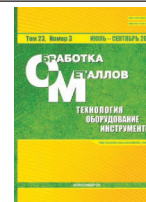




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)





Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Синергетический подход к повышению эффективности управления процессами обработки на металлорежущих станках

Вилор Заковоротный ^a, Валерия Гвинджилия ^{b, *}

Донской государственный технический университет, пл. Гагарина, 1, г. Ростов-на-Дону, 344000, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0003-2187-9897>,  vzakovorotny@dstu.edu.ru, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-1066-4604>,  sinedden@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9:531.3

История статьи:

Поступила: 29 июня 2021
 Рецензирование: 17 июля 2021
 Принята к печати: 30 июля 2021
 Доступно онлайн: 15 сентября 2021

Ключевые слова:

Эффективность обработки
 Самоорганизация и эволюция
 Синергетика согласования внешней и внутренней динамики

Финансирование:

Исследование выполнено при финансовой поддержке грантов РФФИ: «Разработка теории анализа и синтеза управляемой самоорганизации в динамической системе резания в ходе обработки на примере изготовления деталей на токарных станках», № 19-08-00022; «Разработка методов анализа и синтеза динамической системы резания по критерию минимизации приведенных затрат на изготовление», № 20-38-90074.

Благодарности:

Исследования выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

АННОТАЦИЯ

Введение. Эффективность обработки на металлорежущих станках оценивается приведенными затратами на изготовление партии деталей при обеспечении требуемого качества. В современном производстве детали изготавливаются, как правило, на станках с ЧПУ. На сегодняшний день соответствие программы ЧПУ и траекторий исполнительных элементов станка обеспечивается с высокой точностью, которая, однако, еще не гарантирует качество и эффективность изготовления. В основу определения программы ЧПУ положена база знаний о рациональных режимах, инструменте, смазочно-охлаждающей жидкости при обработке. Эта база отражает некоторое усреднение по множеству станков, инструментов и условий обработки. Не принимаются во внимание изменения свойств динамической системы в процессе резания. **Предмет.** В статье рассматривается синергетическое согласование внешнего управления (программы ЧПУ) и динамики резания (внутреннее управление). Факторы внутреннего управления могут быть заданы априорно, а также определены в результате влияния необратимых преобразований энергии в зоне резания. **Цель работы** – определить закон управления траекториями исполнительных элементов станка таким образом, чтобы при изменяющихся свойствах динамической системы резания в ходе обработки детали обеспечивались требуемое качество поверхности детали и минимизация интенсивности изнашивания инструмента. **Метод и методология.** Приводится математическое моделирование управляемой динамической системы, свойства которой изменяются за счет априорно заданных законов вариации параметров подсистем, а также изменения свойств резания, обусловленных мощностью необратимых преобразований энергии. Рассмотрение мощности необратимых преобразований энергии необходимо для прогнозирования износа по задней грани, изменения параметров динамической связи и эволюционной перестройки динамики резания. **Результаты и обсуждения.** Раскрыта закономерность согласования программы ЧПУ с изменяющимися свойствами процесса резания, позволяющими повысить эффективность обработки при обеспечении требуемого качества деталей. Выявлен и проанализирован ряд свойств динамической системы резания, обусловленный изменением траектории скорости продольной подачи инструмента при обработке вала, изменение жесткости которого задано.

Для цитирования: Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Синергетический подход к повышению эффективности управления процессами обработки на металлорежущих станках // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 84–99. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-84-99.

Введение

В настоящее время сформировалась системно-синергетическая парадигма анализа и синтеза сложных систем [1–4]. Она используется при управлении техническими системами [5–8], в том числе процессами обработки на металло-

*Адрес для переписки

Гвинджилия Валерия Енвериевна, аспирант
 Донской государственный технический университет,
 пл. Гагарина, 1
 344000, г. Ростов-на-Дону, Россия
 Тел.: +7 (918) 583-23-33, e-mail: sinedden@yandex.ru

режущих станках [9–13], а также при изучении динамики систем, взаимодействующих с различными средами [14–16]. При определении программ ЧПУ, задающих траектории исполнительных элементов (ТИЭ), используется база знаний, опирающаяся на различные представления о влиянии технологических параметров на обработку [16–24]. Показано, что на интенсивность изнашивания оказывает влияние мощность, выделяемая в зоне резания. Она оценивается, как правило, по температуре [25–32]. Для коррекции управляющих программ, зависящей от информационных обменов в подсистемах, разработаны различные приемы [33–38]. Одним из эффективных методов обеспечения качества деталей является управление упругими деформациями инструмента относительно заготовки [39]. Этот метод получил признание особенно в тех случаях, когда жесткость детали меняется вдоль ТИЭ станка [40–44]. Показано, что выходные характеристики обработки зависят от состояния динамической системы (ДС) [45–54]. Режимы обработки, как правило, остаются неизменными. Не принимаются во внимание изменения свойств ДС, например, зависящих от траектории мощности необратимых преобразований энергии по совершенной работе [55–58]. Следующим шагом, направленным на повышение эффективности обработки, является синергетическое согласование программы ЧПУ с ДС резания. Во-первых, необходимо согласовать технологические режимы и соответствующие им программы ЧПУ с ДС резания; во-вторых, обеспечить это согласование с изменяющимися свойствами системы в ходе эволюции. Целью исследований является разработка алгоритмов, математического инструментария и методики согласования программы ЧПУ с изменяющимися вдоль траектории движения инструмента свойствами ДС резания.

Методика исследований

Пространство состояния

Рассмотрим пространство, в которое поместим заготовку и будем рассматривать траектории движения вершины инструмента, состоящие из ТИЭ станка $\mathbf{L} = \{L_1, L_2, L_3\}^T \in \mathcal{R}^{(3)}$ и траекторий деформационных смещений $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, X_3, Y\}^T \in \mathcal{R}^{(4)}$, в которых выделим

деформационные смещения вершины инструмента относительно несущей системы станка $\mathbf{X}(\mathbf{t}) = \{X_1(t), X_2(t), X_3(t)\}^T \in \mathcal{R}_X^{(3)}$ и деформационные смещения заготовки $Y(t)$ в направлении, нормальном к ее оси. Начало координат пространства $\mathcal{R}^{(3)}$ расположим в правом центре вращения заготовки (рис. 1). Кроме этого зададим траекторию ее вращения ($\Omega = d\alpha / dt$, $\alpha = L_4$). Пространство $\mathcal{R}_X^{(3)}$ является подвижным. Его движение привязано к траекториям \mathbf{L} . Ориентация координат пространства $\mathcal{R}_X^{(3)}$ показана на рис. 1. Векторам \mathbf{L} и \mathbf{X} соответствуют их скорости $\mathbf{V}(\mathbf{t}) = \{V_1, V_2, V_3, V_4\}^T \in \mathcal{R}^{(4)}$ и $\mathbf{v}_X = \{v_{X,1}, v_{X,2}, v_{X,3}, v_{X,4}\}^T \in \mathcal{R}^{(4)}$. Причем $V_4 = \pi D \Omega$. Совокупность $\mathbf{L}(\mathbf{t})$ и $\mathbf{V}(\mathbf{t})$ определяется программой ЧПУ. Рассмотрим также траектории $\mathbf{l}(\mathbf{t}) = \{l_1, l_2, l_3, l_4\}^T$ формообразующих движений

$$\mathbf{l}(\mathbf{t}) = \mathbf{L}(\mathbf{t}) - \mathbf{X}(\mathbf{t}), \quad (1)$$

а также их скоростей $\mathbf{v}(\mathbf{t}) = \{v_1(t), v_2(t), v_3(t), v_4(t)\}^T \in \mathcal{R}^{(4)}$, т. е. $\mathbf{l}(\mathbf{t}) = \int_0^t \mathbf{v}(\xi) d\xi$. Если заданы

$\mathbf{l}(\mathbf{t})$, то определена и скелетная геометрическая топология $\Psi^{(1)} \subset \Psi^{(0)}$ формируемой резанием поверхности [10–12], из которой можно определить используемые в инженерной практике оценки геометрии без учета влияния на поверхность самостоятельных физических процессов, сопровождающих обработку. Условие

$$\mathbf{l}(\mathbf{t}) \in \Psi^{(1)} \subset \Psi^{(0)} \quad (2)$$

определяет требование к качеству формируемой резанием поверхности. Это условие считается достижимым на станке, если управляются ТИЭ $\mathbf{L}(\mathbf{t})$. Однако в ходе эволюции условие $\Phi^{(1)} \subset \Phi^{(0)}$ может стать недостижимым.

Будем опираться на синергетический принцип «расширения-сжатия» размерности пространства состояния [6–8]. Применительно к обработке он раскрывает взаимодействия инструмента и заготовки через среду, формируемую процессом резания.

