УДК 534.1, 621.01, 621.914

К 80-летию ИМАШ РАН

АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА МНОГОРЕЗЦОВОГО ТОЧЕНИЯ «ПО СЛЕДУ»*

А.М. Гуськов, М.А. Гуськов, Динь Дык Тунг, Г.Я. Пановко

В работе представлены результаты моделирования нелинейной динамики и исследования устойчивости процесса непрерывного резания при многорезцовом точении цилиндрических заготовок из конструкционных материалов. В основу математического моделирования положены уравнения образования новых поверхностей детали, образующихся на предшествующем этапе в процессе точения, уравнения движения и дробно-рациональный закон резания. Анализируется влияние параметров технологической системы на толщину снимаемого слоя с материала заготовки и форму получаемой стружки, на возникновение и характер автоколебаний резцов.

Ключевые слова: *многорезцовое точение, динамика, моделирование, бифуркационный анализ.*

ANALYSIS OF NONLINEAR DYNAMICS OF THE MULTI-TOOL TURNING PROCESS «ON THE TRACK»

A. Gouskov, M. Guskov, Dinh Due Tung, G. Panovko

The paper presents the nonlinear dynamics modeling results of the cutting process with multi-tool turning. The mathematical modeling is based on the equations of formation of new surfaces, equations of motion and fractional – rational cutting law. The influence of the parameters of the technological system on the thickness of the removable layer and the shape of the chips, the appearance and nature of self-oscillation cutters during cutting.

Keywords: *multi-cutter turning, dynamics, modeling, bifurcation analysis.*

Введение

Одним из способов повышения эффективности процесса токарной обработки является многорезцовое точение, при котором могут совмещаться различные виды обработки (черновая и чистовая) детали: за один проход может быть увеличена глубина резания (толщина снимаемого слоя), уравновешиваются поперечные составляющие сил резания (что особенно важно при точении протяженных деталей), существенно сокращается время конечного изготовления детали [1–4]. При определенных условиях точение с постоянной толщиной снимаемого слоя (стружки) может стать динамически неустойчивым. Общие вопросы возникновения колебаний при резании обсуждались в многочисленных работах отечественных и зарубежных исследователей [5–8]. Одной из причин потери устойчивости и возбуждения автоколебаний являются нелинейности сил резания и сил трения (в частности, при затирании задней грани резца), зависящие от скорости резания и толщины снимаемого слоя и приводящие к прерывистости (дроблению) стружки [9–11]. Другими причинами потери устойчивости оказываются процессы резания «по следу», т.е. резание поверхности, образованной при предыдущем проходе инструмента, податливость обрабатываемой детали, температурные эффекты и др. [12–16]. При многорезцовом точении существенную роль в появлении этих крайне нежелательных режимов оказывает осевое (вдоль

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-58-150001 НЦНИ_а) и Французского национального центра научных исследований (проект № 263581).

продольной оси детали) смещение (вибрации) резцов. В зависимости от жесткости крепления резцов и их взаимного расположения могут возникать различные формы колебаний резца и образующейся стружки.

В настоящей работе анализируются динамика и устойчивость процесса многорезцовой обработки деталей резанием «по следу» в зависимости от взаимного расположения резцов и режима обработки (скорости резания) с целью выявления условий самовозбуждения колебаний и оценки возможности реализации непрерывного (безвибрационного) резания.

Постановка задачи и расчетная схема

Обрабатываемая заготовка вращается вокруг своей продольной оси с постоянной угловой скоростью ω (рис. 1, *а*). Обработка осуществляется одновременно *n* резцами, расположенными по окружности детали под углом φ_j $(j=\overline{1,n})$ друг к другу так, что $\sum_{1}^{j=n}\varphi_j=2\pi$ (см. рис. 1, *б*). Все резцы закреплены на общем суппорте, движущемся с постоянной скоростью *V* вдоль оси детали. Обрабатываемую деталь будем рассматривать как абсолютно твердое тело цилиндрической формы с радиусом боковой поверхности *R* и длиной l. Каждый *j*-й резец рассматривается как абсолютно твердое тело, независимо закрепленное в отдельном резцедержателе, обладающим конечной жесткостью в осевом направлении.

На рис. 1 показано: H_{0j} – осевой установочный сдвиг *j*-го резца относительно первого, для которого определяется расстояние *A*; *A* – расстояние, отсчитываемое от начального положения режущей кромки первого резца до правого торца детали; $D_j(t)$ – расстояние от режущей кромки *j*-го резца до поверхности, обработанной предыдущим (*j*-1)-м резцом в момент t-t_{j-1}; *t* – текущее время; $L_j(t)$ – расстояние от правого торца детали до поверхности, выходящей из-под *j*-го резца; $u_j(t)$ – продольные колебания *j*-го резца (вдоль оси детали) относительно номинального (квазистатического) состояния; m_j – масса *j*-го резца.

Для наглядности получаемых результатов ограничимся рассмотрением только продольных (вдоль оси детали) составляющих сил резания и перемещений резцов.

Отметим, что все последующие рассуждения и математические выкладки справедливы также для случая продольной подачи детали и вращающегося суппорта.

