

УДК 621.9:531.3

doi: 10.18698/0536-1044-2021-5-24-36

Синергетическая концепция при программном управлении процессами обработки на металлорежущих станках*

В.Л. Заковоротный, В.Е. Гвинджилия

Донской государственный технический университет

Synergetic Concept of Software Control of Machining Processes on Metal-Cutting Machines

V.L. Zakovorotny, V.E. Gvindjiliya

Don State Technical University

Металлорежущие станки с высокой точностью обеспечивают соответствие программируемых траекторий исполнительных элементов станка реальным. Для станков токарной группы — это траектории продольного и поперечного суппортов системы, а также шпинделя. Целью обработки является изготовление деталей заданного качества при минимизации приведенных затрат на производство. На показатели качества деталей и эффективность резания, зависящую от интенсивности изнашивания инструмента, влияет состояние динамической системы резания, определяемое траекториями сил и деформаций. Свойства системы изменяются в зависимости от фазовой траектории мощности необратимых преобразований подводимой к зоне резания энергии по произведенной работе. Их изменения, связанные с эволюцией параметров динамической связи, формируемой резанием, проявляются в развитии износа инструмента и изменении показателей качества детали. Таким образом, мощность необратимых преобразований энергии является одним из внутренних факторов, вызывающих изменение выходных характеристик обработки и состояния процесса. В связи с этим при обработке на станках имеет место проблема синергетического согласования внешнего управления (например, программы ЧПУ) с внутренним, источником которого служат необратимые преобразования подводимой к зоне резания энергии. Рассмотрена проблема синергетического согласования внешнего и внутреннего управлений при резании, решение которой позволит повысить эффективность обработки на станках с ЧПУ. Предложены математическая модель управляемой динамической системы резания и алгоритмы управления для повышения эффективности процесса обработки детали заданного качества с минимизацией интенсивности изнашивания инструмента. Апробация разработанных алгоритмов показала, что их использование позволяет снизить стоимость изготовления детали в 1,2 раза.

Ключевые слова: эффективность обработки, эволюция системы, синергетическое согласование

High precision metal-cutting machines ensure that the programmed machine actuator trajectories correspond to the real ones. For lathes these are the trajectories of the longitudinal and transverse calipers of the system, as well as the spindle. The purpose of processing is to produce parts of a given quality while minimizing the manufacturing costs. The condition of the dynamic cutting system, determined by the trajectories of forces and deformations,

* Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 19-08-00022, 20-38-90074.

affects the quality indicators of parts and the cutting efficiency, which depends on the intensity of tool wear. The properties of the system change depending on the phase trajectory of the power of irreversible transformations of the energy supplied to the cutting zone by the work performed. Their changes related with the evolution of the parameters of the dynamic link formed by cutting are manifested in the development of tool wear and changes in the quality of the part. Thus, the power of irreversible energy transformations is one of the internal factors causing changes in the output characteristics of processing and the state of the process. In this regard, when processing on machine tools, there is a problem of synergistic coordination of external control (for example, the CNC program) with internal one, the source of which is the irreversible transformation of the energy supplied to the cutting zone. The article considers the problem of synergetic coordination of external and internal controls during cutting process, the solution of which will allow increasing the efficiency of processing on CNC machines. A mathematical model of a controlled dynamic cutting system and control algorithms are proposed to improve the efficiency of processing parts of a given quality while minimizing the intensity of tool wear. Testing of the developed algorithms has shown that their use reduces the cost of manufacturing parts by 1.2.

Keywords: processing efficiency, system evolution, synergetic coordination

После опубликования работ Г. Хакена и И. Пригожина [1, 2] многие проблемы эволюционных изменений в системах, взаимодействующих с различными средами, стали рассматриваться с системно-синергетических позиций [3–5]. Синергетическую парадигму используют и при изучении процесса резания [6, 7]. Представление процесса резания как некоторой взаимосвязанной физической системы положено в основу определения режимов обработки, на которых построены программы числового программного управления (ЧПУ). Показано, что при развитии износа изменяются основные характеристики процесса обработки.

В связи с этим изучение влияния условий резания, свойств инструментальных материалов, смазочно-охлаждающей среды, технологических режимов, геометрии режущего инструмента (далее инструмент), вибраций и прочих факторов на его изнашивание являлось предметом многочисленных исследований [8–15].

В частности, доказано, что при увеличении скорости резания существует ее оптимальное значение, при котором интенсивность изнашивания инструмента минимальна [15, 16]. Выдвинуты подтвержденные практикой гипотезы о существовании оптимальной температуры, когда интенсивность изнашивания инструмента минимальна [16, 17].

Важной задачей является определение оптимальной скорости при сверхскоростном резании [18–21]. Здесь на ее оптимальное значение влияют вибрационные возмущения.

Показано также, что изнашиваемость инструмента и показатели качества детали зависят от динамики резания [22–30]. Причем динами-

ческие свойства обработки обладают свойством эволюционных изменений, зависящих от траектории мощности необратимых преобразований энергии в зоне резания по совершенной работе. Одним из проявлений эволюции является износ [31].

Следующим шагом, направленным на повышение эффективности обработки, является согласование программы ЧПУ с эволюционно изменяющейся динамической системой резания (ДСР).

Цель работы — исследование взаимосвязи эволюции ДСР с выходными свойствами обработки и разработка алгоритмов согласования программы ЧПУ с динамикой резания.

Моделирование управляемой ДСР. Для согласования траекторий исполнительных элементов станка (ТИЭС) с эволюционно изменяющейся ДСР введем в рассмотрение координаты ее состояния. Рассмотрим векторы.

Управление характеризуется векторами траектории $\mathbf{l} = \{l_1(t), l_2(t), l_3(t)\}^T \in \mathfrak{R}_l^{(3)}$ и скорости исполнительных элементов $\mathbf{v} = \{v_1(t), v_2(t), v_3(t)\}^T \in \mathfrak{R}_v^{(3)}$, где $l_1(t), l_2(t), l_3(t)$ и $v_1(t), v_2(t), v_3(t)$ — траектории и скорости исполнительных элементов соответственно поперечного, продольного суппортов и поворота шпинделя; t — время. Здесь очевидна связь $v_3(t) = \pi D \Omega$ (D — диаметр заготовки; Ω — циклическая частота).

Векторам \mathbf{l} и \mathbf{v} соответствуют фазовые траектории $\mathbf{v}_\phi = \{v_1(l_1), v_2(l_2), v_3(l_3)\}^T$. Например, траектория скорости продольного суппорта v_2 по оси l_2 есть желаемая фазовая траектория (рис. 1).

