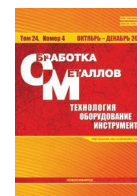




# Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)







Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



## Использование синергетической концепции при определении программы ЧПУ при токарной обработке

Вилор Заковоротный<sup>а</sup>, Валерия Гвинджилия<sup>б, \*</sup>, Элина Фесенко<sup>с</sup>

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

<sup>а</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-2187-9897>,  [vzakovorotny@dstu.edu.ru](mailto:vzakovorotny@dstu.edu.ru), <sup>б</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-1066-4604>,  [sinedden@yandex.ru](mailto:sinedden@yandex.ru),  
<sup>с</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-0833-2758>,  [ellinocha@gmail.com](mailto:ellinocha@gmail.com)

### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.06

#### История статьи:

Поступила: 08 сентября 2022  
 Рецензирование: 03 октября 2022  
 Принята к печати: 28 октября 2022  
 Доступно онлайн: 15 декабря 2022

#### Ключевые слова:

Управляемая система резания  
 Синергетика механической обработки  
 Динамика процесса резания

#### Благодарности:

Исследования частично выполнены на оборудовании ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов» (соглашение с Минобрнаукой № 13.ЦКП.21.0034).

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Одно из динамично развивающихся направлений повышения эффективности станков с ЧПУ связано с использованием синергетической концепции при определении программы ЧПУ. При этом используется принцип расширения-сжатия размерности пространства состояния. **Предмет.** В статье на примере обработки детали, параметры жесткости которой являются функцией траектории движения инструмента, излагаются все этапы синтеза управления, при котором обеспечивается взаимосоогласованность динамических подсистем, в том числе с процессом резания. **Цель работы.** Определение асимптотически устойчивой траектории движения исполнительных элементов станка, задаваемой параметрами программы ЧПУ, из множества траекторий, для которых выполняется условие минимума интенсивности изнашивания. **Метод и методология.** Приводится математическое моделирование управляемой системы резания, в основе которого лежит принцип расширения-сжатия пространства состояния. При расширении размерности пространства состояния в модель динамической системы резания включаются все элементы от системы ЧПУ, программирующей движения исполнительных элементов, до упругих деформаций инструмента, который взаимодействует с заготовкой через связь, формируемую процессом резания. Динамическая связь объединяет подсистемы в единую связанную систему управления. В этом пространстве конструируется желаемая траектория формообразующих движений вершины инструмента относительно заготовки, которая должна быть аттрактором всего пространства состояния. Преобразование желаемой траектории в аттрактор характеризует процедуру сжатия размерности пространства состояния. При этом полагается возможность управления траекториями движения исполнительными элементами в пределах полос пропускания серводвигателей. **Результаты и обсуждения.** Выполнен анализ устойчивости процесса резания, приводится пример эффективности построения программы ЧПУ на основе синергетической парадигмы. Показано, что при согласовании внешнего управления с внутренней динамикой системы можно повысить производительность изготовления детали до двух раз по машинному времени.

**Для цитирования:** Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е., Фесенко Э.О. Использование синергетической концепции при определении программы ЧПУ при токарной обработке // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 98–112. – DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-98-112.

## Введение

**Постановка задачи.** После опубликования работ Г. Хакена и И. Пригожина [1, 2] многие проблемы динамики технических систем стали рассматриваться с учетом их системно-синергетического анализа [3–7]. Системно-синергетический подход стал использоваться и при объяснении многих явлений при обработке резанием и

при трении [8–10]. Одновременно в последнее десятилетие научной общественностью уделяется большое внимание разработке виртуальной модели процессов обработки на металлорежущих станках [11–30]. Эти модели предназначены прежде всего для использования их на стадии технологической подготовки производства деталей сложного геометрического профиля. Под деталями сложного профиля понимаются такие, при изготовлении которых приходится одновременно изменять траектории продольного и поперечного суппортов, а также детали, которые изменяют свойства вдоль траекторий исполнительных элементов станка (ТИЭС).

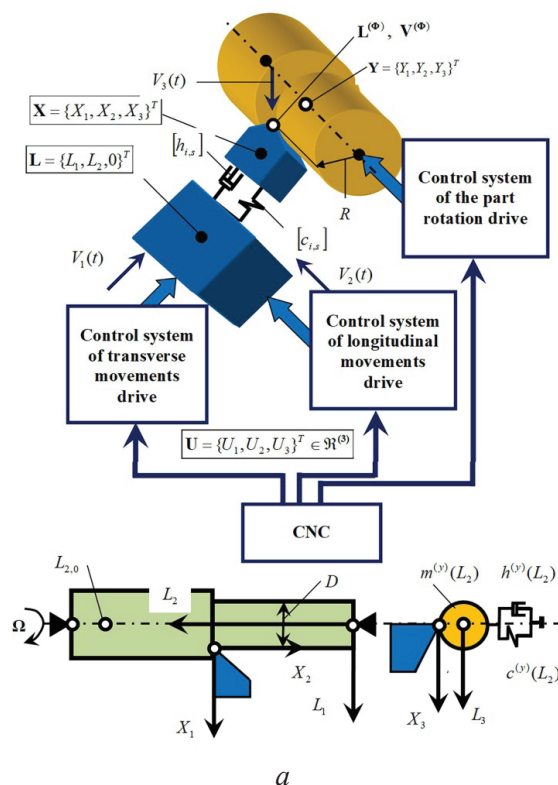
#### \*Адрес для переписки

Гвинджилия Валерия Энвериевна, 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](mailto:sinedden@yandex.ru)

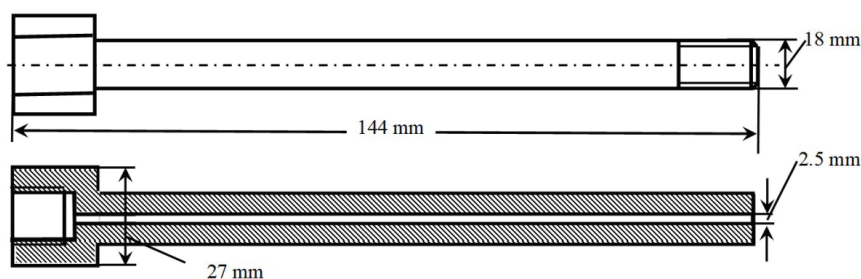
В основу структуры синергетической концепции управления процессами обработки включаются следующие этапы [3–7]. Во-первых, формулируется цель управления как производство партии деталей заданного качества при минимизации приведенных затрат на ее изготовление. Во-вторых, определяется желаемая траектория  $\mathbf{L}_0^{(\Phi)} = \{L_{1,0}^{(\Phi)}, L_{2,0}^{(\Phi)}, L_{3,0}^{(\Phi)}\}^T \in \mathcal{R}^{(3)}$  и соответствующий вектор скоростей  $\mathbf{V}_0^{(\Phi)} = d\mathbf{L}_0^{(\Phi)} / dt = \{V_{1,0}^{(\Phi)}, V_{2,0}^{(\Phi)}, V_{3,0}^{(\Phi)}\}^T \in \mathcal{R}^{(3)}$  формообразующих движений ( $\mathbf{L}^{(\Phi)} = \{L_1^{(\Phi)}, L_2^{(\Phi)},$

$L_3^{(\Phi)}\}^T \in \mathcal{R}^{(3)}$  и  $d\mathbf{L}^{(\Phi)} / dt = \mathbf{V}^{(\Phi)} = \{V_1^{(\Phi)}, V_2^{(\Phi)}, V_3^{(\Phi)}\}^T \in \mathcal{R}^{(3)}$ ), при которых выполняются требования к качеству деталей при минимизации интенсивности изнашивания инструмента (рис. 1, а).