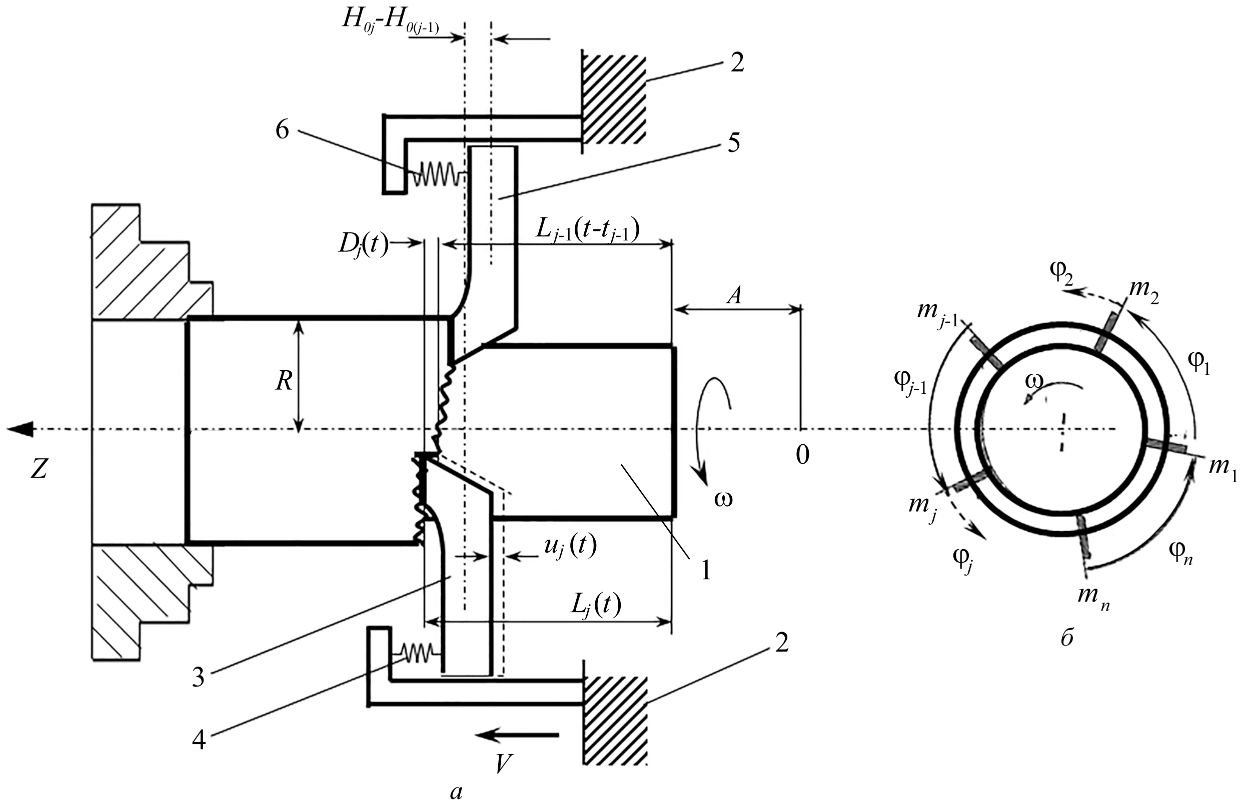


Рис. 1. Расчетная схема процесса многорезцового резания: крепление детали (*а*) и резцов (*б*):
1 – заготовка; 2 – суппорт; 3 – *j*-й резец; 4 – упругое закрепление *j*-го резца;
5 – (*j*-1)-й резец; 6 – упругое закрепление (*j*-1)-го резца

Математическая модель

Математическая модель нелинейной динамики исследуемого процесса может быть описана системой, состоящей из трех групп уравнений: уравнений движения технологической системы, закона резания и уравнений образования новых поверхностей [4, 8, 13].

Уравнения колебаний резцов в продольном направлении имеют следующий вид:

$$m_j \ddot{u}_j = -d_j \dot{u}_j - k_j u_j + F_j(t, h_j);\ j = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где d_j и k_j – коэффициенты демпфирования и жесткости крепления j-го резца соответственно; $F_j\left(t, h_j\right)$ – сила резания; $h_j\left(t\right)$ – толщина слоя детали, снимаемого j-м резцом.

Силы резания $F_j\left(t, h_j\right)$ в осевом направлении для каждого j-го резца описываются моделью закона резания в виде дробно-рациональной функции [4]:

$$F_j\left(t\right) = K_0\, h_j\left(t\right) \frac{c + r\, h_j\left(t\right)}{c + h_j\left(t\right)},\quad j = \overline{1, n},$$

$$K_0 = \gamma\, \sigma_L\, B, \quad (2)$$

где K_0 – статическая жесткость резания; σ_L – характерное напряжение обрабатываемого материала; B – ширина снимаемого слоя (стружки); γ, r, c – эмпирические коэффициенты.

