

РАСШИРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СТАНКОВ С ЧПУ ТОКАРНОЙ ГРУППЫ НА ОСНОВЕ ПОСТРОЕНИЯ МЕХАТРОННЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СИСТЕМ С УПРАВЛЯЕМЫМИ КИНЕМАТИЧЕСКИМИ УГЛАМИ

Ерзин О.А.

Тульский государственный университет, Тула

Ключевые слова: поворотная режущая головка, управляемый передний угол, момент поворота, изменение условий резания, саморегулирование, система управления передним углом, синтез системы управления передним углом.

Аннотация. Рассмотрена математическая модель процесса управления передним углом режущего клина на токарных операциях отрезки, проведен синтез системы управления, обеспечивающий требуемые показатели качества ее реакции на периодические процессы образования и схлопывания поверхностей сдвига при стружкообразовании. На основании проведенных исследований подтверждена возможность и перспективность создания «интеллектуального» инструмента, использующего управление передним углом его режущего клина в зависимости от условий резания.

EXPANSION OF TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF MACHINES WITH CNC TURNING GROUP BASED ON CONSTRUCTION OF MECHATRONIC TOOL SYSTEMS WITH CONTROLLED KINEMATIC ANGLES

Erzin O.A.

Tula State University, Tula

Keywords: rotary cutting head, controlled front angle, turning moment, change of cutting conditions, self-adjustment, front angle control system, synthesis of front angle control system.

Abstract. Mathematical model of process of control of cutting wedge front angle at turning operations of section is considered, synthesis of control system is carried out, which provides required quality indices of its response to periodic processes of formation and collapse of shear surfaces during chip formation. Based on the studies carried out, the possibility and prospects of creating an "intelligent" tool using control of the front angle of its cutting wedge depending on the cutting conditions have been confirmed.

Введение

Одно из перспективных направлений совершенствования технологического оборудования, в частности для обработки резанием, связано с увлечением числа управляемых координат. Оно в большей степени обусловлено стремлением к расширению технологических возможностей с точки зрения формообразования. Известные попытки управления условиями резания, в частности путем изменения кинематических углов режущего клина, определили тенденцию создания «интеллектуального» инструмента [1-4]. Это направление, несмотря на первое упоминание в 2001 г. [1] к сожалению, до сих пор не получило должного теоретического обоснования и практической проработки. В тоже время известны работы, например, по лазерной обработке, где наряду с типовыми осями координатных перемещений введены «электронные оси» управления параметрами лазерного воздействия [5, 6].

В соответствии с известными подходами [7] кинематическую структуру токарного станка с мехатронной системой управления тремя кинематическими углами лезвия инструментальной системы (ИС) можно представить в виде, показанном на рисунке 1. Она позволяет управлять передним в плане углом φ , углом наклона режущей кромки λ и передним углом (наклона передней поверхности) γ . Структура включает в себя станину 1, продольный суппорт (координата Z) 2, поперечный суппорт (координата X) 3, поворотный стол с вертикальной осью вращения Y 4, поворотный стол с горизонтальной осью вращения Y 5, выделенный элемент режущего инструмента в виде поворотного сектора 6. На рисунке показаны проекции лезвия ИС: на горизонтальную плоскость (XOZ) 7, на плоскость резания 8, и на главную секущую плоскость 9. –

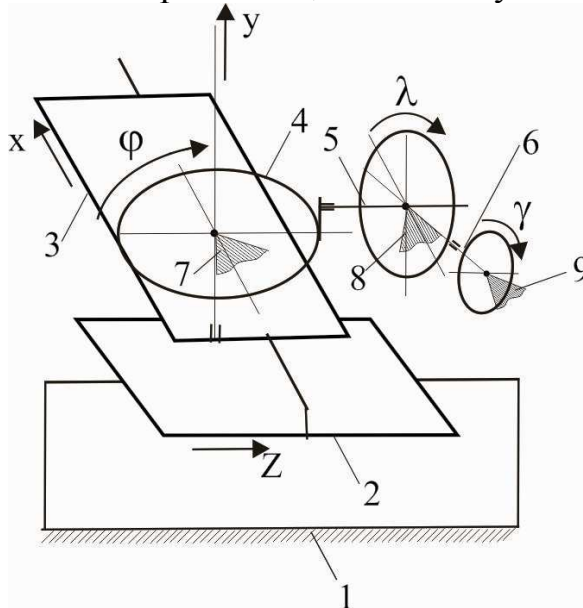


Рис. 1. Кинематическая структура токарного станка с мехатронной системой управления тремя кинематическими основными углами лезвия инструментальной системы

