

УДК 621.92

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ КВАНТОВАНИЯ ЭКСТРАПОЛЯТОРА НУЛЕВОГО ПОРЯДКА

В.Е. Лысов, Я.И. Пешев

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

E-mail: 67lysov@mail.ru, stan-samara@list.ru

Аннотация. Рассмотрена методика определения частоты квантования экстраполятора нулевого порядка в структуре цифровой позиционно-следающей системы. Анализ проводится частотным методом. Амплитудно-частотная характеристика дискретных систем определяется как сумма смещенных амплитудно-частотных характеристик аналоговой части системы. В этой связи необходимо определить частоту смещения амплитудно-частотных характеристик непрерывной части системы с таким расчетом, чтобы их сумма в полосе частот сигнала задания не превышала заданной погрешности относительно аналогового прототипа. Полученное значение частоты квантования экстраполятора позволит определить интервал дискретности.

Ключевые слова: экстраполятор нулевого порядка, амплитудно-частотная характеристика, передаточная функция, частота задания, период дискретизации.

Цифровые позиционно-следающие системы нашли самое широкое распространение в качестве электроприводов подач прецизионных установок, и в частности координатно-расточных станков. Сегодняшние требования к качеству изготовления и обработки деталей для последующих технологических операций непрерывно возрастают и входят в зону 2...3 мкм. Обработка или измерение сложного геометрического профиля детали осуществляется упомянутыми системами. В этой связи предъявляются высокие требования к динамике систем с целью минимизации погрешности цифровой системы относительно аналогового прототипа.

В структуре цифровых позиционно-следающих систем автоматического управления (САУ) присутствует экстраполятор нулевого порядка [1, 2]. Присутствие экстраполятора вносит дополнительную погрешность в воспроизведение сигнала задания. Известно, что амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) дискретного сигнала определяется зависимостью [3]

$$W(e^{jx}) = \frac{1}{T} \sum_{-\infty}^{\infty} W[j(x + 2\pi n)]. \quad (1)$$

Здесь $x = \omega T$, причем ω – частота, T – интервал дискретности, n – номер смещения частоты.

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

Пешев Ярослав Иванович (к.т.н.), старший преподаватель кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».

Формула определяет частотную характеристику дискретной системы $W(e^{jx})$ через частотную характеристику непрерывной части САУ $W(jx)$ при различных значениях частоты. Анализ зависимости (1) указывает на то, что амплитудно-частотная характеристика дискретной системы определяется как сумма смещенных амплитудно-частотных характеристик непрерывной части системы.

Рассмотрим формирование амплитудно-частотной характеристики цифровой системы, представленной на рис. 1.

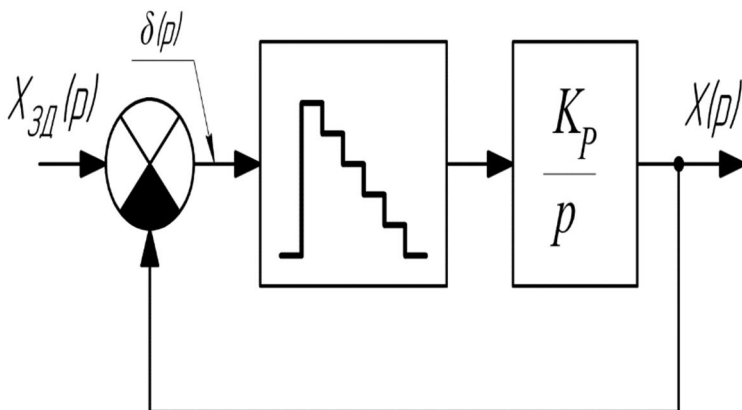


Рис. 1. Структурная схема цифровой позиционно-следящей системы автоматического управления

На структурной схеме обозначена $\frac{K}{p}$ – приведенная передаточная функция аналоговой части системы. Звено со ступенчатой характеристикой представляет дискретную часть системы в виде экстраполятора нулевого порядка.