Пространство  $\mathcal{R}^{(3)}$  определяется направлениями подвижности ТИЭС, которые задаются системой ЧПУ. Под траекторией формообразующих движений понимается сумма траекторий ТИЭС – вектор  $\mathbf{L} = \{L_1, L_2, L_3\}^T \in \mathcal{R}^{(3)}$ , траекторий



а



б

Рис. 1. Управляемая динамическая система резания (а) и эскиз «базовой» детали (б)

Fig. 1. Controlled dynamic cutting system (а) and drawing of the “basic” part (б)

деформационных смещений инструмента – вектор  $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, X_3\}^T \in \mathbb{R}^{(3)}$  и заготовки – вектор  $\mathbf{Y} = \{Y_1, Y_2, Y_3\}^T \in \mathbb{R}^{(3)}$ . Следовательно,  $\mathbf{L}^{(\Phi)} = \mathbf{L} - \mathbf{X} - \mathbf{Y}$ . Траектории  $\mathbf{L}$ , а также  $\mathbf{V} = d\mathbf{L} / dt = \{V_1, V_2, V_3\}^T \in \mathbb{R}^{(3)}$  определяются программой ЧПУ. Деформационные смещения  $\mathbf{X}$  и  $\mathbf{Y}$  рассматриваются в подвижной системе координат, задаваемой ТИЭС. Если  $\mathbf{X} = 0$ ,  $\mathbf{Y} = 0$ , то  $\mathbf{L}^{(\Phi)} = \mathbf{L}$ . Рассматриваются также скорости  $\mathbf{v}^{(X)} = d\mathbf{X} / dt = \{v_{X_1}, v_{X_2}, v_{X_3}\}^T$  и  $\mathbf{v}^{(Y)} = d\mathbf{Y} / dt = \{v_{Y_1}, v_{Y_2}, v_{Y_3}\}^T$ . Обеспечивается такое согласование терминальной траектории  $\mathbf{L}_0^{(\Phi)}$  с траекториями пространства состояния, при котором  $\mathbf{L}$ ,  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{Y}$  являются асимптотически устойчивыми. Тогда  $\mathbf{L}_0^{(\Phi)}$  есть аттрактор. Отличием синергетической парадигмы синтеза программы ЧПУ от традиционной является ее определение на основе взаимосогласования всех подсистем и обеспечение  $\mathbf{L}^{(\Phi)} = \mathbf{L}_0^{(\Phi)}$  свойством притяжения всего пространства состояния. Кроме этого должны выполняться условия  $\mathbf{L}^{(\Phi)} \in \mathbb{S}$ , диктуемые требованиями к качеству деталей. При этом учитывается динамика всей системы в целом.

Поэтому при разработке синергетического подхода к управлению процессами обработки на станках мы опираемся на исследования в области динамики процесса резания [24–43]. Здесь дан далеко не полный перечень работ по динамике резания. Несмотря на множество работ по динамике резания, в них рассматриваются некоторые частные модели представления сил резания в координатах упругой системы. Анализируются: условия потери устойчивости, формирование различных притягивающих множеств деформационных смещений инструмента и заготовки. При решении же проблемы синергетического синтеза, в том числе для определения желаемой траектории  $\mathbf{L}_0^{(\Phi)} \in \mathbb{S}^{(\Phi)}$  и соответствующих ей траекторий  $\mathbf{L}^{(\Phi)}$ ,  $\mathbf{X}$  и  $\mathbf{Y}$ , необходимо анализировать динамическую систему в целом. Здесь  $\mathbb{S}^{(\Phi)}$  – множество допустимых вариаций  $\mathbf{L}^{(\Phi)}$ . В статье рассматриваются все

этапы синергетического управления токарной обработкой деталей, параметры жесткости которых изменяются вдоль траектории инструмента: методика построения  $\mathbf{L}_0^{(\Phi)}$ , ее асимптотическая устойчивость. Приводится анализ эффективности синергетического управления на конкретном примере изготовления «базовой» детали, эскиз которой изображен на рис. 1, б.

## Методика исследований

**Определение желаемой траектории формообразующих движений.** При анализе системы целесообразно использовать принцип разделения движений на «медленные», лежащие в пределах полосы пропускания двигателей исполнительных элементов станка, и «быстрые», определяемые динамическими свойствами подсистем инструмента и заготовки. Его использование базируется на асимптотических свойствах нелинейных дифференциальных уравнений, имеющих малые параметры при производных [44, 45]. Причем подсистема «быстрых» движений рассматривается в вариациях относительно траекторий «медленных» движений. При условии асимптотической устойчивости подсистем траектория «медленных» движений становится аттрактором. Типичным для практики является случай, когда ТИЭС являются заданными и управляемыми в пределах полос пропускания серводвигателей. Тогда имеем следующее уравнение динамики [40]:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 \mathbf{X}}{dt^2} + h \frac{d\mathbf{X}}{dt} + c\mathbf{X} = \mathbf{F}(\mathbf{L}, \mathbf{V}, \mathbf{X}, \mathbf{Y}), \\ m^{(Y)} \frac{d^2 Y_1}{dt^2} + h^{(Y)} \frac{dY_1}{dt} + c^{(Y)} Y_1 = \\ = F^{(0)}(\mathbf{L}, \mathbf{V}, \mathbf{X}, \mathbf{Y}) \chi_1, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\mathbf{m} = [m_s]$ ,  $m_s = m$ ,  $s = 1, 2, 3$ , в кгс<sup>2</sup>/мм,  $\mathbf{h} = [h_{s,l}]$ , в кгс/мм,  $\mathbf{c} = [c_{s,l}]$ , в кг/мм;  $s, l = 1, 2, 3$  – матрицы инерционных, скоростных и упругих коэффициентов подсистемы инструмента. Они симметричны и положительно определены, т. е. потенциальны. Подсистема заготовки имеет жесткость в направлении оси ее вращения на порядок большую, чем в остальных направлениях. В плоскости  $Y_1 - Y_3$  она обладает полной

симметрией. Поэтому в этой плоскости любая ортогональная система координат является главной. Тогда силе  $F_1$  соответствуют деформации только по направлению  $Y_1$  [48]. Сила  $\mathbf{F}$  [4] представлена в виде  $\mathbf{F} = \{F_1, F_2, F_3\} = F^{(0)}\{\chi_1, \chi_2, \chi_3\}$ , причем  $(\chi_1)^2 + (\chi_2)^2 + (\chi_3)^2 = 1$ . Удобно рассмотреть следующее представление о режимах (подаче  $S_P(t)$ , глубине  $t_P(t)$  и скорости  $V_P(t)$  резания):

$$\begin{aligned} S_P(t) &= \int_{t-T}^t [V_2(\xi) - v_{X_2}(\xi) - v_{Y_2}(\xi)] d\xi; \\ V_P(t) &= \pi D \Omega - v_{X_3}(t) - v_{Y_2}(t); \\ t_P(t) &= D / 2 - (L_1 - X_1 - Y_1), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $T = (\Omega)^{-1}$  время оборота заготовки в [с];  $D$  – ее диаметр в [м]. Если  $\mathbf{X} = 0$ ,  $\mathbf{Y} = 0$ , то мы имеем традиционные режимы:  $S_P^{(0)}$ ,  $t_P^{(0)}$  и  $V_P^{(0)} = V_3 = \pi D \Omega$ . Тогда модель связи силы  $F^{(0)}$  с координатами системы имеет уравнение [46, 47]

$$\begin{aligned} T^{(0)} dF^{(0)} / dt + F^{(0)} &= \\ &= \rho \left\{ 1 + \mu \exp \left[ -\varsigma (V_3 - v_{X_3}) \right] \right\} \times \\ &\times \left[ t_P^{(0)} - X_1 - Y_1 \right] \int_{t-T}^t \{V_2(\xi) - v_{X_2}(\xi)\} d\xi, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\rho$  – давление стружки на переднюю грань инструмента в [кг/мм<sup>2</sup>];  $\mu$  – безразмерный параметр;  $\varsigma$  – коэффициент наклона в [с/м<sup>-1</sup>];  $T^{(0)}$  – постоянная времени стружкообразования в [с]. Системы (1)–(3) позволяют при заданных  $\mathbf{L}, \mathbf{V}$  определить  $\mathbf{X}, \mathbf{Y}$  и  $\mathbf{L}^{(\Phi)}$ . Если  $\mathbf{L}^{(\Phi)} \in \mathcal{N}^{(\Phi)}$ , то  $\mathbf{L}, \mathbf{V}$  определяют программу ЧПУ. В противном случае необходимо подобрать  $\mathbf{L}, \mathbf{V}$  или доступные вариациям параметры так, чтобы выполнялось условие  $\mathbf{L}^{(\Phi)} \in \mathcal{N}^{(\Phi)}$  или  $\mathbf{L}^{(\Phi)} = \mathbf{L}_0^{(\Phi)}$ , и обеспечить асимптотическую устойчивость полученной траектории.

