

tion. Pareto optimal relay controller parameters are determined as a result of solving the vector optimization problem, which minimizes the amount of OEE warm-up time and the number of the heater switchings. Experiments confirm the compliance of all the constraints applied to the temperature gradients of OEE design elements. The proposed technique was used for designing of the thermal stabilization system for a diode-pumped solid-state laser.

Keywords: optics, equipment, thermal stabilization, physical model, relay controller, Pareto optimality

For citation:

Arakcheev P. V., Bezdelov V. L., Buryi E. V. Determination of the Relay Controller Parameters for the Optoelectronic Thermal Stabilization System Operating at Low Ambient Temperatures, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 9, pp. 678–685.

DOI: 10.17587/mau.17.678-685

References

1. Dubinovskij A. M., Pankov E. D. *Stendovye ispytaniya i regulirovka optico-electronnyh priborov* (Bench testing and adjustment of optoelectronic devices), Leningrad, Mashinostroenie, 1996, 152 p. (in Russian).

2. Piprek J. ed. *Optoelectronic devices: Advanced Simulation and Analysis*, USA, Springer, 2005, 452 p.

3. Ahmad A. ed. *Optomechanical Engineering Handbook*, Boca Raton, CRC Press LLC, 1999, 416 p.

4. Pontryagin L. S., Boltyanskij V. G., Gamkrelidze R. V., Mishenko V. F. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh processov* (Mathematical theory of optimal processes), Moscow, Nauka, 1983, 392 p. (in Russian).

5. Kuzmin M. P. *Electricheskoe modelirovanie nestacionarnyx processov teploobmena* (Electrical simulation of nonstationary heat exchange processes), Moscow, Energy, 1974, 416 p. (in Russian).

6. Podinovcky V. V., Nogin V. D. *Pareto-optimal'nye resheniya mnogokritererial'nykh zadach* (Pareto-optimal solutions of multicriterion problems), Moscow, Nauka, 1982, 255 p. (in Russian).

7. Diode-pumped solid state laser Implan-10, available at: http://www.lilis.bmstu.ru/Diode-pumped_solid_state_laser_Implan-10.

УДК 621.92

DOI: 10.17587/mau.17.685-689

И. С. Сидоров, аспирант, sidoov@rambler.ru, В. Е. Лысов, д-р техн. наук, проф., Самарский государственный технический университет

Анализ влияния частоты квантования цифрового регулятора положения позиционно-следящего электропривода на динамические показатели качества управления

Исследован процесс формирования погрешности в зависимости от частоты квантования цифровой части числового программного управления, реализующего программу движения подвижного органа станка. Проведено сравнение системы с непрерывным прототипом, принятым за идеал. Согласно проведенным исследованиям и с использованием теоремы Шеннона — Котельникова получено соотношение, которое позволяет повысить производительность технологических операций при обработке сложных профилей.

Ключевые слова: экстраполятор нулевого порядка, следящий электропривод, дискретная система, система подчиненного регулирования, цифроаналоговый преобразователь, частота квантования, аналоговый прототип

Позиционно-следящий электропривод нашел широкое применение в металлообработке, сборочных производствах, в сварочных процессах [1] для реализации перемещения подвижных узлов.

В предлагаемой статье анализируются динамические показатели качества управления в зависимости от частоты квантования цифровой части числового программного управления, реализующего программу движения подвижного органа станка [2]. Частота квантования определяется экстраполятором нулевого порядка, входящим в состав цифроаналогового преобразователя (ЦАП) [3]. Сравнение бу-

дем проводить с непрерывным прототипом системы. Структурная схема привода подачи строится по принципу систем с подчиненным регулированием [4] и включает контур тока, скорости и положения. Динамические показатели качества системы при технологических операциях обработки детали определяет контур положения. Структурная схема позиционно-следящего электропривода, принятого в данном исследовании, показана на рис. 1 [5].