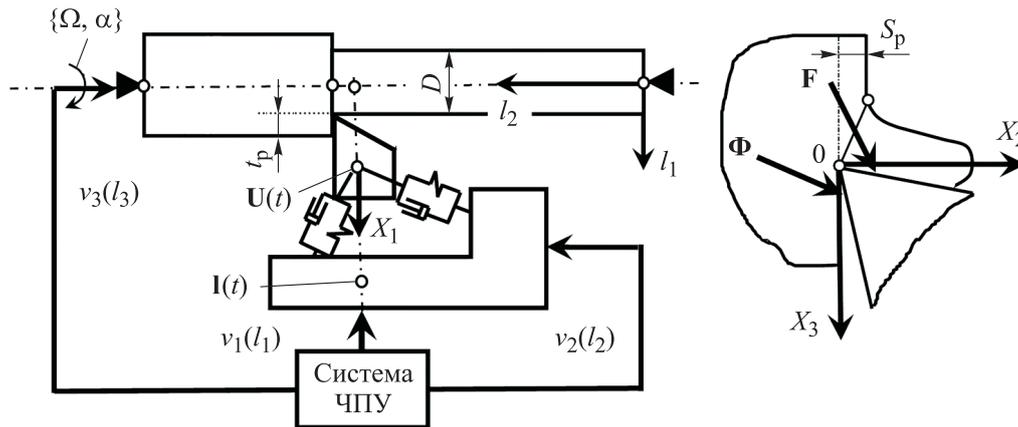


Рис. 1. Схема управляемой ДСР

Определим пространство упругих деформаций $\mathbf{X} = \{X_1(t), X_2(t), X_3(t)\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)}$. Ограничимся деформациями инструмента относительно несущей системы станка, рассматриваемыми в подвижной системе координат. Следуя ранее обоснованным положениям, динамическую подсистему инструмента в подвижной системе координат (см. рис. 1) представим в виде [6, 32]

$$\mathbf{m} \frac{d^2 \mathbf{X}}{dt^2} + \mathbf{h} \frac{d\mathbf{X}}{dt} + \mathbf{c}\mathbf{X} = \mathbf{F}_\Sigma, \quad (1)$$

где \mathbf{m} , \mathbf{c} и \mathbf{h} — положительно определенные симметричные матрицы инерционных, скоростных и упругих коэффициентов соответственно, кг·с²/мм, кг·с/мм и кг/мм; \mathbf{F}_Σ — силы резания, представление которых в координатах состояния и управления позволяет связать упругие деформации \mathbf{X} с параметрами взаимодействующих подсистем и векторами \mathbf{I} и \mathbf{v} .

В выражении (1):

$$\mathbf{m} = [m_{sk}] = \begin{cases} m_{sk} = m & \text{при } s = k; \\ m_{sk} = 0 & \text{при } s \neq k; \end{cases}$$

$$s, k = 1, 2, 3; \quad \mathbf{c} = [c_{sk}]; \quad \mathbf{h} = [h_{sk}];$$

$$\mathbf{F}_\Sigma = \{F_{\Sigma 1}, F_{\Sigma 2}, F_{\Sigma 3}\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)},$$

где $F_{\Sigma 1}, F_{\Sigma 2}, F_{\Sigma 3}$ — компоненты сил резания.

Силу \mathbf{F}_Σ представим как [33, 34]

$$\mathbf{F}_\Sigma = \mathbf{F} + \mathbf{\Phi},$$

Здесь \mathbf{F} и $\mathbf{\Phi}$ — силы, действующие на переднюю и задние грани инструмента (см. рис. 1),

$$\mathbf{F} = \{F_1, F_2, F_3\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)};$$

$$\mathbf{\Phi} = \{\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3\}^T \in \mathfrak{R}_X^{(3)},$$

где F_1, F_2, F_3 и Φ_1, Φ_2, Φ_3 — компоненты сил \mathbf{F} и $\mathbf{\Phi}$ соответственно.

Для силы \mathbf{F} учтены свойства: зависимость модуля $\text{Mod}[\mathbf{F}]$ от площади среза S ; коэффициент пропорциональности ρ между $\text{Mod}[\mathbf{F}] = F_0$ и площадью среза уменьшается в среднескоростном диапазоне при увеличении скорости резания; запаздывание F_0 по отношению к вариациям площади S ; ориентация сил в пространстве \mathbf{X} представима угловыми коэффициентами χ_1, χ_2, χ_3 , т. е. $\mathbf{F}(t) = F_0(t)\{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}^T$.

Тогда (см. рис. 1)

$$T_0 \frac{dF_0}{dt} + F_0 = \rho \{1 + \mu \exp[-\alpha(v_3 - dX_3/dt)]\} t_p S_p(t), \quad (2)$$

где T_0 — постоянная стружкообразования, с; μ — безразмерный коэффициент; α — коэффициент, определяющий убывание сил при увеличении скорости резания; t_p — глубина резания; ρ — давление стружки в области малых скоростей, кг/мм²; S_p — подача инструмента.

Силы $\mathbf{\Phi}$ в областях контакта задних граней инструмента с заготовкой возрастают по мере сближения с ней. Сближение определяется изменением углов между задними гранями инструмента — главной $\beta_{\Sigma 2}(t)$ и вспомогательной $\beta_{\Sigma 1}(t)$ — и направлением скорости резания. Угол между задними гранями

$$\beta_{\Sigma i}(t) = \beta_i + \Delta\beta_i(t), \quad i = 1, 2,$$

где β_i — задний угол в статике; $\Delta\beta_i$ — вариации угла вследствие изменения траекторий, $\Delta\beta_i = \arctg[v_2(t)/v_3(t)]$.

Учтем зависимость коэффициента трения от скорости

$$\begin{cases} \Phi_1 = \rho_0 \int_{t-T}^t (v_2 - dX_2/dt) dt \exp[\alpha_1 \beta_{\Sigma 1}(t)]; \\ \Phi_2 = \rho_0 [t_p^{(0)} - X_1(t)] \exp[\alpha_2 \beta_{\Sigma 2}(t)]; \\ \Phi_3 = k_\tau (\Phi_1 + \Phi_2). \end{cases} \quad (3)$$

Здесь ρ_0 — параметр, характеризующий жесткость; T — время оборота детали, $T = (\Omega)^{-1}$; α_1, α_2 — коэффициенты крутизны; $t_p^{(0)}$ — глубина резания без учета упругих деформаций; k_τ — коэффициент трения,

$$k_\tau = k_\tau [1 + \mu_1 \exp(-\alpha_\tau v_3)],$$

где μ_1 — безразмерный коэффициент; α_τ — коэффициент, определяющий убывание сил при увеличении скорости резания.

