

УДК 621.92

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДИСКРЕТНОСТИ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА ПОЛОЖЕНИЯ НА ТОЧНОСТЬ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ СИГНАЛА ЗАДАНИЯ В ПОЗИЦИОННО-СЛЕДЯЩЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

© 2016 В.Е. Лысов, Я.И. Пешев, И.С. Сидоров

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 13.10.2016

В статье рассматривается вопрос о влиянии дискретной природы цифрового регулятора положения на точность воспроизведения заданной траектории подвижными органами прецизионного металлорежущего станка применительно к высокоскоростным операциям шлифования и фрезерования. Анализ логарифмической амплитудно-частотной характеристики замкнутого цифрового контура положения выявил закономерность изменения ошибки позиционно-следящего электропривода (разность между заданной траекторией и воспроизведённой траекторией позиционно-следящим электроприводом) в зависимости от периода квантования цифрового регулятора положения. На основе представленных теоретических исследований разработан алгоритм динамического изменения периода вызова подпрограммы цифрового регулятора положения в зависимости от параметров обрабатываемого контура детали, который позволяет обеспечить требуемую точность механической обработки с минимальной вычислительной нагрузкой на микропроцессор устройства числового программного управления (УЧПУ). Эффективность разработанного алгоритма доказывается путём проведения экспериментального исследования на реальном металлорежущем станке модели 2440СФ4 с УЧПУ фирмы «Балт-Систем».

Ключевые слова: дискретность, цифровой регулятор положения, экстраполятор нулевого порядка, прецизионный металлорежущий станок.

Необходимость повышения уровня эффективности авиастроения требует от механообрабатывающего оборудования внедрения технологий высокоскоростной и повышенной точности растачивания, шлифования, фрезерования. Это в свою очередь требует высокопроизводительных станков с системами числового программного управления (ЧПУ). Обеспечение точности обработки при увеличении контурной подачи является актуальной задачей, как для нового оборудования, так и для эксплуатируемого на авиационных предприятиях. Все современные металлорежущие станки оснащены системами автоматического управления (САУ). САУ прецизионными металлорежущими станками (САУ ПМС) на сегодняшний день представляют собой полностью цифровые вычислительные платформы, построенные по принципу систем с подчинённым регулированием [1] и включают в себя устройство числового программного управления (УЧПУ) и модули сервоусилителей [2, 3]. В предлагаемой статье анализируется влияние дискретности цифровой части ЧПУ, реализующего программу движения подвижного органа станка,

на точность воспроизведения сигнала задания. Дискретность определяется экстраполятором нулевого порядка, входящего в состав цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) цифрового регулятора положения (ЦРП).

Расчетная структурная схема САУ настроенная на технический оптимум [4] показана на рис. 1. Дискретность ЦРП, вносимая экстраполятором, будем оценивать относительно непрерывной САУ, которая служит эталоном.

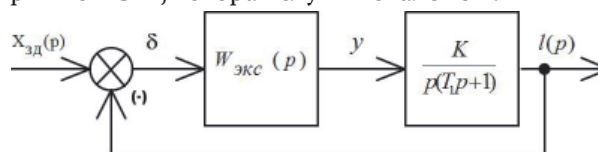


Рис. 1. Структурная схема электропривода

Оценка погрешности, вносимая экстраполятором, является важной составляющей в погрешности воспроизведения заданной траектории движения электропривода $X_{зо}(p)$. Это особенно важно для прецизионных позиционно следящих электроприводов, которыми оснащаются, например, координатно-расточные станки особо высокой точности. Например для станков класса С при перемещениях подвижного органа станка до 1250 мм погрешность должна составлять до 2 мкм [5]. При обработке сложной поверхности следящий электропривод должен воспроизводить гармонический сигнал [6]. При этом в процессе обработки нужно поддерживать постоянную скорость подачи инструмента ($V_{зд}$), заданную для данного технологического процесса. Связь между