На рис. 1 обозначено: $W_{\text{ЭКС}}(p)$ — передаточная функция экстраполятора нулевого порядка, K — коэффициент передачи аналоговой части системы, T_1 — постоянная времени оптимизированного контура положения, p — оператор Лапласа, $X_{\text{ЗД}}(p)$ — изображение заданного значения координаты, $X(p)$ — изображение ее фактического значения.

Анализ влияния частоты квантования особенно важен для прецизионных установок, например станков класса С при обработке сложных профилей, которые можно аппроксимировать фрагмен-

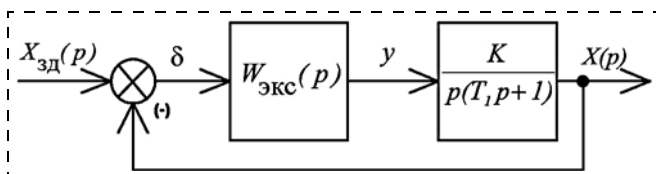


Рис. 1. Структурная схема электропривода

тами окружности радиусом 1...2,5 мм. Частота сигнала задания для электропривода подачи подвижного органа (например, салазок) $\omega_{зд}$ определяется следующим выражением:

$$\omega_{зд} = \frac{V_{зд}}{A_{зд}}, \quad (1)$$

где $V_{зд}$ — линейная скорость подвижного органа относительно инструмента, $A_{зд}$ — амплитуда. Например, для позиционно-следающего привода салазок станка модели 2440СФ4 линейная скорость подачи стола и салазок составляет $V_{зд} = 2$ м/мин при обработке легких материалов и $V_{зд} = 0,5$ м/мин — при обработке тяжелого материала. При $A_{зд} = 1...2,5$ мм согласно зависимости (1) весь спектр частот $\omega_{зд}$ для выполнения технологических операций с требуемыми технологическими скоростями $V_{зд}$ составляет от $8,3 \text{ с}^{-1}$ до $33,3 \text{ с}^{-1}$ (0,76...1,52 дек).

Сравним область частот сигнала задания с областью частот, ограниченной периодом частоты квантования экстраполятора нулевого порядка. Оценим влияние частоты квантования на устойчивость, воспроизведение сигнала задания, погрешность в воспроизведении сигнала задания. При исследовании используем Z -преобразование с последующим переходом в плоскость псевдочастот λ . Это дает возможность использовать амплитудно-частотные характеристики.

Передающая функция рассматриваемой системы в разомкнутом состоянии в форме Z -преобразования имеет вид [6]

$$W_p(z) = \frac{K[z(T - T_1 + T_1 d) + T_1(1 - d) - dT]}{(z - 1)(z - d)}, \quad (2)$$

где T — период частоты квантования экстраполятора; T_1 — постоянная времени апериодического звена непрерывной части системы; K — коэффициент передачи системы в разомкнутом состоянии;

$d = e^{-\frac{T}{T_1}}$. Зависимость (2) позволяет оценить влияние T на устойчивость системы. Для оценки вос-

произведения сигнала задания необходимо анализировать передаточную функцию системы в замкнутом состоянии:

$$W_3(z) = \frac{W_p(z)}{1 + W_p(z)} = \frac{K[Z(T - T_1 + T_1 d) + T_1(1 - d) - dT]}{(Z - 1)(Z - d) + K[Z(T - T_1 + T_1 d) + T_1(1 - d) - dT]}. \quad (3)$$

Для оценки погрешности в воспроизведении сигнала задания необходимо анализировать передаточную функцию системы по ошибке:

$$W_8(z) = \frac{1}{1 + W_p(z)} = \frac{(Z - 1)(Z - d)}{(Z - 1)(Z - d) + K[Z(T - T_1 + T_1 d) + T_1(1 - d) - dT]}. \quad (4)$$

Зависимости (2)–(4) в полной мере способствуют анализу системы в области псевдочастот λ . Для этого в выражениях передаточных функций в форме Z -преобразования заменяем $Z = \frac{1+w}{1-w}$ и переходим к билинейному преобразованию, затем, заменяя $w = j\lambda \frac{T}{2}$, переходим в частотную плоскость в функции абсолютной псевдочастоты λ .