Рассмотрим вектор формообразующих движений $U(t)$ (см. рис. 1), отличающийся от ТИЭС значениями упругих деформаций: $U(t) = \{U_1, U_2, U_3\}^T \in \mathfrak{R}_3^{(3)}$, где U_1, U_2, U_3 — компоненты вектора. Определим связь между $U(t), I(t), X(t)$ и технологическими режимами:

$$\begin{cases} t_p(t) = D/2 - \int_0^t v_1(\xi) d\xi + X_1(t); \\ S_p(t) = \int_{t-T}^t [v_2(\xi) - v_2(\xi)] d\xi; \\ v_3(t) = \pi D \Omega - dX_3/dt; \\ U(t) = I(t) - X(t), \end{cases} \quad (4)$$

где ξ — условная координата; $v_3(t)$ — скорость резания.

Из выражения (4) следует, что при продольном точении детали постоянного припуска технологические режимы без учета упругих деформаций определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} t_p^{(0)} &= D/2 - \int_0^t v_1(\xi) d\xi = \text{const}; \\ S_p^{(0)} &= \int_{t-T}^t v_2(\xi) d\xi; \\ v_3^{(0)} &= \pi D \Omega. \end{aligned}$$

Приведенный математический инструмент позволяет анализировать свойства ДСР: устойчивость, притягивающие множества деформаций, их бифуркации, а также мощность необратимых преобразований в областях сопряжения граней инструмента с деталью. Также он дает возможность определять зависимость траекторий $U(t)$ от $I(t)$. Вектор $X(t)$

(в том числе равновесие $X(t) = X^*$) рассматривается в подвижной системе координат ТИЭС, поэтому точке X^* соответствует аттрактор $U(t) = I(t) - X^*$. При формировании в окрестности точки X^* притягивающих множеств деформаций изменяется $U(t)$. Свойства ДСР и процесса резания остаются неизменными (замороженными).

Известно, что в ходе функционирования свойства системы меняются в зависимости от необратимых преобразований энергии [2]. Полагаем, что свойства системы зависят от фазовой траектории мощности необратимых преобразований по совершенной работе. Причем мощность $N(t)$ и работа $A(t)$ будем рассматривать вдоль траектории $U(t)$.

Так как применен макроскопический подход, для моделирования эволюции удобно воспользоваться уравнением Вольтерры второго рода. При этом вычисляемая функция $N^{(n)}(t)$ характеризует суммарное влияние мощности всех физических взаимодействий (термодинамических, адгезионных, диффузионных и пр.), вызывающих изнашивание [34, 35]

$$\begin{aligned} N^{(n)}(t) &= \left\{ N(t) + \eta \int_0^t W(t-\xi) N(\xi) d\xi \right\}; \\ v_w &= \Phi(N^{(n)}). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь η — коэффициент, определяемый экспериментально, c^{-1} ; $W(t-\xi)$ — безразмерное ядро, которое моделирует процесс адаптации и деградации приповерхностных слоев контакта; v_w — интенсивность изнашивания.

Безразмерное ядро определяется выражением

$$W(t-\xi) = \exp\left(-\frac{t-\xi}{T_1}\right) + \mu_v \exp\left(-\frac{\xi-t}{T_2}\right),$$

где T_1, T_2 — параметры, определяемые экспериментально, c ; μ_v — безразмерный параметр.

Если задана v_w , то определены интенсивность изнашивания по пути резания l $v_w^{(l)} = \partial w / \partial l$ и износ w , т. е.

$$v_w^{(l)} = v_w / v_\Sigma; \quad w(t) = \int_0^t v_w(\xi) d\xi, \quad (6)$$

где $v_\Sigma = \text{Mod}[dU(t)/dt]$.

Функция $v_w^{(l)} = (v_\Sigma)^{-1} \Phi(N^{(n)})$ имеет минимум. Если рассматривать только термодинамику [7, 8], то есть температура, при которой $v_w^{(l)} = \min$. Существует мнение, что минимуму интенсивности изнашивания соответствует переход от

адгезионного изнашивания к диффузионному [7, 8]. Выражения (5) и (6) не только обобщают эти утверждения, но и учитывают эволюцию свойств.

Для анализа эволюции, т. е. функционально связанной интегродифференциальной системы уравнений, необходимо знать зависимость параметров от износа. Наибольшей чувствительностью к нему обладают параметры $T_0(w)$, $\rho(w)$, $\rho_0(w)$, $\alpha_1(w)$ и $\alpha_2(w)$. При анализе линейаризованного уравнения в вариациях параметры $\rho_0(w)$, $\alpha_1(w)$ и $\alpha_2(w)$ практически не влияют на устойчивость. Принципиальное влияние они начинают оказывать при формировании притягивающих множеств деформаций.

Зависимость параметров от износа предварительно изучена и идентифицирована на основе разработанных ранее алгоритмов [6, 31]. Эта функциональная связанность наряду с интегрированием $v_w^{(l)}$ по пути резания характеризует внутреннюю эволюцию ДСР, изменяющую свойства процесса и его выходные характеристики.

Выполненные ранее исследования показали, что вследствие изменения параметров вдоль траектории $U(t)$ наблюдаются все известные бифуркации притягивающих множеств. Причем по мере совершения работы развивается хаотическая динамика [34, 35], и постепенно устанавливается состояние, при котором выходные свойства резания не удовлетворяют заданным требованиям. Система достигает терминального состояния.

Одним из направлений увеличения пути резания является согласование внешнего управления (v_ϕ , v и l) с эволюционно изменяющейся системой. Это — синергетическая проблема взаимодействия внешнего управления с внутренней динамикой [4].