Для вычисления  $\mathbf{L}, \mathbf{V}$ , при которых обеспечивается  $\mathbf{L}^{(\Phi)} \in \mathcal{N}^{(\Phi)}$ , воспользуемся принципом разделения движений. Вначале определим множество траекторий  $\mathbf{L}^{(\Phi)} \in \mathcal{N}^{(\Phi)}$  в «медлен-

ном» времени, затем в этом множестве выберем те, для которых траектории «быстрых» движений являются асимптотически устойчивыми, и из них те, для которых интенсивность изнашивания минимальна. Для определения желаемой траектории «медленных» движений рассмотрим усредненные по периоду вращения заготовки значения  $\mathbf{L}, \mathbf{V}$ . Для этого рассмотрим (1) и (3) в медленном дискретном времени  $T = (\Omega)^{-1}$ :

$$\mathbf{C}(iT)\mathbf{Z}(iT) = \mathbf{F}(iT), \quad (4)$$

где  $\mathbf{Z}(iT) = \{X_1(iT), X_2(iT), X_3(iT), Y_1(iT)\}^T$ ;  
 $\mathbf{F}(iT) = \rho_0 t_P^{(0)} S_P^{(0)}(iT) \{\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_1\}^T$ ;

$$\mathbf{C}(iT) = \begin{bmatrix} c_{1,1} + \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_1 & c_{2,1} & c_{3,1} & \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_1 \\ c_{1,2} + \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_2 & c_{2,2} & c_{3,2} & \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_2 \\ c_{1,3} + \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_3 & c_{2,3} & c_{3,3} & \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_3 \\ \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_1 & 0 & 0 & c^{(Y)} + \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_1 \end{bmatrix},$$

$$\rho_0 = \rho [1 + \mu \exp(-\varsigma V_3)].$$

В (4)  $\sum_{i=1}^{i=s} iT = L_0$  (см. рис. 1). Из (4) вычисляем  $0,5\Delta D(iT) = X_1(iT) + Y_1(iT)$ . При обработке требуется обеспечить условие  $\Delta D(iT) = \text{const}$  [51–55]. Определим  $\Delta D(iT)$  из (4):

$$\Delta D(iT) = 2t_P^{(0)} S_P^{(0)} \frac{\Delta X + \Delta Y}{\Delta}, \quad (5)$$

где

$$\Delta(iT) = \begin{bmatrix} c_{1,1} + \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_1 & c_{2,1} & c_{3,1} & \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_1 \\ c_{1,2} + \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_2 & c_{2,2} & c_{3,2} & \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_2 \\ c_{1,3} + \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_3 & c_{2,3} & c_{3,3} & \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_3 \\ \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_1 & 0 & 0 & c^{(Y)} + \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_1 \end{bmatrix};$$

$$\Delta_X(iT) = \begin{bmatrix} \chi_1 & c_{2,1} & c_{3,1} & \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_1 \\ \chi_2 & c_{2,2} & c_{3,2} & \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_2 \\ \chi_3 & c_{2,3} & c_{3,3} & \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_3 \\ \chi_1 & 0 & 0 & c^{(Y)} + \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_1 \end{bmatrix};$$

$$\Delta_Y(iT) = \begin{bmatrix} c_{1,1} + \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_1 & c_{2,1} & c_{3,1} & \chi_1 \\ c_{1,2} + \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_2 & c_{2,2} & c_{3,2} & \chi_2 \\ c_{1,3} + \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_3 & c_{2,3} & c_{3,3} & \chi_3 \\ \rho_0 S_P^{(0)}(iT)\chi_1 & 0 & 0 & \chi_1 \end{bmatrix}.$$

Анализ (5) показывает, что в зависимости от  $\Delta D(iT)$  имеет место ветвление решений  $S_P^{(0)}(iT)$ . Причем существуют области, в которых вещественных решений нет. Все зависит от соотношения жесткости подсистемы заготовки  $c^{(Y)}$ , элементов матрицы  $\mathbf{c}$  и допустимых значений  $\Delta D(iT)$  при заданных значениях припуска  $t_P^{(0)}$ . В том случае, если  $\mathbf{c} \rightarrow \infty$  и  $\Delta D(iT) = \Delta D_0 = \text{const}$ , то (5) вырождается в выражение

$$\Delta D_0 = 2t_P^{(0)} \frac{\rho_0(V_P)S_P^{(0)}(iT)\chi_1}{c^{(Y)}(iT) + \rho_0(V_P)S_P^{(0)}(iT)\chi_1}, \quad (6)$$

из которого определяем множество траекторий  $S_P^{(0)}(iT, V_P)$ , каждая из которых зависит от скорости резания  $V_P = \text{const}$ . Очевидно,

$$S_P^{(0)}(iT, V_P) = \frac{\Delta D_0 c^{(Y)}(iT)}{\rho_0(V_P)\chi_1[t_P^{(0)} - \Delta D_0]}, \quad (7)$$

$S_P^{(0)}(iT, V_P)$  – траектория оборотной подачи по перемещению суппорта, при которой  $\Delta D_0 = \text{const}$ .

Анализ (5) и (6) позволяет сделать некоторые также известные из практики выводы о выборе параметров инструмента и режимов резания для уменьшения влияния упругих деформаций на диаметр детали.

1. При уменьшении глубины резания снижаются вариации диаметра, обусловленные изменениями жесткости. В связи с этим обработка детали, жесткость которой изменяется вдоль траектории инструмента, выполняется в несколько проходов с последовательным уменьшением величины припуска.

2. На величину  $\Delta D(iT)$  оказывает влияние угловой коэффициент  $\chi_1$ . Угловые коэффициенты зависят от геометрии инструмента, прежде всего от переднего угла и угла наклона режущей кромки [56].

3. Для уменьшения неопределенности  $\Delta D(iT)$  при вариациях  $\mathbf{c}$  целесообразно вести обработку с малыми подачами. Однако при малых подачах, соизмеримых с радиусом инструмента при его вершине, стабилизирующее влияние сформированного на заготовке направления

движения нивелируется. Поэтому величина подачи снизу также ограничена [57]. Эти методы не устраняют необходимости в согласовании программы ЧПУ с законом изменения жесткости.

Если вычислено множество траекторий  $S_P^{(0)}(iT, V_P)$ , то дополнительно необходимо из этого множества выбрать те, для которых выполняется условие минимума интенсивности изнашивания. Решение этой проблемы достаточно полно изложено в работе [58]. Траектории (7) вычислены в предположении, что подсистема «быстрых» движений является асимптотически устойчивой. При этом условии (7) есть аттрактор, обладающий свойством притяжения во всем пространстве состояния. В связи с этим дополнительно необходимо проанализировать подсистему «быстрых» движений на асимптотическую устойчивость.

**Пример согласования программы ЧПУ с изменением жесткости детали.** Проблема согласования ТИЭС с изменяющимися свойствами системы имеет большой спектр применений: согласование ТИЭС с эволюционными изменениями свойств системы, обусловленными работой сил в зоне резания; согласование ТИЭС с априорно заданным законом изменения жесткости заготовки; согласование ТИЭС с развитием износа инструмента и пр. Для примера рассмотрим продольное точение штуцера форсунки топливного насоса дизельного двигателя (длина  $L_0 = 144$  мм (рис. 1, б), диаметр  $D = 18$  мм, материал – горячекатаный прутки из стали 45 (ГОСТ 2590–2006) диаметром  $D = 25$  мм. В качестве инструмента использовались инструментальные системы со сменными четырехгранными пластинами из T15K6 с державками MR TNR 2020 K11. Геометрия инструмента: передний угол  $\gamma = 15^\circ$ , угол в плане  $\phi = 90^\circ$ , задний угол  $\alpha = 6^\circ$ . Параметры упругой системы инструмента и динамической связи приведены в табл. 1 и 2. Обобщенная масса –  $m = 0,5 \cdot 10^{-3}$  кг · с<sup>2</sup>/мм. Для определения закона изменения радиальной жесткости вдоль оси заготовки можно воспользоваться законами изгибных колебаний стержней [59]. Такую информацию проще и точнее получать экспериментально (см. рис. 1, а). Закон  $c^{(Y)}(L_2)$  необходимо дополнить его согласованием с изменением приведенной массы

Таблица 1

Table 1

## Матрицы скоростных коэффициентов и упругости подсистемы инструмента

## Matrices of velocity coefficients and elasticity of the tool subsystem

$c_{1,1}$ , КГ/ММ	$c_{2,2}$ , КГ/ММ	$c_{3,3}$ , КГ/ММ	$h_{1,1}$ , КГ · С/ММ	$h_{2,2}$ , КГ · С/ММ	$h_{3,3}$ , КГ · С/ММ
2000	1000	1000	1,3	1,1	0,8
$c_{1,2} = c_{2,1}$ , КГ/ММ	$c_{1,3} = c_{3,1}$ , КГ/ММ	$c_{2,3} = c_{3,2}$ , КГ/ММ	$h_{1,2} = h_{2,1}$ , КГ · С/ММ	$h_{1,3} = h_{3,1}$ , КГ · С/ММ	$h_{2,3} = h_{3,2}$ , КГ · С/ММ
100	150	80	0,6	0,5	0,4

Таблица 2

Table 2

## Параметры динамической связи

## Dynamic link options

$\rho$ , КГ/ММ <sup>2</sup>	$\zeta$ , (ММ/С) <sup>-1</sup>	$T^{(0)}$ , С	$\mu$	$\chi_1$	$\chi_2$	$\chi_3$
300,0	0,1	0,0001...0,0005	0,5	0,7	0,5	0,5

вдоль  $L_2$ . Это связано с тем, что собственные частоты изгибных колебаний вала остаются неизменными при всех значениях  $L_2$  [4–6, 46].