Лысов Владимир Ефимович, доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и промышленная автоматика». E-mail: 67lysov@mail.ru

Пешев Ярослав Иванович, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Электропривод и промышленная автоматика». E-mail: yarprv14@yandex.ru

Сидоров Игорь Сергеевич, аспирант кафедры «Электропривод и промышленная автоматика». E-mail: sidoov@rambler.ru

круговой частотой $\omega_{зд}$, $V_{зд}$ и $X_{зд}$ устанавливается зависимость:

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

Анализ погрешности, вносимый 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 $Z = \frac{1+w}{1-w}$ [7]. Это в свою очередь позволяет использовать логарифмические амплитудно-фазовые частотные характеристики для исследования системы. Передаточная функция по ошибке в форме Z-преобразования имеет вид:

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

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

$$W_p(z) = \frac{K[z(T_{рп} - T_1 + T_1 d) + T_1(1-d) - dT_{рп}]}{(z-1)(z-d)} \quad (3)$$

В (3) принято: K – коэффициент передачи системы, $T_{рп}$ – период дискретности регулятора положения привода подачи прецизионного станка, $d = e^{-\frac{T_{рп}}{T_1}}$, T_1 – постоянная времени апериодического звена. С учетом (3) зависимость (2) представим в виде:

$$W_{\delta}(z) = \frac{\delta(z)}{X_{зд}(z)} = \frac{(z-1)(z-d)}{(z-1)(z-d) + K[z(T_{рп} - T_1 + T_1 d) + T_1(1-d) - dT_{рп}]} \quad (4)$$

