

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ**MACHINE BUILDING AND THEORETICAL ENGINEERING**

УДК 621.9:531.3

DOI: 10.17213/0321-2653-2016-4-67-76

**ВЛИЯНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ
В НАПРАВЛЕНИИ ПРОДОЛЬНОЙ ПОДАЧИ НА ТРАЕКТОРИИ
ФОРМООБРАЗУЮЩИХ ДВИЖЕНИЙ****THE INFLUENCE OF KINEMATIC PERTURBATIONS TOWARDS
LONGITUDINAL MOTION ON SHAPE-GENERATING MOVEMENT
TRAJECTORIES IN CUTTING DYNAMIC SYSTEM**© 2016 г. **В.Л. Заковоротный, В.Е. Гвинджилия**

Заковоротный Вилор Лаврентьевич – д-р техн. наук, профессор, Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия. E-mail: zakovorotny@dstu.edu.ru

Zakovorotny Vilor Lavrentievich – Doctor of Technical Sciences, professor, Don State Technical University, Rostov-on-Don. Russia. E-mail: zakovorotny@dstu.edu.ru

Гвинджилия Валерия Энвериевна – магистрант, Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия. E-mail: sinedden@yandex.ru

Gvindjiliya Valery Enverievna – Undergraduate student, Don State Technical University, Rostov-on-Don. Russia. E-mail: sinedden@yandex.ru

Рассматривается проблема преобразования кинематических возмущений в направлении скорости подачи при продольном точении в траектории формообразующих движений инструмента относительно детали. При этом учитываются как упругие деформационные смещения вершины инструмента относительно исполнительных элементов станка, так и свойства динамической связи, формируемой процессом резания. Главное внимание уделяется динамике преобразования. Приводятся примеры анализа, а также даются рекомендации по выбору режимов и параметров системы.

Ключевые слова: процесс точения; кинематические возмущения; динамика; формообразование.

The article deal with a problem of conversion kinematic perturbations towards feed speed in the longitudinal turning in shape-generating movement trajectories of the tool relative to the part. In this respect the elastic deformation of the vertex tool relative to the elements of machining and the properties of the dynamic feed generated by the cutting process. The focus is on the dynamics of conversion. Shows examples of the analysis and recommendations on the selection of regimes and parameters of the system.

Keywords: process of turning; kinematic perturbations; dynamic; shape-generating.

Постановка проблемы

Любой металлорежущий станок имеет погрешности движения исполнительных элементов, зависящие от его текущей точности. Для токарного станка – это погрешность движения поперечного и продольного суппортов, а также вращения шпинделя в направлениях их подвижности и ортогональных к ним [1 – 4]. При построении систем управления процессами обработки на металлорежущих станках приходится считаться с

тем, что все траектории движения исполнительных элементов станка зависят не только от управления, но и от возмущений [5 – 7]. Эти возмущения характеризуют предельно достижимую точность обработки на данном станке [8 – 12] и влияют на динамическое качество системы резания [13 – 21].

В предлагаемом исследовании рассматривается проблема влияния кинематических возмущений в направлении движения продольного суппорта на траектории формообразующих дви-

жений вершины инструмента относительно детали. Кинематические возмущения обусловлены, прежде всего, конструктивными несовершенствами при изготовлении механической части приводов подачи и вращения шпинделя, а также их изменениями при эксплуатации.

Обоснование математической модели продольного точения с учетом кинематических возмущений в направлении подачи

При моделировании будем опираться на гипотезы, подробно проанализированные ранее [13 – 21]. Начало координат рассматривается в точке контакта вершины инструмента с деталью в предположении, что упругие деформации отсутствуют (рис. 1). Упругие деформации инструмента $X^{(1)}(t) = \{X_1(t), X_2(t), X_3(t)\}^T$ рассматри-

ваются в пространстве $X^{(1)}(t) \in \mathbb{R}^3$, а обрабатываемой детали – в точке контакта с ней вершины инструмента $Z(t) \in \mathbb{R}^1$. Если заданы силы

$$F(t) = \{F_1(t), F_2(t), F_3(t), F_4(t)\}^T \text{ (здесь } F_2(t) \equiv F_4(t) \text{),}$$

то деформации определяются

$$m \frac{d^2 X}{dt^2} + h \frac{dX}{dt} + cX = F(t), \quad (1)$$

где $X = \{X_1, X_2, X_3, Z\}^T$ – вектор упругих деформаций инструмента (первые три координаты) и детали Z в направлении, указанном на рис. 1; $F_0^{(1)}(t), F_0^{(2)}(t), F_0^{(3)}(t)$ – модули составляющей силы резания, формируемой в области передней грани инструмента, и сил, действующих на его задние грани;

