

УДК 621.92

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДИСКРЕТНОСТИ ПОЗИЦИОННО-СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА НА СИНТЕЗ КОРРЕКТИРУЮЩЕГО ЗВЕНА

**В.Е. Лысов, И.П. Колесников**

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

E-mail: igorkoles.nu@gmail.com

В настоящее время в качестве электроприводов главного движения и подачи самое широкое распространение получили цифровые системы автоматического управления. Особое место занимают позиционно-следящие системы для приводов подачи. Последние обеспечивают технологические процессы обработки деталей для профилей со сложной геометрией. Введение цифровых систем приведет к возникновению дополнительной погрешности. Поэтому необходимо скорректировать систему в зависимости от частоты экстраполятора в контуре положения системы автоматического управления. В статье рассматривается методика коррекции цифровой системы, обеспечивающей односторонний подход к заданной координате, что особенно важно, например, для приводов подачи прецизионных станков, где необходимо избегать влияния вредных нелинейностей, в частности люфта.

**Ключевые слова:** электропривод, передаточная функция, цифровая система, корректирующее звено, синтез, дискретный элемент, цифровой регулятор, экстраполятор нулевого порядка.

Позиционно-следящие электроприводы являются основными при подаче подвижных узлов прецизионных станков, например координатно-расточных, и других прецизионных установок. Структурно такие системы строятся по принципу подчиненного регулирования (СПР) [1, 3], и для трехконтурной системы с астатическим контуром скорости, где выходной величиной является положение  $X$  (позиция), имеют вид, показанный на рис. 1.

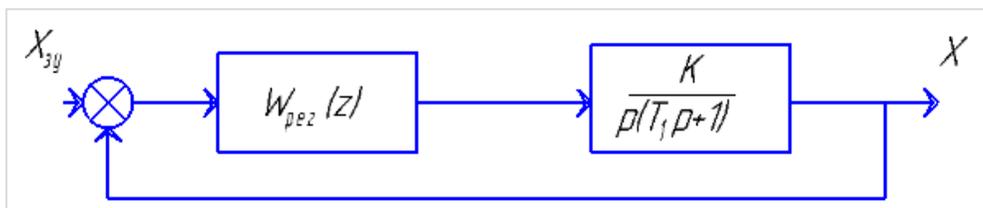


Рис. 1. Структурная схема электропривода

В случае аналоговой системы, построенной по упомянутому выше принципу, и при подаче  $X_{зад}=1(t)$  переходный процесс показан на рис. 2 и соответствует динамическим показателям качества управления  $\sigma \% \approx 4,3 \%$ ; время первого перехода кривой через установившееся значение  $X_{уст} = 1$  составляет  $4,7 T_1$ .

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

Игорь Петрович Колесников, магистрант.

Введение цифрового регулятора положения, обеспечивающего защиту системы от действия всевозможных промышленных помех, приводит к тому, что в системе возникает дополнительная колебательность [4], вызванная наличием дискретности экстраполятора «0» порядка в структуре ЦАП регулятора положения (кривая 2 на рис. 2).

Передаточная функция разомкнутой системы в форме Z-преобразования имеет вид [2]

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

где  $T$  – период дискретности;  $T_1$  – постоянная времени апериодического звена;

$K$  – коэффициент передачи системы в разомкнутом положении;  $d = e^{-\frac{T}{T_1}}$ .

Анализ в форме Z-преобразования в общем виде представляет трудности в виде ненаблюдаемости физических процессов. В этой связи анализ проводим численным методом в области псевдочастот с последующим обобщением.

