ряд значений периода дискретности T , которые определяют частоту квантования $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$: $T = 0,04$ с; $T = 0,08$ с; $T = 0,16$ с; $T = 0,3$ с; $T = 0,4$ с. Результаты расчетов сведены в табл. 1.

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика аналоговой САУ, принятой за эталон, определяется передаточной функцией

$$W_{\delta}(p) = \frac{\delta(p)}{X_{30}(p)} = \frac{1}{1 + W_p(p)} = \frac{0,147p(0,08p + 1)}{0,012p^2 + 0,147p + 1}.$$

На основании полученного выражения проведем расчет необходимых параметров для построения ЛАФЧХ:

$$20 \lg 0,147 = -16,8 \text{ дБ};$$

$$\omega_1 = \frac{1}{0,08} = 12,5 \text{ с}^{-1}; \lg 12,5 = 1,1 \text{ дек}; \omega_2 = \frac{1}{0,109} = 9,17 \text{ с}^{-1}; \lg 9,17 = 0,96 \text{ дек}.$$

Таблица 1

Результаты расчетов

Период дис- кретно- сти экс- траполя- тора «0» порядка T, с	Передаточная функция разо- мкнутой си- стемы $W_p(z) = \frac{x(z)}{x_{3д}(z)}$	Передаточная функция по ошибке системы $W_{\delta}(w) = \frac{\delta(z)}{x_{3д}(z)}$	Амплитудно – фазовая частотная характеристика системы по ошибке $W_{\delta}(j\lambda \frac{T}{2})$ $\lambda, c^{-1}; \lambda, \text{дек}; K, \text{дб}; T, c.$
0,04	$\frac{0,05(1,1Z+1)}{(Z-1)(Z-0,6)}$	$\frac{Z-0,6}{\frac{0,0544(Z+1)}{z-1} + (Z-0,6)}$	$\frac{0,147j\lambda(1+j\lambda 0,08)}{0,0116^2(j\lambda)^2 + 0,125j\lambda + 1}$ $T_1 = 0,08; T_2 = 0,108.$ $\lambda_1 = \frac{1}{T_1} = 12,5;$ $\lg 12,5 = 1,1. c \cong 0,58$ $\lambda_2 = \frac{1}{T_2} = 9,26;$ $\lg 9,26 = 0,966.$ $20\lg K = 20\lg 0,147 = -16,8$
0,08	$\frac{0,143(1,39Z+1)}{(Z-1)(Z-0,366)}$	$\frac{Z-0,366}{(Z-0,366) + 0,145(\frac{1,37Z+1}{Z-1})}$	$\frac{0,147j\lambda(1+j\lambda 0,086)}{0,112^2(j\lambda)^2 + 0,1136j\lambda + 1}$ $T_1 = 0,086; T_2 = 0,112.$ $\lambda_1 = \frac{1}{T_1} = 11,63;$ $\lg 11,63 = 1,06.$ $c \cong 0,52$ $\lambda_2 = \frac{1}{T_2} = 8,93;$ $\lg 8,93 = 0,95.$ $20\lg K = 20\lg 0,147 = -16,8$
0,16	$\frac{0,325(1,88Z+1)}{(Z-1)(Z-0,134)}$	$\frac{Z-0,134}{(Z-0,134) + 0,326(\frac{1,875Z+1}{Z-1})}$	$\frac{0,147j\lambda(1+j\lambda 0,1)}{0,116^2(j\lambda)^2 + 0,092j\lambda + 1}$ $T_1 = 0,1; T_2 = 0,116.$ $\lambda_1 = \frac{1}{T_1} = 10; \lg 10 = 1.$ $c \cong 0,4$ $\lambda_2 = \frac{1}{T_2} = 8,62;$ $\lg 8,6 = 0,93.$ $20\lg K = 20\lg 0,147 = -16,8$