Толщина $h_j\left(t\right)$ снимаемого материала j-м резцом при многорезцовом резании зависит от геометрических особенностей поверхности детали, сформированных при резании предыдущим (j-1)-м резцом. Поверхность, формируемая j-м резцом, является функцией времени t и отсчитывается от свободного (необработанного) торца детали. При этом j-й резец обрабатывает поверхность, полученную в ходе обработки предыдущим (j-1)-м резцом, за время $\left(t - t_{j-1}\right)$. Время t_{j-1} является запаздыванием, равным времени поворота детали на угол между режущими кромками $t_{j-1} = \varphi_{j-1}/\omega$. Эти особенности могут быть описаны уравнениями образования новых поверхностей, которые имеют вид [4, 11–13]:

$$\begin{cases} D_j\left(t\right) = Vt - u_j\left(t\right) - L_{j-1}\left(t - t_{j-1}\right) + A - H_{0j}, \\ h_j\left(t\right) = \max\left[0, D_j\left(t\right)\right], \\ L_j\left(t\right) = L_{j-1}\left(t - t_{j-1}\right) + h_j\left(t\right), \end{cases} \quad (3)$$

Уравнения (1)–(3) позволяют учитывать так называемый регенеративный механизм возбуждения колебаний в системе. Получаемая новая поверхность на текущем цикле обработки содержит информацию обо всех предыдущих проходах инструмента.

Уравнения (1)–(3) представляют собой систему дифференциально-алгебраических уравнений с несколькими запаздываниями и описывают динамику многорезцового точения по следу.

Приведем систему уравнений (1)–(3) к безразмерной форме, выбрав в качестве линейного масштаба X_* подачу на оборот h_0, в качестве масштаба времени

$$T_* = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} T_i^2 \Big/ n},\ T_i = 2\pi\sqrt{m_j / k_j},$$

где T_i – период собственных колебаний резцов, в качестве масштаба сил резания $F_* = K_0\, h_0$.

Тогда для одинаковых резцов и равенства условий их закрепления ($m_1 = m_2 = ... = m$, $k_1 = k_2 = ... = k$, $d_1 = d_2 = ... = d$, $T_1 = T_2 = \ldots$) уравнения (1)–(3) в безразмерной форме примут вид:

$$\begin{cases} \Delta_j\left(\tau\right) = \tau/\rho - \xi_j\left(\tau\right) - \Lambda_{j-1}\left(\tau - \tau_{j-1}\right) + \mathrm{A} - \mathrm{H}_{0j}, \\ \sum\limits_{j=1}^{n} \tau_j = \rho, \\ \eta_j\left(\tau\right) = \max\left(0, \Delta_j\left(\tau\right)\right), \\ \qquad 0 = -\Lambda_j\left(\tau\right) + \Lambda_{j-1}\left(\tau - \tau_{j-1}\right) + \eta_j\left(\tau\right), \\ \qquad \xi_j'' = -4\pi\zeta\xi_j' - 4\pi^2\xi_j + 4\pi^2\kappa\Pi_j, \end{cases} \quad (4)$$

с начальными условиями, отражающими связь между n-м и первым резцом через поверхность обработки:

$$\left\{\xi_j(\tau)\Big|_{\tau=0} = \xi_{j0}, \qquad \xi_j'(\tau)\Big|_{\tau=0} = \right.$$

$$\left. = \xi_{j0}', \Lambda_j(\tau)\Big|_{\tau\in[-\tau_{j-1}, 0)} = \Lambda_{j0}(\tau)\right\},$$

где $\xi_j = \dfrac{u_j}{h_0},\ \zeta = \dfrac{d}{2\sqrt{mk}},\ \kappa = \dfrac{K_0}{k},\ \eta_j = \dfrac{h_j}{h_0},$

$$\eta_* = \frac{c}{h_0},\ \Pi_j = \frac{F_j}{K_0 h_0},$$

$$\Lambda_j\left(\tau\right) = \frac{L_j}{h_0},\ \ \Delta_j = \frac{D_j}{h_0},\ \ \rho = \frac{2\pi}{\omega T_*}, \quad (5)$$

$$\mathrm{A} = \frac{A}{h_0},\ \ \mathrm{H}_{0j} = \frac{H_{0j}}{h_0}.$$

Здесь ρ – отношение собственной частоты резцов к частоте вращения детали (параметр $1/\rho$ представляет собой безразмерную скорость резания), параметр; κ – относительная статическая жесткость резания, в данном случае одинаковая для обеих зон контакта резца с деталью; Π_j – безразмерная осевая составляющая силы резания.

Система уравнений (4) является полной динамической моделью многорезцового точения с учетом начального врезания первым резцом и прерывистости резания, в которой искомыми являются безразмерные параметры, характеризующие колебания резцов и толщину стружки, образованной при резании каждым из резцов: $\left\{\Delta_j, \eta_j, \Lambda_j, \xi_j;\ j=\overline{1,n}\right\}$.