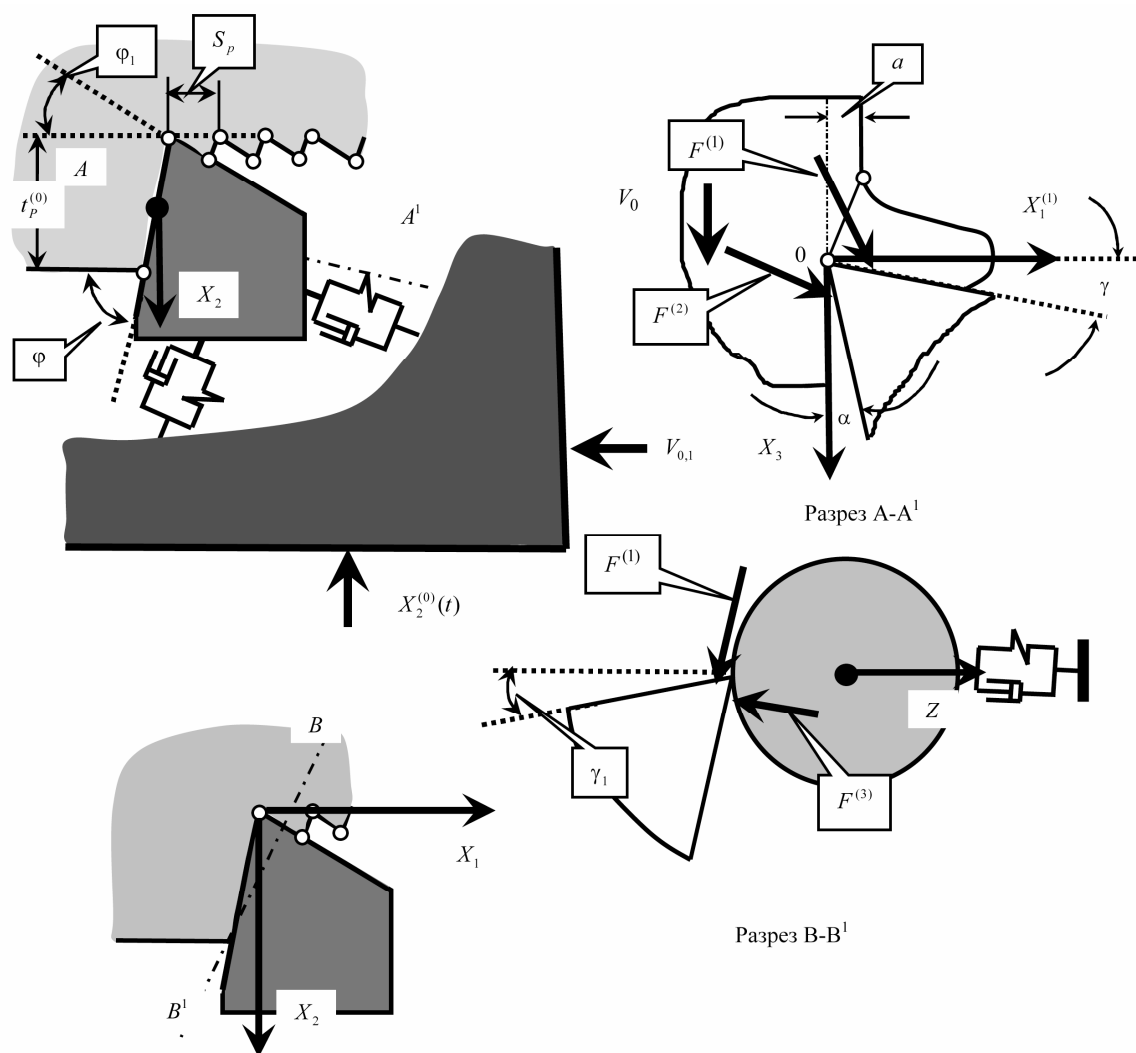


Рис. 1. Ориентация осей деформаций и сил, действующих на режущий инструмент

$F(t) = \{\chi_1^{(1)} F_0^{(1)}(t) + \chi_1^{(2)} F_0^{(2)}(t) + \chi_1^{(3)} F_0^{(3)}(t)\},$
 $[\chi_2^{(1)} F_0^{(1)}(t) + \chi_2^{(2)} F_0^{(2)}(t) + \chi_2^{(3)} F_0^{(3)}(t)], \Leftrightarrow$
 $\Leftrightarrow [\chi_3^{(1)} F_0^{(1)}(t) + \chi_3^{(2)} F_0^{(2)}(t) + \chi_3^{(3)} F_0^{(3)}(t)],$
 $[\chi_2^{(1)} F_0^{(1)}(t) + \chi_2^{(2)} F_0^{(2)}(t) + \chi_2^{(3)} F_0^{(3)}(t)]^T$ – проекции
 всех сил на оси $\{X_1, X_2, X_3, Z\}$; $\{\chi_1^{(1)}, \chi_2^{(1)}, \chi_3^{(1)}, \chi_2^{(1)}\}^T$, $\{\chi_1^{(2)}, \chi_2^{(2)}, \chi_3^{(2)}, \chi_2^{(2)}\}^T$, $\{\chi_1^{(3)}, \chi_2^{(3)}, \chi_3^{(3)}, \chi_2^{(3)}\}^T$ – угловые коэффициенты ориентации главной составляющей силы резания и сил, формируемых в области контакта задних граней инструмента с обработанной частью детали (они определяются углами φ , φ_1 и γ , физико-механическими характеристиками обрабатываемого материала и условиями обработки, прежде всего процессами в области контакта передней поверхности со стружкой);

$$m = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M \end{bmatrix}, \quad h = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{2,1} & h_{3,1} & 0 \\ h_{1,2} & h_{2,2} & h_{3,2} & 0 \\ h_{1,3} & h_{2,3} & h_{3,3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H \end{bmatrix},$$

$$c = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{2,1} & c_{3,1} & 0 \\ c_{1,2} & c_{2,2} & c_{3,2} & 0 \\ c_{1,3} & c_{2,3} & c_{3,3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C \end{bmatrix} \text{ – соответственно}$$

диагональная матрица инерционных коэффициентов и положительно определенные симметричные матрицы диссипации и упругости. Все параметры подсистем определяются по правилам, изложенным, например, в [22 – 25]. Представление (1) справедливо в частотном диапазоне, ограниченном сверху первыми формами колебаний. В отличие от ранее рассмотренных случаев модель (1) учитывает, кроме главной составляющей силы, имеющей модуль $F_0^{(1)}(t)$, еще силы, действующие на задние поверхности инструмента $F_0^{(2)}(t)$ и $F_0^{(3)}(t)$. Причем, ориентация этих сил определяется своими угловыми коэффициентами. Ранее силы $F_0^{(2)}(t)$ и $F_0^{(3)}(t)$ не принимались во внимание, так как рассматривались малые вариации упругих деформаций в окрестности равновесия. В дальнейшем мы будем пользоваться синергетической концепцией анализа [11, 12]. Поэтому силы, формируемые в области сопряжения инструмента с деталью,

необходимо представить в координатах состояния системы, определяющих движение вершины инструмента относительно детали. Они складываются из заданных траекторий движения исполнительных элементов, возмущений и упругих деформаций. Эти координаты формируют топологию обработанной поверхности и определяют все основные показатели точности, макро- и микрорельефа.

Таким образом, систему (1) необходимо дополнить моделью сил в координатах состояния. Прежде всего, рассмотрим силы $F^{(1)}$, формируемые в области передней грани инструмента. Следуя представлениям, изложенным ранее в [22 – 26], модуль сил, действующих на переднюю поверхность инструмента, можно представить в виде

$$F^{(1)} = \rho(t_p^{(0)} - X_2 - Z) \times \int_{t-T}^t \{V_{0,1}(\xi) + \Delta V_1(\xi) - v_1(\xi)\} d\xi, \quad (2)$$

где $V_{0,1}(\xi)$ – скорость продольного суппорта; $\Delta V_1(t)$ – кинематические возмущения скорости; $v_1(t)$ – скорость упругих деформаций по направлению оси движения суппорта; ρ – коэффициент давления стружки на инструмент, кг/мм². Все скорости в (2) измеряются в мм/с, а деформационные смещения – в мм. В (2) полагается, что время оборота детали $T = \text{const}$. Кроме этого, учтем, что в скоростном диапазоне (0,6 – 3,0) м/с при обработке большинства сталей зависимость $\rho_0(V_0)$ можно аппроксимировать выражением

$$\rho_0(V_0) = \rho_0[1 + \mu \exp(-\alpha_1 V_0)],$$

где μ – безразмерный коэффициент; α_1 – параметр, определяющий крутизну уменьшения давления при увеличении скорости, с/мм.