Анализ конструкторского решения проходного резца [3, 4] и проблем управления его передним кинематическим углом подтвердил техническую реализуемость предложенного подхода в условиях нелинейной взаимосвязи параметров процесса резания. Сложность его реализации усугубляется не стационарностью, оказывающей отрицательное влияние практически на все технологические показатели операций, например, отрезки [8].

Предложено оригинальное техническое решение «интеллектуального» инструмента для управления процессом резания по переднему углу режущего клина на операциях отрезки. Оно основано на принципе саморегулирования, реализуемом упругим элементом, увеличивающим значение угла при возрастании сил резания [9].

Постановка задачи

Для целей более широкого исследования перспектив построения систем управления передним углом режущего клина на операциях отрезки, обеспечивающих желаемые динамические характеристики, механическое звено саморегулирования в [9] заменено электрическим каналом управления аналогично [3]. Как и в рассмотренном ранее подходе к синтезу [9], резец

представлен состоящим из конструктивно выделенного элемента резца-поворотного сектора, рычага, линейного двигателя (или двигателя с ШВП) и преобразователя – усилителя мощности. Угол поворота сектора вокруг режущей кромки определяет передний угол режущего клина инструмента.

Линеаризованная математическая модель такой системы управления характеризуется теми же координатами состояния: γ – угол поворота сектора; $\dot{\gamma}$ – скорость поворота сектора; x – величина перемещения штока двигателя; $\dot{x}$ – скорость штока двигателя; I_d – ток якоря двигателя; e_n – выходное напряжение преобразователя [9]. Она отличается от рассмотренной в [9] системы управления только значениями параметров: R_s, L_r – радиус и длина рычага сектора; J_s, C_s, h_s – момент инерции, жесткость и коэффициент вязкого трения сектора; m_{np}, C_d, h_d – приведенная масса, жесткость и коэффициент вязкого трения привода; L_d, R_d, C_e, C_m – индуктивность, активное сопротивление, электрическая и механическая постоянные двигателя; K_n, τ, U_s – коэффициент преобразования, постоянная времени и входное напряжение преобразователя системы управления; D_m – коэффициент линеаризации зависимости момента разворота сектора вокруг режущей кромки под действием сил резания от переднего угла.

Для обеспечения ее технической реализуемости устройства на основании статических расчетов и разработанной методики параметризации обоснованы конкретные значения конструктивных характеристик узлов и параметров элементов системы. В частности, в державке с сечением 25x25 мм конструктивно выделен сектор радиусом $R_s = 20$ мм, меньшей высоты державки [9]. Это обеспечивает расчетную прочность инструмента в направлении действия равнодействующей сил резания. Центральный угол сектора 60° и длина рычага $L_r = 10$ мм обеспечивают изменение угла поворота сектора до 15° , перекрывающего практически весь диапазон используемых углов [3, 4, 8]. При этом максимальная величина перемещения штока привода не превышает 7 мм.

В результате выполненной параметризации рекомендованы следующие значения параметров элементов системы управления: $J_s = 32,0 \cdot 10^{-6}$ Нмс²/рад; $C_s = 1,0 \cdot 10^4$ Нм/рад; $h_s = 0,6$ Нмс/рад; $K_{fi} = 0,052$ м; $m_{np} = 0,02$ кг; $C_d = 1,2 \cdot 10^7$ Н/м; $h_d = 600,0$ Нс/м; $R_d = 3,4$ Ом; $L_d = 0,1 \cdot 10^{-3}$ Гн; $C_m = 16,43$ Н/А; $C_e = 5,25$ Вс/м; $K_n = 1200,0$; $\tau = 0,15 \cdot 10^{-3}$ с; $D_m = -(0,04 \dots 0,2)$ Нм/рад.