Структурно упомянутые системы строятся на основе теории систем подчиненного регулирования [4, 5, 6]. Система имеет три контура: это контуры регулирования тока, скорости и положения. Регуляторы контуров – цифровые. Отметим, что регулятор контура скорости должен быть пропорционально-интегральным, обеспечивающим возможность точного позиционирования подвижного узла. Самым инерционным контуром является контур положения, который, в конечном счете, определяет динамические показатели качества управления всей системы. Следует заметить, что в прецизионных станках требуется обеспечить односторонний подход к заданной координате. Это требование в основном диктуется возможностью исключения влияния люфта в кинематической цепи передачи движения органу станка. Для этого случая на рис. 1 представлен контур положения.

Аналоговая часть системы определяет полосу ее пропускания и, следовательно, возможную вариацию частоты сигналов задания.

Передаточная функция замкнутой системы имеет вид

$$W_S(p) = \frac{x(p)}{x_{SD}(p)} = \frac{1}{T_1 p + 1}. \quad (2)$$

Здесь $T_1 = \frac{1}{K_p}$, K_p – коэффициент передачи разомкнутой системы.

На рис. 2 представлены логарифмические амплитудно-частотные характеристики разомкнутой и замкнутой системы. Они позволяют определить полосу пропускания системы и возможный диапазон частот сигнала задания, которые должны воспроизводиться с допустимой погрешностью.

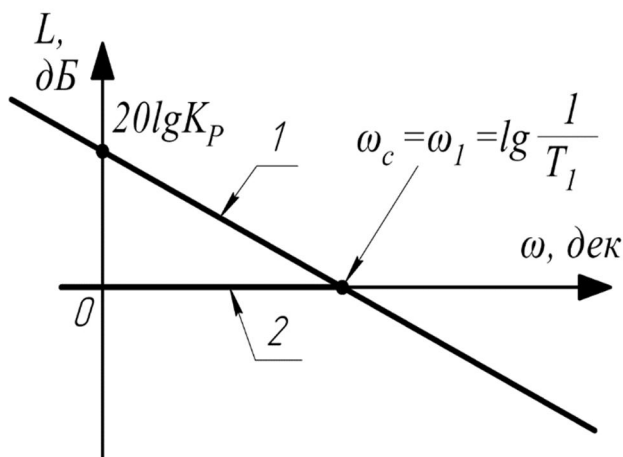


Рис. 2. Логарифмические амплитудно-частотные характеристики цифровой разомкнутой (1) и замкнутой (2) систем автоматического управления

На рис. 2 полоса пропускания сигнала задания обозначена ω_1 (ω_c).

Согласно представленной структурной схеме на рис. 1 процесс формирования амплитудно-частотной характеристики замкнутой системы показан на рис. 3. Формирование упомянутой характеристики осуществляется по зависимости

$$A_S(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{T_1^2 \omega^2 + 1}} \quad (3)$$

На рис. 3 полоса пропускания сигнала задания обозначена как ω_{sd} . Для построения характеристики формула (1) преобразована к виду

$$W(e^{jx}) \approx \frac{1}{T} \{W(jx) + W[j(x - 2\pi n)]\}. \quad (4)$$

Заменив в (4) $x = \omega T$, получим

$$W(e^{j\omega T}) \approx W(j\omega) + W[j(\omega - \omega_0)]. \quad (5)$$

В (5) $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ – частота квантования экстраполятора нулевого порядка.

На рис. 3 показан случай для $n = 3$.

Анализ представленных графических зависимостей указывает на наложение высокочастотных составляющих амплитудно-частотной характеристики системы на низкочастотные составляющие аналоговой части системы (эффект алайзинга).

