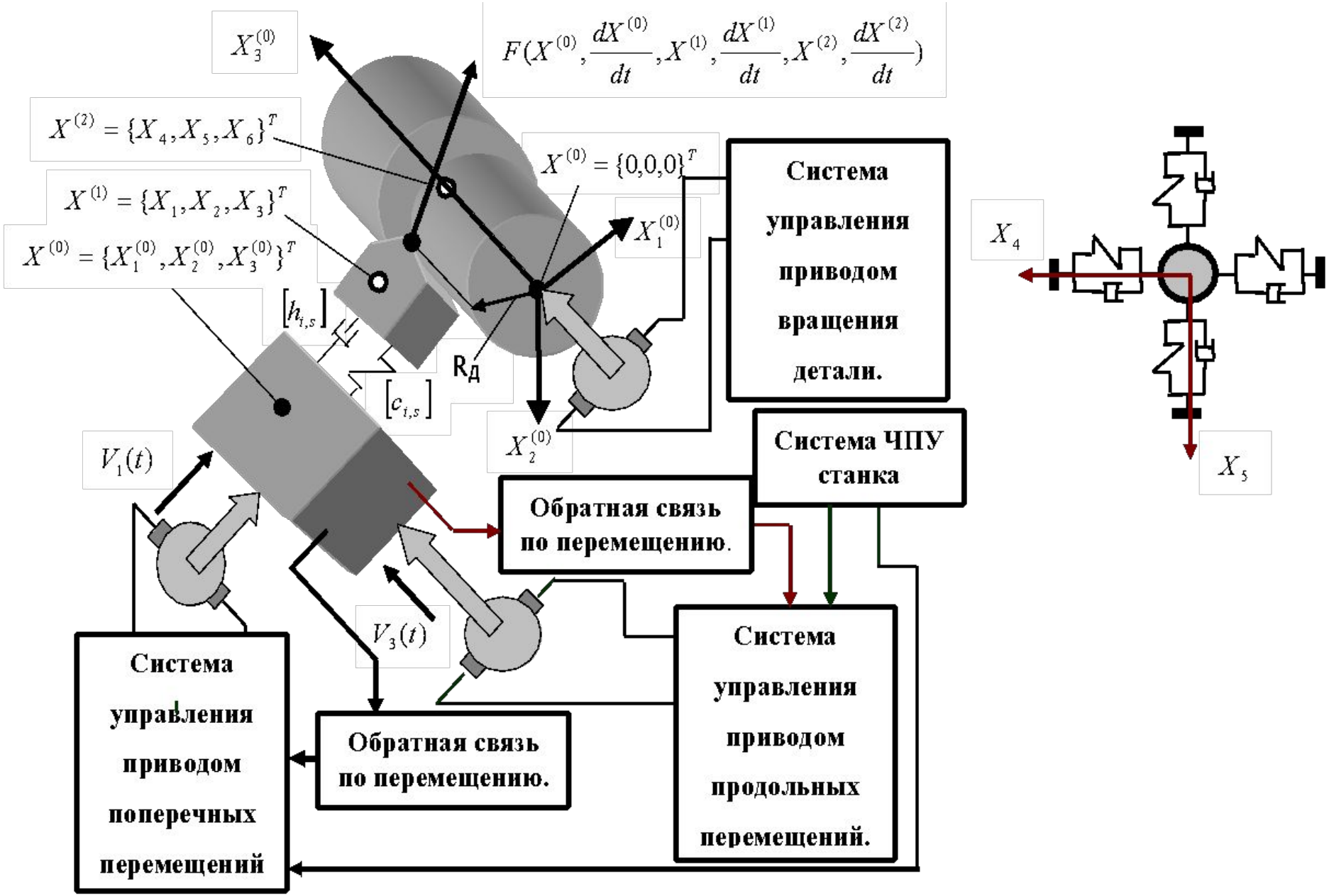
ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Фам Динь Тунг

Разработка методов анализа и синтеза управляемой динамической системы резания с учетом эволюции связей и самоорганизации

Ростов – на – Дону
2012г

Схема управления формообразующими движениями инструмента относительно заготовки при токарной обработки



Обобщённая схема преобразования динамических подсистем станка в процессе расширения пространства состояния на примере обработки на токарном станке

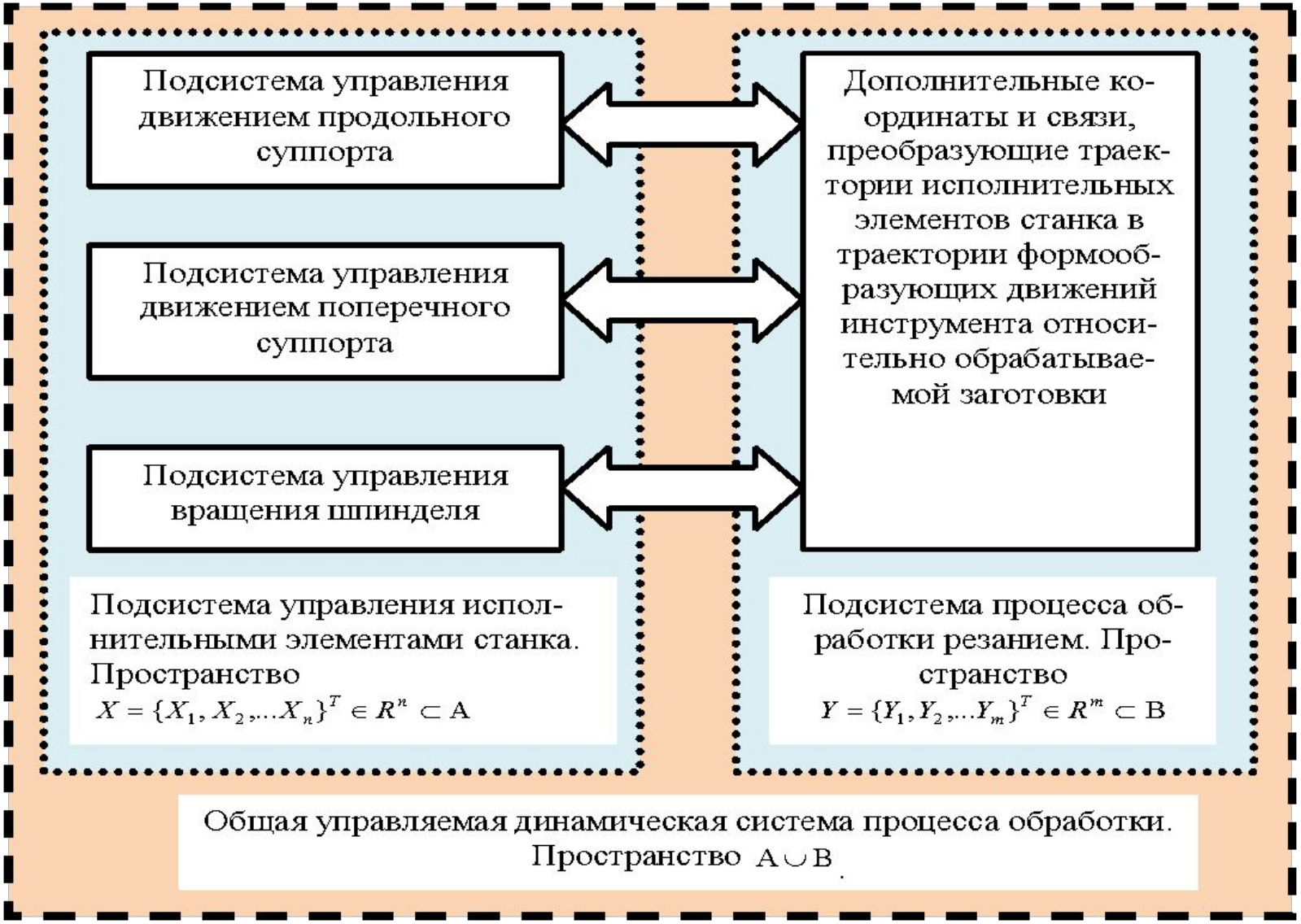
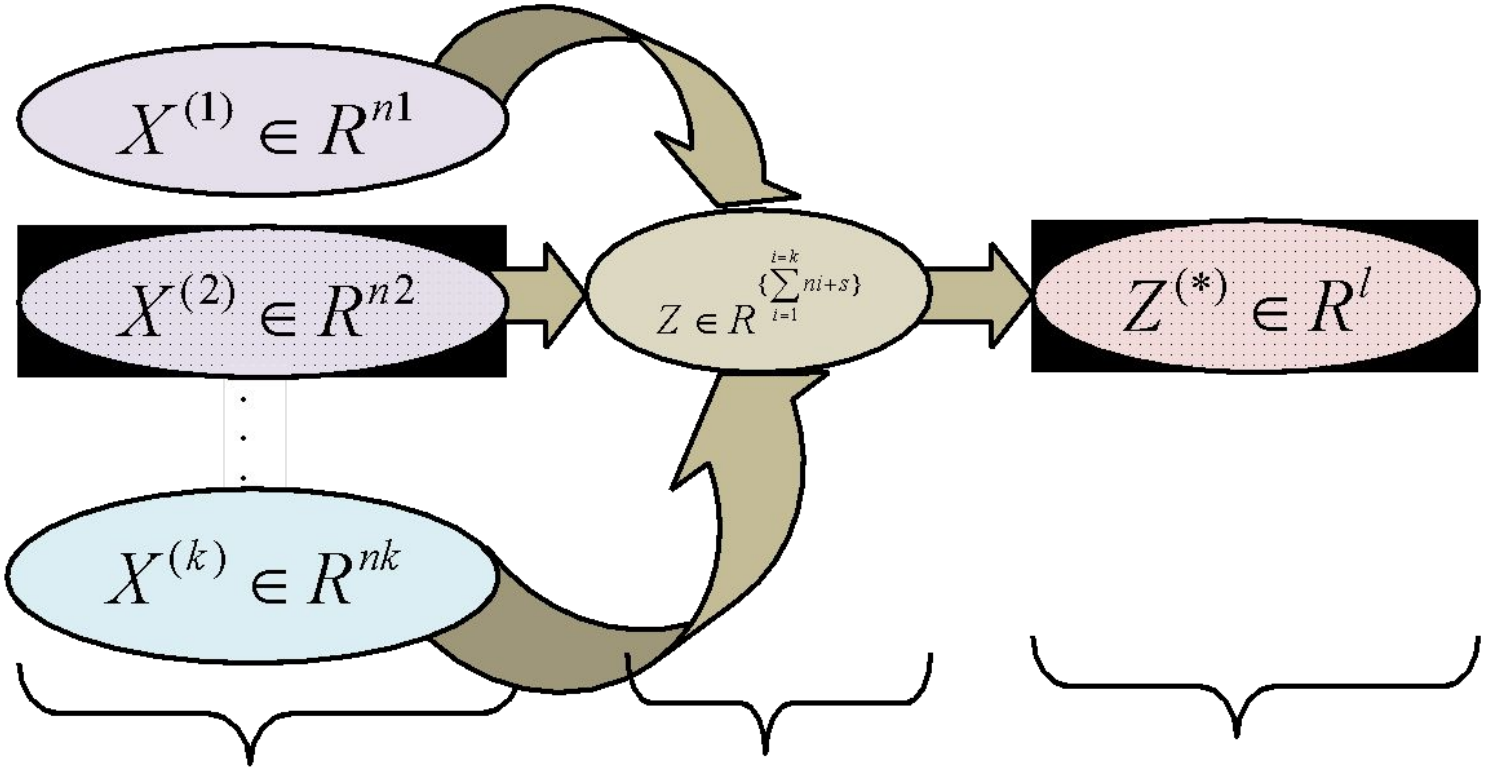


Схема расширения-сжатия пространства состояния динамической системы



Координаты состояния динамических подсистем исполнительных элементов

Координаты расширенного пространства состояния

Притягивающие многообразия расширенного пространства состояния

Цель исследования

Разработка теории и методов анализа и синтеза управляемой динамической системы резания с учетом эволюции связей и процессов самоорганизации для повышения эффективности процессов обработки на металлорежущих станках

Задачи исследования

1. Разработка обобщенной математической модели управляемого процесса резания с учетом преобразования управления (например, программы ЧПУ) в траектории движений исполнительных элементов станка, а также в траектории формообразующих движений инструмента относительно заготовки на примере станков токарной группы. Учет в математических моделях эволюционных преобразований параметров динамической связи, формируемой процессом резания.