Следует отметить, что анализ амплитудно-частотных характеристик в области псевдочастот λ , полученных из выражений (2)–(4), в общем виде практически невозможно осуществить. Поэтому анализ будем проводить численным методом. Для этого было принято, что аналоговая система автоматического управления (САУ) имеет передаточную функцию в разомкнутом состоянии $W_p(p) = \frac{6,8}{p(0,8p + 1)}$ [5]. Зна-

чения периода частоты квантования экстраполятора выбирали в диапазоне: $T = 0,04 \text{ с}$; $0,08 \text{ с}$; $0,16 \text{ с}$; $0,3 \text{ с}$; $0,4 \text{ с}$; $0,45 \text{ с}$. При $T = 0,5 \text{ с}$ система становится неустойчивой. Результаты расчетов по зависимостям (2)–(4) для значения $T = 0,04 \text{ с}$ сведены в табл. 1.

Таблица 1

Период дискретности экстраполятора "0" порядка T , с	Передающая функция разомкнутой системы $W_p(z) = \frac{x(z)}{x_{зд}(z)}$	Амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой системы $W_p(j\lambda \frac{T}{2})$ $\lambda, \text{ с}^{-1}; K, \text{ дБ}; T, \text{ с}$	Амплитудно-фазовая частотная характеристика замкнутой системы $W_3(j\lambda \frac{T}{2})$ $\lambda, \text{ с}^{-1}; \lambda, \text{ дек}; K, \text{ дБ}; T, \text{ с}$	Амплитудно-фазовая частотная характеристика системы по ошибке $W_8(j\lambda \frac{T}{2})$ $\lambda, \text{ с}^{-1}; K, \text{ дБ}; T, \text{ с}$
0,04	$\frac{0,05(1,1Z + 1)}{(Z - 1)(Z - 0,6)}$	$\frac{6,8(1 - j0,02\lambda)}{j\lambda(1 + 0,08\lambda)}$; $20\lg K = 20\lg 6,8 = 16,25$; $\lambda_1 = \frac{1}{0,02} = 50$; $\lg 50 = 1,7$; $\lambda_2 = \frac{1}{0,08} = 12,5$; $\lg 12,25 = 1,097$	$\frac{1 - j0,02\lambda}{0,108^2(j\lambda)^2 + 0,127j\lambda + 1}$ $20\lg K = 20\lg 1 = 0$; $\lambda_1 = \frac{1}{0,02} = 50$; $\lg 50 = 1,7$; $\lambda_2 = \frac{1}{0,108} = 9,26$; $\lg 9,26 = 0,966$; $c = 0,58$	$\frac{0,147j\lambda(1 + j\lambda 0,08)}{0,0108^2(j\lambda)^2 + 0,127j\lambda + 1}$ $\lambda_1 = \frac{1}{0,08} = 12,5$; $\lg 12,5 = 1,1$; $c \approx 0,58$; $\lambda_2 = \frac{1}{0,108} = 9,26$; $\lg 9,26 = 0,966$; $20\lg K = 20\lg 0,147 = -16,8$