Учтем запаздывание сил по отношению к изменениям площади срезаемого слоя [12]. Тогда

$$\left\{ \begin{aligned} F_0^{(1)}(t) &= \rho_0 \{ (1 - \mu) \exp[-\alpha_1 (V_0 - dX_3 / dt)] \} S^{(\infty)}; \\ T_p \frac{dS^{(\infty)}(t)}{dt} + S^{(\infty)}(t) &= \{ t_p^{(0)} - X_2(t) - Z(t) \} \times \\ &\times \left\{ \int_{t-T}^t [V_{1,0} + \Delta V_1(t) - v_1(t)] dt \right\}, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где $S^{(\infty)}$ – эффективная площадь, позволяющая учесть запаздывание сил резания; T_p – постоянная

ная времени; $t_p^{(0)}$ – припуск без учета упругих деформаций. Представление (3) отличается от ранее рассмотренного тем, что учитывается кинематическое возмущение $\Delta V_1(t)$. Очевидно, что по смыслу формирования функции $\Delta V_1(t)$ выполняется условие $\frac{1}{t_0} \int_0^t \Delta V_1(t) dt = 0$, сама же

функция является периодической функцией времени. Рассмотрим также силы $F^{(2)}(t)$ и $F^{(3)}(t)$. Они зависят от сближения задних граней инструмента с деталью. Так как скорость резания на порядок и более превышает скорость подачи, то вариациями скорости резания за счет упругих деформаций можно пренебречь. Тогда силы, действующие на задние грани, можно считать зависящими только от скоростей инструмента в сторону заготовки. В связи с этим необходимо преобразовать скорости упругих деформаций в пространстве $\{X_1, X_2, X_3\}^P \in \mathcal{R}^3$ к направлениям сближения поверхностей (пространства $\{X_1^{(1)}, X_2^{(1)}, X_3^{(1)}\}^P \in \mathcal{R}^3$ и $\{X_1^{(2)}, X_2^{(2)}, X_3^{(2)}\}^P \in \mathcal{R}^3$) (рис. 2). Очевидно, проекции скоростей на направление сближения определяются

$$\begin{cases} V_1^{(1)}(t) = [V_{0,1} + \Delta V_1(t) - v_1(t)] \sin \varphi + v_2(t) \cos \varphi; \\ V_1^{(2)}(t) = [V_{0,1} + \Delta V_1(t) - v_1(t)] \sin \varphi^{(1)} + v_2(t) \cos \varphi^{(1)}, \end{cases} \quad (4)$$

где $v_1(t) = dX_1/(dt)$; $v_2(t) = -dX_2/(dt) - dZ/(dt)$. При традиционной схеме точения углы инструмента $\varphi^{(1)}$ и $\pi/2 - \varphi$ являются величинами малыми. Поэтому

$$\begin{cases} V_1^{(1)}(t) = [V_{0,1} + \Delta V_1(t) - v_1(t)]; \\ V_1^{(2)}(t) = v_2(t). \end{cases} \quad (5)$$

При необходимости можно легко учесть взаимное влияние скоростей в двух ортогональных направлениях на основе соотношений (4). Приведем аппроксимацию модулей сил $F_0^{(2)}(t)$ и $F_0^{(3)}(t)$ в координатах состояния, т. е. в значениях скоростей в направлениях X_1 и X_2 . При анализе ограничимся соотношениями (5).

$$F^{(2)} = F_0^{(2)} \exp \alpha_2 [V_{0,1} + \Delta V_1(t) - v_1(t)];$$

$$F^{(3)} = F_0^{(3)} \exp \alpha_3 [-v_2(t)],$$

где $F_0^{(2)}$ и $F_0^{(3)}$ – модули сил, формируемые в области контакта задних граней инструмента с заготовкой при нулевом значении скоростей упругих деформаций и кинематических возмущений; α_2 и α_3 – параметры, характеризующие крутизну увеличения сил в зависимости от скоростей, с/мм. Параметры α_2 и α_3 при прочих неизменных условиях зависят от задних углов инструмента.

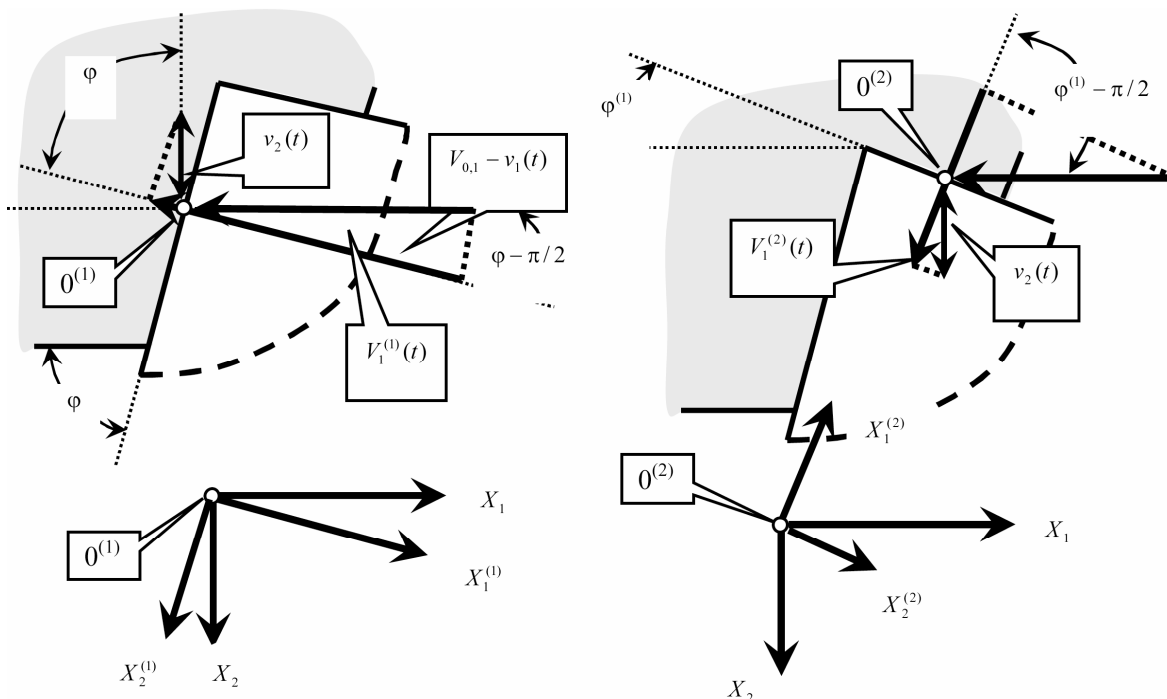


Рис. 2. Схема определения скоростей в направлениях задних граней инструмента

Полную модель сил можно представить в виде

$$F_i = \{[\chi_i^{(1)} \rho_0[(1+\mu)\exp(-\alpha_1(V_0 - dX_3/dt))]S^{(\infty)} + \\ + \chi_i^{(2)} F_0^{(2)} \exp \alpha_2[\Delta V_1(t) - v_1(t)] + \\ + \chi_i^{(3)} F_0^{(3)} \exp \alpha_3[-v_2(t)]\}, \quad i=1,2,3,4; \quad (6) \\ T_p \frac{dS^{(\infty)}(t)}{dt} + S^{(\infty)}(t) = \{t_p^{(0)} - X_2(t) - Z(t)\} \times \\ \times \left\{ \int_{t-T}^t [V_{1,0} + \Delta V_1(t) - v_1(t)] dt \right\}; F_2 \equiv F_4.$$

Таким образом, базовое уравнение возмущенной динамической системы представляет систему (1), в которой правая часть представлена силами в координатах состояния (6).