2. На основе асимптотических методов нелинейной динамики построение иерархии систем дифференциальных уравнений, учитывающих указанные в п.1 преобразования, а также взаимодействия подсистем со стороны режущего инструмента и обрабатываемой заготовки с помощью динамической связи, формируемой процессом резания.

3. Разработка методики и параметрическая идентификация подсистем и динамической связи, формируемой процессом резания в векторной постановке, то есть с учетом пространственных деформационных смещений и пространственной ориентации сил резания. Выявление и моделирование нелинейности динамической связи сил с координатами состояния.

4. Изучение устойчивости траекторий формообразующих движений инструмента относительно заготовки. Определение не рассматриваемых ранее механизмов потери устойчивости, а также путей обеспечения устойчивости траекторий в единстве выбора управления, параметров и конструктивных элементов взаимодействующих подсистем.

5. Исследование закономерностей преобразования траекторий исполнительных элементов станка в траектории формообразующих движений инструмента относительно заготовки. Определение возможности управления траекториями формообразующих движений с помощью внешнего управления.

Задачи исследования (продолжение)

6. Изучение многообразий, формируемых в окрестностях медленно смещающейся точки равновесия динамической системы резания. Анализ бифуркаций в параметрическом пространстве. Определение условий формирования орбитально асимптотически устойчивых предельных циклов, инвариантных торов и странных (хаотических) аттракторов.

7. Разработка теории анализа эволюционной перестройки системы на основе анализа интегро-дифференциальных уравнений. Методика вычисления стационарной эволюционной траектории и анализа многообразий, формируемых в окрестности стационарной эволюционной траектории. Исследование динамической самоорганизации системы в ходе ее эволюции.

8. Разработка методики вычисления многообразия траекторий формообразующих движений инструмента относительно заготовки на основе синергетической теории управления, а также методики выбора на многообразии траектории, минимизирующей приведенные затраты на изготовление партии деталей. Создание основ построения нового класса управляемого процесса резания, сочетающего внешнее управление с действием внутренних регуляторов, формируемых связью, образующейся в результате взаимодействия подсистем через процесс резания.

9. Обоснование путей обеспечения устойчивости многообразия траекторий по п. 8 на основе выбора управления, а также параметров и конструктивных особенностей подсистем станка и параметров (например, геометрических) режущего инструмента.

10. Разработка нового класса систем динамического мониторинга состояния процесса резания и некоторых характеристик качества изготовления деталей на основе раскрытия эволюционной перестройки системы резания.

11. Изучение влияния неуправляемых возмущений, в том числе кинематических, действующих на процесс резания, во взаимосвязи с точностью обработки. Обоснование выбора геометрии режущего инструмента, при которых в данной динамической структуре станка и процесса резания минимизируется погрешность обработки.

12. Обоснование построения нового класса авторезонансных систем управления процессом обработки для улучшения процесса резания и повышения качества изготовления деталей.

Основные части работы

Математическое моделирование динамической системы резания

- Общий подход анализа
- Обоснование математических моделей
- Упрощенные модели

Результаты цифрового моделирования свойств подсистем «медленных» и «быстрых» движений

- Особенности преобразования траектории исполнительных элементов в траектории формообразующих движений
- Механизмы потери устойчивости подсистемы «быстрых» движений
- Бифуркация в пространстве параметров динамической системы

Динамическая перестройка в динамической системе резания

- Методы вычисления стационарной эволюционной траектории
- Особенности эволюционных преобразований в динамической системе резания
- Метод идентификации параметров и ядер интегральных параметров

Прикладное значение исследований

- Синергетическая концепция управления точностью обработки
- Обеспечение устойчивости траектории формообразующих движений
- Динамический мониторинг
- Вибрационное управление процессом резания

Обобщенная динамическая модель управляемой системы резания

1. Уравнения движений исполнительных элементов

$$T_{ЭМ}T_{Э}\frac{d^2\omega}{dt^2}=(c_e)^{-1}U(t)-(c_e)^{-1}U_M(S_P^{(0)},t_P^{(0)},X,T_P\frac{dX}{dt})-T_{ЭМ}\frac{d\omega}{dt}-\mathrm{E}\omega, \qquad (1.1)$$

где $T_{ЭМ}T_{Э}=\begin{bmatrix} T_{ЭМ}^{(1)}T_{Э}^{(1)} & 0 & 0 \\ 0 & T_{ЭМ}^{(3)}T_{Э}^{(3)} & 0 \\ 0 & 0 & T_{ЭМ}^{(4)}T_{Э}^{(4)} \end{bmatrix}$; $T_{ЭМ}=\begin{bmatrix} T_{ЭМ}^{(1)} & 0; & 0 \\ 0 & T_{ЭМ}^{(3)} & 0 \\ 0 & 0 & T_{ЭМ}^{(4)} \end{bmatrix}$ - диагональные матрицы,

составленные из постоянных времени трёх управляемых двигателей постоянного тока;

$\mathrm{E}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ - единичная диагональная матрица; $(c_e)^{-1}=\begin{bmatrix} (c_e^{(1)})^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & (c_e^{(3)})^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & (c_e^{(4)})^{-1} \end{bmatrix}$ - матрица,

составленная из коэффициентов противо ЭДС двигателей $c_e^{(i)}$; $U(t)=\{U_1(t),U_3(t),U_4(t)\}^T$ - вектор управления, который может быть задан и в координатах перемещения суппорта, тогда этот вектор определяет программу ЧПУ станка; $\omega=\{\omega_1,\omega_3,\omega_4\}^T$ - вектор частот вращения роторов двигателей; $U_M=\{U_M^{(1)},U_M^{(3)},U_M^{(4)}\}^T$ - вектор функция моментов сопротивления вращения роторов, приведённых к электрическим частям двигателей; $T_{ЭМ}^{(i)}=\frac{J_iR_i}{c_e^{(i)}c_M^{(i)}}, i=1,3,4$; $T_{Э}^{(i)}=\frac{L_i}{R_i}, i=1,3,4$; $c_M^{(i)}, R_i, L_i$ - параметры двигателей; J_i - моменты инерции приводов, приведённые к роторам двигателей; $X=\{X_1,X_2,X_3,X_4,X_5,X_6\}^T$ - упругие деформационные смещения вершины инструмента (первые три координат) и заготовки.

Обобщенная динамической модель управляемой системы резания

2. Уравнения динамики подсистемы инструмента и заготовки

$$m\frac{d^2X}{dt^2}+h\frac{dX}{dt}+cX=F(S_P^{(0)},t_P^{(0)},X,T_P\frac{dX}{dt}) \qquad (1.2)$$

где $X=\{X_1,X_2,X_3,X_4,X_5,X_6\}^T$ упругие деформационные смещения соответственно вершины инструмента по отношению к суппорту (первые три координат) и заготовки по отношению к идеальному центру её вращения в точке контакта инструмента с заготовки (последние три координат);

$$m=\begin{bmatrix} m_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & m_2(l) \end{bmatrix};\ h=\begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & 0 \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & h_{6,6}(l) \end{bmatrix};c=\begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,2} & \cdots & 0 \\ c_{2,1} & c_{2,2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & c_{6,6}(l) \end{bmatrix}\text{-}$$

положительно определенные симметричные матрицы инерционных, диссипативных и упругих коэффициентов инструмента и заготовки;

$F=\{F_1(S_P^{(0)},t_P^{(0)},X,T_P\frac{dX}{dt}),F_2(S_P^{(0)},t_P^{(0)},X,T_P\frac{dX}{dt}),\cdots,F_6(S_P^{(0)},t_P^{(0)},X,T_P\frac{dX}{dt})\}^T$ - динамическая связь, формируемая процессом резания, раскрывает зависимость сил от технологических режимов и упругих деформационных смещений инструмента относительно заготовки.

Построение иерархии системы дифференциальных уравнений

Представим уравнения в системе (1.2) в следующем виде

$$(T)^2 \frac{d^2X}{dt^2} + 2\xi T \frac{dX}{dt} + c^{(\tau)} X = c_0^{-1} F(S_P^{(0)}, t_P^{(0)}, X, T_P \frac{dX}{dt}) \qquad (1.3)$$

где $(T)^2 = \begin{bmatrix} (T_1)^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & (T_2)^2 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & (T_6)^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{m_1}{c_{1,1}} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{m_1}{c_{2,2}} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{m_2}{c_{6,6}} \end{bmatrix}$; $c_0^{-1} = \begin{bmatrix} (c_{1,1})^{-1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & (c_{2,2})^{-1} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & (c_{6,6})^{-1} \end{bmatrix}$;

$$2\xi T = \begin{bmatrix} 2\xi_{1,1}T_1 & 2\xi_{2,1}T_1 & \cdots & 0 \\ 2\xi_{1,2}T_2 & 2\xi_{2,2}T_2 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 2\xi_{6,6}T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{h_{1,1}}{c_{1,1}} & \frac{h_{2,1}}{c_{1,1}} & \cdots & 0 \\ \frac{h_{1,2}}{c_{2,2}} & \frac{h_{2,2}}{c_{2,2}} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{h_{6,6}}{c_{6,6}} \end{bmatrix}; \; c^{(\tau)} = \left[c_{s,k}^{(\tau)}\right]_{s,k=1,2,\ldots,6} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{c_{2,1}}{c_{1,1}} & \cdots & 0 \\ \frac{c_{1,2}}{c_{2,2}} & 1 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix}.$$

Построение иерархии системы дифференциальных уравнений

В системах (1.1 и 1.3) перейдём к безразмерному времени на основе замены $t=\sqrt{T_{ЭМ}^{(1)}T_{Э}^{(1)}}\cdot\tau$, тогда имеем

$$\mathrm{T}_{ЭМ}\mathrm{T}_{Э}\frac{d^2\omega}{d\tau^2}=\frac{1}{c_e}U_{\Sigma}-\frac{\mathrm{T}_{ЭМ}}{\sqrt{\mathrm{T}_{ЭМ}\mathrm{T}_{Э}}}\frac{d\omega}{d\tau}-\mathrm{E}\omega, \qquad (1.4)$$