Согласование внешнего управления с внутренней динамикой. При определении алгоритмов согласования необходимо учитывать показатели качества и интенсивность изнашивания. Введем в рассмотрение вектор качества $\mathbf{q} = \{q_1, q_2, q_3, \dots, q_n\}^T \in \mathfrak{R}^{(n)}$ и множество допустимых его вариаций $\mathbf{q}_0 = \{q_{10}, q_{20}, \dots, q_{n0}\}$. Ком-

поненты вектора \mathbf{q} необходимо представить в траекториях $U(t)$. Эти представления есть информационные модели параметров качества $q_i = \mathfrak{K}_i\{U(t)\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, где \mathfrak{K}_i — вектор выходных параметров качества, зависящих от $U(t)$. Проблему согласования можно сформулировать следующим образом: определить параметры v_ϕ , v и l так, чтобы

$$v_w^{(l)} = \min; \quad \mathbf{q} \subset \mathbf{q}_0. \quad (7)$$

Принципы согласования продемонстрируем на примере точения вала постоянного диаметра $D = 8$ мм из стали 08X15H24B4TP. Обработку проведем непереключаемыми пластинами фирмы SANDVIK Coromant, выполненными из сплава GC2015, без смазочно-охлаждающей жидкости. Форма пластины — W, ее геометрические параметры: задний угол $\alpha = 2^\circ$; передний угол $\gamma = 6^\circ$; главный угол в плане $\phi = 90^\circ$.

В подсистеме инструмента оси эллипсоида жесткости совпадают с осями $\mathfrak{R}^{(3)}$, так как $\phi = 90^\circ$, $\mathbf{m} = [m_{sk}]$, $m_{ss} = m_0$; $\mathbf{h} = [h_{sk}]$, $h_{ss} = h_0$; $m_{sk} = h_{sk} = 0$ при $s \neq k$. Подсистема инструмента: $c_{10} = 3000$ кг/мм; $c_{20} = 1000$ кг/мм; $c_{30} = 600$ кг/мм; $h_0 = 600$ кг·с/мм; $m_0 = 0,025$ кг·с²/мм. Параметры динамической связи процесса резания: $\rho = 500$ кг/мм²; $\alpha = \alpha_r = 2$ с/мм; $\mu = \mu_1 = 0,5$; $\rho_0 = 5$ кг/мм; $T_0^{(0)} = 0,001$ с; $\alpha_1 = \alpha_2 = 2$ град⁻¹; $k_r = 0,2$. Параметры интегрального оператора: скорость — $v_3^{(0)} = 1,2$ м/с; $T_1 = 13$ с; $T_2 = 30$ с; $\eta = 0,5$ с⁻¹; коэффициенты уравнения мощности необратимых преобразований, определяемые экспериментально, $\eta_1 = 8 \cdot 10^{-6}$ кг⁻¹; $\eta_2 = 3 \cdot 10^{-6}$ кг⁻¹.

Параметры относятся к началу резания: $w \Rightarrow 0$. Они идентифицированы методами экспериментальной динамики. Не останавливаясь на деталях, приведем для указанных условий экспериментальные зависимости параметров от износа для области $w = 0 \dots 0,8$ мм (см. таблицу):

$$\begin{aligned} \rho(w) &= \rho^{(0)} + a_1(w)^2; \\ \rho_0(w) &= \rho_0^{(0)} + a_2(w)^2; \\ T_0(w) &= T_0^{(0)}[1 + a_3w]; \\ \alpha_1 = \alpha_2 &= \alpha + a_4(w)^3, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\rho^{(0)}$ — давление стружки в начале резания.

Значения эволюционных параметров для уравнения (8) при различной глубине резания

t_p , мм	$\rho^{(0)}$, кг/мм ²	$\rho_0^{(0)}$, кг/мм	$T_0^{(0)}$, с	α , град ⁻¹	a_1 , кг/мм ⁴	a_2 , кг/мм ³	a_3 , мм ⁻¹	a_4 , град ⁻¹ ·мм ⁻³
1	300	5	0,001	2,0	400	700	1,25	4
3	300	5	0,025	2,5	450	700	1,25	5

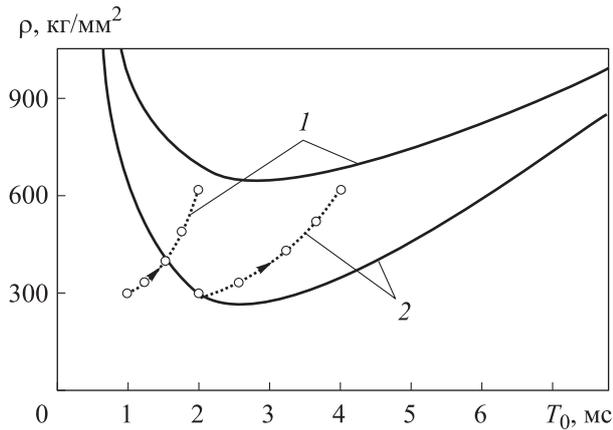


Рис. 2. Совмещенные диаграммы фигуративных линий (—) в плоскости $\rho - T_0$ и траекторий параметров (····) по мере увеличения износа при глубине резания $t_p^{(0)} = 1$ (1) и 3 (2) мм

Как видно из таблицы, основные параметры остаются неизменными при варьировании глубины резания. Как это следует из выражений (2) и (3), свойства системы зависят от режимов. Приведем пример изменения областей устойчивости системы для двух значений глубины резания $t_p^{(0)}$ (рис. 2).

Здесь совмещены фигуративные линии в плоскости $\rho - T_0$ и траектории параметров по мере развития износа (точки соответствуют износу $w = 0; 0,2; 0,4; 0,6$ и $0,8$ мм). Износ возрастает по стрелке. При глубине резания $t_p^{(0)} = 1$ мм система устойчива на всех стадиях эволюции, а при $t_p^{(0)} = 3$ мм траектория параметров практически сразу пересекает фигуративную линию.

Система теряет устойчивость, и формируется предельный цикл, который в дальнейшем претерпевает бифуркации. Пример позволяет сделать заключения о свойстве эволюционной перестройки системы и вытекающих из него направлениях повышения эффективности обработки. При неизменных режимах мощность необратимых преобразований изменяется даже в том случае, если вдоль траектории $U(t)$ «медленно» смещающаяся точка X^* остается устойчивой.

Если вдоль траектории $U(t)$ образуются притягивающие множества деформаций и их бифуркации, то в сопряжениях граней инструмента с заготовкой формируется большое разнообразие траекторий сил, зависящее от начальных параметров и неуправляемых возмущений. Поэтому оптимальным значениям $v_w^{(l)}$

должны соответствовать не точки, а траектории режимов.

Такая траектория может обладать большой чувствительностью к вариациям начальных параметров и неуправляемых возмущений. Притягивающие множества $X(t)$ отображаются в q . Законы отображения и их модели рассмотрены в работе [36]. В настоящем примере ограничимся двумя компонентами вектора q :

$$q_1(t) = \frac{1}{T_\Sigma} \int_{t-T_\Sigma}^t X_1(\xi) d\xi;$$

$$q_2(t) = \frac{1}{T_\Sigma} \int_{t-T_\Sigma}^t [q_1(\xi) - X_1(\xi)]^2 d\xi,$$

где $T_\Sigma = (3...4)T$.