Период дискретности экстраполятора "0" порядка T , с	Передаточная функция разомкнутой системы $W_p(z) = \frac{x(z)}{x_{зд}(z)}$	Амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой системы $W_p(j\lambda \frac{T}{2})$ λ , дек, K , дБ	Амплитудно-фазовая частотная характеристика замкнутой системы $W_3(j\lambda \frac{T}{2})$ λ , дек, K , дБ	Амплитудно-фазовая частотная характеристика системы по ошибке $W_8(j\lambda \frac{T}{2})$ λ , дек, K , дБ
0,08	$\frac{0,143(1,39Z+1)}{(Z-1)(Z-0,366)}$	$20\lg K = 20\lg 6,8 = 16,25$; $\lambda_1 = 1,4; \lambda_2 = 1,065$	$20\lg K = 20\lg 1 = 0$; $\lambda_1 = 1,4; \lambda_2 = 0,95; c \cong 0,51$	$20\lg K = 20\lg 0,147 = -16,8$; $\lambda_1 = 1,1; \lambda_2 = 0,95; c \cong 0,51$
0,16	$\frac{0,325(1,88Z+1)}{(Z-1)(Z-0,13)}$	$20\lg K = 20\lg 6,8 = 16,25$; $\lambda_1 = 1,097; \lambda_2 = 1,62; \lambda_3 = 0,98$	$20\lg K = 20\lg 1 = 0$; $\lambda_1 = 1,1; \lambda_2 = 1,62; \lambda_3 = 0,935; c \cong 0,39$	$20\lg K = 20\lg 0,147 = -16,8$; $\lambda_1 = 1; \lambda_2 = 0,935; c \cong 0,39$
0,3	$\frac{0,48(3,09Z+1)}{(Z-1)(Z-0,023)}$	$20\lg K = 20\lg 6,8 = 16,25$; $\lambda_1 = 0,82; \lambda_2 = 0,8; \lambda_3 = 1,12$	$20\lg K = 20\lg 1 = 0$; $\lambda_1 = 0,82; \lambda_2 = 0,96; \lambda_3 = 1,12; c \cong 0,35$	$20\lg K = 20\lg 0,147 = -16,8$; $\lambda_1 = 0,8; \lambda_2 = 0,96; c \cong 0,35$
0,4	$\frac{0,52(4,21Z+1)}{(Z-1)(Z-0,0066)}$	$20\lg K = 20\lg 6,8 = 16,25$; $\lambda_1 = 0,7; \lambda_2 = 0,92; \lambda_3 = 0,7$	$20\lg K = 20\lg 1 = 0$; $\lambda_1 = 0,92; \lambda_2 = 0,7; \lambda_3 = 1,16; c \cong 0,51$	$20\lg K = 20\lg 0,147 = -16,8$; $\lambda_1 = 0,7; \lambda_2 = 1,17; c \cong 0,5$
0,45	$\frac{0,534(4,74Z+1)}{(Z-1)(Z-0,0035)}$	$20\lg K = 20\lg 6,8 = 16,25$; $\lambda_1 = 0,65; \lambda_2 = 0,84; \lambda_3 = 0,65$	$20\lg K = 20\lg 1 = 0$; $\lambda_1 = 0,65; \lambda_2 = 0,84; \lambda_3 = 1,81; c \cong 2$	$20\lg K = 20\lg 0,147 = -16,8$; $\lambda_1 = 0,65; \lambda_2 = 1,81; c \cong 2$
0,5	$\frac{0,54(5,33Z+1)}{(Z-1)(Z-0,0019)}$	$20\lg K = 20\lg 6,8 = 16,25$; $\lambda_1 = 0,77; \lambda_2 = 0,6; \lambda_3 = 0,6$	$20\lg K = 20\lg 1 = 0$; $\lambda_1 = 0,77; \lambda_2 = 0,6; \lambda_3 = 1,11; c \cong 0,435$	$20\lg K = 20\lg 0,147 = -16,8$; $\lambda_1 = 0,6; \lambda_2 = 1,11; c \cong 0,435$

Аналогично расчетам, сведенным в табл. 1, получены результаты для других периодов частоты квантования. Результаты расчетов сведены в табл. 2.

По данным табл. 1, 2 на рис. 2 построены логарифмические амплитудно-фазовые частотные характеристики (ЛАФЧХ) разомкнутой системы для выбранных значений T и ЛАФЧХ непрерывного прототипа.