где $\mathrm{T}_{ЭМ}\mathrm{T}_{Э}=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \dfrac{T_{ЭМ}^{(3)}T_{Э}^{(3)}}{T_{ЭМ}^{(1)}T_{Э}^{(1)}} & 0\\ 0 & 0 & \dfrac{T_{ЭМ}^{(4)}T_{Э}^{(4)}}{T_{ЭМ}^{(1)}T_{Э}^{(1)}}\end{bmatrix}$; $\dfrac{\mathrm{T}_{ЭМ}}{\sqrt{\mathrm{T}_{ЭМ}\mathrm{T}_{Э}}}=\begin{bmatrix}\dfrac{T_{ЭМ}^{(1)}}{(T_{ЭМ}^{(1)}T_{Э}^{(1)})^{0,5}} & 0 & 0\\ 0 & \dfrac{T_{ЭМ}^{(3)}}{(T_{ЭМ}^{(1)}T_{Э}^{(1)})^{0,5}} & 0\\ 0 & 0 & \dfrac{T_{ЭМ}^{(4)}}{(T_{ЭМ}^{(1)}T_{Э}^{(1)})^{0,5}}\end{bmatrix}$;

$$\frac{1}{c_e}=\begin{bmatrix}(c_e^{(1)})^{-1} & 0 & 0\\ 0 & (c_e^{(3)})^{-1} & 0\\ 0 & 0 & (c_e^{(4)})^{-1}\end{bmatrix};\ U_{\Sigma}=\{(U_1-U_M^{(1)}),(U_3-U_M^{(3)}),(U_4-U_M^{(4)})\}^T$$

Построение иерархии системы дифференциальных уравнений

Кроме того, вместо системы (1.3) имеем

$$(T)^2 / T_{ЭМ}^{(1)} T_{Э}^{(1)} \frac{d^2 X}{d\tau^2} + 2\xi T / \sqrt{T_{ЭМ}^{(1)} T_{Э}^{(1)}} \frac{dX}{d\tau} + c^{(\tau)} X = c_0^{-1} F, \qquad (1.5)$$

где $(T)^2 / T_{ЭМ}^{(1)} T_{Э}^{(1)} = \begin{bmatrix} (T_1)^2 / T_{ЭМ}^{(1)} T_{Э}^{(1)} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & (T_2)^2 / T_{ЭМ}^{(1)} T_{Э}^{(1)} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & (T_3)^2 / T_{ЭМ}^{(1)} T_{Э}^{(1)} \end{bmatrix}$ и

$2\xi T / \sqrt{T_{ЭМ}^{(1)} T_{Э}^{(1)}} = \begin{bmatrix} 2\xi_{1,1} T_1 / \sqrt{T_{ЭМ}^{(1)} T_{Э}^{(1)}} & 2\xi_{2,1} T_1 / \sqrt{T_{ЭМ}^{(1)} T_{Э}^{(1)}} & \cdots & 0 \\ 2\xi_{1,2} T_2 / \sqrt{T_{ЭМ}^{(1)} T_{Э}^{(1)}} & 2\xi_{2,2} T_2 / \sqrt{T_{ЭМ}^{(1)} T_{Э}^{(1)}} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 2\xi_{6,6} T_6 / \sqrt{T_{ЭМ}^{(1)} T_{Э}^{(1)}} \end{bmatrix}$ - матрицы малых параметров, так как $T_i << \sqrt{T_{ЭМ}^{(1)} T_{Э}^{(1)}}$, $i = 1,2,3$;

$F = F(S_P^{(0)}, t_P^{(0)}, X(t), \frac{T_P}{(T_{ЭМ}^{(1)} T_{Э}^{(1)})^{0,5}} \frac{dX(t)}{dt})$; где величина $\frac{T_P}{(T_{ЭМ}^{(1)} T_{Э}^{(1)})^{0,5}}$ - также является малой.

Построение иерархии системы дифференциальных уравнений

Согласно Л.С. Понтрягину и А.Н. Тихонову вместо рассмотрения системы (1.4) и (1.5) рассматриваются подсистема «медленных» движений

$$\begin{cases} T_{ЭМ}T_{Э}\dfrac{d^2\omega}{dt^2} = (c_e)^{-1}U(t) - (c_e)^{-1}U_M(S_P^{(0)}, t_P^{(0)}, X(t), 0,) - T_{ЭМ}\dfrac{d\omega}{dt} - \mathrm{E}\omega \\ cX = F(S_P^{(0)}, t_P^{(0)}, X(t), 0) \end{cases} \qquad (1.6)$$

и подсистема «быстрых» движений

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + h\frac{dx}{dt} + cx = \varphi[S_P^{(0)}, t_P^{(0)}, X^*(t), x(t), T_P\frac{dx(t)}{dt}], \qquad (1.7)$$

где $S_P^{(0)}, t_P^{(0)}, X^*(t)$ - решения подсистемы «медленных» движений, являющиеся параметрами подсистемы «быстрых» движений; $\varphi = \{\varphi_1, \varphi_2, ..., \varphi_6\}^T$, $\varphi_i[S_P^{(0)}, t_P^{(0)}, X^*(t), x(t), T_P\frac{dx(t)}{dt}]$ $= F_i[S_P^{(0)}, t_P^{(0)}, X^*(t) + x(t), T_P\frac{dx(t)}{dt}] - F_i[S_P^{(0)}, t_P^{(0)}, X^*(t), 0]$, $i = 1,2,...,6$ - нелинейная функция, рассматривающая вариации сил резания, обусловленные упругими деформационными смещениями в вариациях относительно заданных траекторий $X^*(t)$, зависящих от $S_P^{(0)}$, $t_P^{(0)}$. Кроме того $\varphi[S_P^{(0)}, t_P^{(0)}, X^*(t), x(t), T_P\frac{dx(t)}{dt}] = 0$ при $x(t)=0$.

Идентификация параметров системы и динамической связи, формируемой процессом резания

Математическая модель подсистем инструмента и заготовки

$$m(X)\frac{d^2X}{dt^2}+h(X)\frac{dX}{dt}+c(X)X=F(X,S_P,t_P)+f(t), \qquad (1.8)$$

где $F=\{F_1(X,S_P,t_P),F_2(X,S_P,t_P),...,F_6(X,S_P,t_P)\}^T$ - вектор – функции, раскрывающие зависимость сил резания от упругих деформационных смещений инструмента и заготовки, и от технологических режимов: величины подачи на оборот S_P и глубины резания t_P при заданной скорости;

$X=\{X_1,X_2,...,X_6\}^T$ - вектор упругих деформационных смещений вершины инструмента (первые три координаты) и заготовки в точке контакта с ней режущего инструмента (последние три координаты);

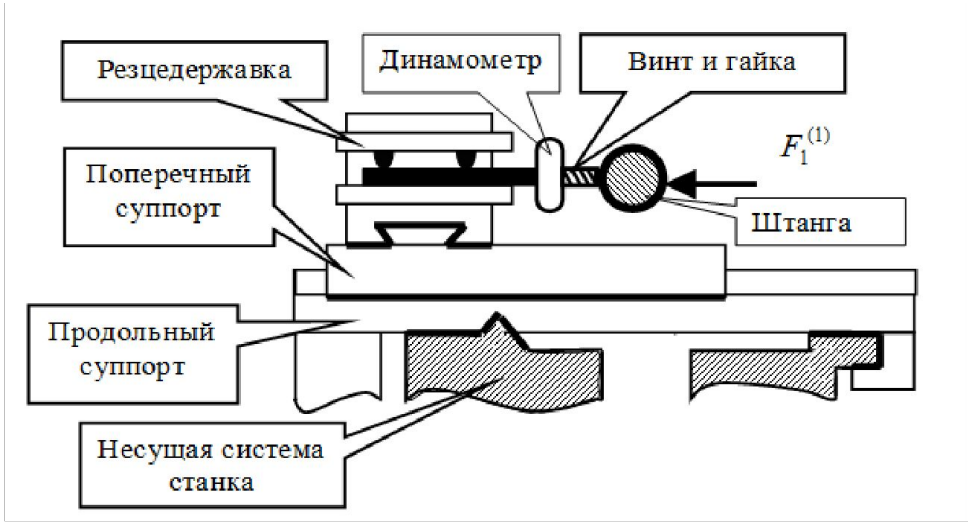
$f(t)=\{f_1(t),f_2(t),...,f_6(t)\}^T$ - изменяющиеся во времени составляющие сил резания, которые интерпретируются как шум; $m(X)=\left[m_{s,k}(X)\right]$, $h(X)=\left[h_{s,k}(X)\right]$, $c(X)=\left[c_{s,k}(X)\right]$, $s,k=1,2,...6$ - соответственно функциональные матрицы инерционных и диссипативных коэффициентов, а также функциональная матрица формирования упругой составляющей сил в зависимости от вектора деформационных смещений и технологических режимов.

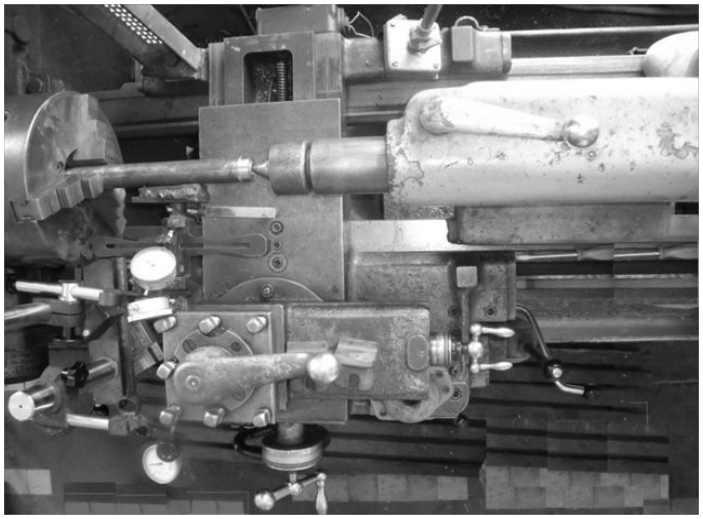
Уравнение в вариациях относительно точки равновесия X^*в линеаризованном виде

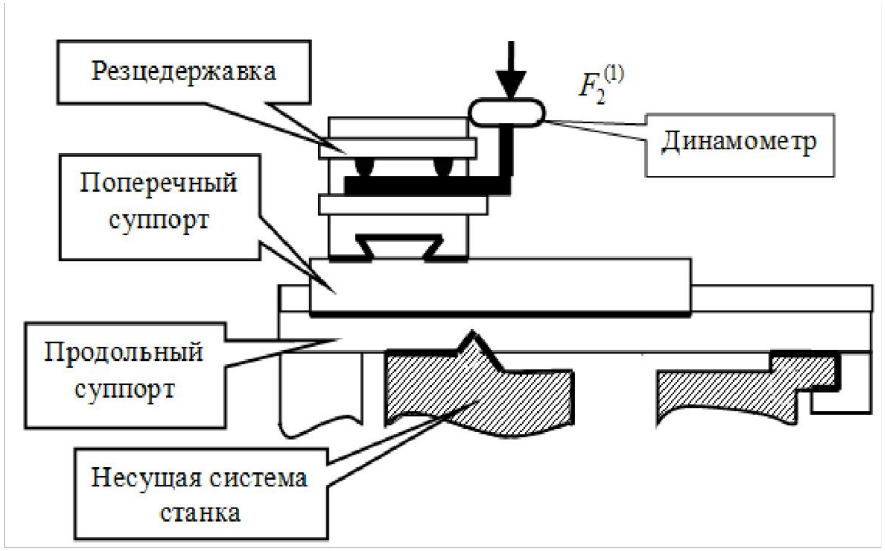
$$m(X^*)\frac{d^2x}{dt^2}+[h(X^*)+h^{(p)}(X^*,S_P,t_P)]\frac{dx}{dt}+[c(X^*)+c^{(p)}(X^*,S_P,t_P)]x=f(t) \qquad (1.9)$$