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

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

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

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

$$20 \lg 0,147 = -16,8 \text{ дБ};$$

$$\omega_1 = \frac{1}{0,08} = 12,5 \text{ с}^{-1}; \lg 12,5 = 1,1 \text{ дек}$$

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

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

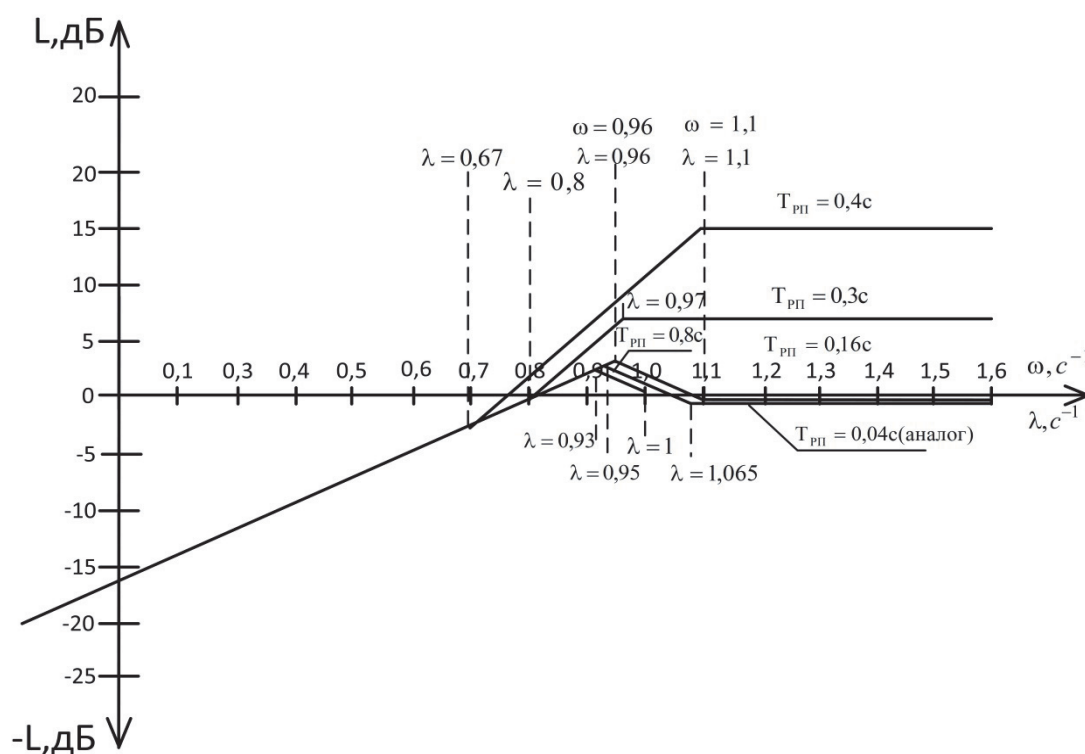


Рис. 2. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика по ошибке

Таблица 1. Результаты расчетов

Период дискретности регулятора положения $T_{\text{РП}}, \text{с}$	Передаточная функция разомкнутой системы $W_p(z) = \frac{x(z)}{x_{\text{зд}}(z)}$	Передаточная функция по ошибке системы $W_{\delta}(w) = \frac{\delta(z)}{x_{\text{зд}}(z)}$	Амплитудно – фазовая частотная характеристика системы по ошибке $W_{\delta}(j\lambda \frac{T_{\text{РП}}}{2})$ $\lambda, \text{с}^{-1}; \lambda, \text{дек}; K, \text{дБ}; T_{\text{РП}}, \text{с}.$
0,04	$\frac{0,05(1,1Z + 1)}{(Z - 1)(Z - 0,6)}$	$\frac{Z - 0,6}{\frac{0,0544(Z + 1)}{z - 1} + (Z - 0,6)}$	$\frac{0,147 j\lambda(1 + j\lambda 0,08)}{0,0116^2 (j\lambda)^2 + 0,125 j\lambda + 1} T_1 = 0,08;$ $T_2 = 0,108.$ $\lambda_1 = \frac{1}{T_1} = 12,5; \lg 12,5 = 1,1. c \cong 0,58$ $\lambda_2 = \frac{1}{T_2} = 9,26; \lg 9,26 = 0,966.$ $20 \lg K = 20 \lg 0,147 = -16,8$
0,08	$\frac{0,143(1,39Z + 1)}{(Z - 1)(Z - 0,366)}$	$\frac{Z - 0,366}{(Z - 0,366) + 0,145(\frac{1,37Z + 1}{Z - 1})}$	$\frac{0,147 j\lambda(1 + j\lambda 0,086)}{0,112^2 (j\lambda)^2 + 0,1136 j\lambda + 1} T_1 = 0,086;$ $T_2 = 0,112.$ $\lambda_1 = \frac{1}{T_1} = 11,63; \lg 11,63 = 1,06.$ $c \cong 0,52$ $\lambda_2 = \frac{1}{T_2} = 8,93; \lg 8,93 = 0,95.$ $20 \lg K = 20 \lg 0,147 = -16,8$
0,16	$\frac{0,325(1,88Z + 1)}{(Z - 1)(Z - 0,134)}$	$\frac{Z - 0,134}{(Z - 0,134) + 0,326(\frac{1,875Z + 1}{Z - 1})}$	$\frac{0,147 j\lambda(1 + j\lambda 0,1)}{0,116^2 (j\lambda)^2 + 0,092 j\lambda + 1} T_1 = 0,1;$ $T_2 = 0,116.$ $\lambda_1 = \frac{1}{T_1} = 10; \lg 10 = 1. c \cong 0,4$ $\lambda_2 = \frac{1}{T_2} = 8,62; \lg 8,6 = 0,93.$ $20 \lg K = 20 \lg 0,147 = -16,8$
0,3	$\frac{0,48(3,097Z + 1)}{(Z - 1)(Z - 0,023)}$	$\frac{Z - 0,023}{(Z - 0,023) + 0,48(\frac{3,09Z + 1}{z - 1})}$	$\frac{0,146 j\lambda(1 + j\lambda 0,157)}{0,109^2 (j\lambda)^2 + 0,075 j\lambda + 1} T_1 = 0,157;$ $T_2 = 0,108.$ $\lambda_1 = \frac{1}{T_1} = 6,37; \lg 6,37 = 0,8. c \cong 0,347$ $\lambda_2 = \frac{1}{T_2} = 9,26; \lg 9,26 = 0,96.$ $20 \lg K = 20 \lg 0,146 = -16,8$
0,4	$\frac{0,52(4,21Z + 1)}{(Z - 1)(Z - 0,0066)}$	$\frac{Z - 0,0066}{(Z - 0,0066) + 0,52(\frac{4,21Z + 1}{Z - 1})}$	$\frac{0,147 j\lambda(1 + j\lambda 0,2)}{0,069^2 (j\lambda)^2 + 0,069 j\lambda + 1} T_1 = 0,2;$ $T_2 = 0,069.$ $\lambda_1 = \frac{1}{T_1} = 5; \lg 5 = 0,7. c \cong 0,347$ $\lambda_2 = \frac{1}{T_2} = 14,5; \lg 14,5 = 1,16$ $20 \lg K = 20 \lg 0,147 = -16,8$
0,5			Система неустойчива