Рассмотрим передаточную функцию непрерывной части системы в виде

$$W_p(p) = \frac{K}{p(T_1 p + 1)} = \frac{6,25}{p(0,08 p + 1)}. \quad (2)$$

Приняв в исследовании  $K = 6,25$ ;  $T_1 = 0,08$  с;  $T = 0,16$  с;  $d = 0,134$ , передаточную функцию (2) в форме Z-преобразования представим в виде

$$W_p(z) = \frac{0,325(1,88z + 1)}{(z - 1)(z - 0,134)}. \quad (3)$$

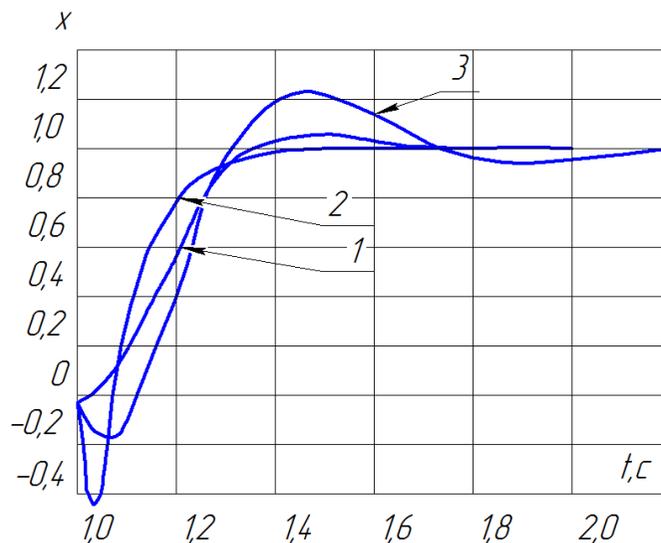


Рис. 2. СПР: 1 – аналоговая; 2 – дискретная с коррекцией; 3 – дискретная без коррекции

Соответствующая выражению (3) амплитудно-частотная характеристика системы в области псевдочастот [3]  $j\lambda$  примет вид

$$W_p(j\lambda) = \frac{6,25(1 - j\lambda 0,08)(1 + j\lambda 0,024)}{j\lambda(1 + j\lambda 0,105)}. \quad (4)$$