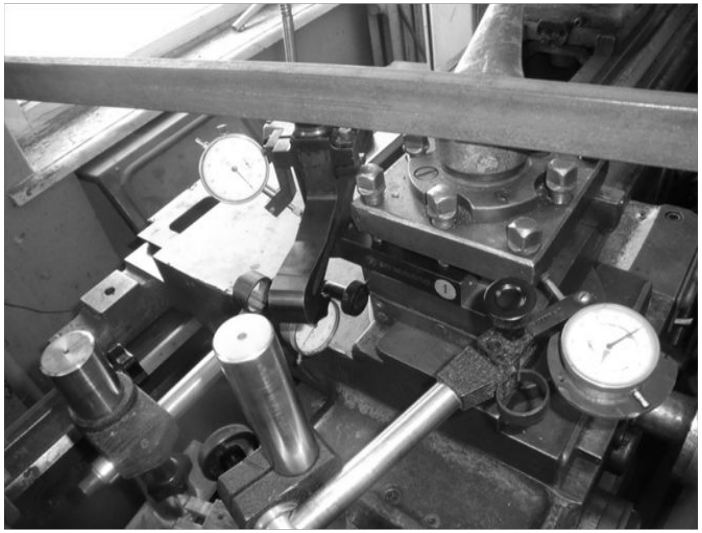
где $c^{(p)}=\left(\partial\varphi_s/\partial x_k\right)$, $h^{(p)}=\left(\partial\varphi_s/\partial\dot{x}_k\right)$, $s,k=1,2,...,6$ матрицы динамической жесткости и диссипации процесса резания; $\varphi_s(X^*,x,\frac{dx}{dt})=F_s(X^*+x,S_p,t_p)-F_s(X^*,S_p,t_p)$, $s=1,2,...,6$ $\varphi_s(0)=0$.

Общий вид экспериментальной установки









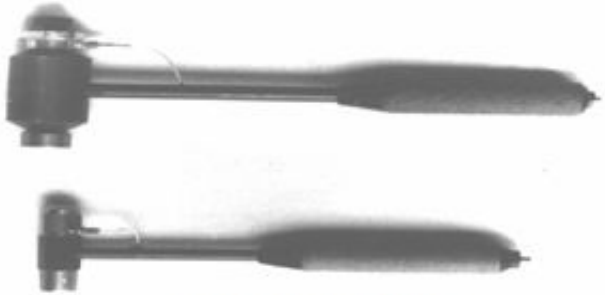
Структурная схема измерения деформацией суппорта
при действии рабочей силы по горизонтальному и вертикальному направлениям

Общий вид экспериментальной установки

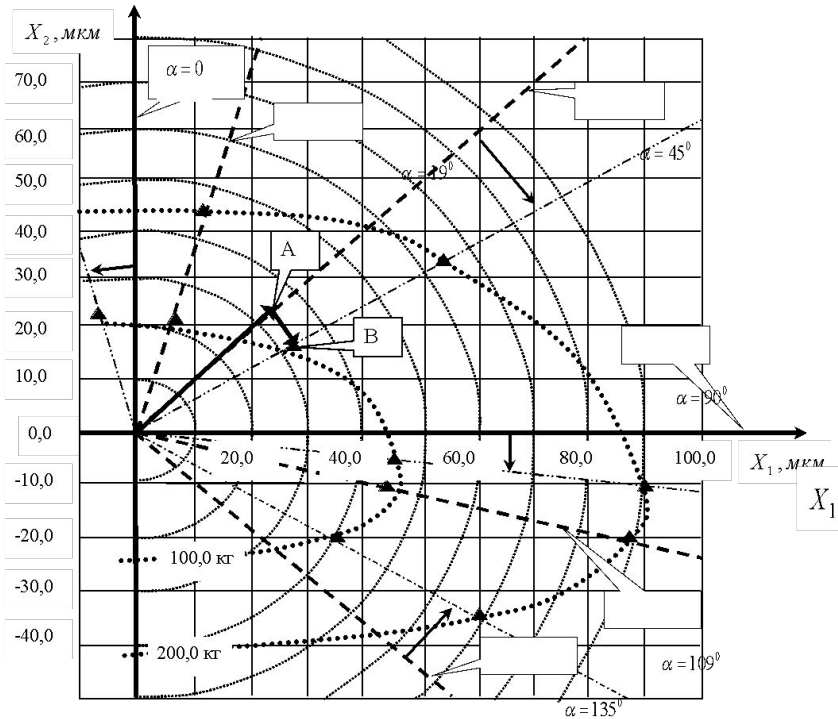
Общий вид экспериментальной установки

Крепление пьезоакселерометров на резце при проведении экспериментов

Внешний модуль АЦП E14-440

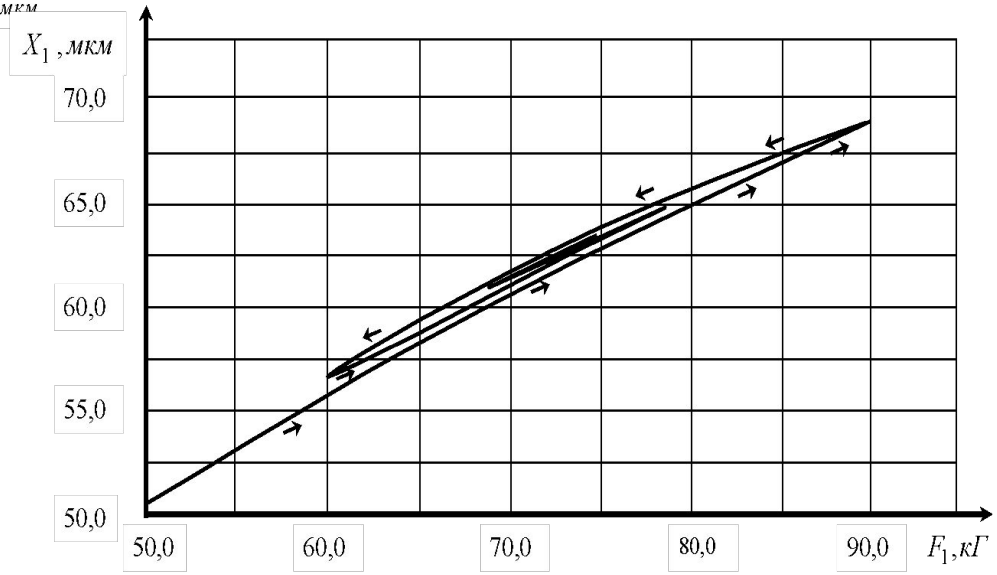


Вибромолотки



«а»

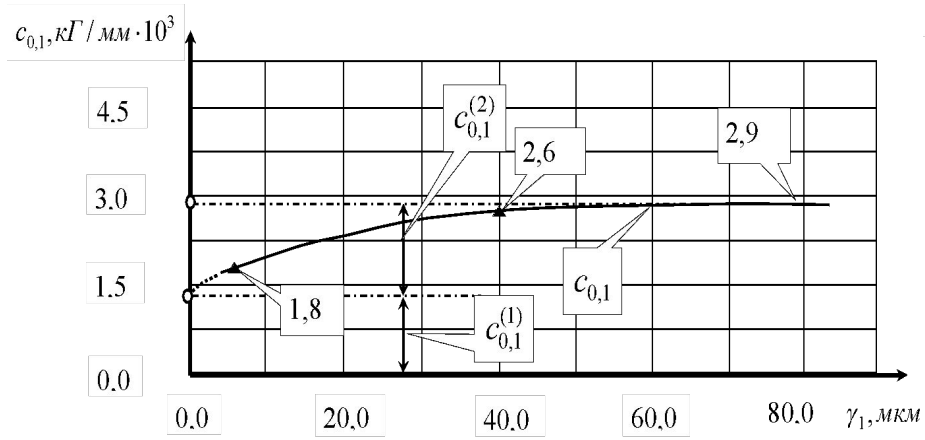
Типичная диаграмма суммарных смещений вершины режущего инструмента в зависимости от направления и модуля внешней силы

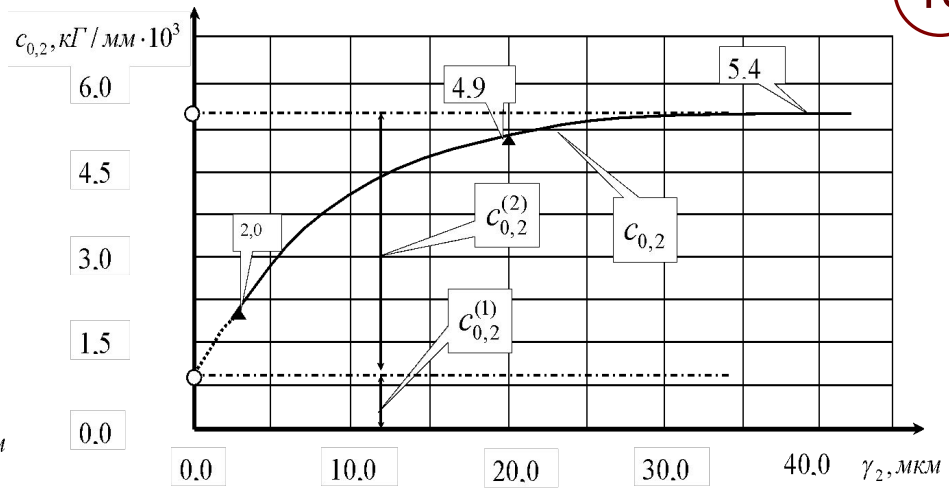


«б»

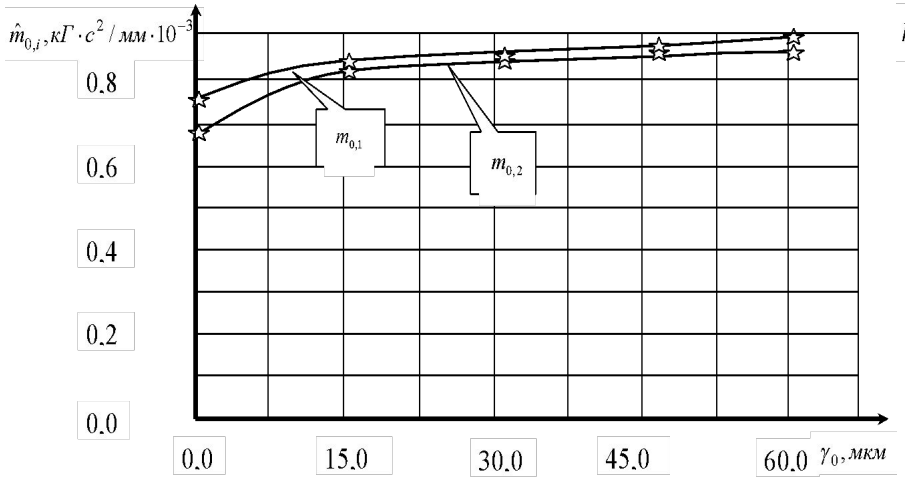
Типичная диаграмма изменения смещений вершины инструмента при варьировании внешней силы $\{F_1, 0\}$ при повторных изменениях внешней силы