Компоненты вектора q определяют погрешность геометрии и оценку рельефа. Необходимо учитывать, что при формировании поверхности принимают участие не только траектории $U(t)$, но и самостоятельные процессы в зоне резания [36]. Примеры траекторий деформаций X_2 и действующих на заднюю грань сил Φ_2 при подаче инструмента $S_p^{(0)} = 0,1$ мм, скорости резания $v_3^{(0)} = 1,2$ м/с и различных значениях глубины резания приведены на рис. 3.

Рассмотрим эффективность различных алгоритмов согласования, моделирование которых не вызывает сложностей. Например, легко реализовать алгоритм согласования скорости резания по критерию $N^{(n)} \rightarrow \text{const}$. Для этого на модели достаточно построить систему автоматической стабилизации $N^{(n)}$ при управлении скоростью резания.

Заметим, что траектории $v_3(l_2) = \pi D \Omega(l_2)$ соответствует $v_2(l_2) = k_l v_3(l_2)$, где k_l — коэффициент пропорциональности траекторий скоростей, а $v_2(l_2)$ подчиняется $v_3(l_3)$ для обеспечения постоянной подачи. Так как силы, действующие на задние грани, отличаются от суммарных сил, вызывающих смещение равновесия, для обеспечения условия (7), необходимо дополнительно уменьшать значение подачи, т. е. обеспечивать условие $v_2(l_2) = k_l(l_2) v_3(l_2)$.

Функция $k_l(l_2)$ также является убывающей по пути резания. В этом случае не только компенсируется влияние эволюционного возрастания коэффициента ρ на диаметр заготовки, но и изменяются условия ее взаимодействия с задней гранью инструмента, повышая его износостойкость. При этом уменьшается влияние самостоятельных процессов на формирование

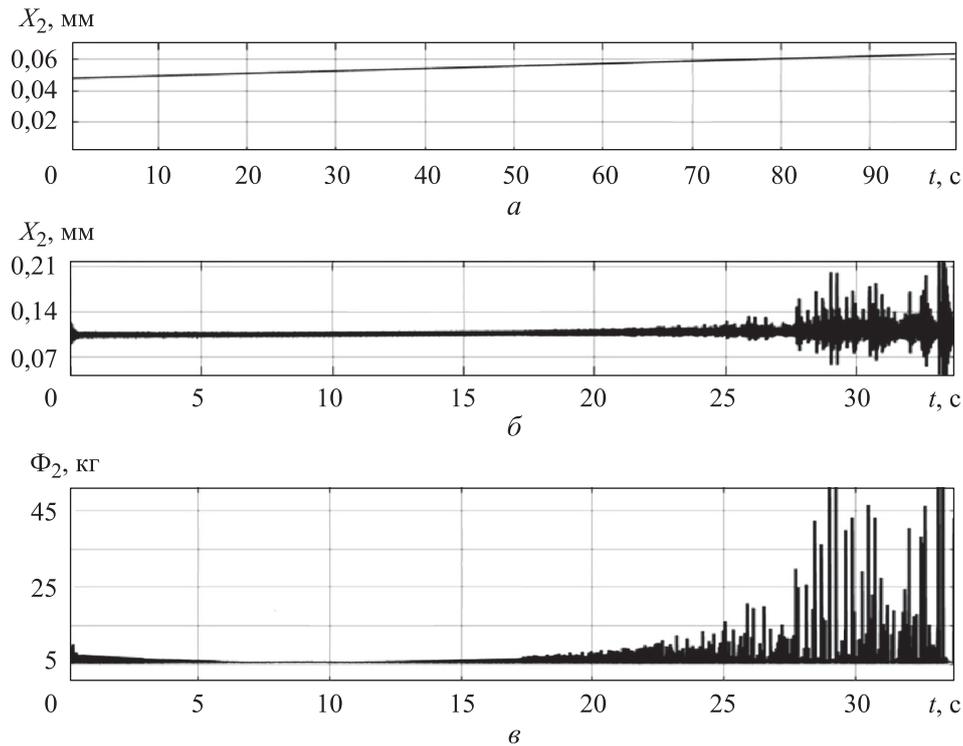


Рис. 3. Примеры траекторий деформаций X_2 (а, б) и действующих на заднюю грань сил Φ_2 (в) при подаче инструмента $S_p^{(0)} = 0,1$ мм, скорости резания $v_3^{(0)} = 1,2$ м/с и различных значениях глубины резания:
а — $t_p^{(0)} = 1$ мм; б, в — $t_p^{(0)} = 3$ мм

рельефа поверхности. Приведенные особенности эволюции определяют три алгоритма согласования.

Первый алгоритм: обработка при постоянных режимах, для которых на начальной стадии эволюции определены технологические режимы, — $v_3 = v_3^{(0)} = \text{const}$ и $v_2 = k_1 v_3$, где $v_3^{(0)}$ — скорость резания, при которой $v_w^{(l)} = \min$.

Второй алгоритм: в ходе эволюции выполняются условия $v_3(l_2) = v_3^{(0)}(l_2)$ и $v_2(l_2) = k_1 v_3(l_2)$.

Третий алгоритм: дополнительно к условиям второго алгоритма обеспечено снижение скорости подачи $v_2(l_2) = k_l(l_2)v_3(l_2)$ таким образом, чтобы уменьшить вариации X_1 , которые изменяют текущее значение диаметра заготовки.

Анализ результатов. Эффективность обработки по условию (7) зависит от параметров взаимодействующих подсистем и эволюционно изменяющихся параметров динамической связи. Приведем примеры траекторий X_1 для различных алгоритмов управления (рис. 4), которым соответствуют траектории вектора \mathbf{q} . Траектории показаны на временном участке, где $\mathbf{q} \subset \mathbf{q}_0$.

При использовании третьего алгоритма наблюдается двоякая эффективность: уменьшается средняя интенсивность изнашивания инструмента и увеличивается путь резания, при котором $\mathbf{q} \subset \mathbf{q}_0$.

Алгоритмы апробировали в условиях ПАО «Роствертол». При этом изменение технологических режимов и соответствующих им ТИЭС (программ ЧПУ) выполнялось дискретно после обработки в каждом цикле дискретного количества деталей.

Апробация алгоритмов показала, что до инструментальной переналадки можно изготовить восемь деталей по первому алгоритму, тринадцать по второму и двадцать девять по третьему. По данным ПАО «Роствертол», при использовании третьего алгоритма стоимость изготовления детали снижается в 1,2 раза.