Функции Λ_j являются функциями с запаздывающим аргументом. Они должны быть доопределены на начальных множествах. Исходя из физических соображений, примем, что поверхность свободного (необработанного) торца идеальна, то есть $\Lambda_j(\tau)=0, \tau<0$. Начальные функции $\Lambda_j(0)$, входящие в систему (4), должны удовлетворять условию замкнутости обрабатываемой поверхности:

$$\Lambda_{j0}(0)=\Lambda_{(j-1)0}(-\tau_{j-1}),\ \Lambda_{(j-1)0}(0)=\Lambda_{j0}(-\tau_j).$$

Двурезцовое точение

В частном случае двурезцового точения резцы разделяют окружность поперечного сечения заготовки на две неравные части (рис. 2), которые определяются углами $\varphi_1=\pi-\Delta\varphi$ и $\varphi_2=\pi+\Delta\varphi$, $\Delta\varphi$ – отклонение угла между резцами от π. Время запаздывания каждого из резцов

$$\tau_1=\rho\frac{\varphi_1}{2\pi}=\rho\frac{(\pi+\Delta\varphi)}{2\pi},\ \tau_2=\rho\frac{\varphi_2}{2\pi}=\rho\frac{(\pi-\Delta\varphi)}{2\pi}, \quad (6)$$

где $\rho=\tau_1+\tau_2=2\pi/(\omega T_*)$ – безразмерное время одного полного оборота детали.

Тогда уравнения динамики (4) запишутся в виде:

$$\begin{cases}\Delta_1(\tau)=\tau/\rho-\xi_1(\tau)-\Lambda_2(\tau-\tau_2)+\mathrm{A},\\ \Delta_2(\tau)=\tau/\rho-\xi_2(\tau)-\Lambda_1(\tau-\tau_1)+\mathrm{A}-\mathrm{H}_0,\\ \eta_1(\tau)=\max\left(0,\Delta_1(\tau)\right);\\ \eta_2(\tau)=\max\left(0,\Delta_2(\tau)\right),\\ \Lambda_1(\tau)=\Lambda_2(\tau-\tau_2)+\eta_1(\tau);\\ \Lambda_2(\tau)=\Lambda_1(\tau-\tau_1)+\eta_2(\tau),\\ \quad\xi_1''=-4\pi\zeta\xi_1'-4\pi^2\xi_1+4\pi^2\kappa\Pi_1,\\ \quad\xi_2''=-4\pi\zeta\xi_2'-4\pi^2\xi_2+4\pi^2\kappa\Pi_2,\\ \quad\Pi_1=\eta_1\dfrac{\eta_*+r\eta_1}{\eta_*+\eta_1};\quad \Pi_2=\eta_1\dfrac{\eta_*+r\eta_2}{\eta_*+\eta_2}.\end{cases} \quad (7)$$

с начальным условием:

$$\Lambda_{10}(0)=\Lambda_{20}(-\tau_2),\ \Lambda_{20}(0)=\Lambda_{10}(-\tau_1).$$

Полученная система включает дифференциально-алгебраические уравнения с запаздывающим аргументом (английская аббревиатура *DDAE*). Численное решение системы (7) проводилось в среде *MATLAB*. Для этого полученные уравнения *DDAE* необходимо было свести к дифференциальным уравнениям с запаздывающим аргументом *DDE*. Подобный переход выполнялся с помощью метода ε-вложения [14], в соответствии с которым в левую часть алгебраических уравнений образования новых

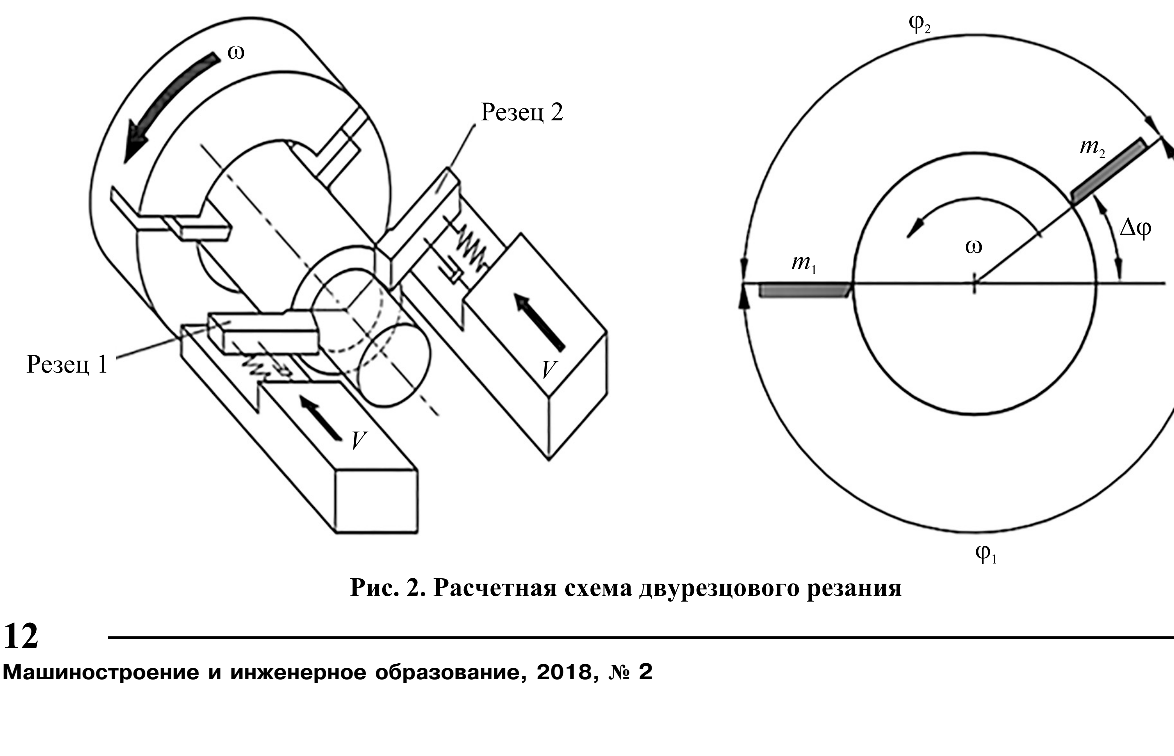


Рис. 2. Расчетная схема двурезцового резания

поверхностей в системе (7) вводится дополнительное возмущение (ε-вложение), являющееся дифференцирующим элементом:

$$\varepsilon\Lambda'_j(\tau) = -\Lambda_j(\tau) + \Lambda_{j-1}(\tau - \tau_{j-1}) + \eta_j(\tau), \quad 0 < \varepsilon < 1. \tag{8}$$

В результате система (7) приобретает форму, приспособленную для решения в среде *MATLAB* с помощью встроенного модуля *BIFTOOL*:

$$\begin{cases} \Delta_1(\tau) = \tau/\rho - \xi_1(\tau) - \Lambda_2(\tau - \tau_2) + \mathrm{A} \\ \Delta_2(\tau) = \tau/\rho - \xi_2(\tau) - \Lambda_1(\tau - \tau_1) + \mathrm{A} - \mathrm{H} \\ \eta_1(\tau) = \max(0, \Delta_1(\tau)); \; \eta_2(\tau) = \max(0, \Delta_2(\tau)) \\ \varepsilon\Lambda'_1(\tau) = -\Lambda_1(\tau) + \Lambda_2(\tau - \tau_2) + \eta_1(\tau) \\ \varepsilon\Lambda'_2(\tau) = -\Lambda_2(\tau) + \Lambda_1(\tau - \tau_1) + \eta_2(\tau) \\ \xi''_1 = -4\pi\zeta\xi'_1 - 4\pi^2\xi_1 + 4\pi^2\kappa\Pi_{c1} \\ \xi''_2 = -4\pi\zeta\xi'_2 - 4\pi^2\xi_2 + 4\pi^2\kappa\Pi_{c2} \\ \Pi_{c1} = \eta_1\dfrac{\eta_* + r\eta_1}{\eta_* + \eta_1}; \quad \Pi_{c2} = \eta_1\dfrac{\eta_* + r\eta_2}{\eta_* + \eta_2} \\ \tau_1 + \tau_2 = \rho \end{cases} \tag{9}$$

При численных расчетах в зависимости от параметра относительной скорости резания τ/ρ определялись осевые смещения (колебания) резцов ξ_j (рис. 3), формы поперечного сечения и толщины стружки, образованной каждым из резцов (рис. 4) при заданных значениях безразмерных параметров ζ = 0,036; r = 0,55; κ = 0,722; η_* = 0,1. Все расчеты выполнялись для симметричного и несимметричного расположения резцов при различных значениях начальных отклонений Н.

При симметричном расположении резцов $(\varphi_1 = \varphi_2 = 180^0, \; \tau_1/\tau_2 = 1)$ и при отсутствии между ними начального отклонения $(\mathrm{H} = 0)$ резцы совершают практически одинаковые колебания (см. рис. 3, *а*). При этом каждый резец снимает одинаковую прерывную (дробленую) стружку (см. рис. 4, *а*). Наличие начального отклонения $(\mathrm{H} = 0{,}4)$, как и несимметричность расположения резцов, приводит к незначительному различию амплитуд и фаз колебаний резцов, но к заметным различиям в толщине и форме образующихся стружек (см. рис. 4).

Анализ результатов

Численное решение системы уравнений (9) позволяет визуализировать различные динамические режимы совместной работы двух резцов, которые связаны между собой через обрабатываемую поверхность. Осевой сдвиг резцов приводит к возможности различной работы. В частности существуют режимы (параметры), при которых один резец имеет прерывистое резание, а другой – непрерывное. Использование сингулярных дифференциальных уравнений для функций Λ демонстрирует возможность использования стандартных процедур вычислительной среды *MATLAB* для решения систем с запаздыванием.

При несимметричной установке резцов $\tau_1/\tau_2 > 1$, но без начального отклонения $\mathrm{H} = 0$, возникает существенное различие между значениями сил резания и толщинами стружки, снимаемыми каждым резцом.