Для известных условий резания [8]: отрезка заготовок из стали 40Х ($\sigma_b = 6,15 \cdot 10^8$ Н/м², $\tau_p = 5,63 \cdot 10^8$ Н/м², $a = 6,75 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\lambda = 33,9$ Дж/м·с·град.) отрезным резцом с пластиной из стали Т15К6 шириной $t = (2,0 \dots 4,0) \cdot 10^{-3}$ м и углами $\alpha = 5^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\phi_1 = 5^\circ$, $r_1 = 0,2 \cdot 10^{-3}$ м, $r = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м, и использовании рекомендованных режимов резания: $S_o = (0,05 \dots 0,15) \cdot 10^{-3}$ м, $V_p = 0,5 \dots 1,5$ м/с максимальный момент разворота режущего клина относительно режущей кромки составляет 0,22 Нм; а минимальный – 0,05 Нм [8]. Этому соответствует максимальное усилие на рычаге не более 7,5 Н.

Методика проведения исследований

В соответствии с подходами, апробированными для синтеза систем управления передним углом на операциях точения [8, 9], для их описания использована матричная форма записи:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{b}\mathbf{u}, \quad (1)$$

где $\mathbf{A} = \|a_{ij}\|_{6 \times 6}$; $\mathbf{b} = \|b_1 \dots b_6\|_{6 \times 1}^T$ – вещественные матрицы параметров системы указанных размерностей; $\mathbf{X} = \|x_i\|_{1 \times 6}^T$ – вектор координат состояния системы; $\mathbf{u} = \|u_i\|_{1 \times 6}^T$ – вектор управляющих воздействий.

Вид и форма используемых матриц, а также зависимости их коэффициентов от параметров системы управления определяются аналогично [6].

Задача синтеза модального регулятора для рассматриваемой системы заключается в определении коэффициентов обратных связей по координатам состояния k_i ($i = \overline{1,6}$) [10, 11].

$$u = -k_1 x_1 - \dots - k_6 x_6 = -\mathbf{k}^T \mathbf{X}, \quad (2)$$

при которых замкнутая система имела бы желаемый «стандартный» характеристический полином 6-го порядка [10], определяющий соответствующее ему качество процесса управления:

$$g(p) = p^6 + \omega_0 g_5 p^5 + \omega_0^2 g_4 p^4 + \omega_0^3 g_3 p^3 + \omega_0^4 g_2 p^2 + \omega_0^5 g_1 p + \omega_0^6 g_0, \quad (3)$$

где g_i – нормированные коэффициенты полинома ($i = \overline{1,6}$); ω_0 – техническая постоянная, имеющая размерность частоты и определяющая масштаб представления переходной характеристики системы во времени.

Этому полиному соответствует каноническая форма записи матрицы желаемой системы управления $\mathbf{G}$.

С учетом обратных связей (2) уравнение свободного движения замкнутой системы примет вид:

$$\dot{\mathbf{X}} = (\mathbf{A} - \mathbf{b}\mathbf{k}^T) \mathbf{X}, \quad (4)$$

Матрица коэффициентов может быть найдена из сравнения матрицы $\mathbf{G}$ с матрицей параметров системы (4), представленной в той же канонической форме, что и $\mathbf{G}$.

На основании матрицы канонического преобразования $\mathbf{P}$ уравнение (1) может быть записано в канонической форме

$$\dot{\tilde{\mathbf{X}}} = \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{X}} + \tilde{\mathbf{b}}\tilde{\mathbf{u}}, \quad (5)$$

где $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{P}\mathbf{A}\mathbf{P}^{-1}$; $\tilde{\mathbf{b}} = \mathbf{P}\mathbf{b}$; $\tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{P}\mathbf{X}$; $\mathbf{X} = \mathbf{P}^{-1}\tilde{\mathbf{X}}$.

Для полностью управляемой системы матрица канонического преобразования $\mathbf{P}$ пары $\{\mathbf{A}, \mathbf{b}\}$ в пару $\{\tilde{\mathbf{A}}, \tilde{\mathbf{b}}\}$ единственна и вычисляется по формуле [11]

$$\mathbf{P} = \tilde{\mathbf{R}}\mathbf{R}^{-1}, \quad (6)$$

где $\mathbf{R}$, $\tilde{\mathbf{R}}$, $\mathbf{R}^{-1}$ – матрицы управляемости систем (1) и (5), а также обратная к матрице (1).