Ограничимся механическими взаимодействиями трех граней инструмента

$$\mathbf{F}_\Sigma(\mathbf{t}) = \mathbf{F}(\mathbf{t}) + \Phi(\mathbf{t}) + \Phi^{(B)}(\mathbf{t}), \quad (3)$$

где $\mathbf{F}(\mathbf{t}) = \{F_1(t), F_2(t), F_3(t)\}^T \in \mathbb{R}^{(3)}$ – силы, формируемые в области сопряжения передней грани инструмента; $\Phi(\mathbf{t}) = \{\Phi_1(t), \Phi_2(t), \Phi_3(t)\}^T \in \mathbb{R}^{(3)}$ – силы, формируемые в области сопряжения главной задней грани инструмента и ее вспомогательной грани $\Phi^{(B)}(\mathbf{t}) = \{\Phi_1^{(B)}(t), \Phi_2^{(B)}(t), \Phi_3^{(B)}(t)\}^T$. Их необходимо представить в координатах состояния и управления. В областях сопряжения граней рассматривается работа $\mathbf{A}(\mathbf{t}) = \{A_1, A_2, A_3\}^T$ и мощность $\mathbf{N}(\mathbf{t}) = \{N_1, N_2, N_3\}^T$ необратимых преобразований энергии. Фазовая траектория $(\mathbf{A}(\mathbf{t})-\mathbf{N}(\mathbf{t}))$ является генератором всех эволюционных изменений в процессе резания [55–58].

Моделирование взаимодействий

Система является заданной, если раскрыты взаимодействия между подсистемами. Взаимодействия инструмента и заготовки через среду, формируемую процессом резания, образуются в результате пересечения тела инструмента и заготовки. Параметры, характеризующие пересечение, есть режимы (подача, глубина и скорость резания): $\mathbf{T}(\mathbf{t}) = \{S_P(t), t_P(t), V_P(t)\}^T$. Они связаны с $\mathbf{V}(\mathbf{t})$ и $\mathbf{v}_X(\mathbf{t})$ соотношениями

$$S_P(t) = \int_{t-T}^t [V_2(\xi) - v_{X,2}(\xi)] d\xi; \\ V_P(t) = V_3(t) - v_{X,3}(t); \quad (4)$$

$$t_P(t) = d / 2 - \int_0^t [V_1(\xi) - v_{X,1}(\xi) - v_{X,4}(\xi)] d\xi,$$

где $T = (\Omega)^{-1} = \text{const}$ – время оборота в $[S]$. Полагаем, что крутильные деформации заготовки отсутствуют, обрабатывается заготовка неизменного диаметра, система является невозмущенной. Из (4) следует, что взаимодействия существуют лишь при движении инструмента относительно заготовки. Например, подача $S_P(t)$ определяется

оператором интегрирования суммарной скорости подачи во временном окне, определяемом частотой Ω . Если в (4) деформации отсутствуют и все скорости постоянны, то для режимов будем использовать обозначения: $S_P^{(0)}, t_P^{(0)}, V_P^{(0)}$.

Для определения деформаций будем опираться на исследования [55, 56]

$$\mathbf{m} \frac{d^2 \mathbf{X}}{dt^2} + \mathbf{h} \frac{d\mathbf{X}}{dt} + \mathbf{c}\mathbf{X} = \mathbf{F}_\Sigma(S_P, t_P, V_P), \quad (5)$$

где $\mathbf{m} = [m_{s,k}]$, $m_{s,k} = m$, при $s = k$, $m_{s,k} = 0$, при $s \neq k$, $s, k = 1, 2, 3$, $m_{4,4} = m_0(L)$, в кгс²/мм, $\mathbf{h} = [h_{s,k}]$, $h_{s,4} = h_{4,s} = 0$, $s = 1, 2, 3$ в кгс/мм, $\mathbf{c} = [c_{s,k}]$, $s, k = 1, 2, 3, 4$, $c_{s,4} = c_{4,s} = 0$, $s = 1, 2, 3$ в кг/мм – симметричные, положительно определенные матрицы инерционных, скоростных и упругих коэффициентов. Параметры подсистемы заготовки ($m_{4,4} = m_0(L)$, $h_{4,4}(L)$, $c_{4,4}(L)$) зависят от L . Проекция сил в пространстве $\mathbb{R}^{(3)}$ определяются коэффициентами χ_i , удовлетво-

ряющими условием $\sum_{i=1}^3 (\chi_i)^2 = 1$. При этом

$F_4 = -F_1$. При обработке детали сложной геометрии коэффициенты χ_i и матрицы изменяются в зависимости от траектории. Возможность рассмотрения деформационных смещений заготовки в виде скалярной модели обосновывается тем, что ее сечение является круглым. Тогда любая ортогональная система координат, нормальная к оси вращения, является главной. Учет зависимости \mathbf{F} от площади S , скорости резания $V_P(t)$ и учет запаздывание сил по отношению к вариациям S . Тогда

$$\mathbf{F}(\mathbf{t}) = F^{(0)}(t) \{\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_1\}^T, \quad (6)$$

где

$$T^{(0)} dF^{(0)} / dt + F^{(0)} = \\ = \rho \left\{ 1 + \mu \exp \left[-\zeta (V_3 - v_{X,3}(t)) \right] \right\} \left[t_P^{(0)} - X_1 - Y \right] \times \\ \times \int_{t-T}^t \{V_2(\xi) - v_{X,2}(\xi)\} d\xi;$$

ρ – давление в [кг/мм²]; ζ – параметр крутизны сил в [кг/мм]; μ – безразмерный коэффициент;

$T^{(0)}$ – параметр, определяющий запаздывание сил.

Представим также модель сил $\Phi(t)$ в координатах состояния. Модуль этих сил зависит от сближения задних граней с заготовкой, т. е. от заднего угла $\alpha_\Sigma(t)$ (рис. 1). Этот угол определяется суммой

$$\alpha_\Sigma(t) = \alpha + \Delta\alpha(t), \quad (7)$$

где α – значение заднего угла; его приращение $\Delta\alpha = \arctg \left[\frac{V_2 - v_{X,2}(t)}{V_3 - v_{X,3}(t)} \right]$. Аналогично меняется угол между задней гранью и заготовкой

$\alpha_\Sigma^{(1)}(t) = \alpha^{(1)} + \Delta\alpha^{(1)}(t)$. Так как $\alpha_\Sigma(t)$ и $\alpha_\Sigma^{(1)}(t)$ есть величины малые, то для сил $\Phi(t)$ справедливо

$$\begin{cases} \Phi_1 = \rho_0 \left\{ \int_{t-T}^t [V_2 - v_{X,2}(t)] dt \right\} \exp[\alpha_1 \alpha_\Sigma^{(1)}(t)]; \\ \Phi_2 = \rho_0 [t_p^{(0)} - X_1(t) - Y(t)] \exp \alpha_2 \alpha_\Sigma(t); \\ \Phi_3 = k_T [\Phi_1 + \Phi_2], \end{cases} \quad (8)$$

где α_1, α_2 – коэффициенты крутизны; ρ_0 – параметр, имеющий смысл жесткости; k_T – коэффициент трения в контакте грани инструмента с заготовкой.

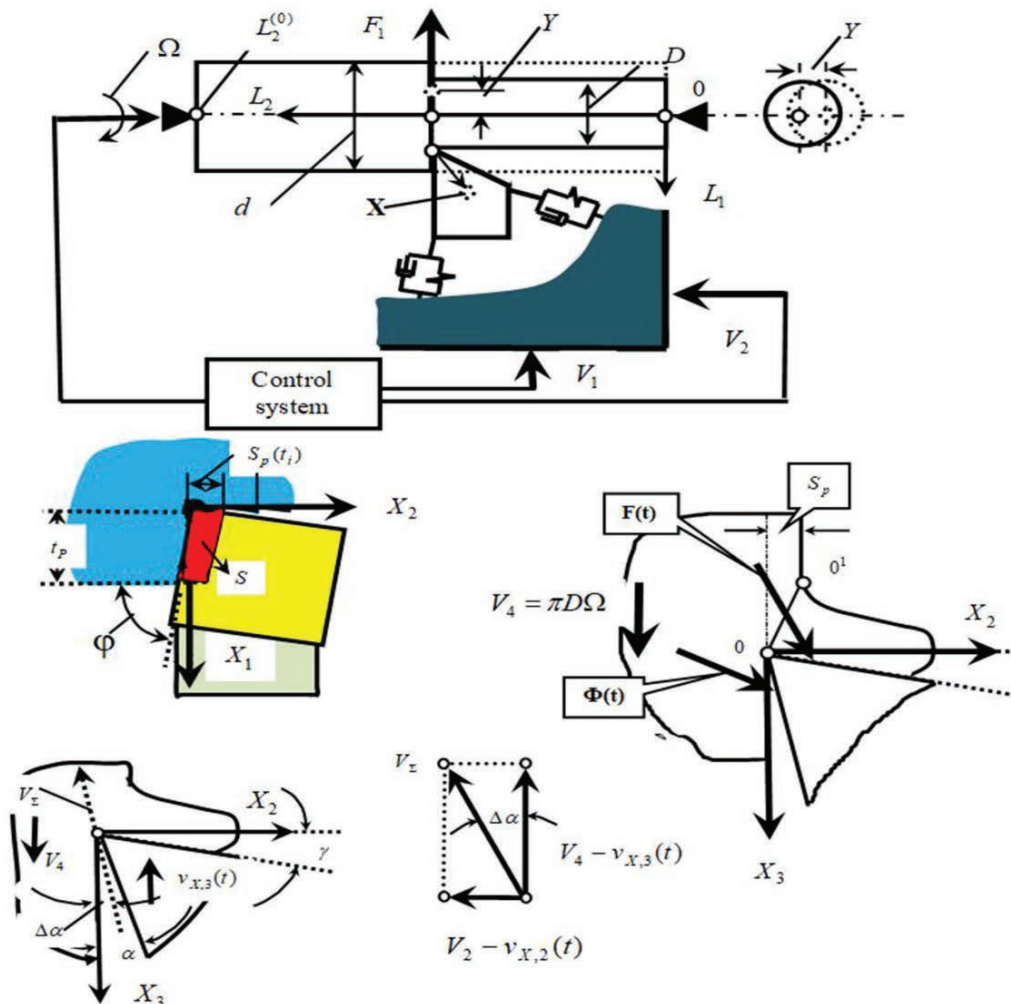


Рис. 1. Схема взаимодействия приводов вращения шпинделя и подачи суппорта, а также формирования динамической связи процесса резания
Fig. 1. Scheme of interaction between the spindle rotation and feed drives of the slide, as well as the formation of a dynamic connection of the cutting process