Закономерности преобразования кинематических возмущений в траектории формообразующих движений

Кинематические возмущения, формируемые осевыми биениями шпинделя и возмущениями со стороны привода подачи, характеризуются набором периодических функций со случайными параметрами. В частности, биения шпинделя имеют явно выраженную периодическую составляющую с периодом вращения шпинделя [4]. Это обусловлено тем, что биения шпиндельного узла, как роторной системы, обусловлены образованием циркуляционных сил [27, 28]. Привод подачи имеет более сложный спектральный состав возмущений, но основные его свойства также представимы в виде набора тригонометрических функций. Поэтому закономерности преобразования удобно рассматривать в частотной области. Уже структура уравнений (1) и (6) позволяет сделать ряд выводов о свойствах преобразования. Вначале будем считать, что силы $F_0^{(2)}$ и $F_0^{(3)}$ есть величины малые. Для этого проанализируем свойства оператора

$$S_p(t) = \int_{t-T}^t [V_{1,0} + \Delta V_1(t) - v_1(t)] dt,$$

который раскрывает закон формирования толщины срезаемого слоя $a(t) = S_p(t) \sin \varphi$. Этот интеграл является оператором скользящего среднего, и он интегрирует вариации скорости в окне T . Обозначая $U(t) = [V_{1,0} + \Delta V_1(t) - v_1(t)]$ и переходя к изображениям по Фурье, получаем АФЧХ связи

$$\frac{a(j\Omega)}{U(j\Omega)} = T_0 \left\{ \frac{\sin \Omega}{\Omega} + j \frac{\cos \Omega - 1}{\Omega} \right\}, \quad (7)$$

где $\Omega = T\omega$ – безразмерная частота в относительных единицах к циклической частоте вращения шпинделя, равной $\omega_{ш} = (T)^{-1}$; $T_0 = T \sin \varphi$ (см. рис. 1). Обычно $\varphi \Rightarrow \pi/2$. Поэтому $T_0 \Rightarrow T$. Годограф (7) приведен на рис. 3. Он зависит от отношения текущей частоты к циклической частоте вращения шпинделя. Отметим следующее.

1. По мере увеличения частоты вариаций скорости по отношению к частоте вращения шпинделя $\Omega = \omega/\omega_{ш}$ наблюдается существенное затухание изменений толщины срезаемого слоя. Это связано с интегрированием скорости в окне T .

2. При увеличении T возрастает и затухание.

3. Существует дискретное множество частот, при которых вариации скорости подачи не вызывают изменений толщины срезаемого слоя, следовательно, сил резания. Причем затухание может существенно меняться даже при малых вариациях частоты изменения скорости подачи.

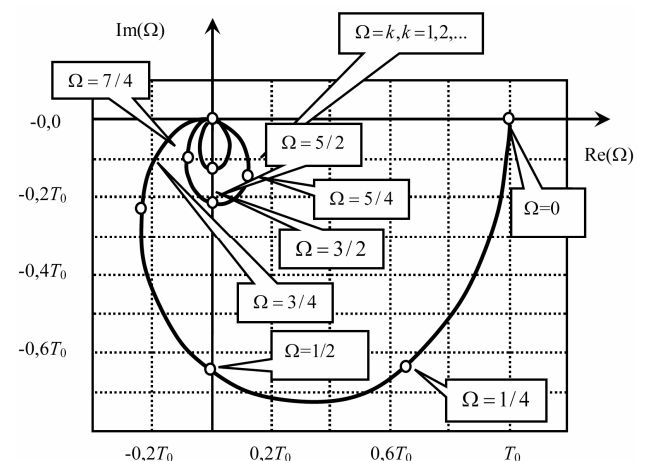


Рис. 3. АФЧХ преобразования вариаций суммарной скорости продольных перемещений в изменения толщины срезаемого слоя

Приведем пример преобразования гармонического кинематического возмущения в деформационные смещения. Параметры подсистемы инструмента и детали:

$$m = \begin{bmatrix} 0,7 \cdot 10^{-3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,7 \cdot 10^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,7 \cdot 10^{-3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \cdot 10^{-3} \end{bmatrix}, \text{ кгс}^2/\text{мм},$$

$$h = \begin{bmatrix} 0,8 & 0,2 & 0,05 & 0 \\ 0,2 & 0,5 & 0,1 & 0 \\ 0,05 & 0,1 & 0,6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,6 \end{bmatrix}, \text{ кгс/мм},$$

$$c = \begin{bmatrix} 800 & 300 & 400 & 0 \\ 300 & 1200 & 200 & 0 \\ 400 & 200 & 600 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 300 \end{bmatrix}, \text{ кг/мм}.$$

Параметры модели динамической связи, формируемой процессом резания, приведены в табл. 1, угловые коэффициенты ориентации сил – в табл. 2.

Вначале рассмотрим переходные процессы при врезании инструмента в заготовку при отсутствии сил, действующих на задние грани. На рис. 4 а приведен пример изменения деформационных смещений в трех ортогональных направлениях для случая, когда кинематические возмущения отсутствуют.