Траектории  $S_p^{(0)}(L_2)$  на рис. 2, б соответствуют скорости продольных перемещений суппорта  $V_2(L_2) = S_p^{(0)}(L_2)(T)^{-1}$ . Приведенные на рис. 2, в траектории характеризуют притягивающее множество деформационных смещений на всем пути движения инструмента в том случае, если подсистема «быстрых» движений является асимптотически устойчивой. Траектории на рис. 2 получены в предположении, что  $V_3 = 1,5$  м/с =  $V_p = \text{const}$ . Если варьировать  $V_3$  и  $t_p^{(0)}$ , то будут смещаться траектории на рис. 2.

Рассмотрим проблему асимптотической устойчивости деформационных смещений для подсистемы «быстрых» движений. Кривым (см. рис. 2) соответствуют квазипостоянные траектории деформационных смещений  $X_s^{(*)}(iT)$ ,  $s = 1, 2, 3$ ,  $Y^{(*)}(iT)$ , сил  $F^{(0,*)}(iT)$  и скоростей

$V_2^{(*)}(iT)$ . Причем  $X_s^{(*)}(iT)$ ,  $Y^{(*)}(iT)$  и  $F^{(0,*)}(iT)$  являются медленно изменяющимися координатами состояния. После замены  $X_s(t) - X_s^{(*)}(iT) = x_s(t)$ ,  $Y(t) - Y^{(*)}(iT) = y(t)$  и  $F^{(0)}(t) - F^{(0,*)}(iT) = f(t)$  получаем уравнение в вариациях относительно траекторий медленных движений.

Его линеаризация в окрестности  $X_s^{(*)}(iT)$ ,  $s = 1, 2, 3$ ,  $Y^{(*)}(iT)$  и сил  $F^{(0,*)}(iT)$  приводит к системе линейных уравнений с запаздывающими аргументами. Анализ устойчивости таких систем на основе алгебраических критериев, а также критерия Михайлова не является справедливым [47, 48]. Моделирование сил в координатах состояния позволяют интерпретировать силы как обратные связи в системе. Поэтому воспользуемся критерием устойчивости Найквиста, для чего из (1) с учетом (3) получим передаточную функцию системы  $W_p(p)$  в разомкнутом состоянии для линеаризованной системы в вариациях:

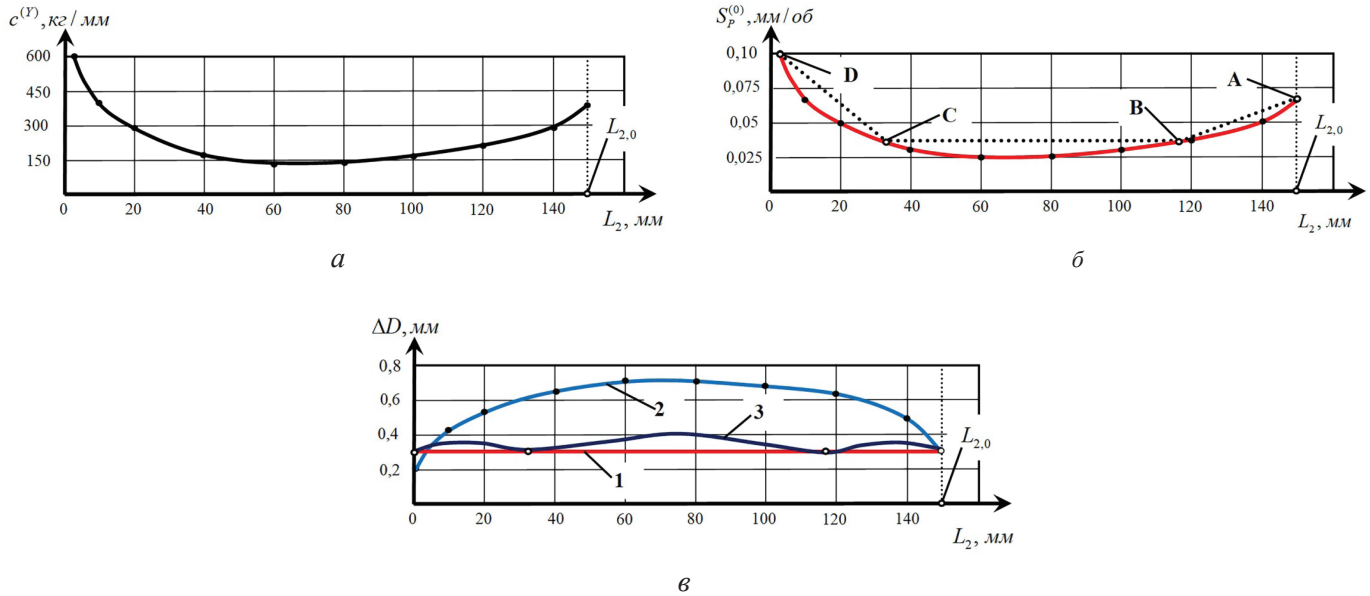


Рис. 2. Пример согласования траектории изменения радиальной жесткости заготовки (а) с величиной оборотной подачи (б), изменяющих вариации диаметра (в):

1 – полное согласование вдоль траектории; 2 – обработка с постоянной подачей; 3 – линейная интерполяция изменения подачи по четырем узловым точкам (А-В-С-Д)

Fig. 2. An example of matching the path of changing the radial stiffness of the workpiece (a) with the value of the feed per revolution (b), changing the diameter variations (c):

1 – complete matching along the path; 2 – processing with a constant feed; 3 – linear interpolation of feed change over four nodal points (A-B-C-D)

$$W_P(p) = \frac{P_0}{T^{(0)}_{p+1}} \left\{ S_P^{(0)} g_{FX_1}(p) [1 - \exp(-Tp)] + \right. \\ \left. + t_P^{(0)} g_{FX_2}(p) [1 - \exp(-Tp)] + \right. \\ \left. + S_P^{(0)} g_{FY}(p) [1 - \exp(-Tp)] \right\}, \quad (8)$$

где

$$g_{FX_1}(p) = \Delta_{X_1} / \Delta; \quad g_{FX_2}(p) = \Delta_{X_2} / \Delta; \\ g_{FY}(p) = \Delta_Y / \Delta;$$

$$\Delta = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{2,1} & c_{3,1} & 0 \\ c_{1,2} & c_{2,2} & c_{3,2} & 0 \\ c_{1,3} & c_{2,3} & c_{3,3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c^{(Y)} \end{bmatrix};$$

$$\Delta_{X_1} = \begin{bmatrix} \chi_1 & c_{2,1} & c_{3,1} & 0 \\ \chi_2 & c_{2,2} & c_{3,2} & 0 \\ \chi_3 & c_{2,3} & c_{3,3} & 0 \\ \chi_1 & 0 & 0 & c^{(Y)} \end{bmatrix};$$

$$\Delta_{X_2} = \begin{bmatrix} c_{1,1} & \chi_1 & c_{3,1} & 0 \\ c_{1,2} & \chi_2 & c_{3,2} & 0 \\ c_{1,3} & \chi_3 & c_{3,3} & 0 \\ 0 & \chi_1 & 0 & c^{(Y)} \end{bmatrix};$$

$$\Delta = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{2,1} & c_{3,1} & \chi_1 \\ c_{1,2} & c_{2,2} & c_{3,2} & \chi_2 \\ c_{1,3} & c_{2,3} & c_{3,3} & \chi_3 \\ 0 & 0 & 0 & \chi_1 \end{bmatrix}.$$

В систему (8) входят технологические параметры  $t_P^{(0)}$  и  $S_P^{(0)}$ , а также косвенно  $V_P$ , так как  $T^{(0)}$  в основном зависит от скорости резания, и частота вращения шпинделя  $\Omega = (T)^{-1}$ . Параметры  $t_P^{(0)}$ ,  $S_P^{(0)}$  и  $\Omega$  определяются программой ЧПУ. Приведем пример изменения области устойчивости в плоскости двух варьируемых параметров « $V_P - \rho$ » (рис. 3). Выше приведенных фигуративных линий система неустойчива. Кривые являются типичными при