Анализ результатов исследования показал, что для достижения $v_w^{(l)} = \min$ необходимо обеспечить условие асимптотической устойчивости точки равновесия системы X^* на всем множестве параметров динамической связи $\mathbf{p} = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_s\}$, изменяющихся в ходе эволюции. Если она устойчива и отсутствуют неуправляемые возмущения, то аттрактором

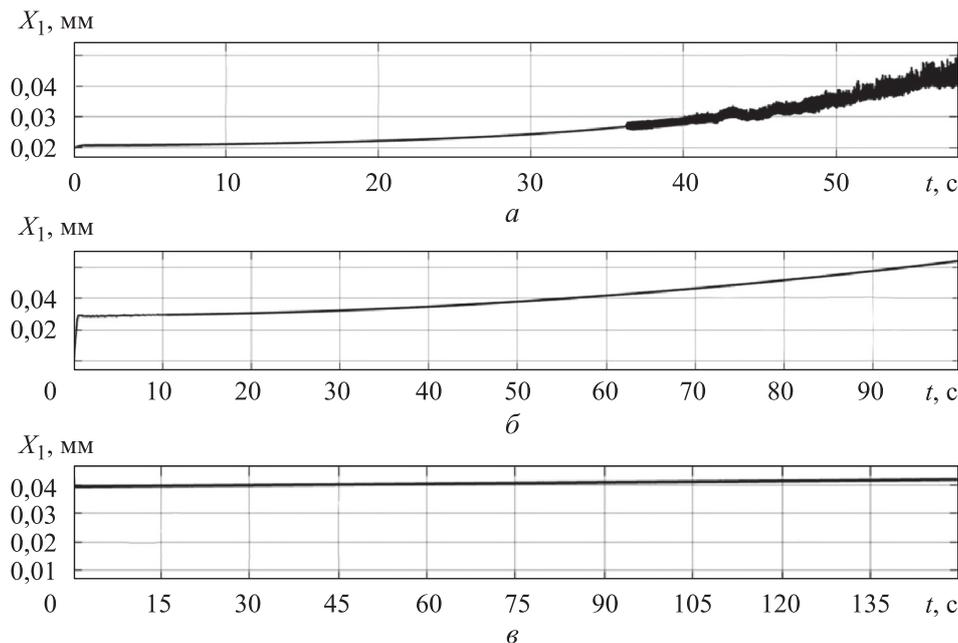


Рис. 4. Примеры траекторий X_1 для первого (а), второго (б) и третьего (в) алгоритмов управления

формообразующих движений $U(t)$ является траектория $l(t)$, задаваемая программой ЧПУ, смещенная на постоянную величину X^* , «медленно» смещающаяся в ходе эволюции.

В этом случае для обеспечения условия (7) необходимо скорость резания выбирать исходя из оптимальной мощности необратимых преобразований в сопряжении задних граней инструмента с заготовкой. Значение подачи определяется требованием постоянства упругих деформаций инструмента относительно заготовки. Кроме того, уменьшение подачи частично устраняет возрастание объема пластической деформации, вносящей самостоятельную неопределенность (не связанную с траекториями формообразующих движений) формируемой геометрической топологии поверхности заготовки.

Устойчивость зависит от технологических режимов, поэтому их необходимо согласовать с изменяющимися свойствами резания. Также на нее влияют параметры динамических подсистем, взаимодействующих через процесс резания, и неуправляемые вибрационные возмущения (например, биения шпинделя).

Показано, что по мере увеличения скорости резания до 2 м/с всегда существует ограниченный диапазон, в котором запас устойчивости максимален. В этом диапазоне находится и оптимальная скорость резания. Причем сверху эта скорость ограничена наступлением параметри-

ческого самовозбуждения, а снизу — инерционностью формирования сил резания. Установлено, что максимальному запасу устойчивости соответствует наивысшая износостойкость инструмента.

Выводы

1. Траектории формообразующих движений вершины инструмента относительно детали отличаются от ТИЭС, задаваемых ЧПУ, по крайней мере, на величину упругих деформаций. Поэтому на выходные свойства процесса обработки оказывают влияние траектории деформационных смещений и определяющих их сил, а также мощности необратимых преобразований энергии, которые вызывают эволюционные изменения параметров динамической связи, формируемой резанием.

2. Показано, что эволюционные изменения свойств ДСР могут обладать большой чувствительностью к малым вариациям параметров взаимодействующих подсистем и динамической связи, формируемой резанием. В свою очередь, эволюционно изменяющаяся динамическая связь, объединяющая подсистемы, зависит от неуправляемых периодических возмущений (например, биений шпинделя) и технологических режимов, задаваемых траекториями исполнительных элементов. Эволюционные изменения вызывают вариации интенсивности

изнашивания инструмента и качества формируемой резанием детали.

3. Показано, что для повышения эффективности обработки необходимо согласовать программу ЧПУ с эволюционно изменяющейся ДСР. Согласование включает в себя обеспечение начальных свойств системы (исходных технологических режимов, геометрических параметров инструмента, доступных изменению упругодиссипативных свойств подсистем и пр.) и изменение в ходе эволюции технологических режимов, а следовательно, программы ЧПУ. Цель согласования заключается в обеспечении устойчивости точке равновесия системы, минимально возможной интенсивности изнашивания инструмента и требуемых показателей качества детали.

4. Условия обработки, в том числе и значения скорости резания, при которой интенсивность изнашивания инструмента минимальна, зависят от точности станка и его состояния,

оцениваемого неуправляемыми вибрационными возмущениями (биениями шпинделя, кинематическими возмущениями и др.). Как правило, неуправляемые периодические возмущения приводят к ухудшению свойств ДСР, проявляющихся, например, в параметрическом самовозбуждении системы, изменении свойств вдоль периодической траектории, влиянии высокочастотных колебаний на свойства системы в низкочастотной области и пр.

5. Согласование программы ЧПУ с эволюционно изменяющимися свойствами системы резания, выполняемое программными методами, не требует дополнительных материальных затрат на модернизацию инструментов и оборудования. Опытная производственная проверка показала возможность снижения стоимости изготовления детали в 1,2 раза. При этом путь резания при достижении терминального состояния процессом резания может быть увеличен до 3 раз.