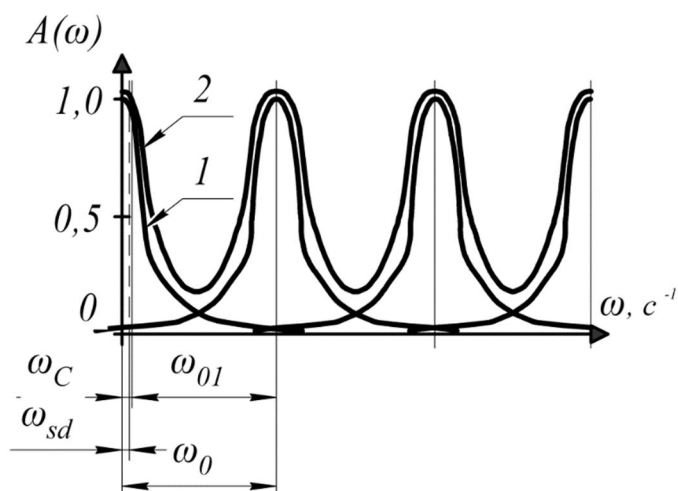


Рис. 3. Формирование амплитудно-частотной характеристики дискретной системы:

- 1 – амплитудно-частотная характеристика аналоговой части системы;
- 2 – амплитудно-частотная характеристика дискретной части системы

Это приводит к возникновению дополнительной погрешности относительно аналогового прототипа. Для того чтобы эта погрешность не превосходила требуемую, необходимо разнести амплитудно-частотные характеристики аналоговой части системы таким образом, чтобы в области частот сигналов задания погрешность укладывалась в допустимую величину. При достаточно больших X модуль частотной характеристики линейной части системы стремится к нулю, поэтому можно учитывать только случай для $n = 1$ и формула (1) может быть представлена в виде

$$W(e^{j\omega T}) \approx W(j\omega) + W[j(\omega - \omega_0)]. \quad (6)$$

Аналогично зависимости (6) определится АЧХ замкнутой системы:

$$W_S(e^{j\omega T}) \approx W_S(j\omega) + W_S[j(\omega - \omega_0)]. \quad (7)$$

Приведенные выше аналитические зависимости по формированию амплитудно-фазовых частотных характеристик позволяют разработать методику определения минимальной частоты квантования экстраполятора нулевого порядка, обеспечивающего заданную точность в воспроизведении сигнала задания на выполнение технологической операции.

Рассмотрим методику определения частоты квантования для позиционно-следящей системы привода подачи прецизионного станка.

Для позиционно-следящих систем особо важной является реализация криволинейного движения, которое характерно для обработки или измерения деталей со сложным профилем [7], например, фрезерования канавки (рис. 4).

Из рассмотрения рис. 4 следует, что возможна обработка с различными радиусами закругления (R_1 – R_3). Это в свою очередь требует формирования различных частот сигналов задания на электропривод подачи, которая определяется по зависимости [8, 9]

$$\omega_{SD} = \frac{V}{R}. \quad (8)$$

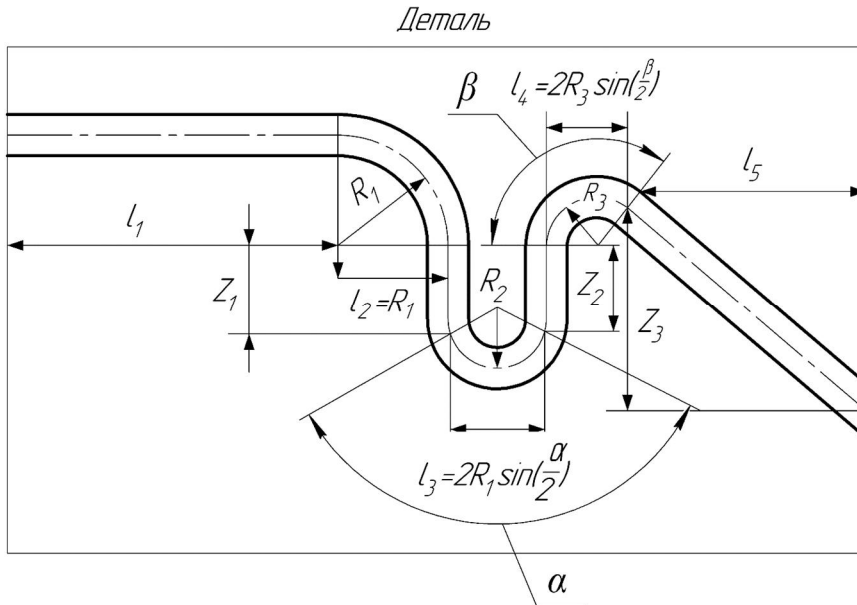


Рис. 4. Аппроксимация сложного криволинейного профиля

В (8) принято: V – линейная скорость резания, R – радиус закругления.