дискретности регулятора положения, 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 [6].

Заметим, что при $T_{pp}=0,04$ с или $\omega_0 = 157 \text{ с}^{-1}$ имеем хорошее совпадение с погрешностью аналоговой системы, которая при заданных параметрах имеет полосу пропускания в разомкнутом состоянии $\omega_c = 7 \text{ с}^{-1}$, $2\omega_c = 14 \text{ с}^{-1}$. Поэтому 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 $1(t)$.

Основываясь на проведенное теоретическое исследование был разработан алгоритм автоматического изменения периода T_{pp} в зависимости от диаметра воспроизводимой окружности и линейной скорости её обхода. Очевидно, что с увеличением значения периода T_{pp} будет снижаться точность воспроизведения криволинейных траекторий подвижными органами станка. Чрезмерное уменьшение T_{pp} вызовет неоправданный расход процессорного времени ЧПУ. Алгоритм позволяют выбрать наиболее оптимальное значение периода T_{pp} при котором обеспечивается требуемая точность воспроизведения окружности.

Экспериментальные исследования, подтверждающие эффективность разработанного

алгоритма, проведены на прецизионном координатно-расточном станке модели 2440СФ4 с УЧПУ NC-310 фирмы «Балт-Систем». В качестве измерительных элементов положения стола и салазок использовались фотооптические инкрементальные линейки типа ЛИР-7 фирмы СКБИС. Точность данных фотооптических линеек – 0,5 мкм. Каждая интерполирующая координата исследуемого станка прошла процедуру юстировки, которая обеспечивает точность позиционирования подвижного органа на уровне 2,5 мкм, что соответствует классу точности С.

Описанное в данной статье экспериментальное исследование проводилось при программном задании отработки эталонных траекторий, в качестве которых использовались эталонные окружности диаметром 2 мм, 4 мм, 6 мм, 8 мм и 10мм. Линейная скорость обхода всех эталонных окружностей постоянна и равняется $V_{\text{Э0}}=1000$ мм/мин.

Учитывая дискретную природу САУ ПМС, для дальнейшей математической обработки результатов эксперимента, каждую эталонную окружность целесообразно представить в виде одномерной матрицы $R_{\text{Э0}}$. Любой элемент данной матрицы представляет собой мгновенный радиус эталонной окружности на i -том шаге интерполяции. Размерность данной матрицы находится как:

$$R_{\text{Э0 } i} = \frac{D_{\text{Э0}}}{2},$$

где $V_{\text{Э0}}$ – линейная скорость отработки эталонной окружности, $D_{\text{Э0}}$ – диаметр эталонной окружности, $T_{\text{и}}$ – такт интерполатора УЧПУ.