Система (8), дополненная (2)–(6), позволяет исследовать \mathbf{X} , \mathbf{F} , Φ и мощность необратимых преобразований энергии. Они изменяются, если варьируются параметры динамической связи и $\mathbf{V}(t)$. Зависимости позволяют также вычислить мощность $N_2(t)$ и работу сил:

$$N(t) = \Phi_1(t)v_{X,1}(t) + \Phi_2(t)[V_2 - v_{X,2}(t)] + k_T [\Phi_1(t) + \Phi_2(t)][V_4 - v_{X,3}(t)]. \quad (9)$$

Рассмотрение мощности $N_2(t)$ необходимо для прогнозирования износа по задней грани, изменения параметров динамической связи и эволюционной перестройки динамики резания. В статье мы ограничились рассмотрением мощности необратимых преобразований в области сопряжения задней грани инструмента и заготовки, так как при резании твердосплавными инструментами превалирующий износ наблюдается именно по его задней грани.

Согласование траекторий с изменяющейся жесткостью

В статье ограничимся проблемой синергетического согласования ТИЭ станка с априорно заданным законом изменения $m_0(L)$, $h_{4,4}(L)$, $c_{4,4}(L)$. Задача решается в три этапа.

На первом этапе определяется множество фазовых траекторий $V_2(L_2)$, при которых отклонение диаметра $\Delta D = 2(X_1 + Y) = \text{const}$. Функцию $c_{4,4}[L_2(t)]$ можно считать постоянной в пределах импульсной реакции системы. Тогда для определения связи ΔD и V_2 можно воспользоваться системой

$$X_1 + Y = \frac{\Delta \mathbf{X}_1 + \Delta \mathbf{Y}}{\Delta} = \Delta_\Sigma = \text{const}, \quad (10)$$

где

$$\Delta = \begin{bmatrix} c_{1,1} + \chi_1 \rho_0 V_2 T & c_{2,1} & c_{3,1} & \chi_1 \rho_0 V_2 T \\ c_{1,2} + \chi_2 \rho_0 V_2 T & c_{2,2} & c_{3,2} & \chi_2 \rho_0 V_2 T \\ c_{1,3} + \chi_3 \rho_0 V_2 T & c_{2,3} & c_{3,3} & \chi_3 \rho_0 V_2 T \\ \chi_1 \rho_0 V_2 T & 0 & 0 & c_{4,4}(L_2) + \chi_1 \rho_0 V_2 T \end{bmatrix};$$

$$\rho_0 = \rho \{1 + \mu \exp[-\zeta(V_3)]\};$$

$$\Delta \mathbf{X}_1 = \rho_0 t_P^{(0)} V_2 T \begin{bmatrix} \chi_1 & c_{2,1} & c_{3,1} & \chi_1 \rho_0 V_2 T \\ \chi_2 & c_{2,2} & c_{3,2} & \chi_2 \rho_0 V_2 T \\ \chi_3 & c_{2,3} & c_{3,3} & \chi_3 \rho_0 V_2 T \\ \chi_1 & 0 & 0 & c_{4,4}(L_2) + \chi_1 \rho_0 V_2 T \end{bmatrix};$$

$$\Delta \mathbf{Y} = \rho_0 t_P^{(0)} V_2 T \begin{bmatrix} c_{1,1} + \chi_1 \rho_0 V_2 T & c_{2,1} & c_{3,1} & \chi_1 \\ c_{1,2} + \chi_2 \rho_0 V_2 T & c_{2,2} & c_{3,2} & \chi_2 \\ c_{1,3} + \chi_3 \rho_0 V_2 T & c_{2,3} & c_{3,3} & \chi_3 \\ \chi_1 \rho_0 V_2 T & 0 & 0 & \chi_1 \end{bmatrix}.$$

При определении $V_2(L_2)$ скорость V_2 рассматривается усредненной по периодам вращения заготовки, и ее вариации не должны превышать допустимых значений исходя из требований к шероховатости поверхности.

На втором этапе из этого множества $V_2(L_2)$ выбираются асимптотически устойчивые траектории. Для этого необходимо вычислить точки равновесия $\mathbf{X}^* = \{X_1^*, X_2^*, X_1^*, Y_1^*\}^T$ и F_0^* , и после замены переменных $\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}^* + \mathbf{x}(t)$ и $F_0(t) = F_0^* + f(t)$ определить уравнение в вариациях, его линеаризовать и исследовать известными приемами [55–58]. Приведем линеаризованное в окрестности равновесия уравнение в вариациях, соответствующее (5) и (6):

$$\mathbf{M} d^2 \mathbf{z}(t) / dt^2 + \mathbf{H} d \mathbf{z}(t) / dt + \mathbf{C} \mathbf{z}(t) = \mathbf{0}, \quad (11)$$

где $\mathbf{z}(t) = \{x_1(t), x_2(t), x_3(t), y(t), f(t)\}^T$;

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{2,1} & h_{3,1} & 0 & 0 \\ h_{1,2} & h_{2,2} & h_{3,2} & 0 & 0 \\ h_{1,3} & h_{2,3} & h_{3,3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h_0 & 0 \\ 0 & 0 & -\rho(t_P^{(0)} - X_1^*)S_P^{(0)}\zeta\mu \exp(-\zeta V_3) & 0 & \frac{kS_P^{(0)}(t_P^{(0)} - X_1^*)}{V_3} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{2,1} & c_{3,1} & 0 & -\chi_1 \\ c_{1,2} & c_{2,2} & c_{3,2} & 0 & -\chi_2 \\ c_{1,3} & c_{2,3} & c_{3,3} & 0 & -\chi_3 \\ 0 & 0 & 0 & c_{4,4}(L_2) & -\chi_1 \\ \rho\{1 + \mu \exp(-\zeta V_3)\}S_P^{(0)} & \rho\{1 + \mu \exp(-\zeta V_3)\}[t_P^{(0)} - X_1^*] & 0 & \rho\{1 + \mu \exp(-\zeta V_3)\}S_P^{(0)} & 1 \end{bmatrix}.$$

Процедуру синтеза проиллюстрируем на примере точения вала штуцера топливной системы из стали 45. Длина $L_2^{(0)} = 120$ мм, диаметр 20 мм, режимы: $t_P^{(0)} \leq 2,0$ мм, $V_3 = 2,0$ м/с. Параметры матрицы скоростных коэффициентов и динамической связи приведены в табл. 1 и 2 соответственно. Обобщенные массы: $m = 0,5 \cdot 10^{-3}$ кг · с²/мм, обобщенная масса m_0 и коэффициент $h_{4,4}$ изменяются при варьирова-

нии $c_{4,4}$ так, что собственная частота и коэффициент затухания подсистемы заготовки остаются неизменными.

Для этого примера приведем траектории жесткости $c_{4,4}(L_2)$, деформационных смещений $\Delta_\Sigma(L_2)$ и скорости $V_2(L_2)$, обеспечивающей $\Delta_\Sigma(L_2) = \text{const}$ (рис. 2).

В зависимости от параметров изображающая точка на рис. 2 может пересекать фигуративную

Таблица 1
Table 1

Параметры матрицы скоростных коэффициентов и упругости
Parameters of the matrix of velocity coefficients and elasticity

$h_{1,1}$	$h_{2,2}$	$h_{3,3}$	$h_{1,2} = h_{2,1}$	$h_{1,3} = h_{3,1}$	$h_{2,3} = h_{3,2}$	$h_{4,4}$
0,25	0,15	0,15	0,1	0,08	0,08	0,18
$c_{1,1}$	$c_{2,2}$	$c_{3,3}$	$c_{1,2} = c_{2,1}$	$c_{1,3} = c_{3,1}$	$c_{2,3} = c_{3,2}$	$c_{4,4}$
1000	800	800	200	100	100	200...300