Для передаточной функции замкнутой системы по выражению (2) соответствует амплитудно-частотная характеристика вида (3).

По полученной зависимости можно построить ряд амплитудно-частотных характеристик замкнутой системы смещённых друг относительно друга. При этом погрешность суммы смещённых характеристик в области полосы пропускания непрерывной части системы не должна превышать заданной величины. Это в свою очередь позволит величину погрешности представить в виде

$$\Delta A_S(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{T_1^2 \omega_{01}^2 + 1}}. \quad (9)$$

Здесь ω_{01} – значение частоты смещения спектров АЧХ, обеспечивающей заданную погрешность в начале полосы пропускания системы.

Из зависимости (9) следует определение частоты смещения ω_{01} :

$$\omega_{01} = \sqrt{\frac{1 - \Delta A_S^2}{\Delta A_S^2 T_1^2}}. \quad (10)$$

Для обеспечения заданной погрешности во всем диапазоне сигналов задания необходимо прибавить значение частоты полосы пропускания линейной части системы. Поэтому окончательно выражение для смещения частотного спектра непрерывной части системы, обеспечивающей заданную погрешность, для цифровой системы примет вид

$$\omega_0 = \omega_{01} + \omega_C. \quad (11)$$

Полученная зависимость позволяет определить период квантования экстраполятора нулевого порядка, обеспечивающий заданную погрешность в воспроизведении задающего сигнала:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}. \quad (12)$$

Рассмотренную методику проиллюстрируем конкретным примером. Требуется обработать деталь с заданной скоростью резания $V=0,5$ м/мин. Радиус закругления профиля детали $R=2,5$ мм. Точность обработки должна составлять $\Delta A=2,5$ мкм. Линейная часть САУ имеет следующие параметры: коэффициент передачи разомкнутой САУ $K_p=10$, тогда $T_I=0,1$ с.

Согласно зависимости (10) определим значение ω_{01} :

$$\omega_{01} = \sqrt{\frac{2500 - 2,5}{6,25 \cdot 0,01}} \approx 200 \text{ с}^{-1}.$$

Требуемая частота квантования экстраполятора определится из зависимости (11):

$$\omega_0 = 200 + 10 = 210 \text{ с}^{-1}.$$

По полученному значению частоты квантования определяем период квантования согласно зависимости (12) и получаем $T_0 \approx 0,03$ с.

Таким образом, минимальная частота экстраполятора нулевого порядка должна быть не меньше чем 210 с^{-1} и период квантования не больше чем $T_0 \approx 0,03$ с.

Геометрический анализ указывает на то, что за один период квантования экстраполятора отличие движения инструмента по радиусу от заданного составляет примерно $2,5$ мкм.

Полученная методика была проверена путем имитационного моделирования в среде Matlab [10]. Результаты моделирования подтвердили правильность определения частоты квантования и дискретности экстраполятора для воспроизведения сигнала задания. Результаты имитационного моделирования цифровой САУ, структурная схема которой показана на рис. 1, представлены на рис. 5 для скачкообразного входного сигнала и на рис. 6 для гармонического сигнала с частотой $\omega_{SD} = 2,5 \text{ с}^{-1}$. Параметры линейной части системы приняты как в рассмотренном примере.

Из рис. 5, 6 следует, что процесс позиционирования реализуется по аperiodическому закону, обеспечивающему односторонний подход к заданной координате. Из осциллограммы на рис. 6 следует, что погрешность воспроизведения сигнала задания дискретной системой не превышает значения $2,5$ мкм.