Полагая по аналогии с (2) $\tilde{\mathbf{u}} = -\tilde{\mathbf{k}}^T \tilde{\mathbf{X}}$ уравнение свободного движения замкнутой системы в канонической форме

$$\tilde{\mathbf{X}} = (\tilde{\mathbf{A}} - \tilde{\mathbf{b}}\tilde{\mathbf{k}}^T) \tilde{\mathbf{X}}. \quad (7)$$

Матрица канонического преобразования устанавливает связь между матрицами коэффициентов обратных связей уравнений (2) и (7)

$$\mathbf{k}^T = \tilde{\mathbf{k}}^T \cdot \mathbf{P}. \quad (8)$$

Для обеспечения требуемого качества проектируемой системы, формируемого выбранным желаемым «стандартным» характеристическим полиномом (3), достаточно тождественно приравнять матрицу правой части уравнения (7) матрице $\mathbf{G}$

$$\tilde{\mathbf{A}} - \tilde{\mathbf{b}}\tilde{\mathbf{k}}^T = \mathbf{G}. \quad (9)$$

Исходя из этого матричного уравнения решение можно записать в следующем виде:

$$\tilde{k}_i = g_{i-1} - \tilde{a}_{i-1}, \quad i = \overline{1...6}, \quad (10)$$

то есть $\tilde{k}_1 = g_0 - \tilde{a}_0$; $\tilde{k}_2 = g_1 - \tilde{a}_1$; $\tilde{k}_3 = g_2 - \tilde{a}_2$; $\tilde{k}_4 = g_3 - \tilde{a}_3$; $\tilde{k}_5 = g_4 - \tilde{a}_4$; $\tilde{k}_6 = g_5 - \tilde{a}_5$.

Используя решение (10) на основании (8), получена искомая матрица строка коэффициентов передачи модального регулятора в исходном базисе $\mathbf{k}^T$.

Синтезированная система управления позволяет определить ее динамические характеристики, а также оценить возможную реакцию на дискретное воздействие сил резания на режущий клин.

Результаты исследований

Коэффициенты матриц $\mathbf{A}$ и $\mathbf{b}$ для приведенных выше параметров системы принимают следующие значения: $a_{12} = 1$; $a_{21} = -3,125 \cdot 10^8$; $a_{22} = -1,875 \cdot 10^4$; $a_{23} = 6,01 \cdot 10^9$; $a_{24} = 3,61 \cdot 10^5$; $a_{34} = 1$; $a_{41} = 9,62 \cdot 10^8$; $a_{42} = 576,92$; $a_{43} = -7,85 \cdot 10^8$; $a_{44} = -4,109 \cdot 10^4$; $a_{45} = 821,5$; $a_{54} = -5,25 \cdot 10^4$; $a_{55} = -3,4 \cdot 10^4$; $a_{56} = 1,0 \cdot 10^4$; $a_{66} = 6,67 \cdot 10^3$; $b_{61} = 8,0 \cdot 10^6$. Неуказанные коэффициенты равны нулю.

Получены матрицы управляемости систем (1) и (5)

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{b} & \mathbf{A} \cdot \mathbf{b} & \mathbf{A}^2 \cdot \mathbf{b} & \mathbf{A}^3 \cdot \mathbf{b} & \mathbf{A}^4 \cdot \mathbf{b} & \mathbf{A}^5 \cdot \mathbf{b} \end{bmatrix}_{6 \times 6};$$

$$\tilde{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{b}} & \tilde{\mathbf{A}} \cdot \tilde{\mathbf{b}} & \tilde{\mathbf{A}}^2 \cdot \tilde{\mathbf{b}} & \tilde{\mathbf{A}}^3 \cdot \tilde{\mathbf{b}} & \tilde{\mathbf{A}}^4 \cdot \tilde{\mathbf{b}} & \tilde{\mathbf{A}}^5 \cdot \tilde{\mathbf{b}} \end{bmatrix}_{6 \times 6}.$$

Учитывая исходные данные их расчет показал, что $\text{rang}\|\mathbf{R}\| = 6$ и $\text{rang}\|\tilde{\mathbf{R}}\| = 6$. Это подтверждает полную управляемость исходной системы и позволяет использовать рассмотренную выше методику.