0,3	$\frac{0,48(3,097Z+1)}{(Z-1)(Z-0,023)}$	$\frac{Z-0,023}{(Z-0,023)+0,48(\frac{3,097Z+1}{Z-1})}$	$\frac{0,146j\lambda(1+j\lambda 0,157)}{0,109^2(j\lambda)^2+0,075j\lambda+1}$ $T_1 = 0,157; T_2 = 0,108.$ $\lambda_1 = \frac{1}{T_1} = 6,37;$ $\lg 6,37 = 0,8. c \cong 0,347$ $\lambda_2 = \frac{1}{T_2} = 9,26;$ $\lg 9,26 = 0,96.$ $20\lg K = 20\lg 0,146 = -16,8$
0,4	$\frac{0,52(4,21Z+1)}{(Z-1)(Z-0,0066)}$	$\frac{Z-0,0066}{(Z-0,0066)+0,52(\frac{4,21Z+1}{Z-1})}$	$\frac{0,147j\lambda(1+j\lambda 0,2)}{0,069^2(j\lambda)^2+0,069j\lambda+1}$ $T_1 = 0,2; T_2 = 0,069.$ $\lambda_1 = \frac{1}{T_1} = 5; \lg 5 = 0,7.$ $c \cong 0,347$ $\lambda_2 = \frac{1}{T_2} = 14,5;$ $\lg 14,5 = 1,16$ $20\lg K = 20\lg 0,147 = -16,8$
0,5			Система не устойчива

По расчетным данным табл. 1 и аналоговой системы на рис. 2 представлена логарифмическая амплитудно-частотная характеристика по ошибке позиционно-следящего электропривода.

Анализ амплитудно-частотной характеристики показывает, что при увеличении периода дискретности экстраполятора существенно возрастает динамическая ошибка в воспроизведении заданной траектории движения. Это особенно важно для приводов прецизионных КРС класс С. Для КРС особо высокой точности при обработке сложных профилей с закруглениями предъявляются вполне определенные требования по скоростям движения приводов подачи [3]. Например, в табл. 2 приведены значения $V_{зд}, \omega_{зд}$ для различных по твердости заготовок при радиусах закругления R.

Таблица 2

Значения $V_{зд}, \omega_{зд}$

R, мм	$V_{зд, \frac{м}{мин}}$	$\omega_{зд}, c^{-1}$	$\lg \omega_{зд}, \text{дек}$
1	0,5	8,3	0,92
	1	16,7	1,2
	2	33,3	1,52
2,5	0,5	3,32	0,52
	1	6,68	0,82
	2	13,32	1,12

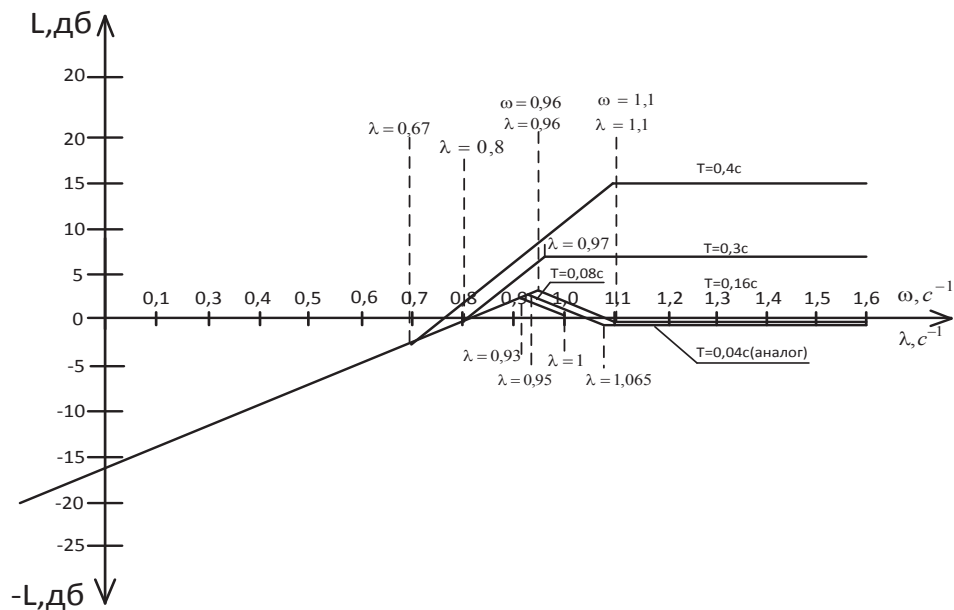


Рис. 2. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика по ошибке

Заметим, что при $T = 0,04$ с или $\omega_0 = 157$ с⁻¹ имеем хорошее совпадение с погрешностью аналоговой системы, которая при заданных параметрах имеет полосу пропускания в разомкнутом состоянии $\omega_c = 7$ с⁻¹, $2\omega_c = 14$ с⁻¹. Хорошее совпадение дискретной системы с непрерывным аналогом реализуется, если $\frac{\omega_0}{2\omega_c} = \frac{157}{14} = 11,2$. Поэтому для достижения высокой точности необходимо, чтобы $\omega_0 > 2\omega_c$ в 12 раз.