Таблица 2
Table 2

Параметры динамической связи
Parameters of the dynamic link

ρ , [кг/мм ²]	ζ , m/s	$T_0\zeta$	μ
500	0,1	0,001...0,005	0,5

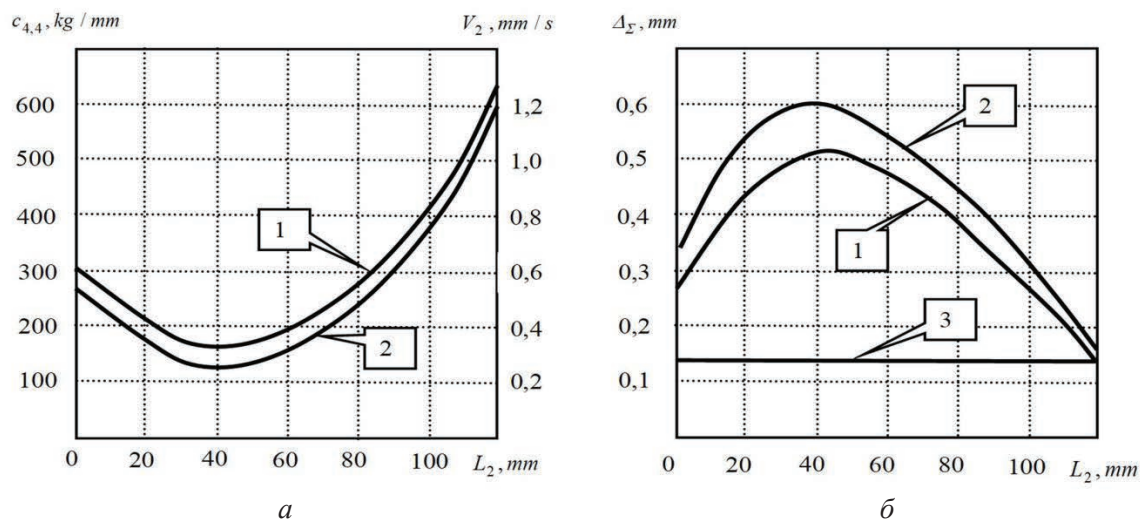


Рис. 2. Изменение свойств системы по оси L_2 :

a – траектория изменения радиальной жесткости $c_{4,4}$ (1) и рациональная траектория скорости подачи (2); b – погрешность, обусловленная упругими деформациями Δ_Σ , при (1) – постоянной подаче; (2) – при постоянной силе; (3) – при управлении скоростью подачи

Fig. 2. Changing the properties of the system along the axis L_2 :

a – trajectory of radial stiffness change $c_{4,4}$ (1) and rational feed rate trajectory V_2 (2); b – error caused by elastic deformations Δ_Σ at (1) – constant feed, at (2) – constant force, at (3) – feed rate control

линию. Тогда траектория $V_2(L_2)$ становится неустойчивой.

Потеря устойчивости зависит и от V_2 , изменяющейся вдоль L_2 износа инструмента. Для обеспечения условия (10) необходимо изменить параметры подсистем конструктивными методами или откорректировать скорость резания $V_p^{(0)} = V_3$ и соответствующую ей скорость подачи V_2 . Из рис. 3 видно, что при увеличении скорости всегда расширяется область устойчивости. Ранее показано, что при возрастании скорости в системе наблюдается также параметрическое самовозбуждение [11–13]. Поэтому при увеличении скорости существует ее диапазон, в котором запас устойчивости максимален.

На третьем этапе из множества $\Psi^{(L)}$ выбираются траектории, обеспечивающие минимум интенсивности изнашивания инструмента. Учитывается [29–32], что по мере совершения работы, подводимой к зоне резания энергии, наблюдается эволюционная перестройка свойств

процесса резания, в том числе и интенсивности изнашивания инструмента. Причем каждая эволюционная диаграмма является уникальной. Она зависит от начальных параметров, режимов и возмущений. Поэтому даже малым их вариациям соответствуют отличные диаграммы износа и изменения геометрических характеристик формируемой резанием поверхности заготовки.

Результаты и их обсуждение

При резании наблюдается изменение свойств динамической системы, определяющееся двумя причинами. Во-первых, изменениями параметров взаимодействующих подсистем, их жесткости, вариациями припуска и пр. Эти факторы являются априорно заданными. Во-вторых, изменением свойств формируемой резанием динамической связи, объединяющей подсистемы, а также развитием износа инструмента. Эти факторы обусловлены мощностью необратимых преобразований подводимой к резанию энергии. Важно подчеркнуть, что свойства динамической системы резания в процессе обработки

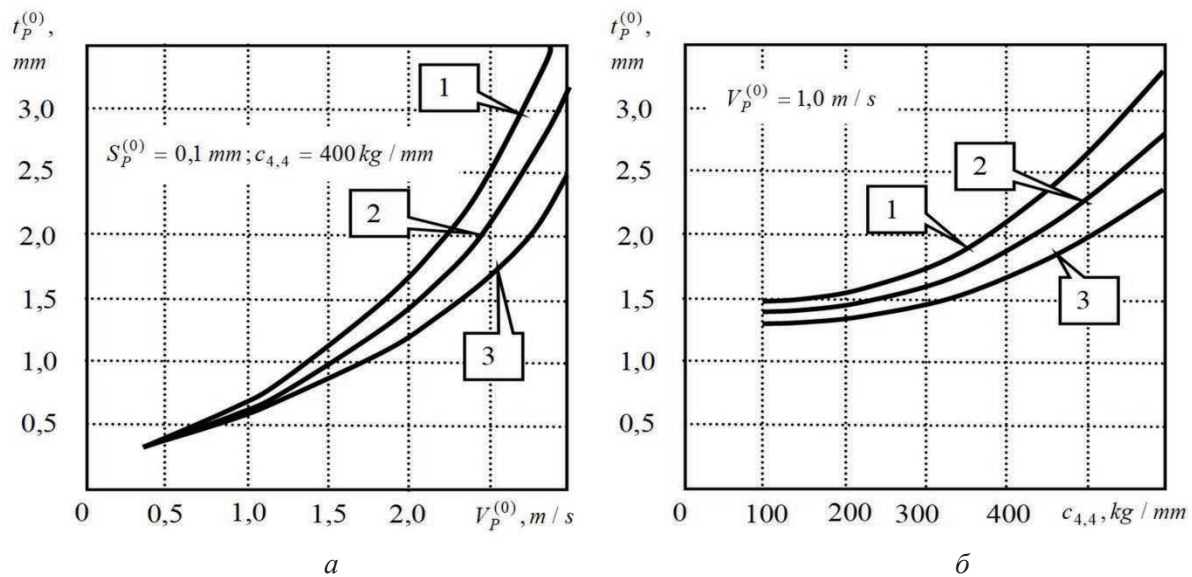


Рис. 3. Области устойчивости «замороженной» системы при различных значениях износа w_0 :

1 – $w_0 = 0,05$; 2 – $w_0 = 0,1$; 3 – $w_0 = 0,15$

Fig. 3. Areas of stability of the “frozen” system at different values of wear w_0 :

1 – $w_0 = 0,05$; 2 – $w_0 = 0,1$; 3 – $w_0 = 0,15$

изменяются даже тогда, когда параметры подсистем (матрицы \mathbf{m} , \mathbf{h} и \mathbf{c}) остаются неизменными. Поэтому необходимо согласовать ТИЭ станка (программу ЧПУ) с изменяющимися свойствами резания.

В зависимости от априорно заданных законов изменения параметров системы можно определить множество желаемых ТИЭ станка, при которых обеспечиваются выходные требования к процессу резания и выбрать из этого множества асимптотически устойчивые, т. е. аттракторы. Приведенный пример выбора траектории скорости продольной подачи при обработке вала, изменение жесткости которого задано, позволил выявить ряд свойств.

1. Если динамическая система резания является невозмущенной и вариации жесткости являются единственным изменяющимся в пространстве параметром, то упругие деформационные смещения можно стабилизировать программными методами с высокой точностью. В этом случае стабилизация сил резания приводит даже к большей погрешности диаметра, чем обработка без управления на постоянных режимах (рис. 3). Это обусловлено свойствами саморегулирования процесса резания, в котором формируемые силы, представленные в координатах состояния, играют роль внутреннего регулятора диаметра

обработки с отрицательной обратной связью, формируемой самим процессом резания. Если же основным изменяющимся параметром является вариация припуска, то стабилизацией сил путем вариации подачи можно полностью компенсировать влияние вариаций припуска на точность диаметра. Во всех случаях необходимо не стабилизировать силы резания, а обеспечивать постоянство упругих деформаций на основе их согласования с законом изменения свойств резания и априорно заданных возмущений.

2. Возможности управления точностью деталей путем варьирования скорости подачи ограничены. Из (4) следует, что вариации подачи $S_P(t)$, влияющие на силы резания, зависят как от временного окна T , в котором интегрируется скорость подачи, так и от скоростей $v_{X,2}(t)$. Обычно собственные частоты колебательных контуров, которые образуются в подсистемах со стороны инструмента и заготовки минимум на порядок больше частоты вращения заготовки. Тогда при рассмотрении деформационных смещений можно ограничиться упругими реакциями и с учетом этого проанализировать преобразование скорости подачи в ее величину в частотной области. Нетрудно получить АФЧХ преобразования $V(t)$ в $S_P(t)$ с учетом (10).