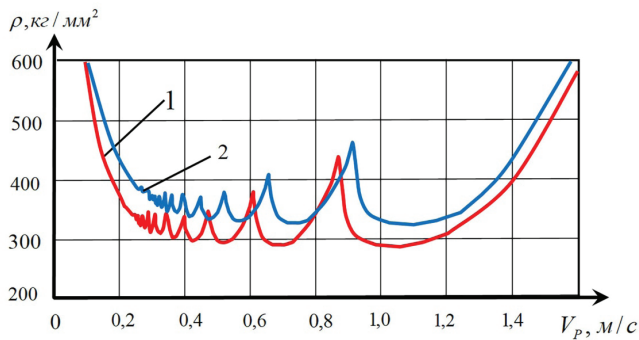


Рис. 3. Пример изменения области устойчивости в плоскости « $V_p - p$ »:

1 –  $c^{(Y)} = 400$  кг/мм; 2 –  $c^{(Y)} = 150$  кг/мм

Fig. 3. An example of changing the region of stability in a plane « $V_p - p$ »:

1 –  $c^{(Y)} = 400$  кг/мм; 2 –  $c^{(Y)} = 150$  кг/мм

оценивании влияния частоты вращения шпинделя на устойчивость упругих деформационных смещений инструмента и заготовки. Периодические всплески допустимых значений  $p$  объясняются регенеративным эффектом интегрального оператора формирования подачи. Если анализировать свойства при  $t < T$ , то скорость резания изменяет прежде всего параметр  $T^{(0)}$ . Его увеличение вызывает две противоположные тенденции. С одной стороны, увеличение  $T^{(0)}$  приводит к дополнительным фазовым сдвигам между силами и деформациями, что способствует потере устойчивости, с другой – увеличение  $T^{(0)}$  способствует возрастанию демпфирующего влияния процесса резания на колебания, что стабилизирует равновесие. Поэтому при увеличении  $V_p$  существует минимум.

Если следовать работам [58], то по мере увеличения скорости резания наблюдается перераспределение физических взаимодействий в областях сопряжения инструмента и зоны резания (адгезионные, усталостные, абразивные, трибохимические, диффузионные и пр.). Переход от преобладающего адгезионного к диффузионному взаимодействию соответствует минимуму интенсивности изнашивания. Этому диапазону соответствует минимум мощности необратимых преобразований подводимой к резанию энергии [56]. При обработке стали 45 область этого перехода расположена в диапазоне (1,0...2,0) м/с.

Кроме этого при возрастании  $\Omega$  существует критическое значение  $\Omega$ , с которого начинают

проявляться параметрические эффекты, в том числе, параметрическое самовозбуждение [45]. Поэтому существует критическое значение  $\Omega$ , превышение которого недопустимо, и необходимо учитывать ограничения, накладываемые на систему особенностями ее динамики.

## Результаты и их обсуждение

Одним из развивающихся в настоящее время путей увеличения эффективности обработки деталей, жесткость которых изменяется вдоль траектории движения инструмента, является согласование внешнего управления (от системы ЧПУ) с внутренним регулированием упругих деформаций, определяемым зависимостью сил от деформационных смещений и ТИЭС. Синергетическая проблема взаимодействия внешнего управления с внутренним [3–7], формируемым зависимостью сил резания от деформационных смещений и ТИЭС, задаваемых системой ЧПУ, решается на основе согласования внешнего управления с внутренней динамикой резания. Для этого, во-первых, при определении программы ЧПУ строится множество желаемых траекторий формообразующих движений, которые включают как ТИЭС, так и деформации вершины инструмента относительно заготовки. Желаемые траектории определяются исходя из требований к качеству деталей. Этим траекториям подчиняются все промежуточные траектории динамической системы вплоть до программы ЧПУ. Таким образом, существующий в настоящее время принцип подчинения заменяется принципом взаимодействия подсистем по направлению достижения цели. Во-вторых, из полученного множества траекторий, полученных при различных технологических режимах, выбирается траектория, при которой интенсивность изнашивания инструмента является минимальной. Глубина резания обычно задается априорно, поэтому при выборе режимов необходимо из условий физической оптимальности определить скорость резания, при которой желаемая траектория формообразующих движений является асимптотически устойчивой. Выполненная проверка эффективности метода при продольном точении штуцера форсунки топливного насоса показала, что за счет уменьшения количества проходов можно повысить произво-

длительность изготовления детали до двух раз по машинному времени. Повышение производительности достигнуто, во-первых, за счет уменьшения числа проходов. По базовой технологии после сверления центрального отверстия  $D = 2,5$  мм, которое выполняется на специализированном станке, заготовка устанавливается в центрах и выполняется продольное точение вала вначале на всю длину до  $D = 27$  мм. Затем в три прохода с глубинами резания  $t_p^{(0)} = 1,5$  мм,  $t_p^{(0)} = 0,7$  мм и  $t_p^{(0)} = 0,3$  мм осуществляется точение основной поверхности вала. Такие переходы обеспечивают требуемую точность диаметра до достижения износа по задней грани 0,6 мм. Режимы резания остаются неизменными. При использовании синергетической концепции за счет согласования ТИЭС с изменяющимися параметрами жесткости заготовки вдоль координат перемещения инструмента, согласования ТИЭС с эволюционными изменениями свойств формируемой резанием динамической связи, а также определения оптимальных координат переключения (переналадки) циклов обработки удастся уменьшить число проходов с четырех до двух. Кроме этого появляется возможность увеличить партию деталей до переналадки инструментальной системы в 1,5 раза. Оптимальные координаты переключений определялись по методике, изложенной нами ранее [59]. Важно подчеркнуть, что увеличение производительности достигнуто программными методами без дополнительных материальных затрат.

## Выводы

Одним из перспективных направлений изготовления партии деталей заданного качества при минимизации приведенных затрат является использование синергетического принципа согласования внешнего управления (программы ЧПУ) с внутренней динамикой системы. Приведенный пример изготовления детали, жесткость которой явно зависит от траектории инструмента, позволяет до двух раз повысить производительность по машинному времени. Разработанный подход и приведенные алгоритмы определения желаемой траектории формообразующих движений и соответствующей ей программы ЧПУ на основе синергетического взаимосогласования внешнего

управления с изменяющимися динамическими характеристиками заготовки можно распространить на большой класс деталей сложной геометрической формы.

## Список литературы

1. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. – М.: Прогресс, 1986. – 432 с.
2. Хакен Г. Синергетика: иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. – М.: Мир, 1985. – 424 с.
3. Синергетика и проблемы теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – М.: Физматлит, 2004. – 504 с. – ISBN 5-9221-0336-9.
4. Заковоротный В.Л., Флек М.Б. Динамика процесса резания. Синергетический подход. – Ростов н/Д.: Терра, 2005. – 880 с.
5. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Синергетическая концепция при программном управлении процессами обработки на металлорежущих станках // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2021. – № 5 (734). – С. 24–36. – DOI: 10.18698/0536-1044-2021-5-24-36.
6. 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.
7. Zakovorotny V., Gvindjiliya V. Process control synergetics for metal-cutting machines // Journal of Vibroengineering. – 2022. – Vol. 24 (1). – P. 177–189. – DOI: 10.21595/jve.2021.22087.
8. Заковоротный В.Л. Нелинейная трибомеханика. – Ростов н/Д.: Изд-во ДГТУ, 2000. – 293 с.
9. 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.
10. Кабалдин Ю.Г., Шатагин Д.А. Искусственный интеллект и киберфизические механообрабатывающие системы в цифровом производстве // Вестник машиностроения. – 2020. – № 1. – С. 21–25.
11. Virtual process systems for part machining operations / Y. Altintas, P. Kersting, D. Biermann, E. Budak, B. Denkena // CIRP Annals. – 2014. – Vol. 63 (2). – P. 585–605. – DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.007.
12. Recent advances in modelling of metal machining processes / P. Arrazola, T. Ozel, D. Umbrello, M. Davies, I. Jawahir // CIRP Annals. – 2013. – Vol. 62 (2). – P. 695–718. – DOI: 10.1016/j.cirp.2013.05.006.
13. Пантюхин О.В., Васин С.А. Цифровой двойник технологического процесса изготовления изделий специального назначения // Станкоинструмент. –

2021. – № 1 (22). – С. 56–59. – DOI: 10.22184/2499-9407.2021.22.1.56.58.

14. Virtual machine tool / Y. Altintas, C. Brecher, M. Weck, S. Witt // *CIRP Annals*. – 2005. – Vol. 54 (2). – P. 115–138. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60022-5.

15. *Erkorkmaz K., Altintas Y., Yeung C.-H.* Virtual computer numerical control system // *CIRP Annals*. – 2006. – Vol. 55 (1). – P. 399–402. – DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60444-2.