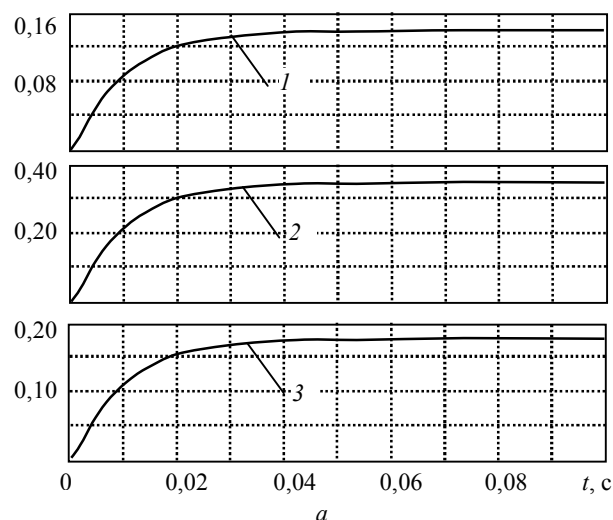
Таблица 1

ρ_0 , кг/мм ²	α_1 , с/мм	α_2 , с/мм	α_3 , с/мм	V , мм/с	t_p , мм	$F_0^{(2)} = F_0^{(3)}$, кг
350	0,8	10,0	10,0	1000	2,5	0,5

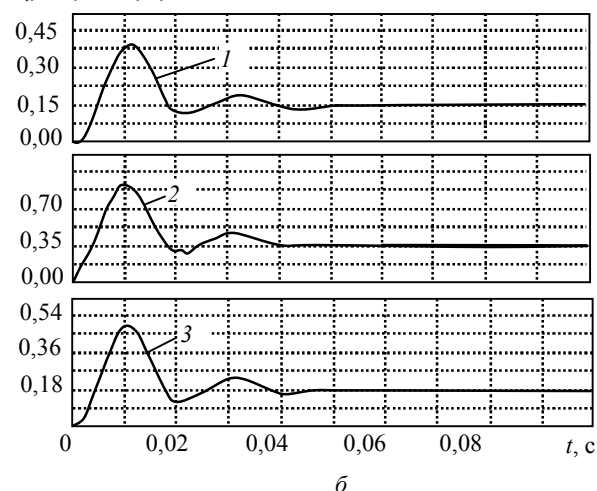
Таблица 2

$\chi_1^{(1)}$	$\chi_2^{(1)}$	$\chi_3^{(1)}$	$\chi_1^{(2)}$	$\chi_2^{(2)}$	$\chi_3^{(2)}$	$\chi_1^{(3)}$	$\chi_2^{(3)}$	$\chi_3^{(3)}$
0,5	0,5	0,7	0,8	0,445	0,445	0,445	0,8	0,445

X_i , мм; $i = 1, 2, 3$



X_i , мм; $i = 1, 2, 3$



X_i , мм; $i = 1, 2, 3$

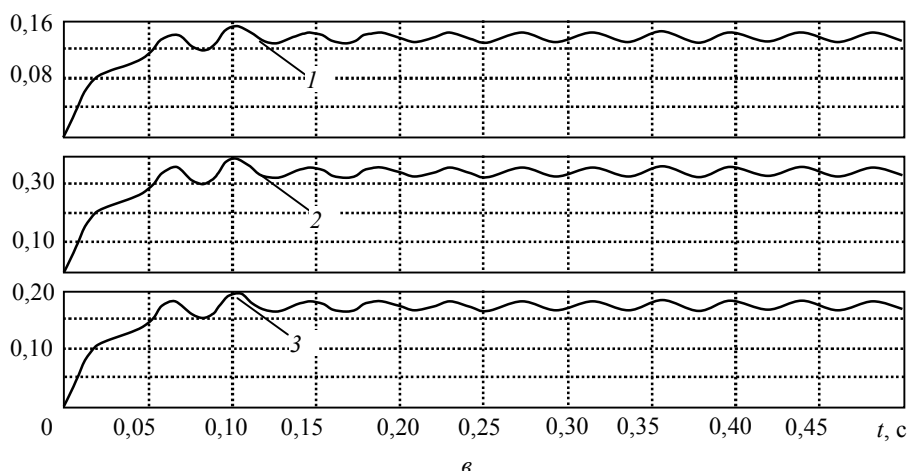


Рис. 4. Переходные процессы деформационных смещений при врезании инструмента в обрабатываемую деталь без учета сил, действующих на задние грани инструмента. Сверху вниз деформационные смещения в миллиметрах соответственно в направлениях X_1 , X_2 и X_3

Здесь виден монотонный переходной процесс, время которого больше одного оборота. Затягивание во времени и пространстве переходного процесса обусловлено взаимным влиянием сил и деформаций и оно принципиально зависит от матрицы упругости. На рис. 4 б даны кривые при частоте колебаний скорости в направлении подачи, совпадающей с частотой шпинделя $\Omega_0 = \Omega = 50$ Гц. Например, это возмущения, определяемые осевыми биениями шпинделя. Для наглядности амплитуда колебаний скорости принята равной самой скорости подачи. Здесь необходимо отметить также существование переходного процесса при установлении стационарного состояния, которое в данном случае представляет точку в подвижной системе координат движений исполнительных элементов станка.

Таким образом, несмотря на кинематические возмущения, притягивающим множеством в этом случае является точка. Следовательно, на формируемой топологии поверхности детали в стационарном режиме никак не отображаются вариации скорости подачи. Они заметны лишь в нестационарном состоянии. Подчеркнем, что в этом случае $\int_{t-T}^t v_1(t) dt \equiv 0$ при $t \rightarrow \infty$.

рис. 4 в частота колебаний скорости равна $\Omega = 25$ Гц. В этом случае вариации скорости вызывают заметные периодические деформации. Притягивающим множеством здесь являются установившиеся периодические деформационные смещения, которые искажают топологию формируемой поверхности. Зависимости также показывают, что в стационарном состоянии выполняются условия

$$\int_{t-T}^t [V_{1,0} + \Delta V_1(t) - v_1(t)] dt = \text{const}, t \in (0, \infty),$$

т. е. при устойчивости справедливо

$$\int_{t-T}^t [v_1(t)] dt \Rightarrow \int_{t-T}^t [\Delta V_1(t)] dt, t \in (0, \infty).$$

Ситуация принципиально меняется, если учесть силы, формируемые в области контактов задних граней инструмента с деталью, которые характеризуют нелинейное демпфирование колебаний. Приведем пример изменения деформационных смещений при частоте вариаций скорости, равной частоте вращения шпинделя, но с учетом сил, действующих на заднюю поверхность инструмента (рис. 5).