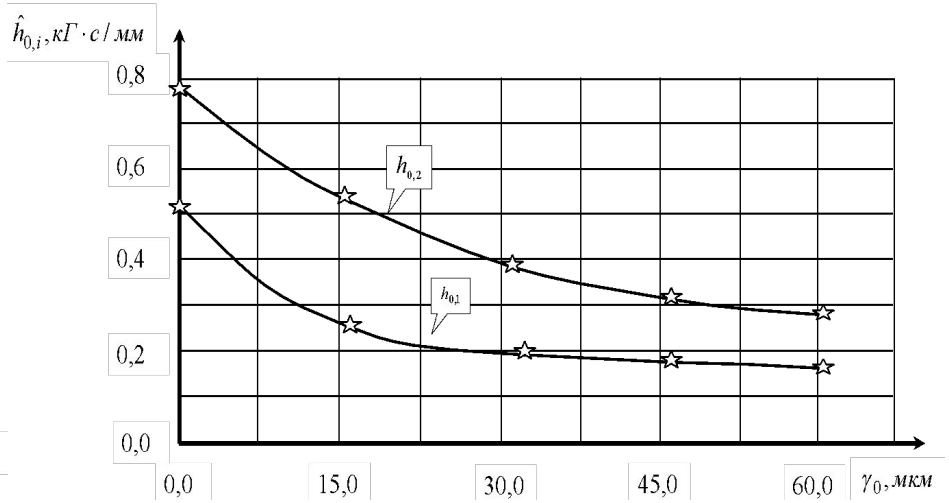
Идентификация параметров подсистем инструмента без процесса резания





Зависимость элементов матриц жёсткости деформационных смещений вершины инструмента по направлениям ориентации эллипсов жёсткости в зависимости от деформационных смещений по этим же направлениям

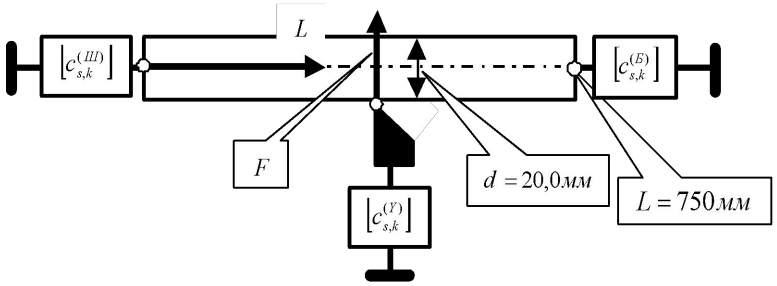


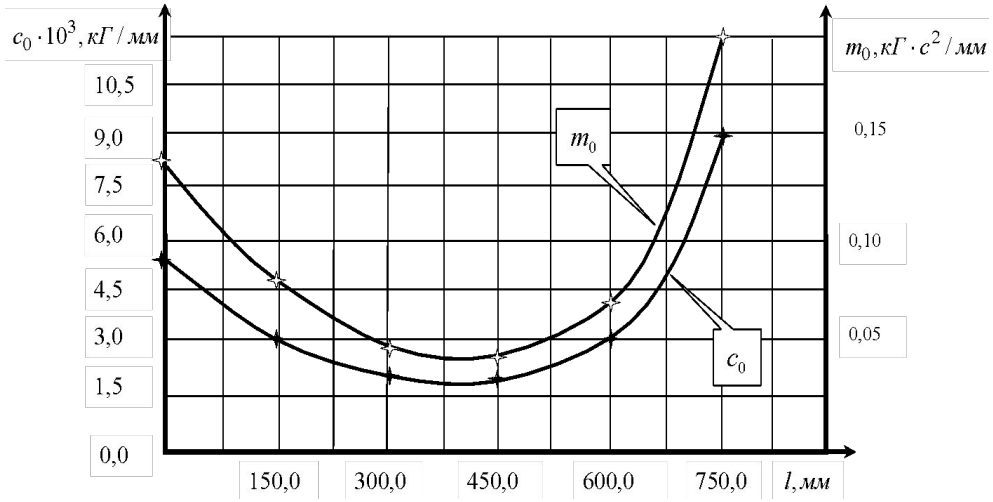


«а» «б»

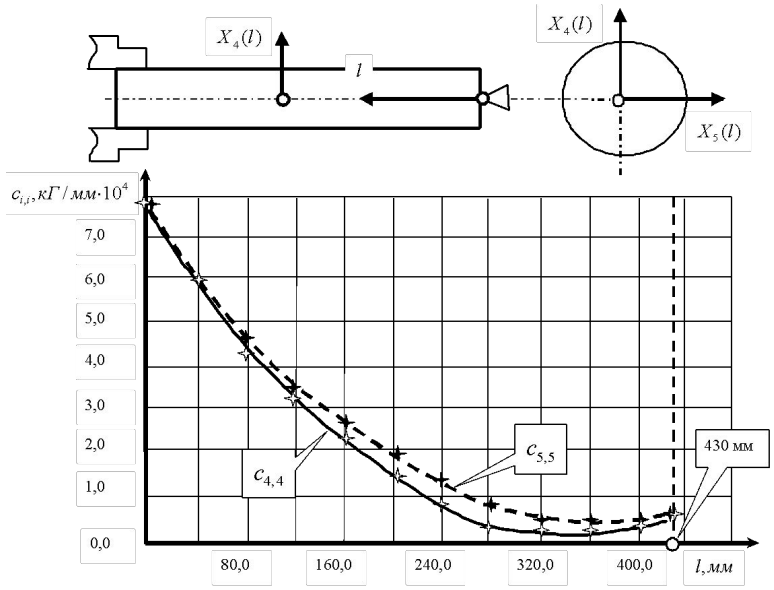
Изменение обобщённых масс «а» и обобщённых коэффициентов демпфирования подсистемы инструмента при смещении точки равновесия системы

Идентификация параметров подсистем заготовки без процесса резания

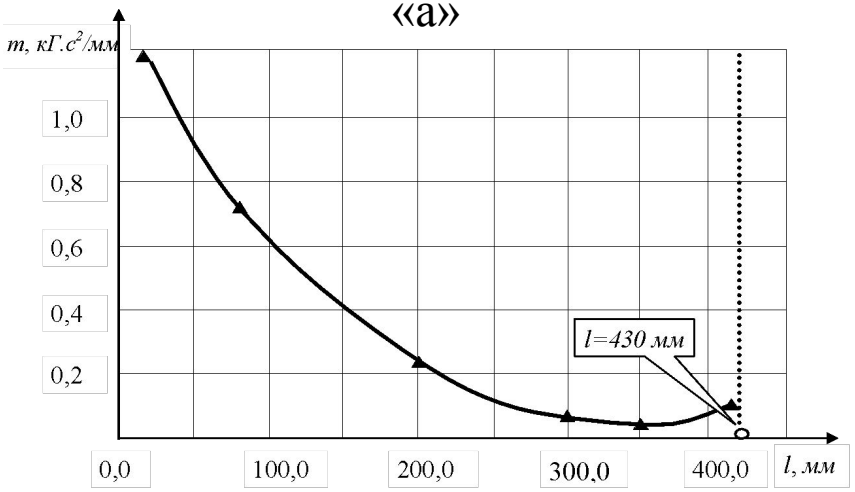




Изменения приведенных коэффициентов жёсткости и массы в зависимости от координаты вдоль оси вращения заготовки

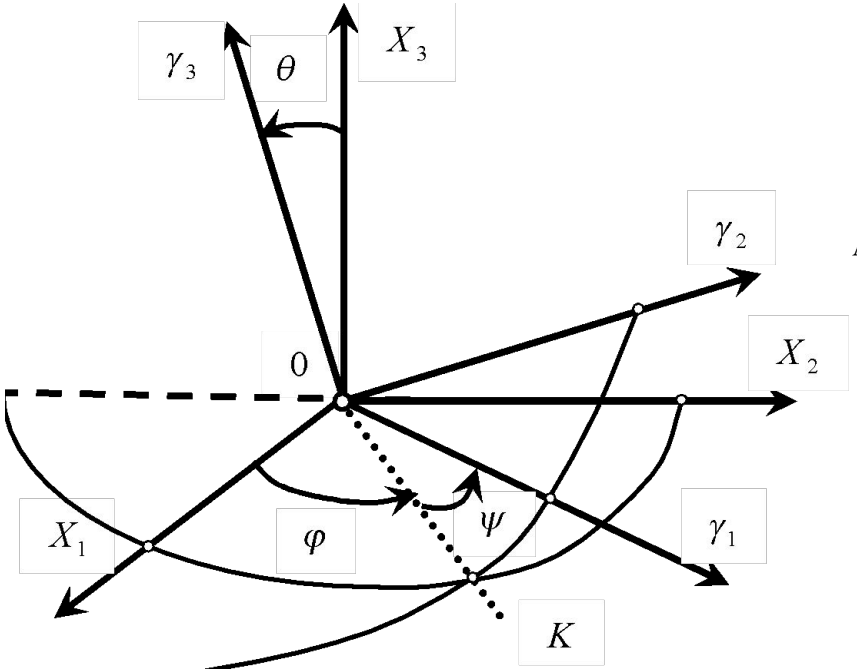


«а»



«б»

Изменение диагональных элементов матрицы жесткости заготовки «а» и обобщенных масс «б» вдоль координат обработки при установке заготовки в патроне с поджимом задним центром



Система координат, в которой отчитывается упругое деформационное смещение и внешние силы в пространстве

Матрица поворота

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\psi - \sin\varphi\cos\theta\sin\psi & -\cos\varphi\sin\psi - \sin\varphi\cos\theta\cos\psi & \sin\varphi\sin\theta \\ \sin\varphi\cos\psi + \cos\varphi\cos\theta\sin\psi & -\sin\varphi\sin\psi + \cos\varphi\cos\theta\cos\psi & -\cos\varphi\sin\theta \\ \sin\theta\sin\psi & \sin\theta\cos\psi & \cos\theta \end{bmatrix};$$

где φ, θ, ψ - углы Эйлера, определяются:

$$\begin{cases} \theta = \arccos e_{3,3} \\ \varphi = \arcsin\left(\dfrac{e_{3,1}}{\sqrt{1-(e_{3,3})^2}}\right) \\ \psi = \arcsin\left(\dfrac{e_{1,3}}{\sqrt{1-(e_{3,3})^2}}\right) \end{cases}$$