ЛАФЧХ на рис. 2 показывает, что при $T = 0,16$ с запас устойчивости $\Delta\varphi$ снижается до 30° и не удовлетворяет техническим требованиям по запасу устойчивости ($45...60^\circ$).

Передаточная функция аналогового прототипа в замкнутом состоянии для целей сравнения с дискретной системой имеет вид

$$W_3(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{1}{0,01166p^2 + 0,147p + 1}$$

Передаточная функция исследуемой системы по ошибке имеет вид

$$W_8(p) = \frac{1}{1 + W_p(p)} = \frac{0,147p(0,08p + 1)}{0,01176p^2 + 0,147p + 1}$$

По данным расчетов, представленных в табл. 1, 2, на рис. 3, 4 представлены соответствующие логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ) для выбранных значений T замкнутой системы и ЛАЧХ

позиционно-следающего электропривода по ошибке. ЛАЧХ на рис. 4 показывает, что при $T > 0,08$ с происходит существенное отличие в точности воспроизведения заданного сигнала от аналогового прототипа. Данный пример показывает, что наилучшее приближение дискретной САУ и аналогового прототипа происходит при $T \leq 0,08$ с или при

$$\frac{\omega_0}{\omega_c} \geq 12.$$

Поэтому для прецизионных позиционно-следающих систем допустимое отклонение частоты кван-

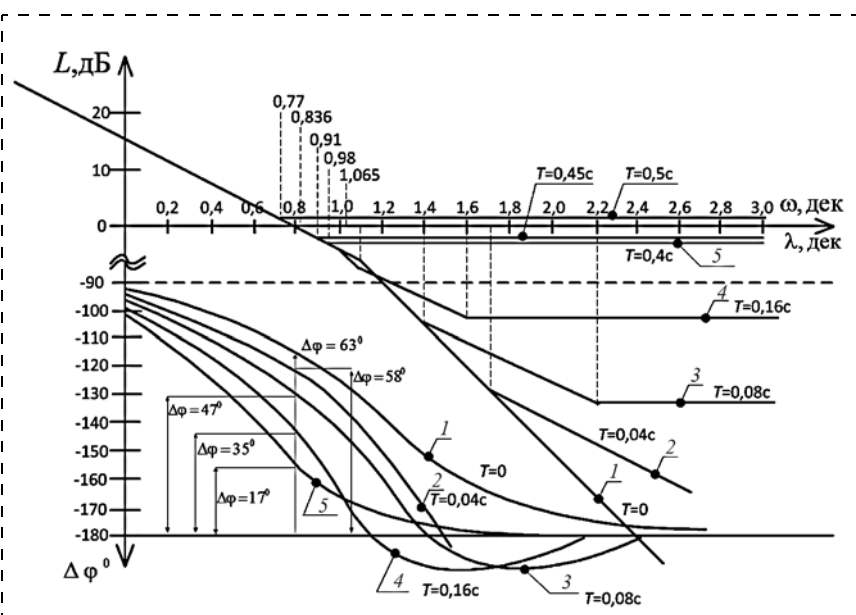


Рис. 2. ЛАФЧХ разомкнутой САУ с экстраполятором "0" порядка: 1 — ЛАФЧХ аналоговой САУ; 2 — ЛАФЧХ дискретной САУ с $T = 0,04$ с; 3 — ЛАФЧХ дискретной САУ с $T = 0,08$ с; 4 — ЛАФЧХ дискретной САУ с $T = 0,16$ с; 5 — ЛАФЧХ дискретной САУ с $T = 0,4$ с