Значение каждого элемента матрицы $R_{\text{Э0}}$ определяется по следующей формуле:

$$R_{\text{Э0 } i} = \frac{D_{\text{Э0}}}{2}.$$

Для оценки реально полученной траектории использовался независимый цифровой самописец (НЦС), который считывает данные с линейки

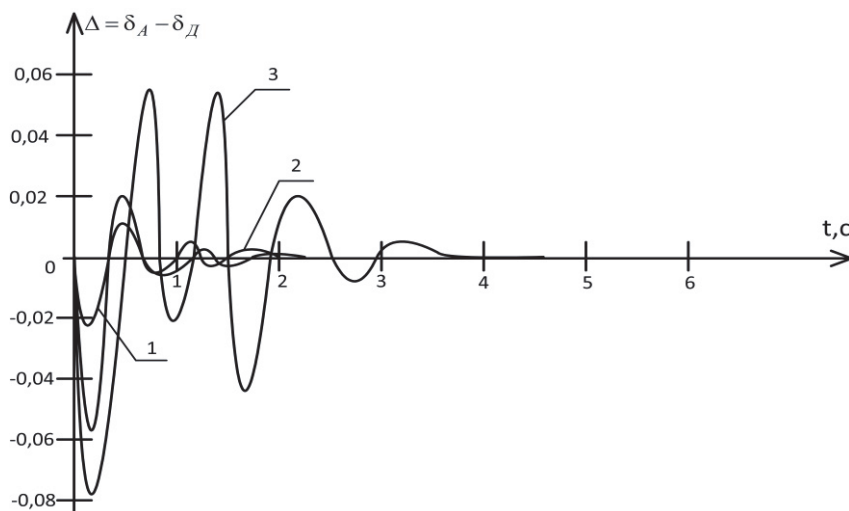


Рис. 3. Отклонение ошибки $\delta(t)$ дискретной системы от аналогового прототипа: кривая 1 – $T_{pp} = 0,04$ с; кривая 2 – $T_{pp} = 0,08$ с; кривая 3 – $T_{pp} = 0,16$ с

стола и линейки салазок. Полученная с НЦС при обработке эталонной окружности одномерная матрица данных характеризует реально полученную окружность, указанную матрицу обозначим как R_{PO} . Значение каждого элемента данной матрицы представляет собой мгновенный радиус реально полученной окружности на i -том шаге интерполяции и находится как:

$$R_{PO\ i} = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2},$$

где X_i – мгновенное значение, считанное НЦС с линейки стола на i -том шаге интерполяции, Y_i – мгновенное значение, считанное НЦС с линейки салазок на i -том шаге интерполяции.

Матрица, полученная в результате вычитания одноименных элементов матрицы $R_{Э0}$ и матрицы R_{PO} , является по существу динамической погрешностью $\Delta_{Э0}$ воспроизведения эталонной окружности, которая и характеризует качество воспроизведения заданной траектории подвижными органами прецизионного металлорежущего станка:

$$\Delta_{Э0} = R_{Э0} - R_{PO}.$$

Элемент $\Delta_{Э0\ MAX}$ матрицы $\Delta_{Э0}$, имеющий максимальное значение, является максимальным значением погрешности воспроизведения эталонной окружности.

Блок-схема алгоритма экспериментального определения значения $\Delta_{Э0\ MAX}$ представлена на рисунке 4. Используя вышеупомянутый алгоритм, а также задаваясь рядом значений T_{PP} в диапазоне 10-80 мс для эталонной окружности определим зависимость $\Delta_{Э0\ MAX} = f(T_{PP})$.

Для получения достоверных результатов проводилось трёхкратное экспериментальное определение зависимости [8].

Заметим, что матрицы R_{PO} и $R_{Э0}$ имеют одинаковую размерность

Период T_{PP} в УЧПУ NC-310 определяется параметром `servo_tick` инструкции CAS.