где e^1, e^2, e^3 - нормированные собственные векторы матрицы жесткости

Связь матриц коэффициентов в двух системах координат

$$c^{(\gamma)} = \Lambda^{-1} c \Lambda$$

$c^{(\gamma)}$ -диагональная матрица

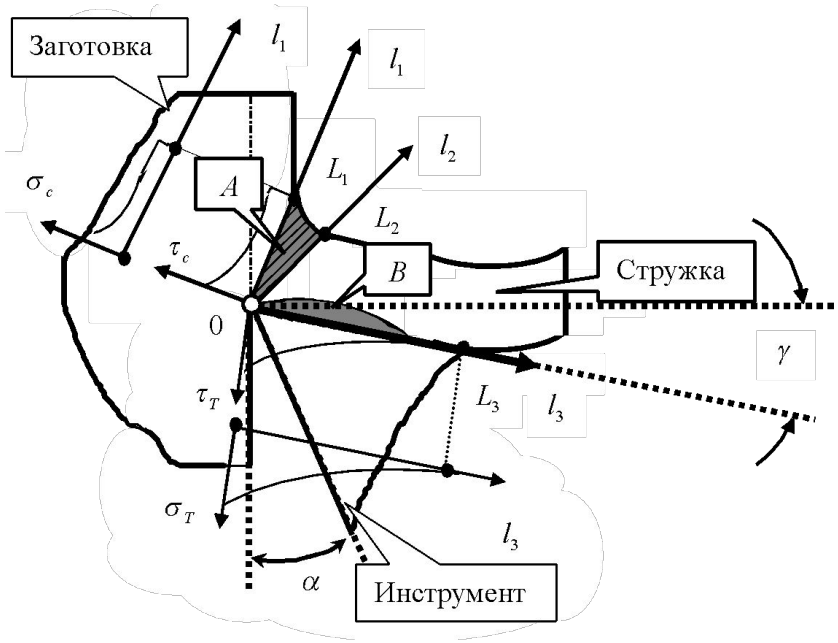


Схема формирования зон первичной и вторичной пластической деформации при свободном резании

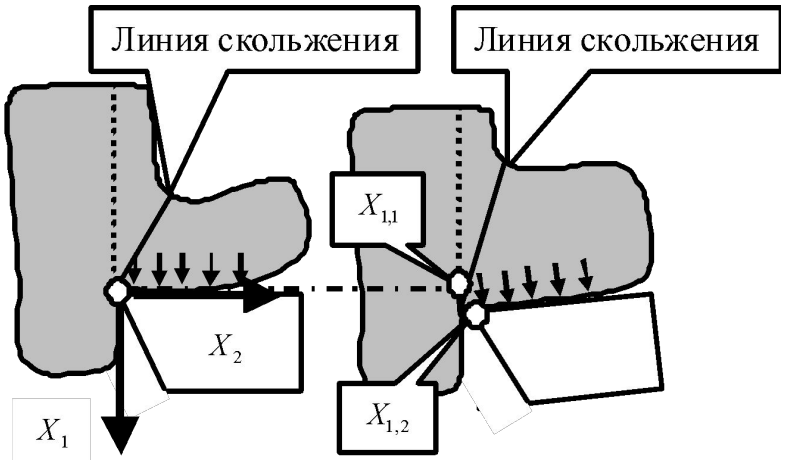


Схема изменения условной линии скольжения в области первичной пластической деформации при изгибе инструмента

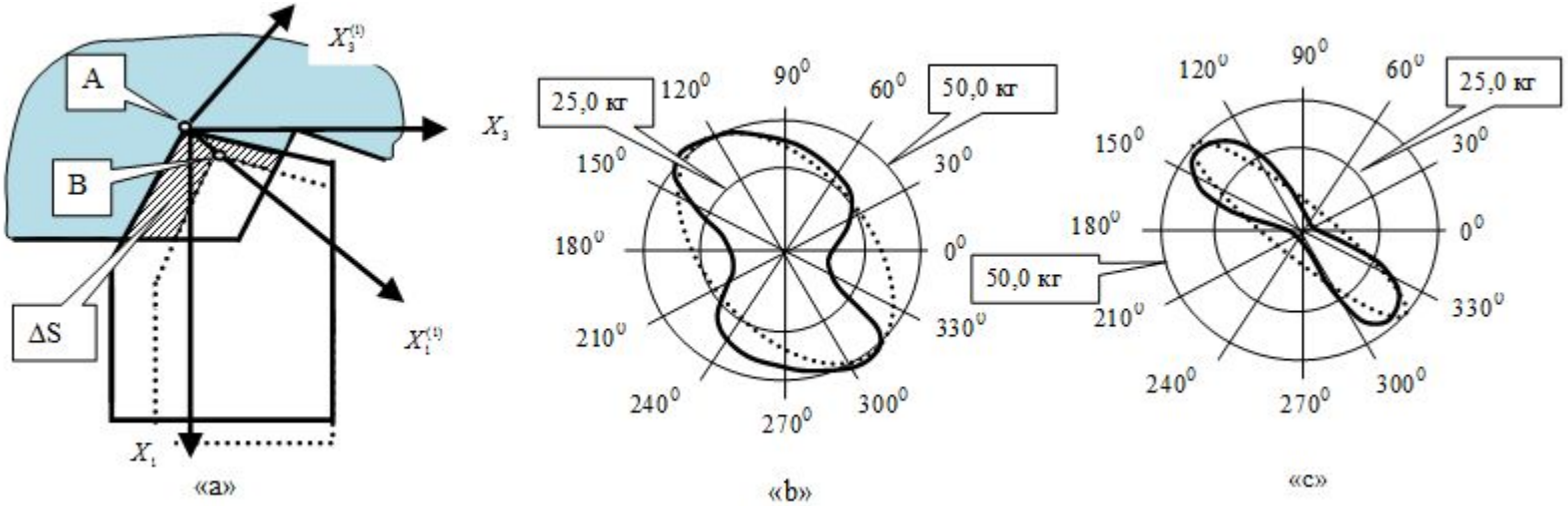


Схема оценивания вариаций сил и деформационных смещений в плоскости (X_1, X_3)

Особенности преобразования упругих деформационных смещений в вариации сил резания

На приращение сил оказывает влияние объем пластической деформации

Изменение объема пластической деформации зависит от направления деформационных смещений

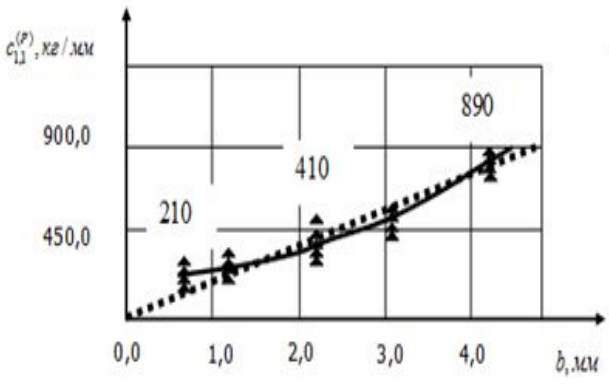
Существует запаздывание вариаций составляющих сил по отношению к вариациям деформационных смещений

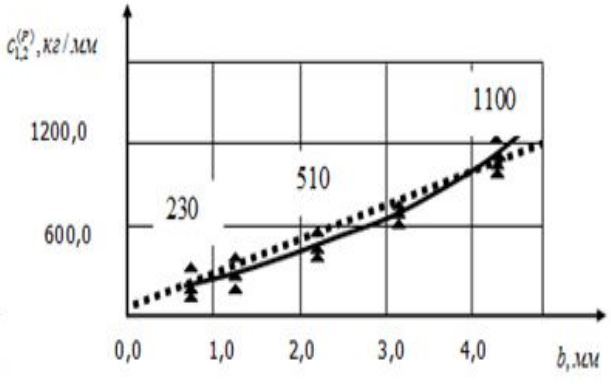
Вариации сил, действующих в отжимающем направлении запаздывают по отношению к изменениям сил тангенциального направления

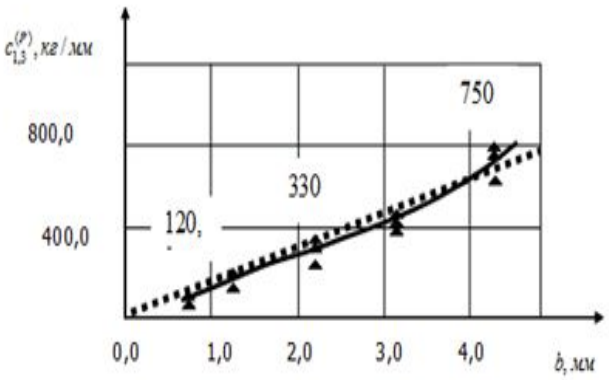
По мере увеличения скорости или тангенциальных колебательных скоростей изменяются силы (скоростной фактор)

Существуют факторы ограничивают развитие периодических составляющих сил, например, за счет контакта задней грани инструмента с обработанной поверхностью заготовки

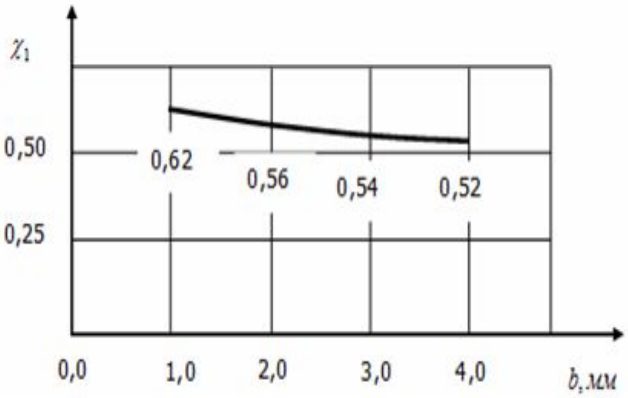
Идентификация параметров динамической связи, формируемой процессом резания

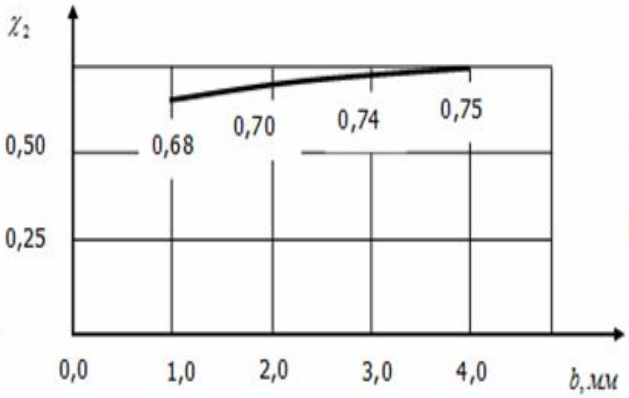


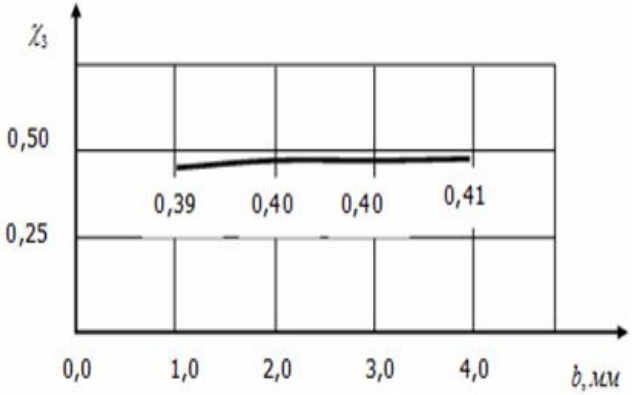




Пример изменения элементов матрицы жёсткости процесса резания при изменении ширины срезаемого слоя: Величина подачи на оборот $S_p^{(0)} = 0{,}05\,мм/об$, скорость резания $V_p^{(0)} = 1{,}0\,м/с$. процесс точения стали 20Х инструментами из Т15К6. Геометрические параметры инструмента: $\varphi = 60^0$, $\lambda = 0^0$, $\alpha = 2^0$, $\gamma = 2^0$, радиус при вершине инструмента $r = 1{,}0\,мм$