Литература

- [1] Haken H. Information and Self-Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems. *American Journal of Physics*, 2006, vol. 57(10), p. 262, doi: 10.1119/1.15809
- [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*, 1983, vol. 8, pp. 4590–4594.
- [3] Заковоротный В.Л., Флек М.Б., Угнич Е.А. Модель управления современным предприятием на основе системно-синергетического подхода. *Экономическая наука современной России*, 2016, № 4(75), с. 112–128.
- [4] Колесников А.А. *Прикладная синергетика: основы системного синтеза*. Ростов-на-Дону, Изд-во ЮФУ, 2007. 384 с.
- [5] Заковоротный В.Л., Шаповалов В.В. Динамика транспортных трибосистем. *Сборка в машиностроении, приборостроении*, 2005, № 12, с. 19–24.
- [6] Заковоротный В.Л., Флек М.Б. *Динамика процесса резания. Синергетический подход*. Ростов-на-Дону, Терра, 2006. 880 с.
- [7] Рыжкин А.А. *Синергетика изнашивания инструментальных материалов при лезвийной обработке*. Ростов-на-Дону, ДГТУ, 2019. 289 с.
- [8] Старков В.К. *Физика и оптимизация резания материалов*. Москва, Машиностроение, 2009. 640 с.
- [9] Мигранов М.Ш. Исследования изнашивания инструментальных материалов и покрытий с позиций термодинамики и самоорганизации. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2006, № 11, с. 65–71.
- [10] Каримов И.Г. Влияние температуры резания на энергетические параметры контакта инструмента с деталью. *Вестник УГАТУ*, 2012, т. 16, № 4(49), с. 85–89. URL: <http://journal.ugatu.ac.ru/index.php/Vestnik/article/view/685> (дата обращения 16 ноября 2020).
- [11] Gomez-Solano J.R. Non-equilibrium work distribution for interacting colloidal particles under friction. *New Journal of Physics*, 2015, no. 045026, pp. 1–13, doi: 10.1088/1367-2630/17/4/045026
- [12] Banjac M., Venci A., Otović S. Friction and Wear Processes – Thermodynamic Approach. *Tribology in Industry*, 2014, vol. 36, no. 4, pp. 341–347.

- [13] Abdel-Aal H.A. Thermodynamic modeling of wear. *Encyclopedia of Tribology*, 2013, pp. 3622–3636, doi: https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_1313
- [14] 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, no. 30(8), pp. 958–963, doi: 10.5829/idosi.wasj.2014.30.08.14120
- [15] Mukherjee I., Ray P.K. A review of optimization techniques in metal cutting processes. *Computers and Industrial Engineering*, 2006, vol. 50, no. 1, pp. 15–34, doi: 10.1016/j.cie.2005.10.001
- [16] Козочкин М.П., Федоров С.В., Терешин М.В. Способ определения оптимальной скорости резания в процессе металлообработки. Патент РФ № RU2538750C2, 2015. 9 с.
- [17] Зориктуев В.Ц. Автоматизация процессов на основе положения об оптимальной температуре резания. *Вестник УГАТУ*, 2009, т. 12, № 4, с. 14–19. URL: <http://journal.ugatu.ac.ru/index.php/Vestnik/article/view/1081> (дата обращения 15 октября 2020).
- [18] 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
- [19] 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
- [20] 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. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, no. 59(2), pp. 124–134, doi: 10.5545/sv-jme.2012.677
- [21] 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, no. 83, pp. 151–164, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.073>
- [22] Кудинов В.А. *Динамика станков*. Москва, Машиностроение, 1967. 359 с.
- [23] Воронов С.А., Киселев И.А. Нелинейные задачи динамики процессов резания. *Машиностроение и инженерное образование*, 2017, № 2(51), с. 9–23.
- [24] Gousskov 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
- [25] 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, iss. 9–12, pp. 1793–1809, doi: 10.1016/S1007-5704(02)00014-X
- [26] 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.
- [27] 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, no. 3, pp. 467–474, doi: <https://doi.org/10.1115/1.1765137>
- [28] Peigne G., Paris H., Brissaud D., Gousskov 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, iss. 11, pp. 1133–1142, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.04.012>
- [29] 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. 479–487.
- [30] 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), pp. 189–201, doi: 10.1142/S0218127414501156
- [31] Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Связь самоорганизации динамической системы резания с изнашиванием инструмента. *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика*, 2020, т. 28, № 1, с. 46–61, doi: 10.18500/0869-6632-2020-28-1-46-61

- [32] Заковоротный В.Л., Фам Д.Т., Нгуен С.Т. Математическое моделирование и параметрическая идентификация динамических свойств подсистем инструмента и заготовки при точении. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*, 2011, № 2(160), с. 38–46.
- [33] 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.ijmesci.2014.08.020
- [34] 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
- [35] Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Влияние кинематических возмущений в направлении продольной подачи на траектории формообразующих движений. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*, 2016, № 4(192), с. 67–76, doi: 10.17213/0321-2653-2016-4-67-76
- [36] Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Влияние погрешности движения исполнительных элементов токарного станка на траектории формообразующих движений. *Вестник Донского государственного технического университета*, 2017, т. 17, № 1(88), с. 35–46, doi: 10.23947/1992-5980-2017-17-1-35-46

References

- [1] Haken H. Information and Self-Organization. A Macroscopic Approach to Complex Systems. *American Journal of Physics*, 2006, vol. 57(10), p. 262, doi: 10.1119/1.15809
- [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*, 1983, vol. 8, pp. 4590–4594.
- [3] Zakovorotnyy V.L., Flek M.B., Ugnich E.A. Model of the modern enterprise management on the basis of system-synergistic approach. *Economics of contemporary Russia*, 2016, no. 4(75), pp. 112–128 (in Russ.).
- [4] Kolesnikov A.A. *Prikladnaya sinergetika: osnovy sistemnogo sinteza prikladnaya sinergetika: osnovy sistemnogo sinteza* [Applied synergetics: fundamentals of system synthesis]. Rostov-on-don, SFU publ., 2007. 384 p.
- [5] Zakovorotnyy V.L., Shapovalov V.V. Dynamics of transport tribosystems. *Sbornik v mashinostroyenii, priborostroyenii*, 2005, no. 12, pp. 19–24 (in Russ.).
- [6] Zakovorotnyy V.L., Flek M.B. *Dinamika protsessy rezaniya. Sinergeticheskiy podkhod* [Dynamics of the cutting process. Synergistic approach]. Rostov-on-don, Terra publ., 2006. 880 p.
- [7] Ryzhkin A.A. *Sinergetika iznashivaniya instrumental'nykh materialov pri lezviynoy obrabotke* [Synergetics of tool material wear during blade processing]. Rostov-on-don, DSTU publ., 2019. 289 p.
- [8] Starkov V.K. *Fizika i optimizatsiya rezaniya materialov* [Physics and optimization of cutting materials]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 2009. 640 p.
- [9] Migranov M.Sh. Studies of wear of tool materials and coatings from the standpoint of thermodynamics and self-organization. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2006, no. 11, pp. 65–71.
- [10] Karimov I.G. Effect of the cutting temperature on the energy parameters of the tool-part contact. *Vestnik UGATU*, 2012, vol. 16, no. 4(49), pp. 85–89 (in Russ.). Available at: <http://journal.ugatu.ac.ru/index.php/Vestnik/article/view/685> (accessed 16 November 2020).
- [11] Gomez-Solano J.R. Non-equilibrium work distribution for interacting colloidal particles under friction. *New Journal of Physics*, 2015, no. 045026, pp. 1–13, doi: 10.1088/1367-2630/17/4/045026
- [12] Banjac M., Vencl A., Otović S. Friction and Wear Processes — Thermodynamic Approach. *Tribology in Industry*, 2014, vol. 36, no. 4, pp. 341–347.
- [13] Abdel-Aal H.A. Thermodynamic modeling of wear. *Encyclopedia of Tribology*, 2013, pp. 3622–3636, doi: https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_1313