Такт интерполятора $T_{и}$ – параметром `int_tick`, причём $T_{и} = 1\ \text{мс} = \text{const}$.

Результат эксперимента представлен в виде семейства графиков зависимости $\Delta_{Э0\ MAX} = f(T_{PP})$ для эталонных окружностей диаметром 2 мм, 4 мм, 6 мм, 8 мм и 10 мм, при линейной скорости обхода $V_{Э0} = 1000\ \text{мм/мин}$ (см. рис. 5). Из анализа представленных выше графиков следует возможность выбора такого значения T_{PP} , при котором обеспечивается требуемая величина максимальной погрешности $\Delta_{Э0\ MAX}$.

По полученным данным можно сформулировать следующие выводы, 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 либо увели-

чить частоту ω_0 экстраполятора, либо увеличить быстродействие аналоговой части системы.

Экспериментально подтверждено теоретическое положение о необходимости обеспечения неравенства $\frac{0}{c} \geq 12,5 \dots 20$ для обеспечения

точности воспроизведения заданной траектории движения по классу точности С.

Экспериментально доказана возможность повышения точности воспроизведения окружности при снижении общей вычислительной нагрузки на микропроцессор УЧПУ за счёт применения алгоритма автоматического изменения периода T_{PP} в зависимости от диаметра воспроизводимой окружности и линейной скорости её обхода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоиздат, 2001.
2. Кошкин В.Л. Аппаратные системы числового программного управления. М.: Машиностроение, 1989.
3. Manfred Weck. Werkzeugmaschinen 3: Mechatronische Systeme, Vorschubantriebe, Prozessdiagnose. Springer Berlin Heidelberg, 2006, 424 p.
4. Рапопорт Э.Я. Системы подчиненного регулирования электроприводов постоянного тока. Конспект лекций. Куйбышев 1985. 56 с.
5. Решетов Д.Н., Портман В.Г. Точность металлорежущих станков. М.: Машиностроение 1986. 336 с.
6. Михайлов О.П., Орлова Р.Т. Современный электро-

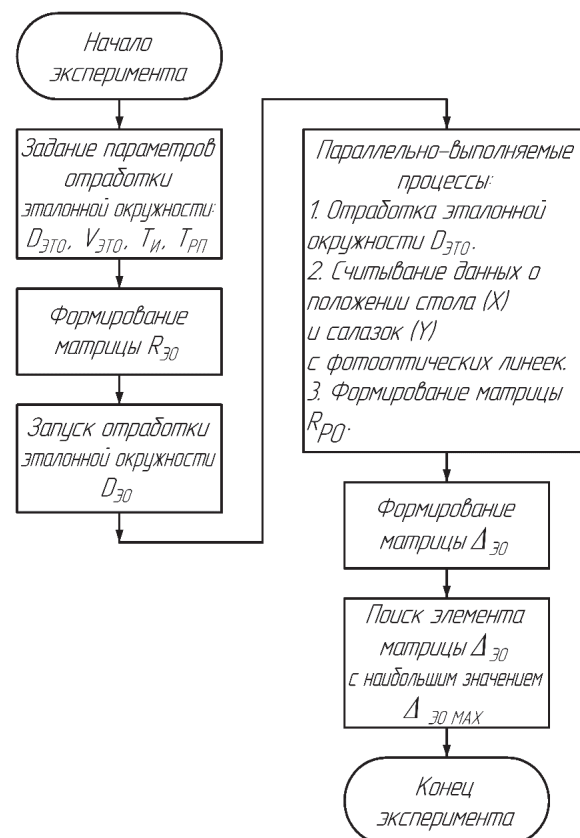


Рис. 4. Блок-схема алгоритма экспериментального определения значения $\Delta_{Э0\ MAX}$