Вначале приведем выражение для передаточной функции где

$$W_{V,S}(p) = \frac{S_P(p)}{V_2(p)} = \frac{1 - \exp(-pT)}{p} \times \left\{ 1 - \frac{A[1 - \exp(-pT)]}{1 + A[1 - \exp(-pT)]} \right\}, \quad (12)$$

где $A = \frac{\rho_0 t_P^{(0)}}{c_0}$ – безразмерный параметр влия-

ния системы резания на преобразование

$$V_2 \rightarrow S_P; c_0 = \frac{\Delta X_2}{\Delta};$$

$$\Delta X_2 = \begin{bmatrix} c_{1,1} + \chi_1 \rho_0 V_2 T & \chi_1 & c_{3,1} & \chi_1 \rho_0 V_2 T \\ c_{1,2} + \chi_2 \rho_0 V_2 T & \chi_2 & c_{3,2} & \chi_2 \rho_0 V_2 T \\ c_{1,3} + \chi_3 \rho_0 V_2 T & \chi_3 & c_{3,3} & \chi_3 \rho_0 V_2 T \\ \chi_1 \rho_0 V_2 T & \chi_1 & 0 & c_{4,4}(L_2) + \chi_1 \rho_0 V_2 T \end{bmatrix},$$

или после очевидных преобразований имеем

$$W_{V,S}(j\omega) = \left\{ \frac{\sin(\omega T)}{\omega} - j \frac{1 - \cos(\omega T)}{\omega} \right\} \times \{R(\omega) + jI(\omega)\} \quad (13)$$

$$R(\omega) = 1 - \frac{A[1 + 2A][1 - \cos(\omega T)]}{[1 + A - A \cos(\omega T)]^2 + A^2 \sin^2(\omega T)} = \frac{1 + A - A \cos(\omega T)}{[1 + 2A(1 + A)(1 - \cos(\omega T))]};$$

$$I(\omega) = \frac{A \sin(\omega T)}{[1 + A - A \cos(\omega T)]^2 + A^2 \sin^2(\omega T)} = \frac{A \sin(\omega T)}{[1 + 2A(1 + A)(1 - \cos(\omega T))]}.$$

Приведем примеры изменения $W_{V,S}(j\omega)$ в функции безразмерной частоты $\Omega = \omega T$ (рис. 4). Анализ (13), а также рис. 4 позволяет сделать следующие важные заключения. Во-первых, при вариациях скорости $V_2(t)$ с частотой вращения заготовки деформационные смещения инструмента относительно заготовки являются неуправляемыми. Во-вторых, в низкочастотной области (до частоты 0,1W) вариации подачи $S_P(t)$ отличаются от скорости $V_2(t)$ на постоянный

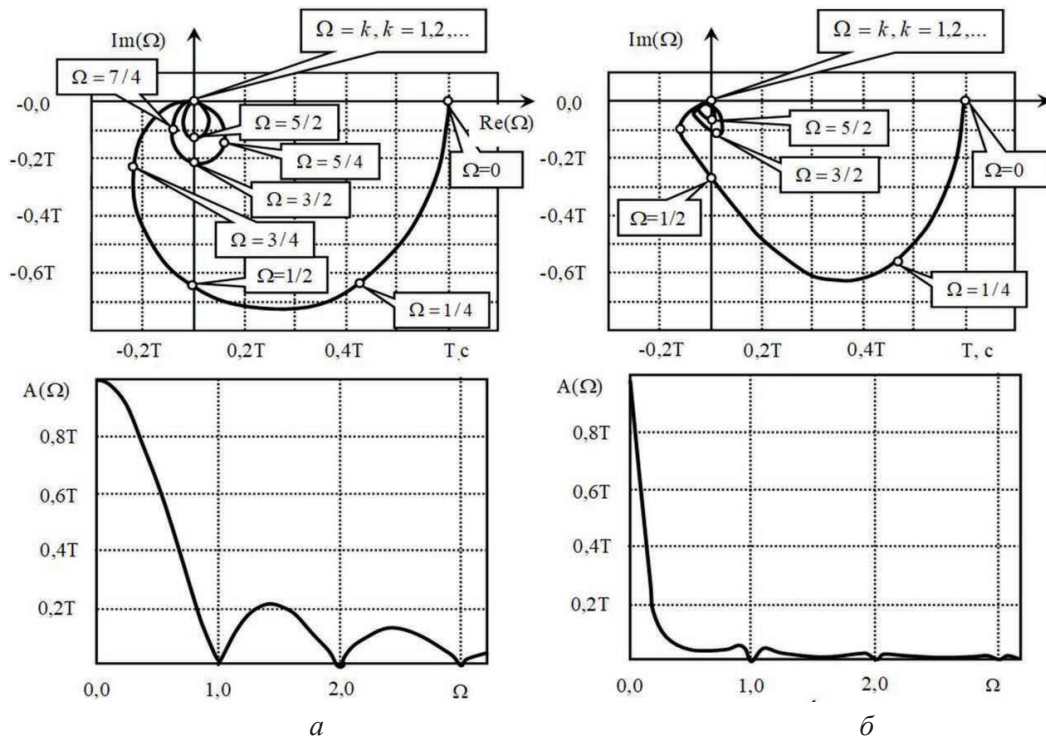


Рис. 4. Частотные характеристики преобразования $V_2 \rightarrow S_P$:

$a - A = 0$; $b - A = 0,5$

Fig. 4. Frequency conversion characteristics $V_2 \rightarrow S_P$:

$a - A = 0$; $b - A = 0,5$

коэффициент «Т». Затем наблюдается быстрое вращение фазы и периодическое, с монотонным затуханием максимальной амплитуды, изменение S_p . Фаза вращается в пределах «0 – π », что влияет на динамические свойства, в том числе на устойчивость. В-третьих, динамические свойства преобразования $V_2(t)$ в силы зависят не только от свойств приводов, но и от параметров жесткости подсистем инструмента и заготовки, а также от параметров динамической связи, формируемой процессом резания. Например, уменьшение приведенной жесткости вызывает увеличение времени переходного процесса. На рис. 4 это отображается в уменьшении полосы пропускания системы. Таким образом, при проектировании желаемой траектории подачи необходимо ее значения усреднять по нескольким периодам вращения заготовки с использованием алгоритмов скользящего среднего.

Наконец, преобразование $V_2 \rightarrow S_p$, влияющее на силы резания, зависит и от частоты вращения заготовки, задающей скорость резания, которая выбирается исходя из минимизации интенсивности изнашивания инструмента.

Выводы

При обработке деталей сложной геометрии, а также имеющих априорно заданный закон изменения жесткости заготовки при определении программы ЧПУ необходимо выполнить ее согласование с изменяющимися свойствами системы. Эффективный способ такого согласования может быть основан на синергетической парадигме обеспечения когерентности внешнего управления с изменяющейся внутренней динамикой системы резания. Предложенный алгоритм такого согласованного управления включает определение желаемой траектории и обеспечение ее асимптотической устойчивости при минимизации интенсивности изнашивания инструмента. При этом учитываются раскрытые в статье условия реализуемости управления, зависящие от особенностей динамической системы резания.

Список литературы

1. Haken H. Information and self-organization: a macroscopic approach to complex systems. – Amsterdam: Elsevier, 2006. – 258 p. – ISBN 978-3-540-33021-9. – DOI: 10.1007/3-540-33023-2.
2. Prigogine I., George C. The second law as a selection principle: the microscopic theory of dissipative processes in quantum systems // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 1983. – Vol. 80. – P. 4590–4594.
3. Эбелинг В., Энгель А., Файстель Р. Физика процессов эволюции. – М.: УРСС, 2001. – 328 с.
4. Николис Дж. Динамика иерархических систем. – М.: Мир, 1989. – 488 с.
5. Колесников А.А. Прикладная синергетика: основы системного синтеза. – Таганрог: ЮФУ, 2007. – 384 с.
6. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 344 с. – ISBN 5-230-24678-2.
7. Колесников А.А., Кузьменко А.А. Метод АКАР и теория адаптивного управления в задачах синтеза нелинейных систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2017. – Т. 18, № 9. – С. 579–589. – DOI: 10.17587/mau.18.579-589.
8. Колесников А.А., Колесников Ал.А., Кузьменко А.А. Методы АКАР и АКОР в задачах синтеза нелинейных систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Т. 17, № 10. – С. 657–669. – DOI: 10.17587/mau.17.657-669.
9. Заковоротный В.Л., Флек М.Б., Фам Д.Т. Синергетическая концепция при построении систем управления точностью изготовления деталей сложной геометрической формы // Вестник Донского государственного технического университета. – 2011. – Т. 11, № 10 (61). – С. 1785–1797.
10. Zakovorotny V.L., Gubanova A.A., Lukyanov A.D. Stability of shaping trajectories in milling: Synergetic concepts // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36 (11). – P. 956–964. – DOI: 10.3103/S1068798X16110216.
11. Zakovorotny V.L., Gubanova A.A., Lukyanov A.D. Parametric self-excitation of a dynamic end-milling machine // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36 (12). – P. 1033–1039. – DOI: 10.3103/S1068798X16120194.
12. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Influence of spindle wobble in a lathe on the tool's deformational-displacement trajectory // Russian Engineering Research. – 2018. – Vol. 38 (8). – P. 623–631. – DOI: 10.3103/S1068798X1808018X.
13. Zakovorotny V.L., Bykador V.S. Cutting-system dynamics // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36 (7). – P. 591–598. – DOI: 10.3103/S1068798X16070182.
14. Zakovorotny V.L., Flek M.B., Ugnich E.A. Synergetic approach to the modeling of industrial enterprise's economic activity // International Journal of Economic Perspectives. – 2016. – Vol. 10 (4). – P. 371–375.