16. Complexity-based analysis of the influence of machining parameters on the surface finish of drilled holes in drilling operation / As. Ahamed, At. Ahamed, D. Katuwawala, T.T. Ee, Z.H. Tan, I.S. Bajaj, Th. Wickramasurendra, H. Namazi // *Fractals*. – 2019. – Vol. 27 (6). – P. 1950087. – DOI: 10.1142/S0218348X19500877.

17. *Kilic Z.M., Altintas Y.* Generalized mechanics and dynamics of metal cutting operations for unified simulations // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2016. – Vol. 104. – P. 1–13. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2016.01.006.

18. Development of machining strategies for aerospace components, using virtual machining tools / L. Estman, D. Merdol, K.-G. Brask, V. Kalhori, Y. Altintas // *New Production Technologies in Aerospace Industry*. – Cham: Springer, 2014. – P. 63–68. – (Lecture Notes in Production Engineering). – DOI: 10.1007/978-3-319-01964-2\_9.

19. Influence of cutting and geometrical parameters on the cutting force in milling / H. Yangu, B. Zghal, A. Kessentini, G. Chevallier, A. Rivière, M. Haddar, Ch. Karra // *Engineering*. – 2010. – Vol. 2 (10). – P. 751–761. – DOI: 10.4236/eng.2010.210097.

20. *Thasana W., Chianrabutra S.* A comparison between simulation and experiment of virtual machining in CNC turning machine considering kinematic motion deviations, tool wear and workpiece deflection errors // *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*. – 2019. – Vol. 13 (1). – P. 18-00250. – DOI: 10.1299/jamdsm.2019jamdsm0009.

21. A study on estimation of three-dimensional tolerances based on simulation of virtual machining in turning processes including kinematic motion deviations / W. Thasana, N. Sugimura, K. Iwamura, Y. Tanimizu // *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*. – 2015. – Vol. 9 (1). – P. 14-00507. – DOI: 10.1299/jamdsm.2015jamdsm0012.

22. *Studiyaniti L.* Workstation and posture improvement in cutting machine process using virtual modeling // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 1072. – P. 012032. – DOI: 10.1088/1757-899X/1072/1/012032.

23. *Soori M., Arezoo B.* Virtual machining systems for CNC milling and turning machine tools: a review // *International Journal of Engineering and Technology*. – 2020. – Vol. 18. – P. 56–104.

24. The state of the art for numerical simulations of the effect of the microstructure and its evolution in the metal-cutting processes / H. Liu, X. Xu, J. Zhang, Z. Liu, Y. He, W. Zhao, Z.-q. Liu // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2022. – Vol. 177. – P. 103890. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2022.103890.

25. Nonlinearities of hardware-in-the-loop environment affecting turning process emulation / B. Beri, A. Miklos, D. Takacs, G. Stepan // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2020. – Vol. 157. – P. 103611. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2020.103611.

26. *Soori M., Arezoo B., Habibi M.* Virtual machining considering dimensional, geometrical and tool deflection errors in three-axis CNC milling machines // *Journal of Manufacturing Systems*. – 2014. – Vol. 33 (4). – P. 498–507. – DOI: 10.1016/j.jmsy.2014.04.007.

27. A multipoint method for 5-axis machining of triangulated surface models / R.K. Duvedi, S. Bedi, A. Batish, S. Mann // *Computer-Aided Design*. – 2014. – Vol. 52. – P. 17–26. – DOI: 10.1016/j.cad.2014.02.008.

28. Five-axis tool path generation in CNC machining of T-spline surfaces / W.F. Gan, J.Z. Fu, H.Y. Shen, Z.Y. Chen, Z.W. Lin // *Computer-Aided Design*. – 2014. – Vol. 52. – P. 51–63. – DOI: 10.1016/j.cad.2014.02.013.

29. *Kiswanto G., Hendriko H., Duc E.* An analytical method for obtaining cutter workpiece engagement during a semi-finish in five-axis milling // *Computer-Aided Design*. – 2014. – Vol. 55. – P. 81–93. – DOI: 10.1016/j.cad.2014.05.003.

30. Cloud-based design and manufacturing: a new paradigm in digital manufacturing and design innovation / D. Wu, D.W. Rosen, L. Wang, D. Schaefer // *Computer-Aided Design*. – 2015. – Vol. 59. – P. 1–14. – DOI: 10.1016/j.cad.2014.07.006.

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

32. *Selbsterregte Schwingungen an Werkzeugmaschinen* / J. Tlustý, A. Polacek, C. Danek, J. Spacek. – Berlin: Verlag Technik, 1962. – 320 p.

33. *Merritt H.E.* Theory of self-excited machine-tool chatter-contribution to machine tool chatter research // *ASME Journal of Engineering for Industry*. – 1965. – Vol. 87 (4). – P. 447–454. – DOI: 10.1115/1.3670861.

34. *Altintas Y.* Analytical prediction of three dimensional chatter stability in milling // *JSME International Journal. Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*. – 2001. – Vol. 44 (3). – P. 717–723. – DOI: 10.1299/jsmec.44.717.

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

36. *Stépán G.* Modelling nonlinear regenerative effects in metal cutting // *Philosophical Transactions of*

the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2001. – Vol. 359 (1781). – P. 739–757. – DOI: 10.1098/rsta.2000.0753.

37. Reith M.J., Bachrathy D., Stepan G. Improving the stability of multi-cutter turning with detuned dynamics // *Machining Science and Technology*. – 2016. – Vol. 20 (3). – P. 440–459. – DOI: 10.1080/10910344.2016.1191029.

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

39. 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.

40. 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.

41. Influence of the clearance face on the condition of chatter self-excitation during turning / A. Gousskov, M. Gousskov, Ph. Lorong, G. Panovko // *International Journal of Machining and Machinability of Materials*. – 2017. – Vol. 19 (1). – P. 17–39. – DOI: 10.1504/IJM-MM.2017.10002088.

42. Моделирование и исследование устойчивости процесса многолезцового резания «по следу» / М. Гуськов, Т. Динь Дык, Г. Пановко, А.М. Гуськов // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. – 2018. – № 3. – С. 19–27. – DOI: 10.31857/S023571190000533-7.

43. Понтрягин Л.С. Избранные научные труды. Т. 2. – М.: Наука, 1988. – С. 95–154.

44. Тихонов А.Н. Системы дифференциальных уравнений, содержащие малые параметры при производных // *Математический сборник*. – 1952. – Т. 31, № 3. – С. 575–586.

45. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (позиционная связь) / В.Л. Заковоротный, Д.Т. Фам, С.Т. Нгуен, М.Н. Рыжкин // *Вестник Донского государственного технического университета*. – 2011. – Т. 11, № 3 (54). – С. 301–311.

46. Лойцянский Л.Г. Курс теоретической механики. – М.: Наука, 1982. – 640 с.

47. Ляпунов А.М. Общая задача об устойчивости движения. – Л.: Гостехиздат, 1950. – 472 с.

48. Меркин Д.Р. Введение в теорию устойчивости движения. – М.: Наука, 1971. – 312 с.

49. Бржозовский Б.М., Янкин И.Н., Хайров Д.А. Обеспечение качества резания неоднородных материалов на основе оптимальной динамической настройки формообразующих подсистем станка // *Прогресивні технології і системи машинобудування*. – 2012. – № 1 (43). – С. 71–77.

50. Адаптивное управление станками / под ред. Б.С. Балакшина. – М.: Машиностроение, 1973. – 688 с.

51. Базров Б.М. Технологические основы проектирования самоподнастраивающихся станков. – М.: Машиностроение, 1978. – 216 с.

52. Тверской М.М. Автоматическое управление режимами обработки на станках. – М.: Машиностроение, 1982. – 208 с.

53. Вейц В.Л., Васильков Д.В. Задачи динамики, моделирования и обеспечения качества при механической обработке маложестких заготовок // *СТИН*. – 1999. – № 6. – С. 9–13.

54. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е., Минаков В.С. Влияние геометрии режущего инструмента на динамику процесса точения // *Вестник ДГТУ*. – 2018. – Т. 18, № 2. – С. 201–213. – DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-2-201-213.

55. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Свойства притягивающих множеств деформационных смещений инструмента в траекториях формообразующих движений при точении изделий // *Известия вузов. Машиностроение*. – 2022. – № 3 (744). – С. 15–30. – DOI: 10.18698/0536-1044-2022-3-15-30.

56. 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.

57. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний. – М.: Высшая школа, 1972. – 416 с.

58. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

59. Заковоротный В.Л., Гвинджилия В.Е. Определение оптимальных координат переключения циклов обработки на металлорежущих станках // *Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты)*. – 2021. – Т. 23, № 1. – С. 56–67. – DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-56-67.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2022 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



# Obrabotka metallov -

## Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)





### Application of the synergistic concept in determining the CNC program for turning

Vilor Zakovorotny<sup>a</sup>, Valery Gvindjiliya<sup>b, \*</sup>, Ellina Fesenko<sup>c</sup>

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

<sup>a</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-2187-9897>,  [vzakovorotny@dstu.edu.ru](mailto:vzakovorotny@dstu.edu.ru), <sup>b</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-1066-4604>,  [sinedden@yandex.ru](mailto:sinedden@yandex.ru),

<sup>c</sup>  <https://orcid.org/0000-0003-0833-2758>,  [ellinoocha@gmail.com](mailto:ellinoocha@gmail.com)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received: 08 September 2022

Revised: 03 October 2022

Accepted: 28 October 2022

Available online: 15 December 2022

##### Keywords:

Controlled cutting system

Synergetics of machining

Dynamic of the cutting process.

##### Acknowledgements

Research were partially conducted at core facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

#### ABSTRACT

**Introduction.** One of the dynamically developing areas of increasing the efficiency of CNC machines is associated with the use of the synergetic concept in determining the CNC program. The principle of compression-expansion of the dimensionality of the state space is used. **Subject.** On the example of the workpiece machining, the stiffness parameters of which are a function of the toolpath, all stages of control synthesis, which ensures the mutual consistency of dynamic subsystems, including the cutting process, are described in the paper. **The aim of the work is to determine asymptotically stable machine actuator toolpath, given by CNC program parameters, from the set of paths, for which the condition of minimum wear intensity is fulfilled. Method and methodology.** Mathematical modeling of the controlled cutting system, which is based on the principle of compression-expansion state space, is presented. When the dimension of the state space is expanded, the model of the dynamic cutting system includes all elements from the CNC system that programs the motion of the actuating elements to the elastic deformations of the tool, which interacts with the workpiece through the connection formed by the cutting process. The dynamic coupling integrates the subsystems into a single coupled control system. In this space, the desired shaping motion path of the tool tip relative to the workpiece is constructed, which should be the attractor of the entire state space. The transformation of the desired motion path into an attractor characterizes the procedure of compressing the dimensionality of the state space. It is supposed that it is possible to control the motion trajectories of the actuators within the bandwidths of the servomotors. **Results and Discussion.** The analysis of the stability of the cutting process is performed; the example of the efficiency of a NC program on the basis of the synergetic paradigm is presented. It is shown that by coordinating the external control with the internal dynamics of the system it is possible to increase the efficiency of a part production up to two times in machine time.

**For citation:** Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E., Fesenko E.O. Application of the synergistic concept in determining the CNC program for turning. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2022, vol. 24, no. 4, pp. 98–112. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.4-98-112. (In Russian).

#### References

1. Prigogine I., Stengers I. *Order out of chaos*. London, Heinemann, 1984 (Russ. ed.: Prigozhin I., Stengers I. *Poryadok iz khaosa*. Moscow, Progress Publ., 1986. 432 p.).
2. Haken H. *Advanced synergetics: instability hierarchies of self-organizing systems and devices*. Berlin, New York, Springer, 1983 (Russ. ed.: Khaken G. *Sinergetika: ierarkhii neustoichivostei v samoorganizuyushchikhsya sistemakh i ustroystvakh*. Moscow, Mir Publ., 1985. 424 p.).
3. Kolesnikov A.A., ed. *Sinergetika i problemy teorii upravleniya* [Synergetics and problems in control theory]. Moscow, Fizmatlit, 2004. 504 p. ISBN 5-9221-0336-9.
4. Zakovorotny V.L., Flek M.B. *Dinamika protsessa rezaniya. Sinergeticheskii podkhod* [The dynamics of the cutting process. Synergistic approach]. Rostov-on-Don, Terra Publ., 2005. 880 p.
5. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. *Sinergeticheskaya kontseptsiya pri programmnom upravlenii protsessami obrabotki na metallovezhushchikh stankakh* [Synergetic concept of software control of machining processes on

#### \* 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](mailto:sinedden@yandex.ru)

metal-cutting machines]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroyeniye* = *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 5 (734), pp. 24–36. DOI: 10.18698/0536-1044-2021-5-24-36.

6. Zakovorotny V.L., Gvindjiliya V.E. Sinergeticheskii podkhod k povysheniyu effektivnosti upravleniya protsessami obrabotki na metallorezhushchikh stankakh [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.

7. Zakovorotny V., Gvindjiliya V. Process control synergetics for metal-cutting machines. *Journal of Vibration Engineering*, 2022, vol. 24 (1), pp. 177–189. DOI: 10.21595/jve.2021.22087.

8. Zakovorotny V.L. *Nelineinaya tribomekhanika* [Nonlinear tribomechanics]. Rostov-on-Don, Don State Technical University Publ., 2000. 293 p.

9. Ryzhkin A.A. *Sinergetika iznashivaniya instrumental'nykh materialov pri lezviinoy obrabotke* [Synergetics of tool wear in cutting edge treatment]. Rostov-on-Don, Don State Technical University Publ., 2019. 289 p. ISBN 978-5-7890-1669-5.

10. Kabaldin Yu.G., Shatagin D.A. Artificial intelligence and cyberphysical machining systems in digital production. *Russian Engineering Research*, 2020, vol. 40, no. 4, pp. 292–296. DOI: 10.3103/S1068798X20040115. Translated from *Vestnik mashinostroyeniya*, 2020, no. 1, pp. 21–25.

11. Altintas Y., Kersting P., Biermann D., Budak E., Denkena B. Virtual technological systems for parts processing operations. *CIRP Annals*, 2014, vol. 63 (2), pp. 585–605. DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.007.

12. Arrazola P., Ozel T., Umbrello D., Davies M., Jawahir I. Recent advances in modelling of metal machining processes. *CIRP Annals*, 2013, vol. 62 (2), pp. 695–718. DOI: 10.1016/j.cirp.2013.05.006.

13. Pantyukhin O.V., Vasin S.A. Tsifrovoy dvoynik tekhnologicheskogo protsessa izgotovleniya izdelii spetsial'nogo naznacheniya [Digital double of the technological process of manufacturing special-purpose products]. *Stankoinstrument*, 2021, no. 1 (22), pp. 56–59. DOI: 10.1016/j.cirp.2013.05.006. (In Russian).

14. Altintas Y., Brecher C., Weck M., Witt S. Virtual machine tool. *CIRP Annals*, 2005, vol. 54 (2), pp. 115–138. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60022-5.

15. Erkorkmaz K., Altintas Y., Yeung C.-H. Virtual computer numerical control system. *CIRP Annals*, 2006, vol. 55 (1), pp. 399–402. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60444-2.

16. Ahamed As., Ahamed At., Katuwawala D., Ee T.T., Tan Z.H., Bajaj I.S., Wickramasurendra Th., Namazi H. Complexity-based analysis of the influence of machining parameters on the surface finish of drilled holes in drilling operation. *Fractals*, 2019, vol. 27 (6), p. 1950087. DOI: 10.1142/S0218348X19500877.

17. Kilic Z.M., Altintas Y. Generalized mechanics and dynamics of metal cutting operations for unified modeling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, vol. 104, pp. 1–13. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2016.01.006.

18. Estman L., Merdol D., Brask K.-G., Kalhori V., Altintas Y. Developing strategies for machining aerospace components using virtual machining tools. *New Production Technologies in Aerospace Industry*. Cham, Springer, 2014, pp. 63–68. DOI: 10.1007/978-3-319-01964-2\_9.

19. Yangui H., Zghal B., Kessentini A., Chevallier G., Riviere A., Haddar M., Karra Ch. Influence of cutting and geometrical parameters on the cutting force in milling. *Engineering*, 2010, vol. 2 (10), pp. 751–761. DOI: 10.4236/eng.2010.210097.

20. Thasana W., Chianrabutra S. A comparison between simulation and experiment of virtual machining in CNC turning machine considering kinematic motion deviations, tool wear and workpiece deflection errors. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, 2019, vol. 13 (1), p. 18-00250. DOI: 10.1299/jamdsm.2019jamdsm0009.

21. Thasana W., Sugimura N., Iwamura K., Tanimizu Y. A study on estimation of three-dimensional tolerances based on simulation of virtual machining in turning processes including kinematic motion deviations. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2015, vol. 9 (1), p. 14-00507. DOI: 10.1299/jamdsm.2015jamdsm0012.

22. Studiyaniti L. Workstation and posture improvement in cutting machine process using virtual modeling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1072, p. 012032. DOI: 10.1088/1757-899X/1072/1/012032.

23. Soori M., Arezoo B. Virtual machining systems for CNC milling and turning machine tools: a review. *International Journal of Engineering and Technology*, 2020, vol. 18, pp. 56–104.