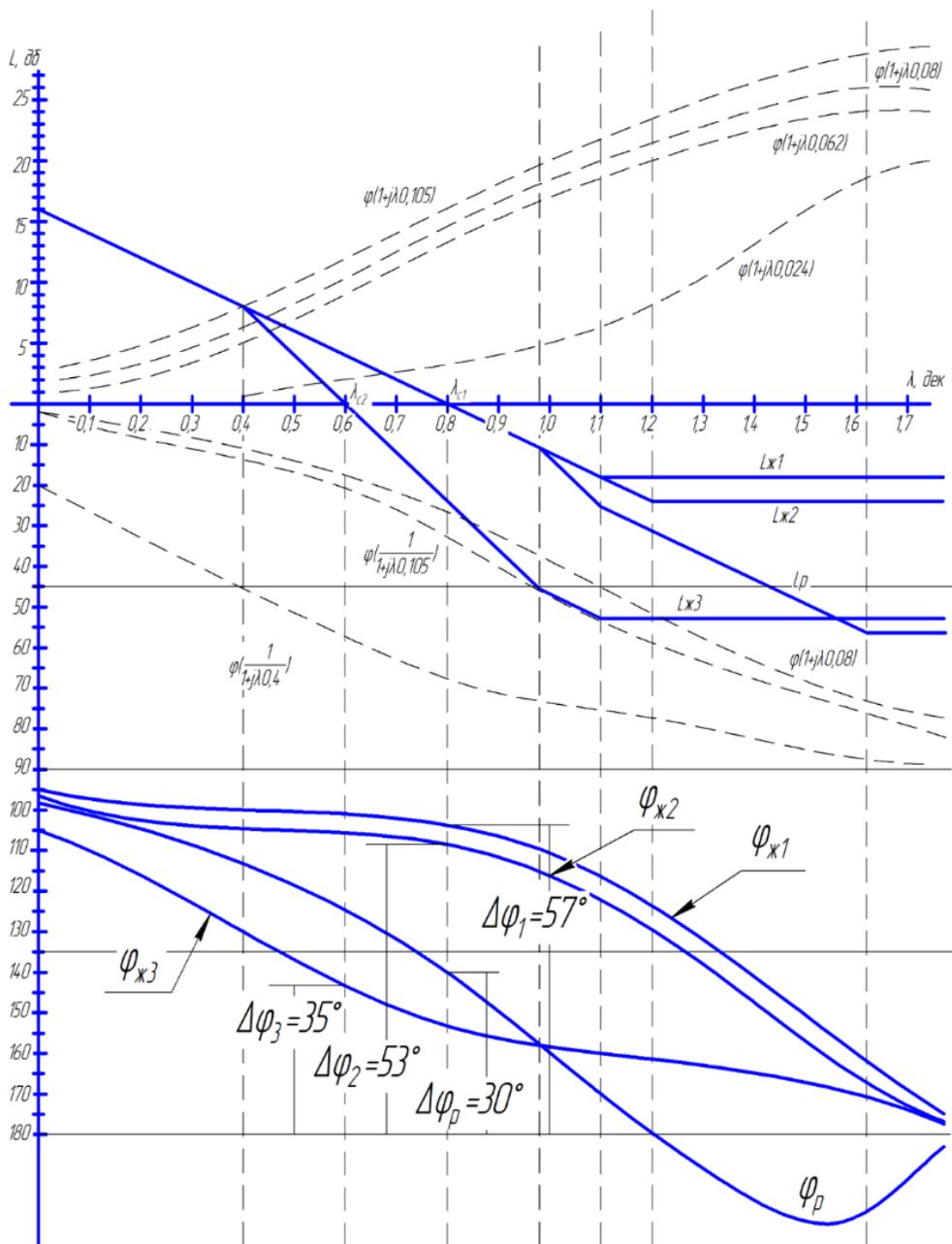


Рис. 3.  $L_p$  – ЛАЧХ разомкнутой системы;  $L_{ж1}$  – желаемая ЛАЧХ для  $W_{ж1}(j\lambda)$ ;  $L_{ж2}$  – желаемая ЛАЧХ для  $W_{ж2}(j\lambda)$ ;  $L_{ж3}$  – желаемая ЛАЧХ для  $W_{ж3}(j\lambda)$ ;

По выражениям (2) и (4) на рис. 3 построены соответствующие ЛАФЧХ. Данные для построения имеют следующие значения:

$$20\lg 6,25 \approx 16 \text{ дБ}; \lambda_1 = \frac{1}{T/2} = \frac{1}{0,08} = 12,5 \text{ с}^{-1}; \lg \lambda_1 = \lg 12,5 \approx 1,1 \text{ дек};$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{0,024} = 41,66 \text{ с}^{-1}; \lg \lambda_2 = \lg 44,66 \approx 1,62 \text{ дек};$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{T_3} = \frac{1}{0,105} = 9,524 \text{ с}^{-1}; \lg \lambda_3 = \lg 9,524 \approx 0,98 \text{ дек};$$

$$\lambda_{cp} = \frac{2}{T} = \frac{2}{0,16} = 12,5 \text{ с}^{-1}; \lg \lambda_{cp} = \lg 12,5 \approx 1,1 \text{ дек}.$$

ЛАФЧХ дискретной системы позволяет построить переходный процесс (кривая 2 на рис. 2), откуда следует, что в системе возникли колебания. Это делает переходный процесс затянутым относительно аналогового прототипа примерно в 2 раза ( $t_p = 0,7$  с против  $t_p = 0,32$  с), а перерегулирование составило  $\sigma \% \approx 25 \%$ .

Таким образом, введение дискретного элемента в структуру аналоговой системы приводит к ухудшению ее динамических показателей качества [5]. Это особенно касается электроприводов подачи прецизионных станков. В таких электроприводах очень важно обеспечить односторонний подход к заданной координате. Это объясняется возможной компенсацией влияния вредных нелинейностей, в частности люфта, в кинетической передаче движения от электродвигателя к подвижному узлу [6]. Кроме того, нужно стараться обеспечить быстрдействие не хуже, чем в аналоговом прототипе. На основании этих требований и необходимо построить желаемую ЛАФЧХ разомкнутой системы в области псевдочастот.