Конкретизированный вид «стандартного» характеристического полинома, в частности Баттерворта 6-го порядка, имеет вид [10]:

$$g(p) = (p^2 + 0,51764\omega_0 p + \omega_0^2) \cdot (p^2 + 1,41421\omega_0 p + \omega_0^2) \cdot (p^2 + 1,93185\omega_0 p + \omega_0^2). \quad (11)$$

Исходя из требований к динамическим характеристикам системы управления углом поворота сектора в области частот дискретного воздействия на него сил резания $f = 0,5...20$ кГц [12, 13, 14] принята техническая постоянная $\omega_0 = 50000,0 \text{ с}^{-1}$.

На основании приведенной выше методики используя (8), получена искомая матрица-строка коэффициентов передачи модального регулятора в исходном базисе $\mathbf{k}^T$. Для упрощения практической реализации системы управления выполнено округление коэффициентов обратной связи. Оно потребовало осторожного подхода поскольку в определенных случаях оно приводило к существенному ухудшению качества переходных процессов. Наиболее рациональный вариант матрицы коэффициентов принял вид:

$$\mathbf{k}^T_{\text{round}} = \begin{bmatrix} 2,0 \cdot 10^4 & 0,12 \cdot 10^5 & 3,0 \cdot 10^5 & 5,45 & 0,07 & 0,01 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Исходя из (1) и (12) нормированные переходные характеристики систем: h_{ish} – исходной, h_{tg} – желаемой и h_{tt} – с модальным регулятором вида (12) приведены на рисунке 2, а.

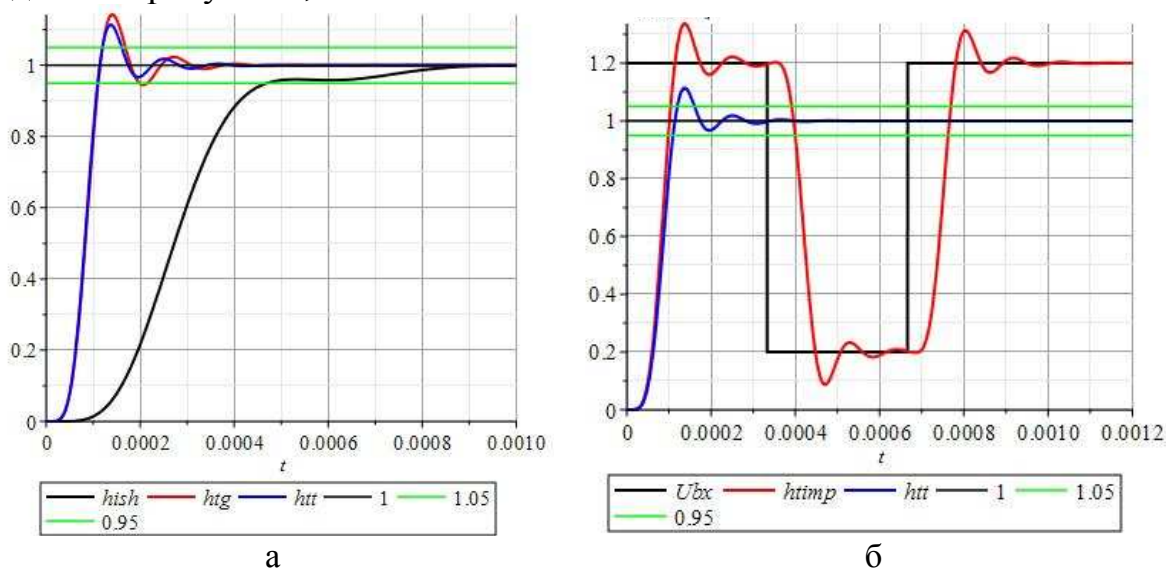


Рис. 2. Нормированные переходные характеристики систем: а) исходной, желаемой и с модальным регулятором вида (12); б) реакция системы на обратный импульс по входу

Из рисунка 2а видно, что применение модального регулятора позволило уменьшить длительность переходного процесса с 0,45 мс до 0,17 мс, то есть более чем 2,5 раза. Реакция системы на обратный импульс длительностью 300 мкс, поданный на вход системы с задержкой на завершение в ней переходного процесса от установки заданного значения переднего угла режущего клина, приведена на рисунке 2, б. На нем показаны: U_{bx} – импульсное входное воздействие, h_{timp} – реакция системы на входное воздействие и h_{tt} – переходный процесс установки заданного значения переднего угла режущего клина. Можно видеть, что задержка импульса достигает 50 мкс, а длительности фронтов – 80 мкс. Это говорит о возможности системы достаточно адекватно реагировать на воздействия с частотой до 2,5 кГц, соответствующей цикличности сегментации стружки на операции отрезки [12-15].