15. *Заковоротный В.Л., Шаповалов В.В.* Динамика транспортных трибосистем // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2005. – № 12. – С. 19–24.
16. *Рыжский А.А.* Синергетика изнашивания инструментальных материалов при лезвийной обработке. – Ростов н/Д.: Донской гос. техн. ун-т, 2019. – 289 с. – ISBN 978-5-7890-1669-5.
17. *Старков В.К.* Физика и оптимизация резания материалов. – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.
18. *Мигранов М.Ш.* Исследования изнашивания инструментальных материалов и покрытий с позиций термодинамики и самоорганизации // Известия вузов. Машиностроение. – 2006. – № 11. – С. 65–71.
19. *Каримов И.Г.* Влияние температуры резания на энергетические параметры контакта инструмента с деталью // Вестник УГАТУ. – 2012. – Т. 16, № 44 (49). – С. 85–89.
20. Non-equilibrium work distribution for interacting colloidal particles under friction / J.R. Gomez-Solano, C. July, J. Mehl, C. Bechinger // New Journal of Physics. – 2015. – Vol. 17. – P. 045026. – DOI: 10.1088/1367-2630/17/4/045026.
21. *Banjac M.* Friction and wear processes-thermodynamic approach // Tribology in Industry. – 2014. – Vol. 36, N 4. – P. 341–347.
22. *Abdel-Aal H.A.* Thermodynamic modeling of wear // Encyclopedia of Tribology. – Boston, MA: Springer, 2013. – P. 3622–3636. – DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5_1313.
23. *Duyun T.A., Grinek A.V., Rybak L.A.* Methodology of manufacturing process design, providing quality parameters and minimal costs // World Applied Sciences Journal. – 2014. – Vol. 30 (8). – P. 958–963. – DOI: 10.5829/idosi.wasj.2014.30.08.14120.
24. *Mukherjee I., Ray P.K.* A review of optimization techniques in metal cutting processes // Computers and Industrial Engineering. – 2006. – Vol. 50, N 12. – P. 15–34. – DOI: /10.1016/j.cie.2005.10.001.
25. Патент 2538750 Российская Федерация. Способ определения оптимальной скорости резания в процессе металлообработки / Козочкин М.П., Федоров С.В., Терешин М.В. – № 2013123625/02; заявл. 23.05.2013; опубл. 10.01.2015.
26. *Зариктуев В.Ц.* Автоматизация процессов на основе положения об оптимальной температуре резания // Вестник УГАТУ. – 2009. – Т. 12, № 4. – С. 14–19.
27. *Лапишин В.П., Христофорова В.В., Носачев С.В.* Взаимосвязь температуры и силы резания с износом и вибрациями инструмента при токарной обработке металлов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 3. – С. 44–58. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-44-58.
28. *Lapshin V., Moiseev D., Minakov V.* Diagnosing cutting tool wear after change of cutting forces during turning // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2188. – P. 030001. – DOI: 10.1063/1.5138394.
29. *Begic-Hajdarevic D., Cekic A., Kulenovic M.* Experimental study on the high speed machining of hardened steel // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 69. – P. 291–295. – DOI: 10.1016/j.pro-eng.2014.02.234.
30. Flushing strategies for high performance, efficient and environmentally friendly cutting / P. Blau, K. Busch, M. Dix, C. Hochmuth, A. Stoll, R. Wertheim // Procedia CIRP. – 2015. – Vol. 26. – P. 361–366. – DOI: 10.1016/j.procir.2014.07.058.
31. *Chin C.-H., Wang Y.-C., Lee B.-Y.* The effect of surface roughness of end-mills on optimal cutting performance for high-speed machining // Strojnicki Vestnik = Journal of Mechanical Engineering. – 2013. – Vol. 52 (2). – P. 124–134. – DOI: 10.5545/sv-jme.2012.677.
32. *Kant G., Sangwan K.S.* Prediction and optimization of machining parameters for minimization power consumption and surface roughness in machining // Journal of Cleaner Production. – 2014. – Vol. 83. – P. 151–164. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.07.073.
33. *Martinov G., Martinova L., Ljubimov A.* From classic CNC systems to cloud-based technology and back // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. – 2020. – Vol. 63. – DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101927.
34. *Martinov G.M., Kovalev I.A., Grigoriev A.S.* Approach to building an autonomous cross-platform automation controller based on the synthesis of separate modules // Advances in Automation. RusAutoCon 2019. – Cham: Springer, 2020. – P. 128–136. – DOI: 10.1007/978-3-030-39225-3_15.
35. *Сосонкин В.Л., Мартинов Г.М.* Новейшие тенденции в области архитектурных решений систем ЧПУ // Автоматизация в промышленности. – 2005. – № 4. – С. 3–9.
36. Approach to the diagnosis and configuration of servo drives in heterogeneous machine control systems / G.M. Martinov, S.V. Sokolov, L.I. Martinova, A.S. Grigoryev, P.A. Nikishechkin // Advances in swarm intelligence. ICSI 2017 / ed. by Y. Tan, H. Takagi, Y. Shi, B. Niu. – Cham: Springer, 2017. – P. 586–594. – (Lecture Notes in Computer Science; vol. 10386). – DOI: 10.1007/978-3-319-61833-3_62.
37. *Sang Z., Xu X.* The framework of a cloud-based CNC system // Procedia CIRP. – 2017. – Vol. 63. – P. 82–88. – DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.152.
38. *Мартинов Г.М., Козак Н.В., Никишечкин П.А.* Решение задачи резервирования в станках с числовым программным управлением // СТИН. – 2020. – № 7. – С. 2–7.
39. *Базров Б.М., Балакишин Б.С.* Адаптивное управление станками. – М.: Машиностроение, 1973. – 688 с.



40. Математическая модель уточнения режимов резания для обеспечения точности токарной обработки нежестких валов на станках с ЧПУ / А.А. Жданов, А.Л. Плотников, Ю.Л. Чигиринский, И.В. Фирсов // Научные труды SWorld. – 2015. – Т. 3, № 4 (41). – С. 41–47.

41. Никишечкин П.А., Григорьев А.С. Практические аспекты разработки модуля диагностики и контроля режущего инструмента в системе ЧПУ // Вестник МГТУ СТАНКИН. – 2013. – № 4 (27). – С. 65–70.

42. Бобровский А.В., Драчев О.И. Технология механической обработки маложестких осесимметричных деталей // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2019. – № 9 (232). – С. 15–17.

43. Драчев О.И. Система автоматического управления эксплуатационной точностью длинномерных валов // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2017. – № 5 (200). – С. 18–20.

44. Казаков А.В., Жолобов А.А. Прогнозирование и обеспечение точности токарной обработки ступенчатых валов // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2014. – № 1 (42). – С. 6–14.

45. Кудинов В.А. Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.

46. Воронов С.А., Киселев И.А. Нелинейные задачи динамики процессов резания // Машиностроение и инженерное образование. – 2017. – № 2 (51). – С. 9–23.

47. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays / A.M. Gousskov, S.A. Voronov, H. Paris, S.A. Batzer // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. – 2002. – Vol. 7. – P. 207–221. – DOI: 10.1016/s1007-5704(02)00014-x.

48. A prediction method of cutting force coefficients with helix angle of flat-end cutter and its application in a virtual three-axis milling simulation system / Y.-C. Kao, N.-T. Nguyen, M.-S. Chen, S.T. Su // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 77, N 9–12. – P. 1793–1809. – DOI: 10.1007/s00170-014-6550-8.

49. Stepan G., Insperger T., Szalai R. Delay, parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2005. – Vol. 15, N 9. – P. 2783–2798. – DOI: 10.1142/S0218127405013642.

50. Corpus W.T., Endres W.J. Added stability lobes in machining processes that exhibit periodic time varia-

tion – Part 1: An analytical solution // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2004. – Vol. 126. – P. 467–474. – DOI: 10.1115/1.1765137.

51. Impact of the cutting dynamics of small radial immersion milling operations on machined surface roughness / G. Peigne, H. Paris, D. Brissaud, A. Gousskov // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2004. – Vol. 44. – P. 1133–1142. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.04.012.

52. The parametric effect and optimization on JIS S45C steel turning / H. Hadi, L. Tajul, Z.A. Zailani, M.F.M.A. Hamzas, M.S. Hussin // International Journal of Engineering Science and Technology. – 2011. – Vol. 3, N 5. – P. 4479–4487.

53. Rusinek R., Wiercigroch M., Wahi P. Influence of tool flank forces on complex dynamics of a cutting process // International Journal of Bifurcation and Chaos. – 2014. – Vol. 24 (9). – P. 189–201. – DOI: 10.1142/S0218127414501156.

54. Rusinek R., Wiercigroch M., Wahi P. Modeling of frictional chatter in metal cutting // International Journal of Mechanical Sciences. – 2014. – Vol. 89. – P. 167–176. – DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.08.020.

55. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Связь самоорганизации динамической системы резания с изнашиванием инструмента // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2020. – Т. 28, № 1. – С. 46–61. – DOI: 10.18500/0869-6632-2020-28-1-46-61.

56. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Бифуркации притягивающих множеств деформационных смещений режущего инструмента в ходе эволюции свойств процесса обработки // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2018. – Т. 26, № 5. – С. 20–38. – DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-5-20-38.