- [14] 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, no. 30(8), pp. 958–963, doi: 10.5829/idosi.wasj.2014.30.08.14120
- [15] Mukherjee I., Ray P.K. A review of optimization techniques in metal cutting processes. *Computers and Industrial Engineering*, 2006, vol. 50, no. 1, pp. 15–34, doi: 10.1016/j.cie.2005.10.001
- [16] Kozochkin M.P., Fedorov S.V., Tereshin M.V. *Sposob opredeleniya optimal'noy skorosti rezaniya v protsesse metalloobrabotki* [Method for determining the optimal cutting speed in the metalworking process]. Patent no. RU2538750S2 RF, 2015. 9 p.
- [17] Zoriktuyev V.Ts. Automation of cutting operation on basis of state about optimal cutting temperature cutting. *Vestnik UGATU*, 2009, vol. 12, no. 4, pp. 14–19 (in Russ.). Available at: <http://journal.ugatu.ac.ru/index.php/Vestnik/article/view/1081> (accessed 15 October 2020).
- [18] 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
- [19] 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
- [20] 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. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, no. 59(2), pp. 124–134, doi: 10.5545/sv-jme.2012.677
- [21] 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, no. 83, pp. 151–164, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.073>
- [22] Kudinov V.A. *Dinamika stankov* [Dynamics of machine tools]. Moscow, Mashinostroyeniye publ., 1967. 359 p.
- [23] Voronov S.A., Kiselev I.A. Nonlinear problems of cutting process dynamics. *Mashinostroyeniye i inzhenernoye obrazovaniye*, 2017, no. 2(51), pp. 9–23 (in Russ.).
- [24] Gousov 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
- [25] 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, iss. 9–12, pp. 1793–1809, doi: 10.1016/S1007-5704(02)00014-X
- [26] Stepan G., Insperge 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.
- [27] 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, no. 3, pp. 467–474, doi: <https://doi.org/10.1115/1.1765137>
- [28] Peigne G., Paris H., Brissaud D., Gousov 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, iss. 11, pp. 1133–1142, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.04.012>
- [29] 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. 479–487.
- [30] 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), pp. 189–201, doi: 10.1142/S0218127414501156
- [31] Zakovorotnyy V.L., Gvindjiliya V.E. Link between the self-organization of dynamic cutting system and tool wear. *Izvestiya VUZ. Applied nonlinear dynamics*, 2020, vol. 28, no. 1, pp. 46–61 (in Russ.), doi: 10.18500/0869-6632-2020-28-1-46-61

- [32] Zakovorotnyy V.L., Fam Din' Tung, Nguyen Suan T'yem. Mathematical modeling and parametric identification of dynamic properties of the subsystems of the cutting tool and workpiece in the turning. *Bulletin of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical sciences*, 2011, no. 2(160), pp. 38–46 (in Russ.).
- [33] 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
- [34] Zakovorotnyy V.L., Gvindjiliya V.E. Bifurcations of attracting sets of cutting tool deformation displacements at the evolution of treatment process properties. *Izvestiya VUZ. Applied nonlinear dynamics*, 2018, vol. 26, no. 5, pp. 20–38 (in Russ.), doi: 10.18500/0869-6632-2018-26-5-20-38
- [35] Zakovorotnyy V.L., Gvindjiliya V.E. The influence of kinematic perturbations towards longitudinal motion on shape-generating movement trajectories in cutting dynamic system. *Bulletin of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical sciences*, 2016, no. 4(192), pp. 67–76 (in Russ.), doi: 10.17213/0321-2653-2016-4-67-76
- [36] Zakovorotnyy V.L., Gvindjiliya V.E. Error effect of executive elements movement of the lathe tool on forming motion paths. *Vestnik of Don state technical university*, 2017, vol. 17, no. 1(88), pp. 35–46 (in Russ.), doi: 10.23947/1992-5980-2017-17-1-35-46

Статья поступила в редакцию 15.12.2020

Информация об авторах

ЗАКОВОРОТНЫЙ Вилор Лаврентьевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов». Донской государственный технический университет (344000, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, пл. Гагарина, д. 1, e-mail: vzakovorotny@dstu.edu.ru).

ГВИНДЖИЛИЯ Валерия Енвериевна — аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов». Донской государственный технический университет (344000, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, пл. Гагарина, д. 1, e-mail: sinedden@yandex.ru).

Information about the authors

ZAKOVOROTNY Vilor Lavrentyevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Automation of Manufacturing Processes. Don State Technical University (344000, Rostov-on-Don, Russian Federation, Gagarina Sq., Bldg. 1, e-mail: vzakovorotny@dstu.edu.ru).

GVINDJILIYA Valeriya Enverievna — Postgraduate Student, Department of Automation of Manufacturing Processes. Don State Technical University (344000, Rostov-on-Don, Russian Federation, Gagarina Sq., Bldg. 1, e-mail: sinedden@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Синергетическая концепция при программном управлении процессами обработки на металлорежущих станках. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 5, с. 24–36, doi: 10.18698/0536-1044-2021-5-24-36

Please cite this article in English as:

Zakovorotny V.L., Gvindzhiliya V.E. Synergetic Concept of Software Control of Machining Processes on Metal-Cutting Machines. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 5, pp. 24–36, doi: 10.18698/0536-1044-2021-5-24-36