Заключение

На основании проведенных исследований подтверждена возможность и перспективность создания «интеллектуального» инструмента, использующего управление передним углом его режущего клина в зависимости от условий

резания. Проведенный синтез его системы управления показал, что она позволяет отслеживать и адекватно реагировать на периодически (до 2,5 кГц) изменяемое состояние системы.

Предложенный подход к созданию инструментов для операций токарной обработки носит инновационный характер и позволяет повысить ее эффективность в широком диапазоне изменения условий резания.

Список литературы

1. Sellmer D. High-performance processing by means of the "intellektualnyy" cutting tools // Werkstatt und Betrieb. 2001, no. 3, pp. 38-40.
2. Патент №2443510 РФ. Токарный резец с изменяемыми передним углом / Е.Б. Шелкунов, О.Н. Порошин – Заявка №2010144908 от 02.11.2011; опублик. 27.02.2012, Бюл. №6.
3. Патент №2741397 РФ. Резец с изменяемым передним углом / Г.В. Шадский, В.С. Сальников, О.А. Ерзин. – Заявка №2020129113 от 02.09.2020; опублик. 25.01.2021, Бюл. №3.
4. Сальников В.С., Шадский Г.В., Ерзин О.А. Анализ конструкторского решения «интеллектуального» режущего инструмента с управляемым передним углом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – №10. – С. 400-406.
5. Мартинов Г.М., Коваленко А.В. Расширение функциональных возможностей системы ЧПУ для управления установкой электронно-лучевой сварки // Авиационная промышленность. – 2009. – №1. – С. 16-21.
6. Кисаев Р.А., Портнов С.М., Кисаев Р.А., Кузнецов И.Н. Синтез и анализ системы автоматического управления лазерным технологическим комплексом // Проектирование и исследование технических систем. Межвузовский научный сборник. – Набережные Челны: Изд-во ИНЭКА, 2010. – №15. – С. 39-45.
7. Серков Н.А. Методы и средства измерения объемной точности многокоординатных станков с ЧПУ // Вестник научно-технического развития. – 2012. – № 3(55). – С. 26-45.
8. Сальников В.С., Шадский Г.В., Ерзин О.А. Перспективы управления передним углом режущего клина при технологической обусловленности изменения скорости резания // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – №12. – С. 276-284.
9. Сальников В.С., Шадский Г.В., Ерзин О.А. Техническое решение отрезного резца с управляемым передним углом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 2. – С. 3-6.
10. Гайдук А.Р. Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход): монография. – М.: Физматлит, 2018. – 360 с.
11. Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б., Носов В.Р. Математическая теория конструирования систем управления. – М.: Высшая школа, 2003. – 615 с.
12. Волков Д.И., Проскуряков С.Л. Разработка модели процесса резания с учетом цикличности формирования стружки // Вестник УГАТУ. Машиностроение. – 2011. – Т. 15, №3(43). – С. 72-78.
13. Gui Gen Ye¹, Shi Feng Xue¹, Xing Hua Tong, Lan Hong Dai. Influence of cutting conditions on the cutting performance of TiAl6V4 // Advanced Materials Research. 2011, vol. 337, pp 387-391. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.337.387.
14. Евсеев Л.Л. Исходные положения и зависимости для расчета характеристик динамики процесса резания металлов // Вестник машиностроения. – 1995. – №12. – С. 29-32.
15. Евсеев Л.Л. Расчет оптимальной скорости резания по коэффициенту динамичности процесса стружкообразования // СТИН. – 1994. – №4. – С. 41-43.

Сведения об авторе:

Ерзин Олег Александрович – к.т.н., доцент кафедры «Промышленная автоматика и робототехника».