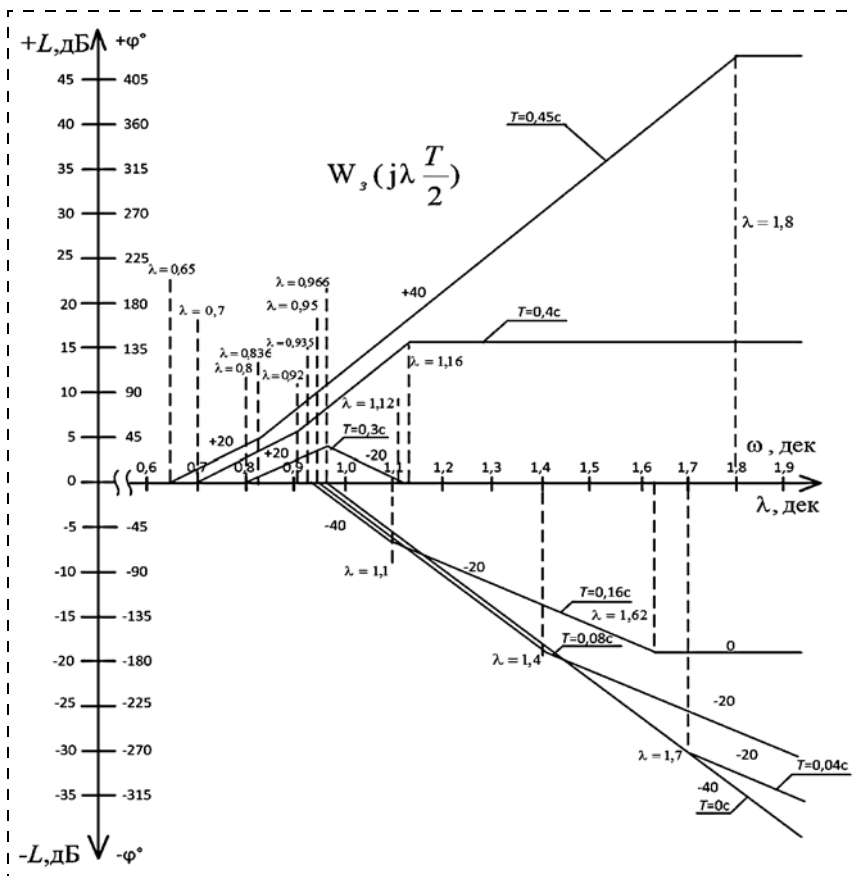


Рис. 3. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика замкнутой системы: $T = 0$ — ЛАЧХ аналоговой САУ; $T = 0,04$ — ЛАЧХ дискретной САУ с $T = 0,04$ с; $T = 0,08$ — ЛАЧХ дискретной САУ с $T = 0,08$ с; $T = 0,16$ — ЛАЧХ дискретной САУ с $T = 0,16$ с; $T = 0,3$ — ЛАЧХ дискретной САУ с $T = 0,3$ с; $T = 0,4$ — ЛАЧХ дискретной САУ с $T = 0,4$ с; $T = 0,45$ — ЛАЧХ дискретной САУ с $T = 0,45$ с