Чтобы цифровая система оставалась астатической, необходимо, чтобы желаемая характеристика имела вид, показанный на рис. 3 в виде  $L_{ж1}, L_{ж2}, L_{ж3}$ . Проведем анализ численным методом с последующим обобщением. Для анализа принято:

$$W_{рж1}(j\lambda) = \frac{6,25(1 - j\lambda 0,08)(1 + j\lambda 0,08)}{j\lambda(1 + j\lambda 0,08)}; \quad (5)$$

$$W_{рж2}(j\lambda) = \frac{6,25(1 - j\lambda 0,08)(1 + j\lambda 0,062)}{j\lambda(1 + j\lambda 0,08)}; \quad (6)$$

$$W_{рж3}(j\lambda) = \frac{6,25(1 - j\lambda 0,08)(1 + j\lambda 0,105)}{j\lambda(1 + j\lambda 0,04)}. \quad (7)$$

В выражениях (5–7)  $W_{рж1-3}$  – желаемые передаточные функции разомкнутой системы в области псевдочастот. Соответствующие ЛАФЧХ показаны на рис. 3. Представив соответствующие им Z-преобразования, получим

$$W_{рж1}(z) = \frac{0,5(1 - \frac{z-1}{z+1})}{\frac{z-1}{z+1}} = \frac{1}{z-1}.$$

Желаемая передаточная функция замкнутой системы:

$$W_{зж1}(z) = \frac{W_{рж1}}{1 + W_{рж1}} = \frac{1}{z}.$$

Переходный процесс в форме Z-преобразования при единичном скачкообразном воздействии  $1(z) = \frac{z}{z-1}$  представим в виде

$$X(z) = 1(z) \cdot W_{зж1}(z) = \frac{z}{z-1} \cdot \frac{1}{z} = \frac{1}{z-1}.$$

Отсюда значение выходной величины в дискретные моменты времени

$$X[nT] = \frac{1}{(z-1)} \cdot (z-1) = 1; \quad X[nT] = \frac{1}{(z-1)} = z^{-1} + z^{-2} + z^{-3} \dots$$

Таким образом, имеем апериодический переходный процесс, заканчивающийся за один период  $T = 0,16$  с. Аналогичным образом анализируем две другие передаточные функции:

$$W_{рж2}(z) = \frac{0,5 \cdot 0,225 \cdot (7,9z + 1)}{z^2 - z},$$

откуда

$$W_{зж2}(z) = \frac{0,89z + 0,1125}{z^2 - 0,11125z + 0,1125};$$

$$X(z) = 1(z) \cdot W_{зж2}(z) = \frac{z}{z-1} \cdot \frac{0,89z + 0,1125}{z^2 - 0,11125z + 0,1125}.$$

Корни характеристического уравнения замкнутой системы:

$$z_1 = 0,056 + j0,33; \quad z_2 = 0,056 - j0,33;$$

корни внутри окружности единичного радиуса – система устойчива. При  $z \rightarrow 1$  получим:

$$X[nT] = \frac{0,89z^2 + 0,1125z}{z^3 - 0,11125z^2 + 0,1125z - z^2 + 0,11125z - 0,1125} = \\ = 0,89z^{-1} + 1,1z^{-2} + 1,02z^{-3} + 0,99z^{-4} + 0,905z^{-5} + 0,897z^{-6} + 0,903z^{-7} + 0,903z^{-8}.$$

Процесс имеет перерегулирование  $\approx 10\%$ , что недопустимо для позиционно-следящего электропривода.

$$W_{рж3}(z) = \frac{0,5 \cdot 2(1,13z + 0,87)}{(z-1)(6z-4)};$$

$$W_{зж3} = \frac{0,18(1,3z + 1)}{(1,232z^2 - 1,82z + 1)}.$$

Корни характеристического уравнения замкнутой системы:

$$z_1 = 0,74 + j0,515; \quad z_2 = 0,74 - j0,515;$$

корни уравнения внутри единичной окружности – система устойчива, но т.к. корни комплексные, то будет иметь место перерегулирование. При  $z \rightarrow 1$  получим:

$$X[nT] = \frac{0,234z^2 + 0,18z}{1,232z^3 - 3,052z + 2,82z - 1} = \\ = 0,19z^{-1} + 0,62z^{-2} + 1,1z^{-3} + 1,45z^{-4} + 1,57z^{-5} + 1,47z^{-6} \dots$$

В этом случае также получили колебательный процесс.