Из рис. 5, 6 следует, что процесс позиционирования реализуется по аperiodическому закону, обеспечивающему односторонний подход к заданной координате. Из осциллограммы на рис. 6 следует, что погрешность воспроизведения сигнала задания дискретной системой не превышает значения $2,5$ мкм.

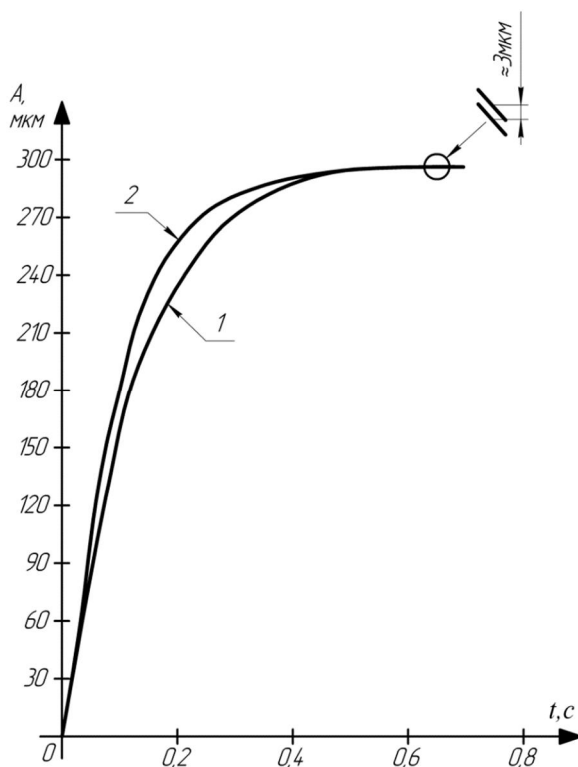


Рис. 5. Воспроизведение скачкообразного сигнала задания аналоговой (1) и цифровой (2) системами автоматического управления

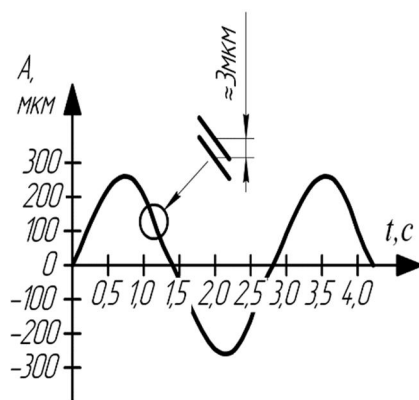


Рис. 6. Воспроизведение гармонического сигнала задания аналоговой и цифровой системами автоматического управления

Значительные успехи в производстве инструмента за рубежом [11, 12] и в России [13] позволяют реализовать высокоскоростную обработку деталей. Например, шпиндели фирм SIP и ASIERA имеют частоту вращения 35000–40000 об/мин, что позволяет высококачественно обрабатывать даже закаленные стали.

Повышение производительности станков, точности позиционирования и плавности перемещения подвижных узлов требует принципиально новых решений САУ. Одним из путей является применение линейных электродвигателей

с цифровой системой управления, использование мехатронных модулей исключают редукторы в кинематической цепи передачи движения узлам станка.

В этой связи повышается быстродействие системы и, следовательно, частота сигнала задания скорости на приводы подач, что, в свою очередь, требует изменений в структуре аналоговой части системы. В этом случае следует увеличивать быстродействие [14, 15] аналогового прототипа таким образом, чтобы сигнал задания не выходил за полосу пропускания линейной части.

Выводы

1. Повышение производительности прецизионных металлорежущих станков, а также динамической точности воспроизведения сигнала задания цифровыми позиционно-слеящими системами требует обеспечения частоты квантования экстраполятора нулевого порядка в соответствии с технологическими требованиями по обработке детали или ее измерению.

2. Предложенная методика определения минимальной частоты квантования экстраполятора нулевого порядка обеспечивает требуемую точность воспроизведения сигнала задания относительно аналогового прототипа.