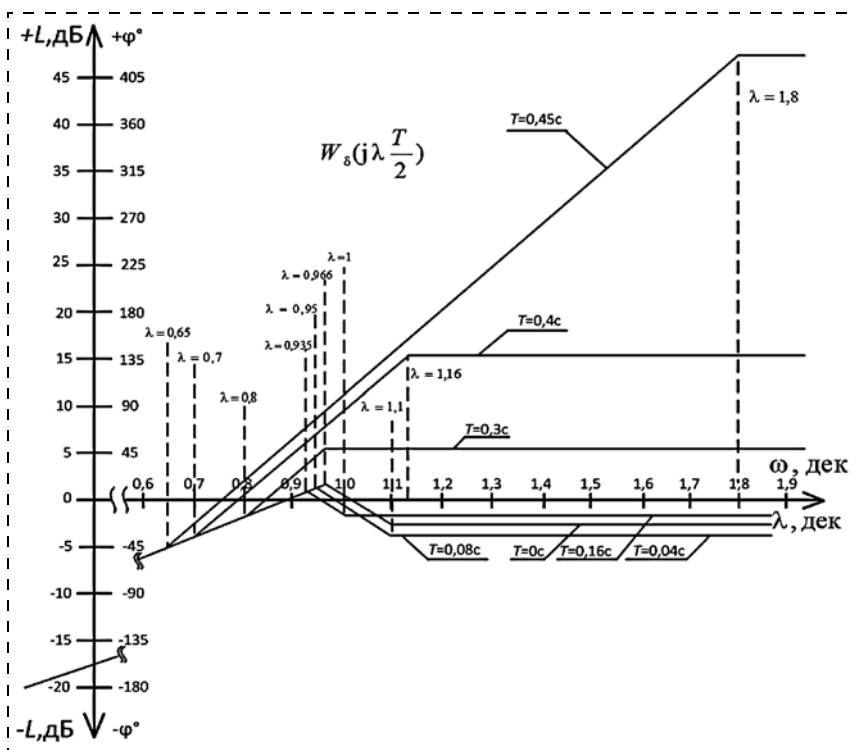


Рис. 4. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика системы по ошибке

тования системы от аналогового прототипа требует более жесткого соотношения между ω_0 и ω_c . Согласно теореме Шеннона — Котельникова это должно быть соотношение $\omega_0 \geq 2\omega_c$ [6]. Как следует из приведенных результатов, для прецизионных систем это соотношение должно быть существенно большим.

Анализ ЛАЧХ, представленных на рис. 4 (обозначения, как и на рис. 3), показывает, что значение ошибки в отработке сигнала задания в упомянутом выше диапазоне частот удовлетворяет техническим требованиям при частоте квантования $T \leq 0,08$ с

или при отношении $\frac{\omega_0}{\omega_c} \geq 12$.

На основании проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. Для повышения производительности технологических операций при обработке сложных профилей необходимо для поддержания постоянной скорости обработки увеличивать частоту ω_0 (уменьшать период частоты квантования экстраполятора), реализуя соотношение $\frac{\omega_0}{\omega_c} \geq 12$.

2. При повышении быстродействия аналоговой части системы необходимо пропорционально увеличивать частоту ω_0 экстраполятора нулевого порядка.

Список литературы

1. Лебедев М. Н., Орлова Р. Т., Пальцев А. В. Следящие электроприводы станков с ЧПУ. М.: Энергоиздат, 1988. 223 с.
2. Xun W. Xu., Stephen T. Newman. Making CNC machine tools more open, interoperable and intelligent — a review of the technologies. Computers in Industry. 2006. Vol. 12. N. 2. P. 141—152.
3. William Bolton. Instrumentation and Control Systems (Second Edition). Newnes, 2015. P. 281—302.
4. Рапопорт Э. Я. Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока. Конспект лекций. Куйбышев, 1985. 56 с.
5. Лысов В. Е., Сидоров И. С. Анализ устойчивости позиционно-следящего электропривода с учетом дискретности экстраполятора нулевого порядка // Вестник СамГТУ. Сер. "Технические науки". 2015. № 3 (47). С. 142—148.
6. Лысов В. Е. Теория автоматического управления. М.: Машиностроение, 2010. 500 с.

Analysis of the Influence of the Sampling Rate Position Regulator of the Position Servo Electric Drive on the Dynamic Parameters of the Quality Control

I. S. Sidorov, sidoov@rambler.ru, V. E. Lysov,
Samara State Technical University, Samara, 443100, Russian Federation

Corresponding author: Sidorov Igor S., Postgraduate Student,
Samara State Technical University, Samara, 443100, Russian Federation,
e-mail: sidoov@rambler.ru