Для обобщающих выводов по выбору эквивалентной постоянной времени в области высоких частот проведем анализ показателей качества для случаев  $T = 0,16$  с,  $T = 0,08$  с,  $T = 0,24$  с. Анализ проводим путем моделирования в среде Matlab [7]. По данным таблицы представлены графики зависимостей перерегулирования, времени переходного процесса соответственно:  $\sigma\% = f\left(\frac{T_{\text{экв}}}{T/2}\right)$ ,

$$t_p = f\left(\frac{T_{\text{экв}}}{T/2}\right).$$

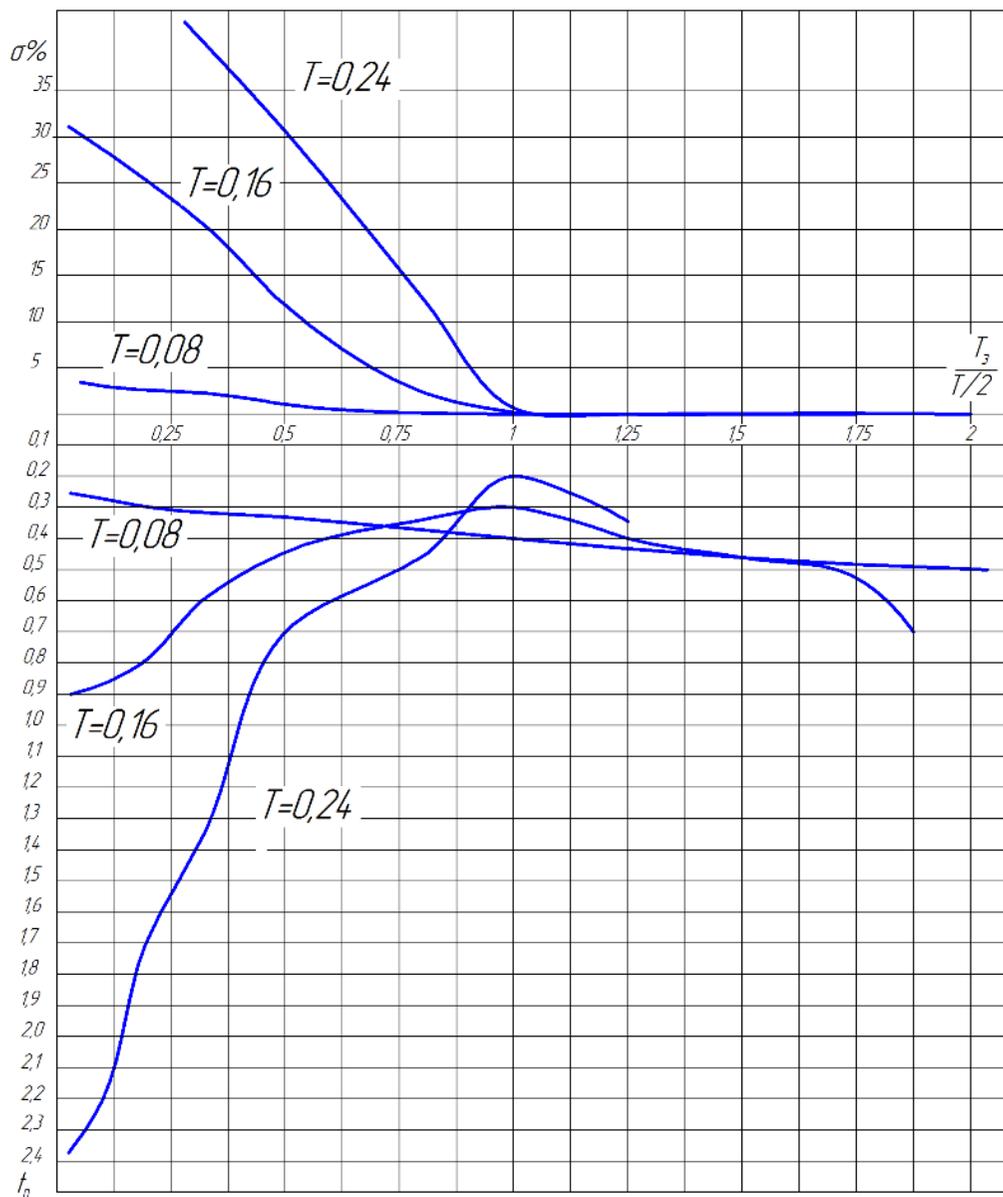


Рис. 4. Диаграмма качества управления

## Динамические показатели качества управления

T <sub>э</sub> /T	T/2 = 0,04		T/2 = 0,12		
	σ %	t <sub>p</sub> , с	σ %	t <sub>p</sub> , с	
0,05	2,5	0,28	74	2,38	3 периода колебаний
0,1	2	0,29	67	2,25	3 периода колебаний
0,2	1,2	0,3	56	1,7	2 периода колебаний
0,3	0,5	0,31	49	1,33	2 периода колебаний
0,5	0	0,33	30	0,85	1 период колебаний
0,775	0	0,36	12	0,46	–
1,0	0	0,4	0	0,18	–
1,125	0	0,41	0	0,26	–
1,25	0	0,42	0	0,35	–
1,5	0	0,45	–	–	Неуст.

Анализ показывает, что оптимальной величиной T<sub>э</sub> является отношение  $\frac{T_{экв}}{T/2} = 1$ , т. е.  $T_{экв} = \frac{T}{2}$ .

Процессы и при больших соотношениях являются аperiодическими, но при этом возрастает время переходного процесса. Таким образом, общий вывод таков: для астатической ЦСАУ, обеспечивающей односторонний подход к заданной координате, желаемой передаточной функцией в области псевдочастот является

$$W_{жс}(j\lambda) = \frac{6,25(1 - 0,08j\lambda)}{j\lambda}, \text{ или в общем виде } W_{жс}(j\lambda) = \frac{K(1 - \frac{T}{2}j\lambda)}{j\lambda}.$$

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайлов О.П., Орлова Р.Т. Современный электропривод станков с ЧПУ и промышленных роботов. – М.: Высшая школа, 1989. – 111 с.
2. Лысов В.Е. Теория автоматического управления. – М.: Машиностроение, 2010. – 500 с.