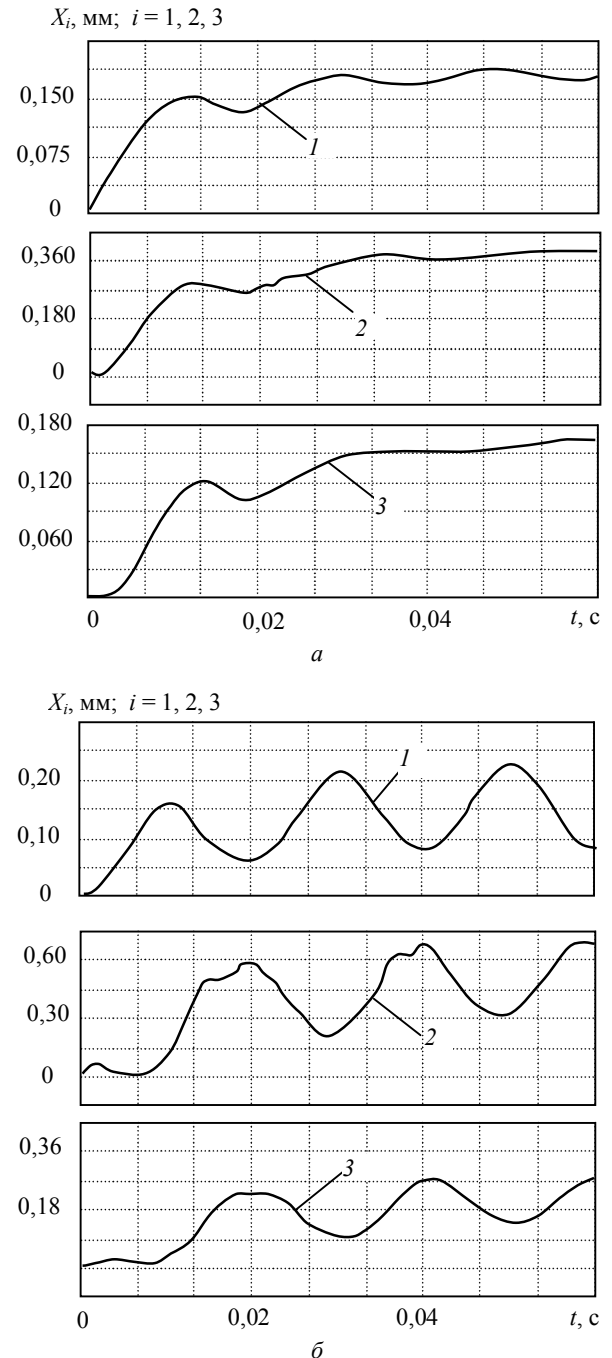


Рис. 5. Влияние сил, формируемых в области контакта задних граней инструмента, на траектории деформационных смещений: а – амплитуда вариаций скорости подачи равна 0,1 от скорости подачи; б – амплитуда вариаций скорости подачи равна 0,5 от скорости подачи

Здесь за счет этих сил в стационарном состоянии наблюдаются периодические деформации. Причем, как и в рассмотренных выше примерах, наблюдается переходной процесс при установлении периодических стационарных деформационных смещений. При этом наблюдается заметное влияние сил, действующих на задние поверхности инструмента, которые, во-первых, вызывают нелинейные искажения гармониче-

ских колебаний, во-вторых, при больших амплитудах вариации скорости приводят к изменениям фазы колебательных смещений по различным направлениям. В общем случае при анализе преобразования вариаций скорости продольной подачи в траектории деформационных смещений наблюдается сложное перераспределение сил, действующих на переднюю и задние поверхности инструмента, и деформационных смещений. Кинематические возмущения являются регулярными и изменяющимися периодически, поэтому при резании устанавливается некоторое стационарное состояние изменения деформационных смещений. В тех случаях, когда возмущения не регулярны, то в процессе резания постоянно происходит динамическая перестройка системы.

Анализ результатов

Результаты цифрового моделирования преобразования кинематических возмущений в траектории формообразующих движений инструмента относительно детали позволяют сформулировать следующие особенности преобразования.

1. Вариации траектории движения исполнительных элементов станка при продольном точении вдоль оси вращения детали непосредственно не изменяют диаметра обработки и координат положения вершины инструмента и детали по отношению к этой оси. Однако за счет преобразования этих траекторий через процесс резания с учетом упругих деформаций они приводят к упругим отклонениям положения вершины инструмента и детали. Причем на закономерности преобразования оказывает влияние структура динамической модели подсистемы инструмента и обрабатываемой детали, а также угловые коэффициенты

$$\{\chi_1^{(1)}, \chi_2^{(1)}, \chi_3^{(1)}, \chi_2^{(1)}\}^T,$$

$$\{\chi_1^{(2)}, \chi_2^{(2)}, \chi_3^{(2)}, \chi_2^{(2)}\}^T,$$

$$\{\chi_1^{(3)}, \chi_2^{(3)}, \chi_3^{(3)}, \chi_2^{(3)}\}^T.$$

Необходимо учитывать, что угловые коэффициенты зависят от геометрии инструмента и условий трения при движении стружки по передней поверхности инструмента. В частности, затягивание переходного процесса при установлении стационарного состояния зависит от всех указанных выше параметров системы и, прежде всего, от величины жесткости взаимодействующих подсистем в направлении скорости подачи и проекции сил в этом направлении.

2. Нелинейные связи в (6) не обладают свойством центральной симметрии относительно стационарного состояния, в том числе от точки равновесия. Поэтому в зависимости от амплитуды колебательных скоростей кинематических возмущений наблюдается образование усредненной по периодам колебаний динамической постоянной составляющей деформационных смещений, влияющей на размер формируемой поверхности детали.

3. Для уменьшения погрешности при формировании детали, обусловленной кинематическими возмущениями, необходимо согласовать частоту вращения шпинделя с частотами основных осцилляторов, формирующих вариации скорости подачи. Если эти частоты равны или кратны частоте вращения шпинделя, то в стационарном состоянии кинематические возмущения вызывают изменения деформационных смещений, лишь на основе образования сил, действующих на задние грани инструмента. В свою очередь, для уменьшения этих сил необходимо увеличивать задние углы инструмента. Однако и в этом случае необходимо выбирать компромиссное решение, обусловленное тем, что увеличение этого угла вызывает снижение прочности инструмента, следовательно, его надежности.

4. Кинематические возмущения вызывают образование дополнительных сил, действующих на задние грани инструмента, которые приводят к непропорционально быстрому увеличению работы сил резания. Если учесть зависимость скорости износа от мощности необратимых преобразований [29, 30], то можно прийти к выводу о зависимости интенсивности изнашивания инструмента от параметров точности станка.

Заключение

Анализ показывает, что практически все основные свойства металлорежущего станка в единстве достижимой точности обработки и характеристик состояния процесса резания, оцениваемых, например, интенсивностью изнашивания инструмента, зависят от кинематических возмущений в станке. Кроме этого при управлении процессами обработки на станках, например, выборе программы ЧПУ, необходимо знать кинематические возмущения конкретного станка, зависящие от его текущей точности, и при этом программировать траектории движения исполнительных элементов, из условия минимизации деформационных смещений инструмента относительно детали.