Received on April 04, 2016

Accepted on June 21, 2016

The paper studies the stability and dynamic quality parameters of the control of the digital positional precision electric drive depending on the frequency of the digital part quantization of the numerical control. The drive provides a program of movement and positioning precision of the movable body of the machine. Structurally, the digital actuator is designed as a three-loop system of subordinate regulation: current loop, speed loop and position loop. The astatic position loop has the greatest sampling period of the digital part of the system. The article analyzes the influence of the minimum programmable movement in the astatic position loop with the minimized power and speed on stability of the system circuits and the quality control indicators: deregulation and transition time. It also analyzes the stability of the sampled-data system on the transfer-function for the system in the open position in the form of Z-transformation based on the Shannon—Kotelnikov theorem. Herewith, there is an analysis of the reproduction accuracy of the given difficult path by the approximated part of a small radius circle and a playback accuracy analysis. The analysis is based on the study of the transfer function of the system in the closed state and the error transfer function state, respectively, in the form of Z-transformation. Z-transformation and bilinear transformation make it possible to analyze the processes in the system in the field of pseudo-frequencies and to present the results of the research in the form of a logarithmic amplitude—phase—frequency characteristic. These characteristics clearly and convincingly demonstrate the impact of the minimal programmable movement of the system on the dynamic quality indicators control in comparison with the analog prototype. The study clarified the relationship between the sampling rate of the digital portion of the frequency and bandwidth of the analog part of the system, providing the required accuracy of a complex trajectory of the movable part of the machine. In order to improve the performance of the technological operations it is necessary to maintain a constant and optimal processing speed for the given work material, which is possible by increasing the frequency of a digital quantization of the system in the function of the parameters of the motion path.

Keywords: zero order hold device, servo drive, discrete system, slave control system, digital-to-analog converter, sampling rate, analog prototype, Z-transformation, numerical control

For citation:

Sidorov I. S., Lysov V. E. Analysis of the Influence of the Sampling Rate Position Regulator of the Position Servo Electric Drive on the Dynamic Parameters of the Quality Control, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 10, pp. 685—689.

DOI: 10.17587/mau.17.685-689

References

1. Lebedev M. N., Orlova R. T., Pal'cev A. V. *Sledjashhie jelectroprivody stankov s ChPU* (Follow-up motors CNC), Moscow, Jenergoizdat, 1988, 223 p. (in Russian).
2. Xun W. Xu., Stephen T. Newman. Making CNC machine tools more open, interoperable and intelligent — a review of the

technologies, *Computers in Industry*, 2006, vol. 57, no. 2, pp. 141—152 (in Russian).

3. William Bolton. *Instrumentation and Control Systems* (Second Edition), Newnes, 2015, pp. 281—302.

4. Rapoport Je. Ja. *Sistemy podchinennogo regulirovanija jelectroprivodov postojannogo toka. Konspekt lekcij* (Slave systems control electric DC. Lecture notes), Kujbyshev, 1985, pp. 56 (in Russian).

5. Lysov V. E., Sidorov I. S. *Analiz ustojchivosti pozicionno-sledjashhego jelectroprivoda s uchetom diskretnosti jekstrapoljatora nulevogo porjadka* (Stability Analysis of position — servo actuator based on discreteness extrapolator zero order), *Vestnik SamGTU. Serija "Tehnicheskie nauki"*, 2015, no. 3 (47), pp. 142—148 (in Russian).

6. Lysov V. E. *Teorija avtomaticheskogo upravlenija* (Automatic Control Theory), Moscow, Mashinostroenie, 2010, 500 p. (in Russian).



15-я Международная конференция "АВИАЦИЯ И КОСМОНАВТИКА"

Москва, 14—18 ноября 2016 г.



В рамках III Международной недели авиакосмических технологий "Aerospace Science Week" Московский авиационный институт (НИИ) проводит 15-ю Международную конференцию "Авиация и космонавтика" с целью расширения способов и инструментов научного взаимодействия, выявления новых научно-технических результатов в области авиации и космонавтики, определения новых "точек роста" и прорывных технологий авиакосмической отрасли, выработки стратегии развития отраслевого уровня.

Подробную информацию о конференции см. на сайте:
www.mai.ru/science/aerospace