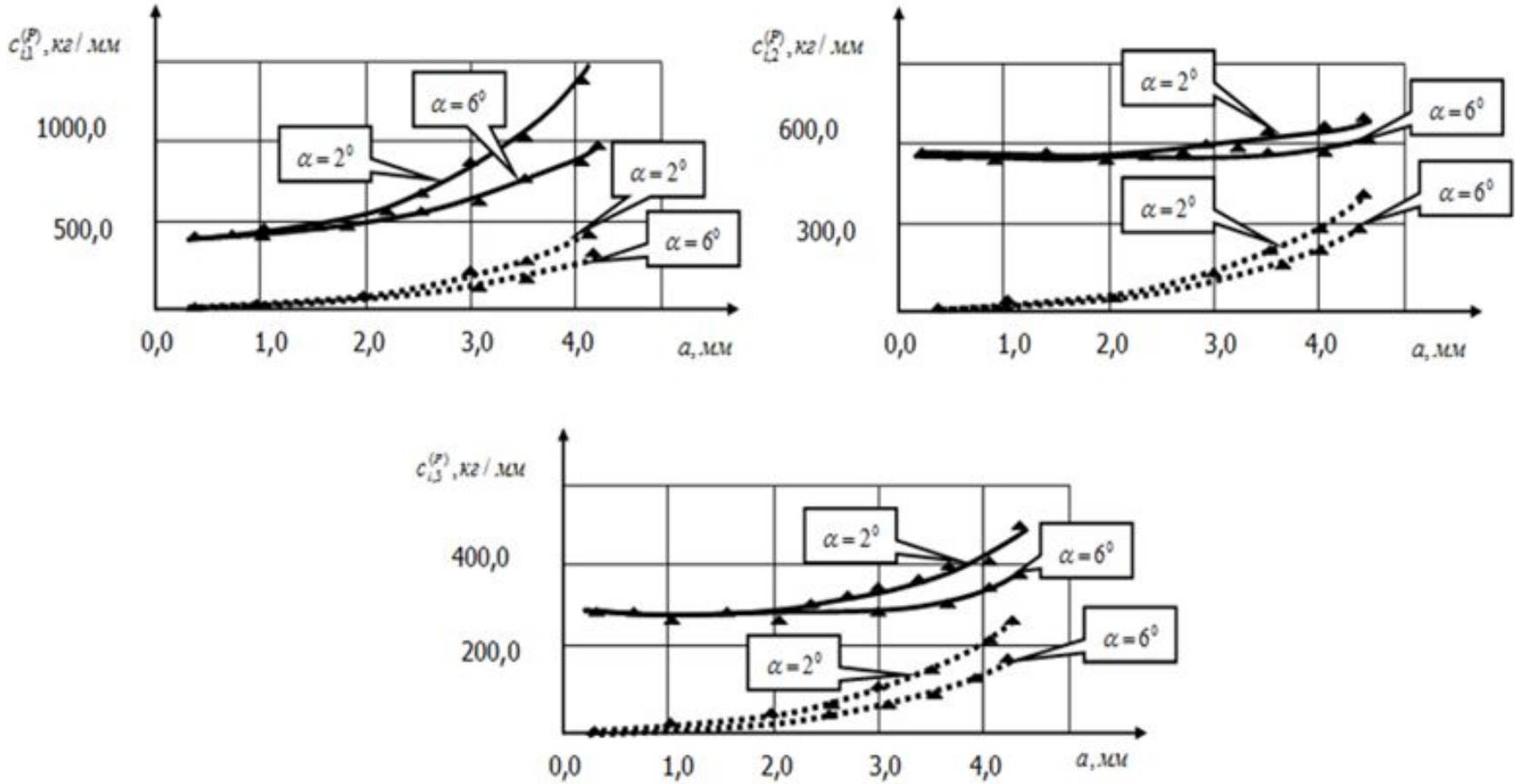






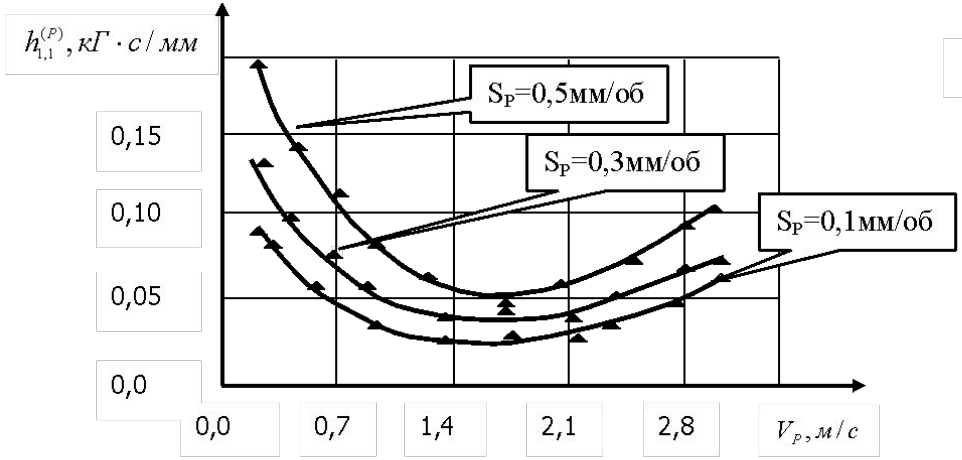
Пример изменения угловых коэффициентов ориентации силы резания

Идентификация параметров динамической связи, формируемой процессом резания

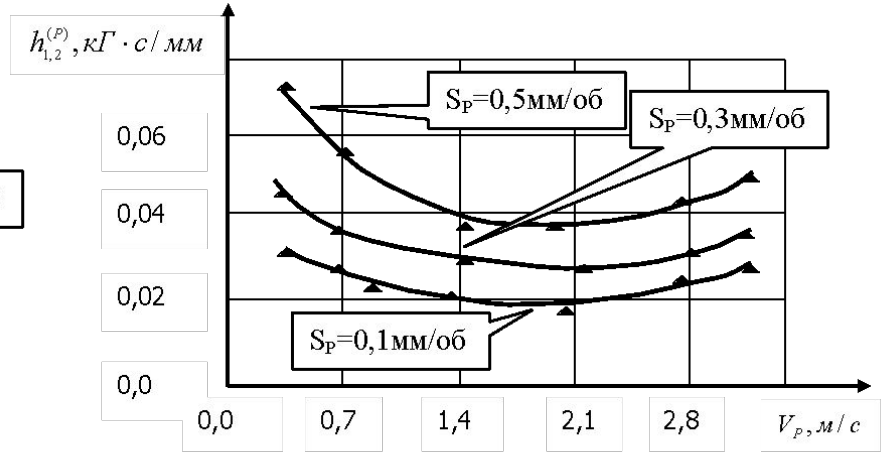


Пример изменения элементов матрицы жёсткости процесса резания при изменении толщины срезаемого слоя: Глубина резания $t_p^{(0)} = 2мм$, скорость резания $V_p^{(0)} = 1{,}0 м/с$. процесс точения стали 20Х инструментами из Т15К6. Геометрические параметры инструмента: $\varphi = 60^0$, $\lambda = 0^0$, $\alpha = 2^0$, $\gamma = 2^0$, радиус при вершине инструмента $r = 1{,}0мм$

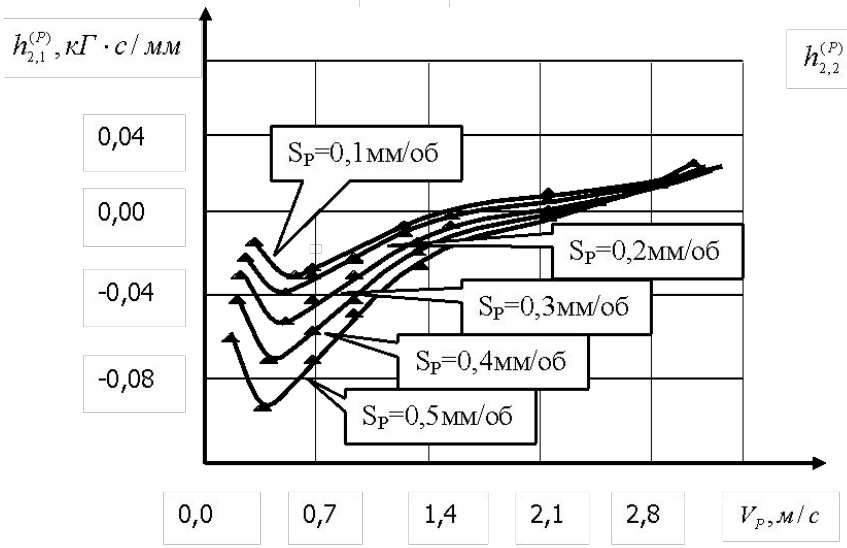
Идентификация параметров динамической связи, формируемой процессом резания



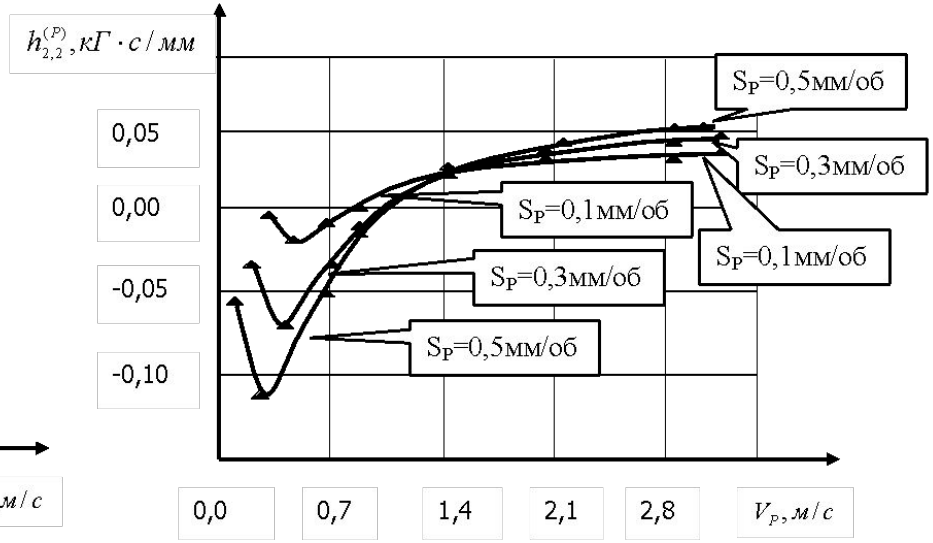
«a»



«b»