3. Рапопорт Э.Я. Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока. Конспект лекций. – Куйбышев, 1985. – 56 с.
4. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. – М.: Машиностроение-3, 1978. – 736 с.
5. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – СПб.: Профессия, 2003. – 740 с.
6. Теория автоматического управления / под ред. чл.-корр. АН СССР Ю.М. Соломенцева. – М.: Машиностроение, 1991. – 544 с.
7. Katalin Popovici, Pieter J. Mosterman. Real-Time Simulation Technologies: Principles, Methodologies, and Applications. – CRC Press 2012, Print ISBN: 978-1-4398-4665-0, eBook ISBN: 978-1-4398-4723-7, DOI: 10.1201/b12667.

Статья поступила в редакцию 27 января 2017 г.

## INFLUENCE ANALYSIS OF DISCRETE POSITION-CONTROL DRIVE ON CORRECTIVE UNIT SYNTHESIS

*V.E. Lysov, I.P. Kolesnikov*

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

*At present, digital automatic control systems have become the most widely used electric drives of the main movement and supply. A special place is occupied by position-tracking systems for feed drives. The latter provide technological processes of processing details for shapes with complex geometry. Insertion of digital systems will lead to the additional error. Therefore, it is necessary to correct the system depending on the frequency of extrapolator in the automatic control system in the position loop. The correction technique a digital system providing a one-sided approach to a given coordinate is considered in the paper, which is especially important, for example, for precision machine feeders to avoid the influence of harmful nonlinearity and a luff, in particular.*

**Keywords:** *electrical drives, transfer function, digital system, corrective unit, synthesis, discrete component, digital control, zero-order extrapolator.*