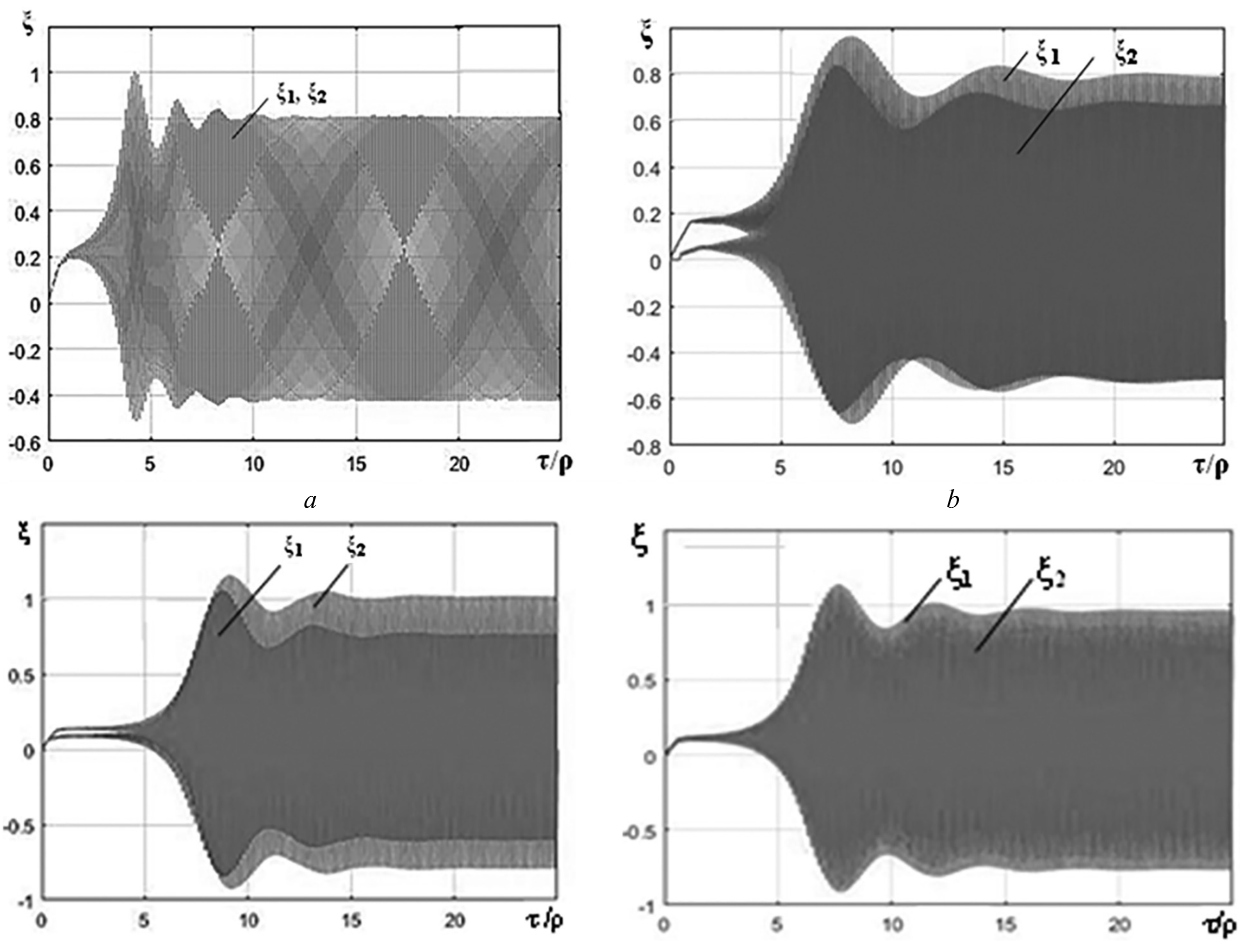
Заключение

Разработана математическая модель динамики многорезцового резания с учетом влияния на текущий процесс обработки новой поверхности, образованной при обработке предыдущим резцом. Для численной реализации в среде *MATLAB* полученные дифференциально-алгебраические уравнения с несколькими запаздывающими аргументами (*DDAE*) предложено преобразовывать в дифференциальные уравнения с запаздывающим аргументом (*DDE*) с помощью метода ε-вложения.

Выполненный анализ динамики процесса многорезцовой обработки деталей резанием «по следу» позволил установить влияние расположения резцов и их начального отклонения на колебания резцов, форму поперечного сечения и толщину стружки, образованной каждым из резцов.

Список литературы

1. An experimental study of cutting forces and temperature in multi-tool turning of grey cast iron / *R. Kalidasan, M. Yatin, D.K. Sarma, S. Senthilvelan, U.S. Dixit* // Int. J. of Machining and Machinability of Materials. 2016. Vol. 18. No. 5/6. P. 540–551.
2. *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.
3. *Azvar M., Budak E.* Multi-dimensional modelling of chatter stability in parallel turning operation // Proceedings of the 17th International Conference on Machine Design and Production. July 12–15, 2016, Bursa, Turkey.