Литература

1. Проников А.С. Программный метод испытания металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1985. 288 с.
2. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1986. 336 с.
3. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: в 3 т. Т. 1: Проектирование станков / А.С. Проников, О.И. Аверьянов, Ю.СМ. Аполлонов и др.; под общей редакцией А.С. Проникова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана: Машиностроение, 1994. 176 – 184 с.
4. Пуш А.В. Шпиндельные узлы. Качество и надежность. М.: Машиностроение, 1992. 288 с.
5. Заковоротный В.Л., Панов Е.Ю., Потапенко П.Н. Свойства формообразующих движений при сверлении глубоких отверстий малого диаметра // Вестн. Донского гос. техн. ун-та. 2001. Т.1, № 2. С. 81 – 93.
6. Заковоротный В.Л., Лапшин В.П., Туркин И.А. Управление процессом сверления глубоких отверстий спиральными сверлами на основе синергетического подхода // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2014. № 3 (178). С. 33 – 41.
7. Заковоротный В.Л., Санкар Т., Бордачев Е.В. Система оптимального управления процессом глубокого сверления отверстий малого диаметра // СТИН, 1994. № 12. С. 22 – 25.
8. Zakovorotny V. L., Lukyanov A.D. The Problems of Control of the Evolution of the Dynamic System Interacting with the Medium // Int. J. of Mechanical Engineering and Automation. 2014. Vol. 1, № 5. P. 271 – 285.
9. Zakovorotny V.L., Lukyanov A.D. System synthesis of Machine tool manufacturing process control based on synergetic conception // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. P. 370 – 375.
10. Заковоротный В.Л., Флек М.Б., Фам Д.Т. Синергетическая концепция при построении систем управления точностью изготовления деталей сложной геометрической формы // Вестн. Донского гос. техн. ун-та. 2011. Т. 11. № 10 (61). С. 1785 – 1797.
11. Синергетика и проблемы теории управления / под ред. А.А. Колесникова. М.: Физматлит, 2004. 504 с.
12. Заковоротный В.Л., Флек М.Б. Динамика процесса резания. Синергетический подход. Ростов н/Д.: Терра, 2006. 880 с.
13. Глустый И. Автоколебания в металлорежущих станках: пер. с чешск. М.: Машгиз, 1956. 395 с.
14. Tlustý I., Poláček M., Danek O., Spacek L. Selbsterregte Schwingungen an Werkzeugmaschinen. Berlin: Veb Verlag Technik, 1962. 320 p.
15. Tobias S.A. Machine Tool Vibrations. London: Blackie, 1965. 350 p.
16. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.
17. Эльясберг М.Е. Автоколебания металлорежущих станков: Теория и практика. СПб.: ОКБС, 1993. 182 с.
18. Zakovorotny V.L. Bifurcations in the dynamic system of the mechanic processing in metal-cutting tools // WSEAS Journal of Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. 2015. Vol. 10. P. 102 – 116.
19. Заковоротный В.Л., Фам Д.-Т., Быкадор В.С. Самоорганизация и бифуркации динамической системы обработки металлов резанием // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22, № 3. С. 26 – 40.
20. Заковоротный В.Л., Фам Д.-Т., Быкадор В.С. Влияние изгибных деформаций инструмента на самоорганизацию и бифуркации динамической системы резания металлов. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2014. Т. 22, № 3. С. 40 – 52.
21. Zakovorotnyi V.L., Lukyanov A.D., Gubanova A.A., Khristoforova V.V. Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of cutting // Journal of Sound and Vibration. 2016. T. 368. C. 174 – 190.
22. Заковоротный В.Л., Губанова А.А., Лукьянов А.Д. Использование синергетической концепции для изучения устойчивости формообразующих траекторий попутного фрезерования // СТИН. 2016. № 4. С. 32 – 40.
23. Заковоротный В.Л., Губанова А.А., Лукьянов А.Д. Условия параметрического самовозбуждения динамической системы фрезерования концевыми фрезами // СТИН. 2016. № 6. С. 10 – 16.
24. Заковоротный В.Л., Губанова А.А., Лукьянов А.Д. Притягивающие множества при фрезеровании концевыми фрезами // СТИН. 2016. № 8. С. 27 – 33.
25. Заковоротный В.Л., Фам Д.Т., Нгуен С.Т., Рыжский М.Н. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (скоростная связь) // Вестн. Донского гос. техн. ун-та. 2011. Т. 11, № 2 (53). С. 137 – 146.
26. Заковоротный В.Л., Фам Д.Т., Нгуен С.Т., Рыжский М.Н. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (позиционная связь) // Вестн. Донского гос. техн. ун-та. 2011. Т. 11, № 3 (54). С. 301 – 311.
27. Заковоротный В.Л., Шаповалов В.В. Динамика транспортных трибосистем // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2005. № 12. С. 19 – 29.
28. Заковоротный В.Л., Блохин В.П., Алексейчик М.И. Введение в динамику трибосистем. Ростов н/Д.: Инфо-Сервис, 2004. 680 с.
29. Заковоротный В.Л., Бордачев Е.В. Информационное обеспечение системы динамической диагностики износа режущего инструмента на примере токарной обработки // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1995. № 3. С. 95 – 103.
30. Заковоротный В.Л., Ладник И.В. Построение информационной модели динамической системы металлорежущего станка для диагностики процесса обработки // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1991. № 4. С. 75 – 79.

References

1. Pronikov A.S. *Programnyi metod ispytaniya metallorazreshchikh stankov* [Program test method of metal-cutting machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985, 288 p.
2. Reshetov D.N., Portman V.T. *Tochnost' metallorazreshchikh stankov* [Accuracy of metal-cutting machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986, 336.
3. Pronikov A.S., Averb'yanov O.I., Apollonov Yu.S.M. i dr. *Proektirovanie metallorazreshchikh stankov i stanochnykh sistem. V 3-kh tomakh. T.1. Proektirovanie stankov* [Design of metal-cutting machines and machine systems. In 3 volumes. T.1. Design of machines]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E.Baumana: Mashinostroenie, 1994, pp. 176–184.
4. Push A.V. *Shpindel'nye uzly. Kachestvo i nadezhnost'* [Shpindelny knots. Quality and reliability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992, 288 p.