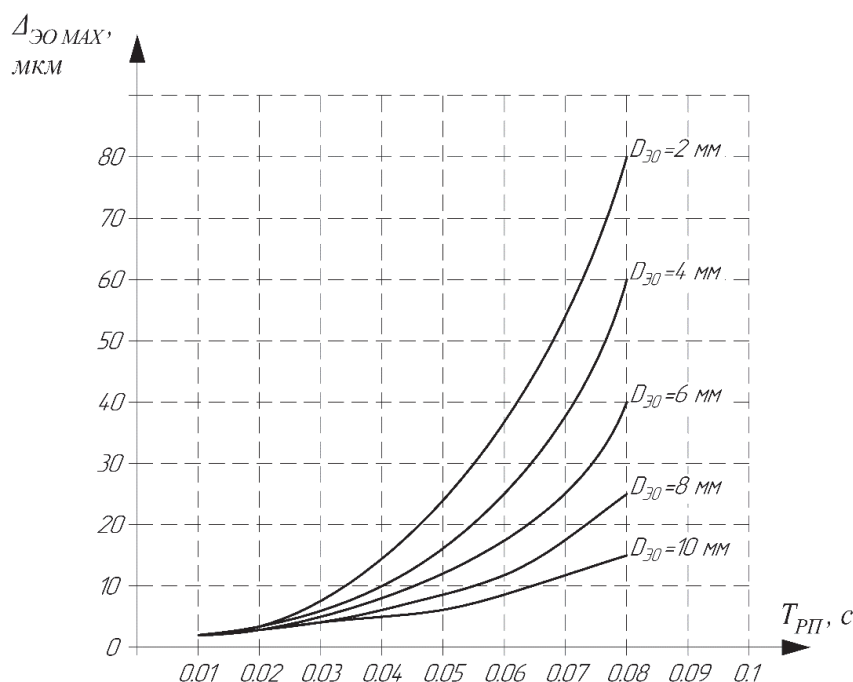


Рис. 5. Семейство графиков зависимости $\Delta_{Э0 MAX} = f(T_{РП})$ для эталонных окружностей диаметром 2 мм, 4 мм, 6 мм, 8 мм и 10 мм

- привод станков с ЧПУ и промышленных роботов. М.: Высшая школа 1989. 111с.
7. Лысов В.Е. Теория автоматического управления. М.: Машиностроение. 2010. 500 с.
8. Ермаков С. М. Математическая теория планирования эксперимента. М.: Наука, 1983.

ANALYSYS OF IMPACT A SAMPLING PERIOD OF DIGITAL POSITION CONTROLLER'S ON POSITIONING QUALITY

© 2016 V.E. Lysov, Y.I. Peshev, I.S. Sidorov

Samara State Technical University

The article is focused on the influence of the digital position controller's discrete nature on the accuracy of rendering the set path by the moving parts of a precision jig boring machine in relation to high-speed grinding and milling operations. An analysis of the logarithmic amplitude-frequency response of the digital position loop has revealed a pattern of variation in the servo drive position error (i.e. the discrepancy between the path set and the path rendered by the servo drive) depending on the sampling period of the digital position controller. Based on the presented theoretical studies, an algorithm has been developed for dynamic variation of the digital position controller subroutine call period as a function of the machined piece surface profile parameters. This algorithm ensures the required machining accuracy while minimizing the computational load on the microprocessor of the numerical control unit (NCU). The efficiency of the developed algorithm is confirmed by experimental testing using an actual precision jig boring machine (2440SF4 model) with an NCU by Balt-System Ltd.

Keywords: digital position regulator, jig-boring machine, sampling period, zero-order hold.

Vladimir Lysov, Doctor of Technics, Professor at the Electric Drive and Industrial Automation Department.

E-mail: 67lysov@mail.ru

Yaroslav Peshev, Candidate of Technics, Senior Lecturer at the Electric Drive and Industrial Automation Department.

E-mail: yarpv14@yandex.ru

Igor Sidorov, Postgraduate Student, Electric Drive and Industrial Automation Department. E-mail: sidoov@rambler.ru