Моделирование системы в среде Matlab подтверждает полученные расчетным путем выводы. Графики отклонения ошибки $\delta(t)$ дискретной системы от аналогового прототипа показаны на рис. 3 при входном воздействии $1(t)$.

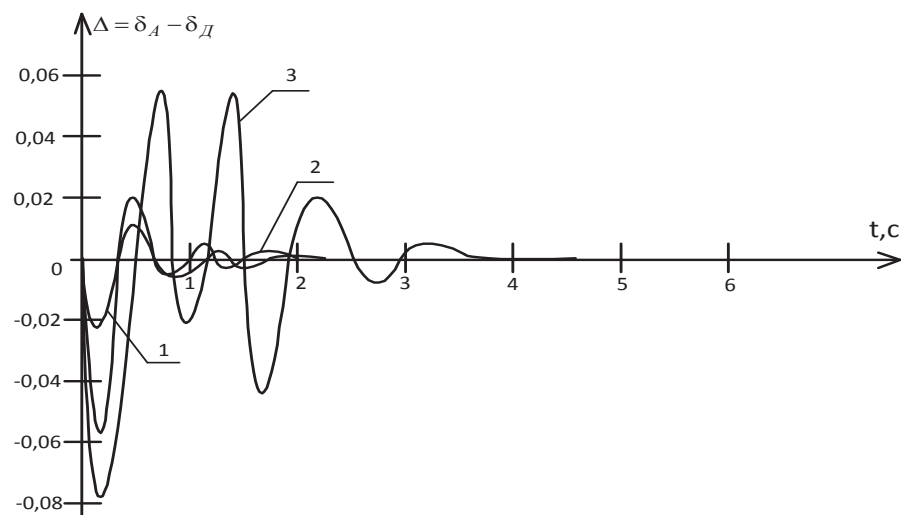


Рис. 3. Отклонение ошибки $\delta(t)$ дискретной системы от аналогового прототипа:

1 – $T = 0,04$ с; 2 – $T = 0,08$ с; 3 – $T = 0,16$ с

На основании рассмотренного можно сформулировать вывод. Если линейный прототип удовлетворяет техническим требованиям по ошибке воспроизведения заданной траектории, то дискретный регулятор может внести дополнительную погрешность, что может привести к увеличению погрешности и неудовлетворению технических требований. В этом случае требуется увеличить либо частоту ω_0 экстраполятора, либо быстродействие аналоговой части системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ранопорт Э.Я.* Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока. Конспект лекций. – Куйбышев, 1985. – 56 с.
2. *Решетов Д.Н., Портман В.Г.* Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.
3. *Михайлов О.П., Орлова Р.Т.* Современный электропривод станков с ЧПУ и промышленных роботов. – М.: Высшая школа, 1989. – 111 с.
4. *Лысов В.Е.* Теория автоматического управления. – М.: Машиностроение, 2010. – 500 с.

Статья поступила в редакцию 25 сентября 2015 г.

THE ANALYSIS OF THE ERROR IN THE REPRODUCTION OF THE PREDETERMINED PATH OF A ZERO-ORDER PREDICTOR POSITION-TRACKING ELECTRIC DRIVE

V.E. Lysov, I.S. Sidorov

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

Position-tracking systems with numerical control are fundamental for the synthesis of electric drives for metal-cutting machines and, in particular, for jig-boring high-precision machine tools. In the structure of such systems, CNC commands are transferred to the power amplifiers feeding the machine moving-parts electric motors by means of a zero-order predictor. The latter's discreteness causes an error in the reproduction tasks in dynamic modes, which are typical of the processing of complex-profile products. The paper deals with the estimation of the dynamic error coming from the discreteness of the predictor, and provides recommendations on the formation of the tasks for the implementation of the constant (predetermined) productivity technological process.

Keywords: *period of discreteness, the zero-order extrapolator, digital system function transfer.*

*Vladimir E. Lysov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Igor S. Sidorov, Postgraduate Student.*