5. Zakovorotnyi V.L., Panov E.Yu., Potapenko P.N. Svoistva formoobrazuyushchikh dvizhenii pri sverlenii glubokikh otverstii malogo diametra [Properties of form-building movements when drilling deep openings of small diameter]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2001, vol. 1, no. 2, pp. 81 – 93. [In Russ.]
6. Zakovorotnyi V.L., Lapshin V.P., Turkin I.A. Upravlenie protsessom sverleniya glubokikh otverstii spiral'nymi sverlami na osnove sinergeticheskogo podkhoda [Management of process of drilling of deep openings of spiral drills on the basis of synergetic approach]. *Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. Tekhn. nauki*, 2014, no. 3 (178), pp. 33 – 41. [In Russ.]
7. Zakovorotnyi V.L., Sankar T., Bordachev E.V. *Sistema optimal'nogo upravleniya protsessom glubokogo sverleniya otverstii malogo diametra* [System of optimum control of process of deep drilling of openings of small diameter]. *STIN*, 1994, no. 12, pp. 22 – 25. [In Russ.]
8. Zakovorotny V. L., Lukyanov, A.D. The Problems of Control of the Evolution of the Dynamic System Interacting with the Medium // *Int. J. of Mechanical Engineering and Automation*. 2014. Vol. 1, № 5. Pp. 271 – 285.
9. Zakovorotny V.L., Lukyanov A.D. System synthesis of Machine tool manufacturing process control based on synergetic conception. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 150, Pp. 370 – 375.
10. Zakovorotnyi V.L., Flek M.B., Fam D.T. Sinergeticheskaya kontseptsiya pri postroenii sistem upravleniya tochnost'yu izgotovleniya detalei slozhnoi geometricheskoi formy [The synergetic concept at creation of control systems of accuracy of production of details of an irregular geometrical shape]. *Vestn. Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 11, no. 10 (61), pp. 1785 – 1797. [In Russ.]
11. *Sinergetika i problemy teorii upravleniya* [Synergetics and problems of the theory of management]. Edit by A.A. Kolesnikova. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, 504 p.
12. Zakovorotnyi V.L., Flek M.B. *Dinamika protsessa rezaniya. Sinergeticheskii podkhod* [Dynamics of process of cutting. Synergetic approach]. Rostov-on-Don, Terra Publ., 2006, 880 p.
13. Tlustý I. *Avtokolebaniya v metallorezhushchikh stankakh* [Self-oscillations in metal-cutting machines]. The Translation from Czech. Moscow, Mashgiz Publ., 1956, 395 p.
14. Tlustý I., Polacek M., Danek O., Spacek L. *Selbsterregte Schwingungen an Werkzeugmaschinen*. Veb Verlag Technik, Berlin, 1962, 320p.
15. Tobias S. A. *Machine Tool Vibrations*. Blackie, London, 1965. 350 p.
16. Kudinov V.A. *Dinamika stankov* [Dynamics of machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1967, 359 p.
17. El'yasberg M.E. *Avtokolebaniya metallorezhushchikh stankov: Teoriya i praktika* [Self-oscillations of metal-cutting machines: Theory and practice]. St. Petersburg, OKBS, 1993, 182 p.
18. Zakovorotny V.L. Bifurcations in the dynamic system of the mechanic processing in metal-cutting tools. *WSEAS Journal of Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*. 2015. Vol. 10. Pp. 102 – 116.
19. Zakovorotnyi V.L., Fam D.-T., Bykador V.S. Samoorganizatsiya i bifurkatsii dinamicheskoi sistemy obrabotki metallov rezaniem [Self-organization and bifurcations of dynamic system of processing of metals cutting]. *Izv. vuzov. Prikladnaya nelineinaya dinamika*, 2014, vol. 22, no. 3, pp. 26 – 40. [In Russ.]
20. Zakovorotnyi V.L., Fam D.-T., Bykador V.S. Vliyachnie izgibnykh deformatsii instrumenta na samoorganizatsiyu i bifurkatsii dinamicheskoi sistemy rezaniya metallov [Vliyachniye of flexural deformations of the tool on self-organization and bifurcations of dynamic system of cutting of metals]. *Izv. vuzov. Prikladnaya nelineinaya dinamika*, 2014, vol. 22, no. 3, pp. 40 – 52. [In Russ.]
21. Zakovorotnyi V.L., Lukyanov A.D., Gubanova A.A., Khristoforova V.V. Bifurcation of stationary manifolds formed in the neighborhood of cutting. *Journal of Sound and Vibration*. 2016. Vol. 368. Pp. 174 – 190.
22. Zakovorotnyi V.L., Gubanova A.A., Luk'yanov A.D. Ispol'zovanie sinergeticheskoi kontseptsii dlya izucheniya ustoichivosti formoobrazuyushchikh traektorii poputnogo frezerovaniya [Use of the synergetic concept for studying of stability of form-building trajectories of passing milling]. *STIN*, 2016, no. 4, pp. 32 – 40. [In Russ.]
23. Zakovorotnyi V.L., Gubanova A.A., Luk'yanov A.D. Usloviya parametricheskogo samovozbuzhdeniya dinamicheskoi sistemy frezerovaniya kontsevmi frezami [Conditions of parametrical self-excitation of dynamic system of milling by trailer mills]. *STIN*, 2016, no. 6, pp. 10 – 16. [In Russ.]
24. Zakovorotnyi V.L., Gubanova A.A., Luk'yanov A.D. Prityagivayushchie mnozhestva pri frezerovanii kontsevmi frezami [The attracting sets when milling by trailer mills]. *STIN*, 2016, no. 8, pp. 27 – 33. [In Russ.]
25. Zakovorotnyi V.L., Fam D.T., Nguen S.T., Ryzhkin M.N. Modelirovanie dinamicheskoi svyazi, formiruemoi protsessom tocheniya, v zadachakh dinamiki protsessa rezaniya (skorostnaya svyaz') [Modeling of the dynamic communication formed by turning process in problems of dynamics of process of cutting (high-speed communication)]. *Vestn. Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 11, no. 2 (53), pp. 137 – 146. [In Russ.]
26. Zakovorotnyi V.L., Fam D.T., Nguen S.T., Ryzhkin M.N. Modelirovanie dinamicheskoi svyazi, formiruemoi protsessom tocheniya, v zadachakh dinamiki protsessa rezaniya (pozitsionnaya svyaz') [Modeling of the dynamic communication formed by turning process in problems of dynamics of process of cutting (position communication)]. *Vestn. Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 11, no. 3 (54), pp. 301 – 311. [In Russ.]
27. Zakovorotnyi V.L., Shapovalov V.V. Dinamika transportnykh tribosistem [Dynamics transport tribosisty]. *Sbornik v mashinostroenii, priborostroenii*, 2005, no. 12, pp. 19 – 29. [In Russ.]
28. Zakovorotnyi V.L., Blokhin V.P., Alekseichik M.I. *Vvedenie v dinamiku tribosistem* [Introduction to dynamics tribosisty]. Rostov-on-Don, InfoServis Publ., 2004, 680 p.
29. Zakovorotnyi V.L., Bordachev E.V. Informatsionnoe obespechenie sistemy dinamicheskoi diagnostiki iznosa rezhushchego instrumenta na primere tokarnoi obrabotki [Information support of system of dynamic diagnostics of wear of the cutting tool on the example of turning]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 1995, no. 3, pp. 95 – 103. [In Russ.]
30. Zakovorotnyi V.L., Ladnik I.V. Postroenie informatsionnoi modeli dinamicheskoi sistemy metallorezhushchego stanka dlya diagnostiki protsessa obrabotki [Creation of information model of dynamic system of the metal-cutting machine for processing diagnostics]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 1991, no. 4, pp. 75 – 79. [In Russ.]