3. При повышении быстродействия исполнительных электродвигателей в аналоговой части системы следует увеличивать частоту квантования экстраполятора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лысов В.Е., Сидоров И.С.* Анализ влияния частоты квантования цифрового регулятора положения позиционно-слеящего электропривода на динамические показатели качества управления // Мехатроника, Автоматизация, Управление. – 2016. – Т. 17. – № 10. – С. 685–689.
2. *Терехов В.М.* Дискретные и непрерывные системы управления в электроприводах: учеб. пособие по курсу «Системы управления электроприводами». – М.: МЭИ, 1989. – 80 с.
3. Теория автоматического регулирования. Кн. 2: Анализ и синтез линейных непрерывных и дискретных систем автоматического регулирования / Под ред. В.В. Солодовникова. – М.: Машиностроение, 1967. – 679 с.
4. *Лысов В.Е.* Теория автоматического управления: учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 2010. – 500 с.
5. *Михайлов О.П., Орлова Р.Г., Пальцев А.В.* Современный электропривод станков с ЧПУ и промышленных роботов / Под ред. Б.И. Черпакова. – М.: Высшая школа, 1989 – 111 с.
6. *Анучин А.С.* Системы управления электроприводов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2015. – 373 с.
7. *Комбаров В.В., Сорокин В.Ф.* Ограничение погрешности аппроксимации криволинейных траекторий при выборе частоты цикла управления систем ЧПУ с учетом технологических параметров оборудования // Открытые информационные и компьютерные технологии. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2013. – № 59. – С. 132–139.
8. *Лысов В.Е., Сидоров И.С.* Анализ погрешности в воспроизведении заданной траектории движения позиционно-слеящего электропривода с учетом дискретности экстраполятора нулевого порядка // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 3(47). – С. 142–148.
9. *Лысов В.Е., Саранцев С.С.* Синтез корректирующего звена слеящего электропривода подачи координатно-расточного станка для компенсации нелинейности типа «люфт» в кинематической цепи // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 1(32). – С. 148–156.
10. *Кудинов Ю.И., Пищенко Ф.Ф.* Теория автоматического управления (с использованием Matlab simulink): Учеб. пособие. – СПб: Лань, 2016. – 256 с.
11. *Аврамов А.А.* Прогнозирование подачи при высокоскоростной металлообработке: пер. с англ. // Cutting Tool Engineering. – 2002. – № 3(54). – С. 40, 42–44.
12. *Фельдштейн Е.В., Корниевич М.А.* Обработка деталей на станках с ЧПУ: учеб. пособие. – 3-е изд., доп. – Минск: Новое знание, 2008. – 229 с.

13. Качан А.Я., Петров С.А. и др. Технология обработки моноколес высокоскоростным фрезерованием // Оборудование и инструмент. – 2006. – № 2 [75]. – С. 26–32.
14. Лебедев А.М. Следящие электроприводы станков с ЧПУ. – М.: Энергоиздат, 1988. – 223 с.
15. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. – СПб.: ВHV, 2016. – 560 с.

Статья поступила в редакцию 10 июля 2019 года

THE METHOD OF DETERMINING THE FREQUENCY QUANTIZATION OF THE ZERO-ORDER EXTRAPOLATOR

V.E. Lysov, Y.I. Peshev

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

Abstract. *In this paper we consider a method for determining the quantization frequency of the zero-order extrapolator in the frame of the digital position-tracking system. The analysis is carried out by the frequency approach. Amplitude frequency specifications of discrete systems are defined as the sum of the shifted amplitude-frequency characteristics of the analog part of the system. In this connection, it is necessary to determine the shifting frequency of the amplitude frequency characteristics of the system's continuous part so that their sum in the frequency band of the reference signal does not exceed the specified error regarding the analog prototype. The obtained value of the quantization frequency of the extrapolator will determine the interval of discreteness.*

Keywords: *zero-order extrapolator, amplitude-frequency characteristic, transfer function, set frequency, sampling period.*