57. Lapshin V.P., Turkin I.A., Khristoforova V.V. Assessment of metal wear in turning on the basis of components of the cutting force // Russian Engineering Research. – 2020. – Vol. 40, N 9. – P. 797–800.

58. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Влияние динамики резания на выбор технологических режимов, обеспечивающих минимальное изнашивание режущих инструментов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 4. – С. 54–70. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-54-70.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Synergetic approach to improve the efficiency of machining process control on metal-cutting machines

Vilor Zakovorotny^a, Valery Gvindjiliya^{b, *}

Don State Technical University, 1 Gagarin square, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0003-2187-9897>, vzakovorotny@dstu.edu.ru, ^b <https://orcid.org/0000-0003-1066-4604>, sinedden@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 29 June 2021

Revised: 17 July 2021

Accepted: 30 July 2021

Available online: 15 September 2021

Keywords:

Processing efficiency

Self-organization and evolution

Synergetics of reconciling external and internal dynamics

Funding

This study was performed with financial support of RFBR grants: “Development of the theory of analysis and synthesis of controlled self-organization in a dynamic cutting system during processing on the example of manufacturing parts on lathes”, No. 19-08-00022; “Development of methods for analysis and synthesis of a dynamic cutting system based on the criterion of minimizing the reduced manufacturing costs”, No. 20-38-90074.

Acknowledgements

Research were conducted at core facility “Structure, mechanical and physical properties of materials”.

ABSTRACT

Introduction. The efficiency of processing on metal-cutting machines is evaluated by the reduced cost of producing a batch of parts while ensuring the required quality. In modern production, parts are usually made on CNC machines. Today the CNC program and the trajectories of the machine tool actuators match each other with high accuracy, which, however, does not yet guarantee quality and efficiency of production. The definition of the CNC program is based on the knowledge base of rational modes, tools, coolant and etc. during processing. This base reflects some averaging over the set of machines, tools and processing conditions, and does not take into account changes in the properties of the dynamic system in the process of cutting. **Subject.** The paper deals with the synergistic matching of external control (CNC programs) and cutting dynamics (internal control). The internal control factors can be set a priori, as well as determined as a result of the influence of irreversible energy transformations in the cutting zone. **The purpose of the work** is to determine the law of controlling the trajectories of the machine's executive elements in such a way that, with changing properties of the dynamic cutting system, the required surface quality of the part and minimizing the intensity of tool wear are ensured during the processing of the part. **Method and methodology.** Mathematical simulation of the controlled dynamic system, which properties change due to the a priori set laws of variation of subsystem parameters, as well as changes in the cutting properties conditioned by the power of irreversible energy transformation is presented. Consideration of the power of irreversible energy transformations is necessary for predicting back-edge wear, changes in dynamic coupling parameters, and evolutionary restructuring of cutting dynamics. **Results and Discussion.** The regularity of matching the CNC program with the changing properties of the cutting process, which allows increasing the processing efficiency while ensuring the required quality of parts, is disclosed. A number of properties of the dynamic cutting system caused by changing trajectory of the longitudinal feed rate of the tool during processing of the shaft, the stiffness change of which is given, are revealed and analyzed.

For citation: Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Synergetic approach to improve the efficiency of machining process control on metal-cutting machines. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 3, pp. 84–99. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.3-84-99. (In Russian).

References

1. Haken H. *Information and self-organization: a macroscopic approach to complex systems*. Amsterdam, Elsevier, 2006. 258 p. ISBN 978-3-540-33021-9. DOI: 10.1007/3-540-33023-2.

* Corresponding author

Gvindjiliya Valery E., Post-graduate Student

Don State Technical University,

1 Gagarin square,

344000, Rostov-on-Don, Russian Federation

Tel.: +7 (918) 583-23-33, e-mail: sinedden@yandex.ru



2. Prigogine I., George C. The second law as a selection principle: the microscopic theory of dissipative processes in quantum systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1983, vol. 80, pp. 4590–4594.
3. Ebeling W. von, Engel A., Feistel R. *Fizika protsessov evolyutsii* [Physics of evolution processes]. Moscow, URSS Publ., 2001. 328 p.
4. Nikolis Dzh. *Dinamika ierarkhicheskikh sistem* [Dynamics of Hierarchical Systems]. Moscow, Mir Publ., 1989. 488 p.
5. Kolesnikov A.A. *Prikladnaya sinergetika: osnovy sistemnogo sinteza* [Applied synergetics: fundamentals of system synthesis]. Taganrog, SFU Publ., 2007. 384 p.
6. Kolesnikov A.A. *Sinergeticheskaya teoriya upravleniya* [Synergetic theory of control]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1994. 344 p. ISBN 5-230-24678-2.
7. Kolesnikov A.A., Kuzmenko A.A. Metod AKAR i teoriya adaptivnogo upravleniya v zadachakh sinteza nelineinykh sistem upravleniya [The ACAR method and the theory of adaptive control in problems of synthesis of nonlinear control systems]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*, 2017, vol. 18, no. 9, pp. 579–589. DOI: 10.17587/mau.18.579-589.
8. Kolesnikov A.A., Kolesnikov A.I., Kuz'menko A.A. Metody AKAR i AKOR v zadachakh sinteza nelineinykh sistem upravleniya [Methods of ACAR and ACOR in problems of synthesis of nonlinear control systems]. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, automation, control*, 2016, vol. 17, no. 10, pp. 657–669. DOI: 10.17587/mau.17.657-669.
9. Zakovorotny V.L., Flek M.B., Pham D.T. Sinergeticheskaya kontseptsiya pri postroenii sistem upravleniya tochnost'yu izgotovleniya detalei slozhnoi geometricheskoi formy [Synergetic concept in the construction of precision control systems for manufacturing parts of complex geometric shapes]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Don State Technical University*, 2011, vol. 11, no. 10 (61), pp. 1785–1797.
10. Zakovorotny V.L., Gubanova A.A., Lukyanov A.D. Stability of shaping trajectories in milling: Synergetic concepts. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36 (11), pp. 956–964. DOI: 10.3103/S1068798X16110216.
11. Zakovorotny V.L., Gubanova A.A., Lukyanov A.D. Parametric self-excitation of a dynamic end-milling machine. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36 (12), pp. 1033–1039. DOI: 10.3103/S1068798X16120194.
12. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Influence of spindle wobble in a lathe on the tool's deformational-displacement trajectory. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38 (8), pp. 623–631. DOI: 10.3103/S1068798X1808018X.
13. Zakovorotny V.L., Bykador V.S. Cutting-system dynamics. *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36 (7), pp. 591–598. DOI: 10.3103/S1068798X16070182.
14. Zakovorotny V.L., Flek M.B., Ugnich E.A. Synergetic approach to the modeling of industrial enterprise's economic activity. *International Journal of Economic Perspectives*, 2016, vol. 10 (4), pp. 371–375.
15. Zakovorotny V.L., Shapovalov V.V. Dinamika transportnykh tribosistem [Dynamics of transport tribosystems]. *Sborka v mashinostroenii, priborostroenii = Assembling in Mechanical Engineering, Instrument-Making*, 2005, no. 12, pp. 19–24.
16. Ryzhkin A.A. *Sinergetika iznashivaniya instrumental'nykh materialov pri lezviinoi obrabotke* [Synergetics of tool wear in cutting edge treatment]. Rostov-on-Don, Don State Technical University Publ., 2019. 289 p. ISBN 9785789016695.
17. Starkov V.K. *Fizika i optimizatsiya rezaniya materialov* [Physics and optimization of cutting materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2009. 639 p.
18. Migranov M.Sh. Issledovaniya iznashivaniya instrumental'nykh materialov i pokrytii s pozitsii termodinamiki i samoorganizatsii [Research of wear of tool materials and coatings from the positions of thermodynamics and self-organization]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2006, no. 11, pp. 65–71.
19. Karimov I.G. Vliyanie temperatury rezaniya na energeticheskie parametry kontakta instrumenta s detal'yu [Influence of the cutting temperature on the energy parameters of the tool contact with the part]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik USATU*, 2012, vol. 16, no. 44 (49), pp. 85–89.
20. Gomez-Solano J.R., July C., Mehl J., Bechinger C. Non-equilibrium work distribution for interacting colloidal particles under friction. *New Journal of Physics*, 2015, vol. 17, p. 045026. DOI: 10.1088/1367-2630/17/4/045026.
21. Banjac M. Friction and wear processes-thermodynamic approach. *Tribology in Industry*, 2014, vol. 36, no. 4, pp. 341–347.
22. Abdel-Aal H.A. Thermodynamic modeling of wear. *Encyclopedia of Tribology*. Boston, MA, Springer, 2013, pp. 3622–3636. DOI: 10.1007/978-0-387-92897-5_1313.