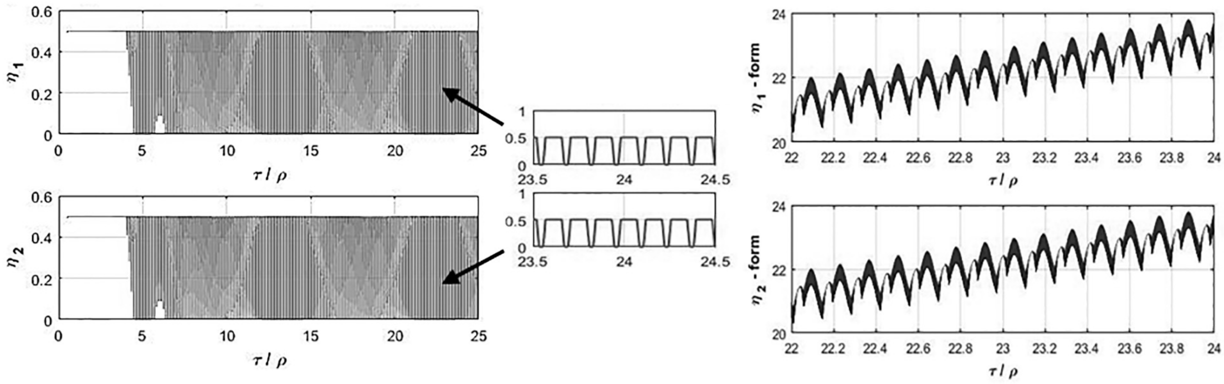


a *b* *c* *d*

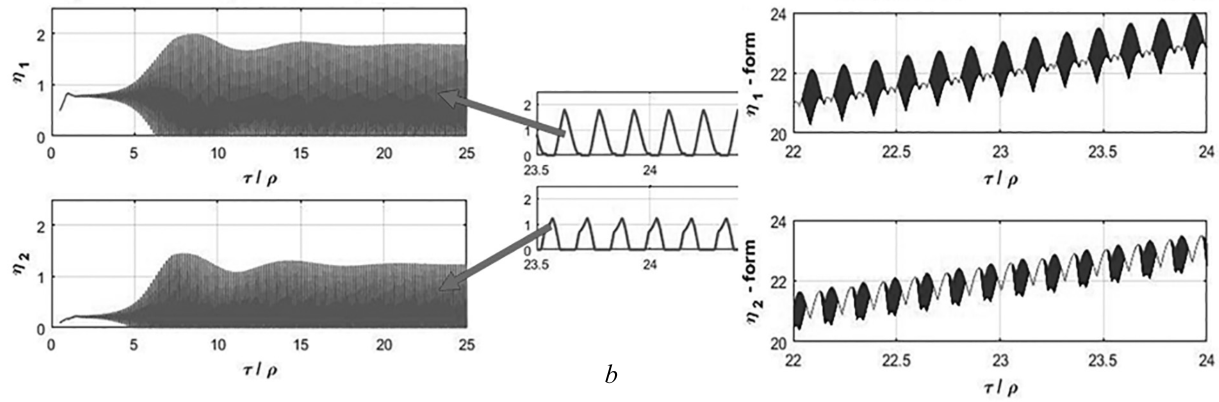
Рис. 3. Осевые колебания резцов для симметричного (*a*, *b*) и несимметричного (*c, d*) расположения резцов при различных значениях начальных отклонений H в зависимости от параметра относительной скорости резания τ/ρ :

a – $\varphi_1 = \varphi_2 = 180^0, \text{H} = 0$; *b* – $\varphi_1 = \varphi_2 = 180^0, \text{H} = 0,4$;
c – $\varphi_1 = \varphi_2 = 120^0, \text{H} = 0$; *d* – $\varphi_1 = \varphi_2 = 165^0, \text{H} = 0,1$

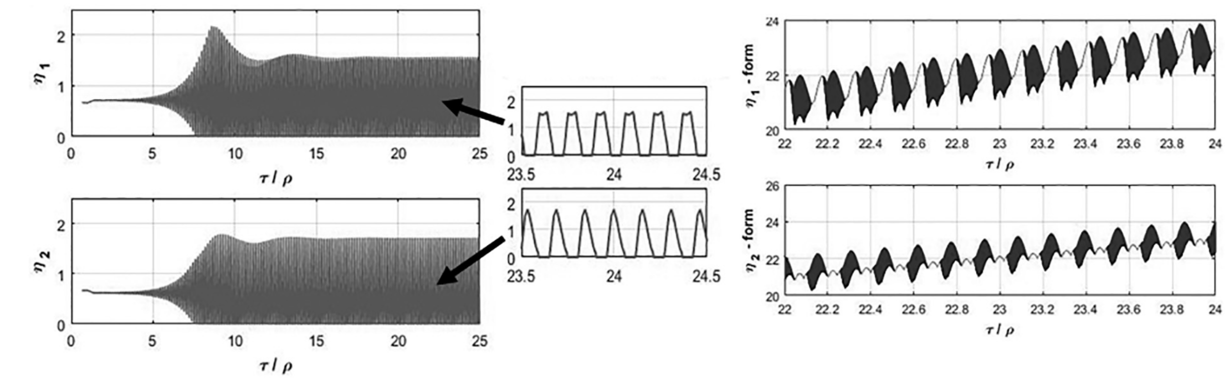
4. Cylindrical Workpiece Turning Using Multiple-Cutting Tool / *A. Gouskov, S.A. Voronov, H. Paris, S.A. Batzer* // Proceedings of the Design Technical Conferences and Computers and Information Engineering Conference. September 9–12, 2001. Pittsburgh, Pennsylvania.
5. *Козочкин М.П.* Динамика процесса резания. Теория, эксперимент, анализ. Lambert Academic Publishing, 2013. – 297 с.
6. *Кудинов В.А.* Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. – 357 с.
7. On the global dynamics of chatter in the orthogonal cutting model / *Z. Dombovari, D.A.W. Barton, R.E. Wilson, G. Stepan* // Int. J. of Non-linear Mechanics. 2011. No 46. Pp. 330–338.
8. Influence of the ploughing effect on the dynamic behavior of the self-vibratory drilling head / *D. Brissaud, A. Gouskov, N. Guibert, J. Rech* // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2008, pp. 385–388.
9. *Lamikiz A.* Calculation of the specific cutting coefficients and geometrical aspects in sculptured surface machining // Machining Science and Technology. 2005. Vol. 9 (3). P. 411–436.
10. Analysis of indirect measurement of cutting forces turning metal cyli drical shells / *K. Kondratenko, A. Gouskov, M. Guskov, Ph. Lorong, G. Panovko* // Vibration Engineering and Technology of Machinery. 2014. P. 929–937.
11. Influence of the clearance face on the condition of chatter self-excitation during turning / *A. Gouskov, M. Gouskov, Ph. Lorong, G. Panovko* // Int. J. of Machining and Machinability of Materials. 2017. Vol. 19 (1). P. 17–39.
12. Analytical approach of turning thin-walled tubular parts. Stability analysis of regenerative chat-