24. Liu H., Xu X., Zhang J., Liu Z., He Y., Zhao W., Liu Z.-q. The state of the art for numerical simulations of the effect of the microstructure and its evolution in the metal-cutting processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2022, vol. 177, p. 103890. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2022.103890.

25. Beri B., Miklos A., Takacs D., Stepan G. Nonlinearities of hardware-in-the-loop environment affecting turning process emulation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2020, vol. 157, p. 103611. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2020.103611.
26. Soori M., Arezoo B., Habibi M. Virtual machining with dimensional, geometric and tool deflection errors on three-axis CNC milling machines. *Journal of Manufacturing Systems*, 2014, vol. 33 (4), pp. 498–507. DOI: 10.1016/j.jmsy.2014.04.007.
27. Duvedi R.K., Bedi S., Batish A., Mann S. Multi-point method for 5-axis processing of triangular surface models. *Computer-Aided Design*, 2014, vol. 52, pp. 17–26. DOI: 10.1016/j.cad.2014.02.008.
28. Gan V.F., Fu J.Z., Shen H.Yu., Chen Z.Yu., Lin Z.V. Creating a 5-axis toolpath in CNC machining T-spline surfaces. *Computer-Aided Design*, 2014, vol. 52, pp. 51–63. DOI: 10.1016/j.cad.2014.02.013.
29. Kiswanto G., Hendrikoh H., Duk E. An analytical method for obtaining cutter engagement with the workpiece during semi-finishing in five-axis milling. *Computer-Aided Design*, 2014, vol. 55, pp. 81–93. DOI: 10.1016/j.cad.2014.05.003.
30. Wu D., Rosen D.W., Wang L., Schaefer D. Cloud design and manufacturing: a new paradigm in digital manufacturing and design innovation. *Computer-Aided Design*, 2015, vol. 59, pp. 1–14. DOI: 10.1016/j.cad.2014.07.006.
31. Kudinov V.A. *Dinamika stankov* [Dynamics of machine tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967. 359 p.
32. Tlustý J., Poláček A., Danek C., Spacek J. *Selbsterregte Schwingungen an Werkzeugmaschinen*. Berlin, Verlag Technik, 1962. 320 p.
33. Merritt H.E. The theory of the contribution of self-excited chatter of machine tools to the study of vibrations of machine tools. *ASME Journal of Engineering for Industry*, 1965, vol. 87 (4), pp. 447–454. DOI: 10.1115/1.3670861.
34. Altintas Y. Analytical prediction of 3D vibration in milling. *JSME International Journal. Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing*, 2001, vol. 44 (3), pp. 717–723. DOI: 10.1299/jsmec.44.717.
35. Stépán G., Insperger T., Salai R. Delay, parametric excitation and nonlinear dynamics of cutting processes. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2005, vol. 15 (9), pp. 2783–2798. DOI: 10.1142/S0218127405013642.
36. Stépán G. Modeling of non-linear regenerative effects in metal cutting. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2001, vol. 359 (1781), pp. 739–757. DOI: 10.1098/rsta.2000.0753.
37. Reith M.J., Bachrathy D., Stepan G. Improving the stability of multi-cutter turning with detuned dynamics. *Machining Science and Technology*, 2016, vol. 20 (3), pp. 440–459. DOI: 10.1080/10910344.2016.1191029.
38. Voronov S.A., Kiselev I.A. Nelineinye zadachi dinamiki protsessov rezaniya [Nonlinear problems of cutting process dynamics]. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie = Mechanical Engineering and Engineering Education*, 2017, no. 2 (51), pp. 9–23.
39. 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.
40. 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.
41. Gousskov A., Gousskov M., Lorong Ph., Panovko G. Influence of the clearance face on the condition of chatter self-excitation during turning. *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, 2017, vol. 19 (1), pp. 17–39. DOI: 10.1504/IJMMM.2017.10002088.
42. Gousskov M., Dyn Dyk T., Panovko G., Gousskov A.M. Modelirovanie i issledovanie ustoichivosti protsessa mnogoreztsovogo rezaniya «po sledu» [Modeling and investigation of the stability of the process of multi-cutting cutting “on the trail”]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2018, no. 3, pp. 19–27. DOI: 10.31857/S023571190000533-7. (In Russian).
43. Pontryagin L.S. *Izbrannyye nauchnyye trudy*. T 2 [Selected works. Vol. 2]. Moscow, Nauka Publ., 1988, pp. 95–154.
44. Tikhonov A.N. Sistemy differentsial’nykh uravnenii, soderzhashchie малыe parametry pri proizvodnykh [Systems of differential equations containing small parameters with derivatives]. *Matematicheskii sbornik*, 1952, vol. 31, no. 3, pp. 575–586. (In Russian).
45. Zakovorotniy V.L., Pham D.T., Nguyen X.C., Ryzhkin M.N. Modelirovanie dinamicheskoi svyazi, formiruemoi protsessom tocheniya, v zadachakh dinamiki protsessa rezaniya (pozitsionnaya svyaz’) [Dynamic coupling modeling formed by turning in cutting dynamics problems (positional coupling)]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Don State Technical University*, 2011, vol. 11, no. 3 (54), pp. 301–311.

46. Loitsyanskii L.G. *Kurs teoreticheskoi mekhaniki* [The course of theoretical mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 640 p.
47. Lyapunov A.M. *Obshchaya zadacha ob ustoychivosti dvizheniya* [The general problem of motion stability]. St. Petersburg, Gostekhizdat Publ., 1950. 472 p.
48. Merkin D.R. *Vvedenie v teoriyu ustoychivosti dvizheniya* [Introduction to the theory of motion stability]. Moscow, Nauka Publ., 1971. 312 p.
49. Brzhozovskiy B.M., Yankin I.N., Khayrov D.A. Obespechenie kachestva rezaniya neodnorodnykh materialov na osnove optimal'noi dinamicheskoi nastroyki formoobrazuyushchikh podsystem stanka [Providing of quality of cutting of heterogeneous materials on basis of optimum dynamic tuning of shape-generating subsystems of machine-tool]. *Progresivni tekhnologii i sistemi mashinobudovaniya = Progressive Technologies and Machine-Building Systems*, 2012, no. 1 (43), pp. 71–77.
50. Balakshin B.S., ed. *Adaptivnoe upravlenie stankami* [Adaptive control of machine tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 688 p.
51. Bazrov B.M. *Tekhnologicheskie osnovy proektirovaniya samopodnastroyayushchikhsya stankov* [Technological bases for designing self-adjusting machine tools]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 216 p.
52. Tverskoi M.M. *Avtomatischeskoe upravlenie rezhimami obrabotki na stankakh* [Automatic control of processing modes on machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982. 208 p.
53. Veits V.L., Vasil'kov D.V. Zadachi dinamiki, modelirovaniya i obespecheniya kachestva pri mekhanicheskoi obrabotke malozhestkikh zagotovok [Dynamics, modeling, and quality maintenance at the machine treatment of low-rigidity billets]. *Stanki i instrument = Machines and Tools*, 1999, no. 6, pp. 9–13.
54. Zakovorotny V.L., Gvindzhiliya V.E., Minakov V.S. Vliyanie geometrii rezhushchego instrumenta na dinamiku protsessa tocheniya [Cutting-tool geometry effect on turning process dynamics]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Don State Technical University*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 201–213. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-2-201-213.
55. Zakovorotny V.L., Gvindzhiliya V.E. Svoystva prityagivayushchikh mnozhestv deformatsionnykh smeshchenii instrumenta v traektoriyakh formoobrazuyushchikh dvizhenii pri tochenii izdelii [The properties of attracting sets of tool deformation displacements in the trajectories of the shape-generating movements in turning]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 3 (744), pp. 15–30. DOI: 10.18698/0536-1044-2022-3-15-30.
56. Zakovorotny V.L., Gvindzhiliya V.E. Vliyanie dinamiki rezaniya na vybor tekhnologicheskikh rezhimov, obespechivayushchikh minimal'noe 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. (In Russian).
57. Biderman V.L. *Prikladnaya teoriya mekhanicheskikh kolebaniy* [Applied theory of mechanical oscillations]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1972. 416 p.
58. Makarov A.D. *Optimizatsiya protsessov rezaniya* [Optimization of cutting processes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 278p.
59. Zakovorotny V.L., Gvindzhiliya V.E. Opredelenie optimal'nykh koordinat pereklyucheniya tsiklov obrabotki na metallovezhushchikh stankakh [Determination of optimal coordinates for switching processing cycles on metal-cutting machines]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2021, vol. 23, no. 1, pp. 56–67. DOI: 10.17212/1994-6309-2021-23.1-56-67.

## Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2022 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/>).