23. Duyun T.A., Grinek A.V., Rybak L.A. Methodology of manufacturing process design, providing quality parameters and minimal costs. *World Applied Sciences Journal*, 2014, vol. 30 (8), pp. 958–963. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2014.30.08.14120.
24. Mukherjee I., Ray P.K. A review of optimization techniques in metal cutting processes. *Computers and Industrial Engineering*, 2006, vol. 50, no. 1–2, pp. 15–34. DOI: 10.1016/j.cie.2005.10.001.
25. Kozochkin M.P., Fedorov S.V., Tereshin M.V. *Sposob opredeleniya optimal'noi skorosti rezaniya v protsesse metalloobrabotki* [Method for determining the optimal cutting speed in the process of metalworking]. Patent RF, no. 2538750, 2015.
26. Zariktuev V.Ts. Avtomatizatsiya protsessov na osnove polozheniya ob optimal'noi temperature rezaniya [Automatization of process based on concept of optimal cutting temperature]. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik USATU*, 2009, vol. 12, no. 4, pp. 14–19.
27. Lapshin V.P., Khristoforova V.V., Nosachev S.V. Vzaimosvyaz' temperatury i sily rezaniya s iznosom i vibratsiyami instrumenta pri tokarnoi obrabotke metallov [Relationship of temperature and cutting force with tool wear and vibrations in metal turning]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 3, pp. 44–58. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.3-44-58.
28. Lapshin V., Moiseev D., Minakov V. Diagnosing cutting tool wear after change of cutting forces during turning. *AIP Conference Proceedings*, 2019, vol. 2188, p. 030001. DOI: 10.1063/1.5138394.
29. Begic-Hajdarevic D., Cekic A., Kulenovic M. Experimental study on the high speed machining of hardened steel. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 69, pp. 291–295. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.02.234.
30. Blau P., Busch K., Dix M., Hochmuth C., Stoll A., Wertheim R. Flushing strategies for high performance, efficient and environmentally friendly cutting. *Procedia CIRP*, 2015, vol. 26, pp. 361–366. DOI: 10.1016/j.procir.2014.07.058.
31. Chin C.-H., Wang Y.-C., Lee B.-Y. The effect of surface roughness of end-mills on optimal cutting performance for high-speed machining. *Strojniski Vestnik = Journal of Mechanical Engineering*, 2013, vol. 52 (2), pp. 124–134. DOI: 10.5545/sv-jme.2012.677.
32. Kant G., Sangwan K.S. Prediction and optimization of machining parameters for minimization power consumption and surface roughness in machining. *Journal of Cleaner Production*, 2014, vol. 83, pp. 151–164. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.07.073.
33. Martinov G., Martinova L., Ljubimov A. From classic CNC systems to cloud-based technology and back. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, vol. 63. DOI: 10.1016/j.rcim.2019.101927.
34. Martinov G.M., Kovalev I.A., Grigoriev A.S. Approach to building an autonomous cross-platform automation controller based on the synthesis of separate modules. *Advances in Automation. RusAutoCon 2019*. Cham, Springer, 2020, pp. 128–136. DOI: 10.1007/978-3-030-39225-3_15.
35. Sosonkin V.L., Martinov G.M. Noveishie tendentsii v oblasti arkhitekturnykh reshenii sistem ChPU [Latest trends in the architecture of CNC systems]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti = Automation in Industry*, 2005, no. 4, pp. 3–9.
36. Martinov G.M., Sokolov S.V., Martinova L.I., Grigoryev A.S., Nikishechkin P.A. Approach to the diagnosis and configuration of servo drives in heterogeneous machine control systems. *Advances in Swarm Intelligence. ICSI 2017. Lecture Notes in Computer Science*. Ed. by Y. Tan, H. Takagi, Y. Shi, B. Niu. Cham, Springer, 2017, vol. 10386, pp. 586–594. DOI: 10.1007/978-3-319-61833-3_62.
37. Sang Z., Xu X. The framework of a cloud-based CNC system. *Procedia CIRP*, 2017, vol. 63, pp. 82–88. DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.152.
38. Martinov G.M., Kozak N.V., Nikishechkin P.A. Reshenie zadachi rezervirovaniya v stankakh s chislovym programmnyim upravleniem [Solution of the redundancy problem in numerical control machines]. *STIN = Russian Engineering Research*, 2018, no. 7, pp. 2–7. (In Russian).
39. Bazrov B.M., Balakshin B.S. *Adaptivnoe upravlenie stankami* [Adaptive control of machine tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 688 p.
40. Zhdanov A.A., Plotnikov A.L., Tchigirinsky Ju.L., Firsov I.V. Matematicheskaya model' utochneniya rezhimov rezaniya dlya obespecheniya tochnosti tokarnoi obrabotki nezhestkikh valov na stankakh s ChPU [The mathematical model of corrections the cutting conditions to providing the precision of nonrigid shafts turning on CNC machines]. *Nauchnye trudy SWorld = Scientific papers SWorld*, 2015, vol. 3, no. 4 (41), pp. 41–47.
41. Nikishechkin P.A., Grigoriev A.S. Prakticheskie aspekty razrabotki modulya diagnostiki i kontrolya rezhushchego instrumenta v sisteme CHPU [Practical aspects of the development of the module diagnosis and monitoring of cutting tools in the CNC]. *Vestnik MGTU STANKIN = Vestnik MSTU STANKIN*, 2013, no. 4 (27), pp. 65–70.
42. Bobrovsky A.V., Drachev O.I. Tekhnologiya mekhanicheskoi obrabotki malozhestkikh osesimmetrichnykh detalei [Technology of processing of low-rigid axisymmetric details]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2019, no. 9 (232), pp. 15–17.

43. Drachev O.I. Sistema avtomaticheskogo upravleniya ekspluatatsionnoi tochnost'yu dlinnomernykh valov [System of automatic control of operational accuracy of long-length shafts]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2017, no. 5 (200), pp. 18–20.
44. Kazakov A.V., Zholobov A.A. Prognozirovaniye i obespecheniye tochnosti tokarnoi obrabotki stupenchatykh valov [Forecasting and ensuring the accuracy of stepped shafts turning]. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta* = *Bulletin of the Belarusian-Russian University*, 2014, no. 1 (42), pp. 6–14.
45. Kudinov V.A. *Dinamika stankov* [Dynamics of machine tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 359 p.
46. Voronov S.A., Kiselev I.A. Nelineinyye zadachi dinamiki protsessov rezaniya [Nonlinear problems of cutting process dynamics]. *Mashinostroenie i inzhenernoye obrazovanie* = *Mechanical engineering and engineering education*, 2017, no. 2 (51), pp. 9–23.
47. Gouskov A.M., Voronov S.A., Paris H., Batzer S.A. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2002, vol. 7, pp. 207–221. DOI: 10.1016/s1007-5704(02)00014-x.
48. Kao Y.-C., Nguyen N.-T., Chen M.-S., Su S.T. A prediction method of cutting force coefficients with helix angle of flat-end cutter and its application in a virtual three-axis milling simulation system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 77, no. 9–12, pp. 1793–1809. DOI: 10.1007/s00170-014-6550-8.
49. Stepan G., Insperger T., Szalai R. Delay, parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2005, vol. 15, no. 9, pp. 2783–2798. DOI: 10.1142/S0218127405013642.
50. Corpus W.T., Endres W.J. Added stability lobes in machining processes that exhibit periodic time variation – Part 1: An analytical solution. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2004, vol. 126, pp. 467–474. DOI: 10.1115/1.1765137.
51. Peigne G., Paris H., Brissaud D., Gouskov A. Impact of the cutting dynamics of small radial immersion milling operations on machined surface roughness. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004, vol. 44, pp. 1133–1142. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.04.012.
52. Hasnul H., Tajul L., Zailani Z.A., Hamzas M.F.M.A., Hussin M.S. The parametric effect and optimization on JIS S45C steel turning. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2011, vol. 3, no. 5, pp. 4479–4487.
53. Rusinek R., Wiercigroch M., Wahi P. Influence of tool flank forces on complex dynamics of a cutting process. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2014, 24 (9), pp. 189–201. DOI: 10.1142/S0218127414501156.
54. Rusinek R., Wiercigroch M., Wahi P. Modeling of frictional chatter in metal cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2014, vol. 89, pp. 167–176. DOI: /10.1016/j.ijmecsci.2014.08.020.
55. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Svyaz' samoorganizatsii dinamicheskoi sistemy rezaniya s iznashivaniem instrumenta [Link between the self-organization of dynamic cutting system and tool wear]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Prikladnaya nelineinaya dinamika* = *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2020, vol. 28, no. 1, pp. 46–61. DOI: 10.18500/0869-6632-2020-28-1-46-61.
56. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Bifurkatsii prityagivayushchikh mnozhestv deformatsionnykh smeshchenii rezhushchego instrumenta v khode evolyutsii svoystv protsessa obrabotki [Bifurcations of attracting sets of cutting tool deformation displacements at the evolution of treatment process properties]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Prikladnaya nelineinaya dinamika* = *Izvestiya VUZ. Applied Nonlinear Dynamics*, 2018, vol. 26, no. 5, pp. 20–38. DOI: 10.18500/0869-6632-2018-26-5-20-38.
57. Lapshin V.P., Turkin I.A., Khristoforova V.V. Assessment of metal wear in turning on the basis of components of the cutting force. *Russian Engineering Research*, 2020, vol. 40, no. 9, pp. 797–800.
58. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Vliyanie dinamiki rezaniya na vybor tekhnologicheskikh rezhimov, obespechivayushchikh minimal'noye iznashivanie rezhushchikh instrumentov [Influence of cutting dynamic on the selection of the technological regimes to ensure minimal wear of cutting tools]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty)* = *Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 4, pp. 54–70. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.4-54-70.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2021 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).