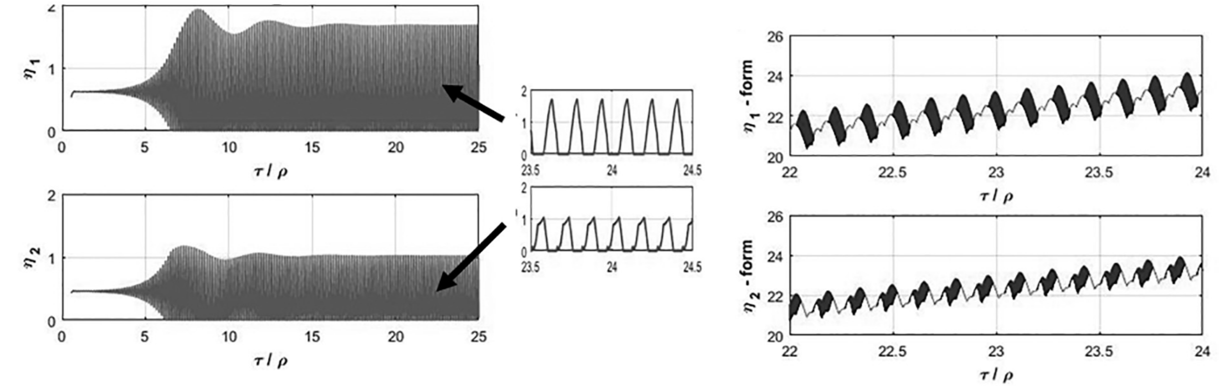
a



b



c



d

Рис. 4. Толщины (слева) и формы (справа) стружек, снимаемых каждым резцом:
a – $\varphi_1 = \varphi_2 = 180^0, \mathrm{H} = 0$; *b* – $\varphi_1 = \varphi_2 = 180^0, \mathrm{H} = 0,4$;
c – $\varphi_1 = \varphi_2 = 120^0, \mathrm{H} = 0$; *d* – $\varphi_1 = \varphi_2 = 165^0, \mathrm{H} = 0,1$

ter / *A. Gerasimenko, M. Guskov, A. Gouskov, P. Lorong, G. Panovko* // Vibroengineering Procedia. 2016. Vol. 8. P. 179–184.

13. Nonlinear dynamics of a machining system with two interdependent delays / *A.M. Guskov, Voronov S.A., Paris H., S.A. Batzer* // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2002. Vol. 7 (3). P. 207–221.
14. *Benardos P.G., Mosialos S., Vosniakos G.C.* Prediction of workpiece elastic deflections under cutting forces in turning // Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2002. Vol. 22. P. 505–514.
15. *Wang, X., Feng C.X.* Development of Empirical Models for Surface Roughness Prediction in Finish Turning // Int. J. of Advanced Manufacturing Technology. 2002, Vol. 20 (5). pp. 348–56.
16. *Асташев В.К., Корендясев Г.К.* Термомеханическая модель возникновения автоколебаний при резании. Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012. № 3. С. 3–9.

ГУСЬКОВ Александр Михайлович E-mail: **gouskov_am@mail.ru** Тел.: **(499) 135-30-47**	Доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная механика» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана, главный научный сотрудник Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Сфера научных интересов: теория нелинейных колебаний и устойчивости движения, динамика технологических систем, динамика роторных систем. Автор трех монографий, более 160 научных статей.
ГУСЬКОВ Михаил Александрович E-mail: **mikhail.guskov@ensam.eu** Тел.: **(499) 135-30-47**	Кандидат технических наук, доцент Парижской высшей инженерной школы (PIMM Laboratory UMR 8006, ENSAM, CNRS, CNAM, Paris, France). Сфера научных интересов: теория нелинейных колебаний и устойчивости движения, динамика технологических систем, Автор более 50 научных статей.
ДИНЬ Дык Тунг E-mail: **tungdinhx48@gmail.com** Тел.: **(499) 135-30-47**	Аспирант Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сфера научных интересов: динамика технологических систем.
ПАНОВКО Григорий Яковлевич E-mail: **gpanovko@yandex.ru** Тел.: **(499) 135-30-47**	Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией вибромеханики Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, профессор кафедры «Прикладная механика» Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Сфера научных интересов: теория нелинейных колебаний, динамика машин, вибрационная техника и технологии. Автор 5 монографий, более 160 научных статей.