REFERENCES

1. Lysov V.Ye., Sidorov I.S. Analiz vliyaniya chastoty kvantovaniya tsifrovogo regul'yatora polozheniya pozitsionno-sledyashchego elektroprivoda na dinamicheskiye pokazateli kachestva upravleniya // Teor. i prikl. nauchn-tekhn. Zhurnal «Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye» Tom 17. – 2016. – № 10. – S. 685–689.
2. Terekhov V.M. Diskretnyye i nepreryvnyye sistemy upravleniya v elektroprivodakh: uchebnoye posobiye po kursu «Sistemy upravleniya elektroprivodami». – М.: MEI, 1989. – 80 s.
3. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya. Kniga 2: Analiz i sintez lineynykh nepreryvnykh i diskretnykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya / Pod red. V.V. Solodovnikova. – М.: Mashinostroyeniye, 1967. – 679 s.
4. Lysov V.Ye. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: ucheb. posobiye. – М.: Mashinostroyeniye, 2010. – 500 s.
5. Mikhaylov O.P., Orlova R.G., Pal'tsev A.V. Sovremennyy elektroprivod stankov s CHPU i promyshlennyykh robotov / pod red. B.I. Cherpakova. – М.: Vysshaya shkola, 1989. – 111 s.
6. Anuchin A.S. Sistemy upravleniya elektroprivodov. – М.: Izd. dom MEI, 2015. – 373 s.
7. Kombarov V.V., Sorokin V.F. Ogranicheniye pogreshnosti approksimatsii krivolinyenykh trayektoriy pri vybore chastoty tsikla upravleniya sistem CHPU s uchotom tekhnologicheskikh parametrov oborudovaniya // Otkrytyye informatsionnyye i komp'yuternyye tekhnologii. – Kharkov: Natsional'nyy aerokosmicheskiy universitet im. N.Ye. Zhukovskogo «KHAU». – 2013. – № 59. – S. 132–139.

Vladimir E. lysov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Yaroslav I. Peshev (Ph.D. (Techn.)), Engineer.

8. *Lysov V.Ye., Sidorov I.S.* Analiz pogreshnosti v vosproizvedenii zadannoy trayektorii dvizheniya pozitsionno-sledyashchego elektroprivoda s uchotom diskretnosti ekstrapolyatora nulevogo por-yadka // Vestnik SamGTU. Seriya «Tekhnicheskiye nauki». – 2015. – № 3(47). – S. 142–148.
9. *Lysov V.Ye., Sarantsev S.S.* Sintez korrektruyushchego zvena sledyashchego elektroprivoda po-dachi koordinatno-rastochnoy stanka dlya kompensatsii nelineynosti tipa «lyuft» v kinemacheskoy tsepi // Vestnik SamGTU. Seriya «Tekhnicheskiye nauki». – 2012. – № 1(32). – S. 148–156.
10. *Kudinov J.I., Pichenko F.F.* Teoriya avtomaticheskogo upravleniya (s icpolsovaniem Matlab sim-ulink): uchebnoe posobie. – Cnb: Lani, 256 s.
11. *Avramov A.A.* Prognozirovaniye podachi pri vysokoskorostnoy metalloobrabotke: per. s angl. // Cutting Tool Enginiring. – 2002. – № 3(54). – S. 40, 42–44.
12. *Fel'dshteyn Ye.V., Korniyevich M.A.* Obrabotka detaley na stankakh s CHPU: ucheb. posobiye. – 3-ye izd., dop. – Minsk: Novoye znaniye, 2008. – 229 s.
13. *Kachan A.YA., Petrov S.A. i dr.* Tekhnologiya obrabotki monokolos vysokoskorostnym frezero-vaniyem // Oborudovaniye i instrument. – 2006. – № 2[75]. – C. 26–32.
14. *Lebedev A.M.* Sledyashchiye elektroprivody stankov s CHPU Energoizdat, 1988. 223 s.
15. *Jrevich E.I.* Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. – Cnb.: BHV, 2016. – 560 s.