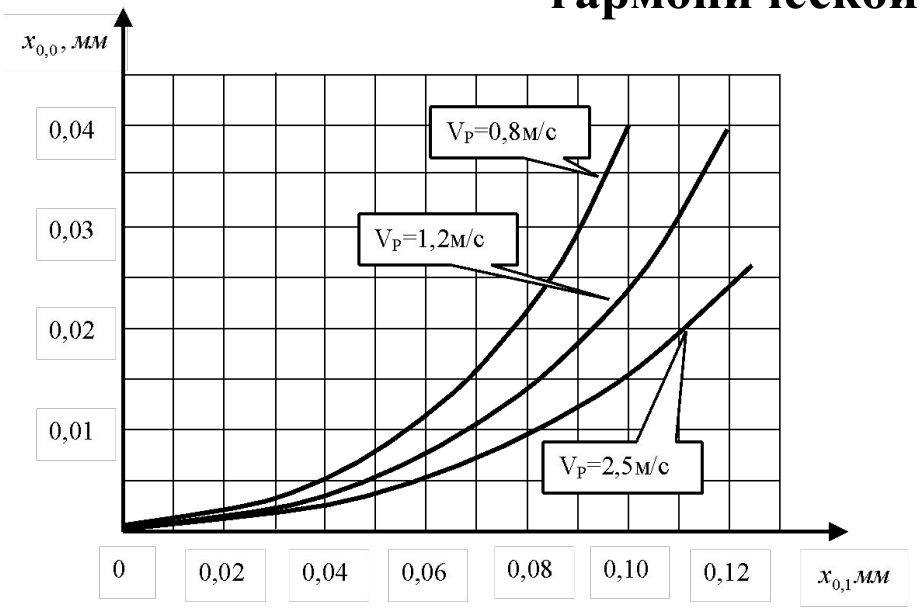
«c»



«d»

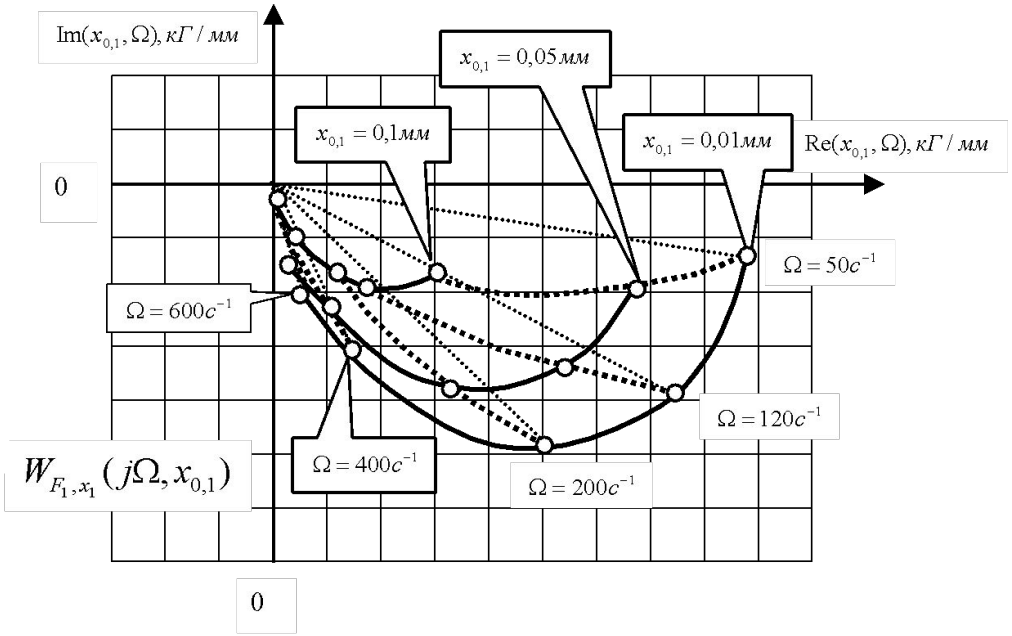
Изменения элементов матрицы скоростных коэффициентов в зависимости от скорости резания: процесс точения стали 20Х инструментами из Т15К6. Геометрические параметры инструмента: $\varphi = 60^0$, $\lambda = 10^0, \alpha = 2^0, \gamma = 0^0$, радиус при вершине инструмента $r = 1{,}0 мм$

Оценивание нелинейности динамической связи методом гармонической линеаризации



Пример изменения динамического смещения условной точки равновесия в зависимости от амплитуды при различных скоростях резания. Точение стали 20Х на режимах: величина подачи на оборот $S_P = 0{,}14мм$; глубина резания $t_P = 2{,}5мм$ Частота колебаний равна 200,0 Гц

Пример годографов гармонически линеаризованных функций влияния колебательных смещений инструмента на проекции сил резания в плоскости. Точение стали 20Х на режимах: скорость резания $V_P = 1{,}2м/с$; величина подачи на оборот $S_P = 0{,}14мм$; глубина резания $t_P = 2{,}5мм$



Основные особенности динамической связи, формируемой в зоне резания

1. Матрицы динамической жесткости и скоростных коэффициентов, характеризующих линеаризованные характеристики процесса резания в окрестности точки равновесия динамической системы резания, зависят от текущих значений технологических режимов. В свою очередь, текущие значения технологических режимов определяются траекториями исполнительных элементов станка и установившимися значениями упругих деформационных смещений, рассматриваемых в подвижной системе координат, задаваемой траекторией исполнительных элементов.

2. При варьировании упругих деформационных смещений относительно точки равновесия имеет место запаздывание вариаций сил по отношению к вариациям упругих деформационных смещений. Это обусловлено тем, что при переходе из одного стационарного состояния к другому происходит процесс изменения распределения напряжений и деформаций в зонах первичной и вторичной пластической деформации.

3. Во всех случаях отмечается, что вариации сил, действующих в отжимающем направлении, запаздывают по отношению к вариациям сил, действующих в тангенциальном направлении.

4. В зависимости от формы колебаний инструмента, прежде всего, существуют или нет изгибные деформационные смещения инструмента, структура матрицы динамической жесткости изменяется. При малых изгибных колебаний в матрице динамической жесткости значимым является первый столбец. В противном случае, силы являются зависящими также от деформационных смещений в направлении скорости резания.

5. По мере увеличения амплитуды периодических движений в вариациях относительно точки равновесия изменяется фазовый сдвиг между силами и деформациями, что свидетельствует о нелинейности динамической связи, формируемой процессом резания.

6. По мере увеличения амплитуды периодических движений формируется постоянные составляющие деформационного смещения в зависимости от амплитуды, следовательно, нелинейные функции, моделирующие зависимость сил от деформационных смещений не должны обладать свойством центральной симметрии.

Упрощенные базовые модели динамики процесса резания

1. Первая базовая модель

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2X_1}{dt^2}+h_{1,1}\dfrac{dX_1}{dt}+h_{2,1}\dfrac{dX_2}{dt}+c_{1,1}X_1+c_{2,1}X_2=\chi_1\rho\cdot b\cdot(a-Y_1)+\Phi_1^{(1)}(0)\cdot e^{-\frac{dX_1/dt}{T_3}} \\ m\dfrac{d^2X_2}{dt^2}+h_{1,2}\dfrac{dX_1}{dt}+h_{2,2}\dfrac{dX_2}{dt}+c_{1,2}X_1+c_{2,2}X_2=\chi_2\rho\cdot b\cdot(a-Y_2)+\alpha_1[\dfrac{dX_2}{dt}-\alpha_2(\dfrac{dX_2}{dt})^3] \\ T_1\dfrac{dY_1}{dt}+Y_1=X_1 \\ T_2\dfrac{dY_1}{dt}+Y_2=X_1 \end{cases} \qquad (1.10)$$

2. Вторая базовая модель

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2X}{dt^2}+h_\Sigma\dfrac{dX}{dt}+c_\Sigma X=F_0^{(1)}+F^{(2)} \\ T_{P,1}\dfrac{dF_1^{(2)}}{dt}+F_1^{(2)}=\rho_1(X_2)^3 \\ T_{P,2}\dfrac{dF_2^{(2)}}{dt}+F_2^{(2)}=\rho_2X_2 \end{cases} \qquad (1.11)$$

Особенности преобразования траектории движений исполнительных элементов в траектории формообразующих движений

$$c_{\Sigma}X = \Phi_0\{\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4, \chi_5, \chi_6\}^T \qquad (2.1)$$

где $c_{\Sigma} = \begin{bmatrix} c_{1,1} + \chi_1 \rho S_P^{(0)} & c_{2,1} & c_{3,1} + \chi_1 \rho t_P^{(0)} & \chi_1 \rho S_P^{(0)} & 0 & \chi_1 \rho t_P^{(0)} \\ c_{1,2} + \chi_3 \rho S_P^{(0)} & c_{2,2} & c_{3,2} + \chi_2 \rho t_P^{(0)} & \chi_2 \rho S_P^{(0)} & 0 & \chi_2 \rho t_P^{(0)} \\ c_{1,3} + \chi_3 \rho S_P^{(0)} & c_{2,3} & c_{3,3} + \chi_3 \rho t_P^{(0)} & \chi_3 \rho S_P^{(0)} & 0 & \chi_3 \rho t_P^{(0)} \\ \chi_4 \rho S_P^{(0)} & 0 & \chi_4 \rho t_P^{(0)} & c_{4,4}(l) + \chi_4 \rho S_P^{(0)} & 0 & \chi_4 \rho t_P^{(0)} \\ \chi_5 \rho S_P^{(0)} & 0 & \chi_5 \rho t_P^{(0)} & \chi_5 \rho S_P^{(0)} & c_{5,5}(l) & \chi_5 \rho t_P^{(0)} \\ \chi_6 \rho S_P^{(0)} & 0 & \chi_6 \rho t_P^{(0)} & \chi_6 \rho S_P^{(0)} & 0 & c_{6,6}(l) + \chi_6 \rho t_P^{(0)} \end{bmatrix}$;

$\Phi_0 = \rho[S_P^{(0)} t_P^{(0)} + t_P^{(0)} X_3(t-T) + t_P^{(0)} X_6(t-T)]$;

$\{\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4, \chi_5, \chi_6\}^T$ - угловые коэффициенты ориентации сил. Причем $\chi_i = \chi_{i+3}, i = 1,2,3$.

Гипотезы и закономерности формирования сил резания

Модуль силы резания пропорционален площади срезаемого слоя

(2.2)

где

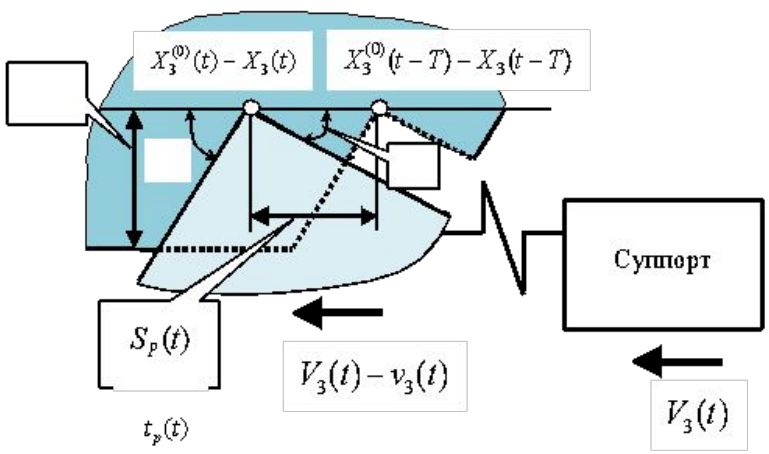
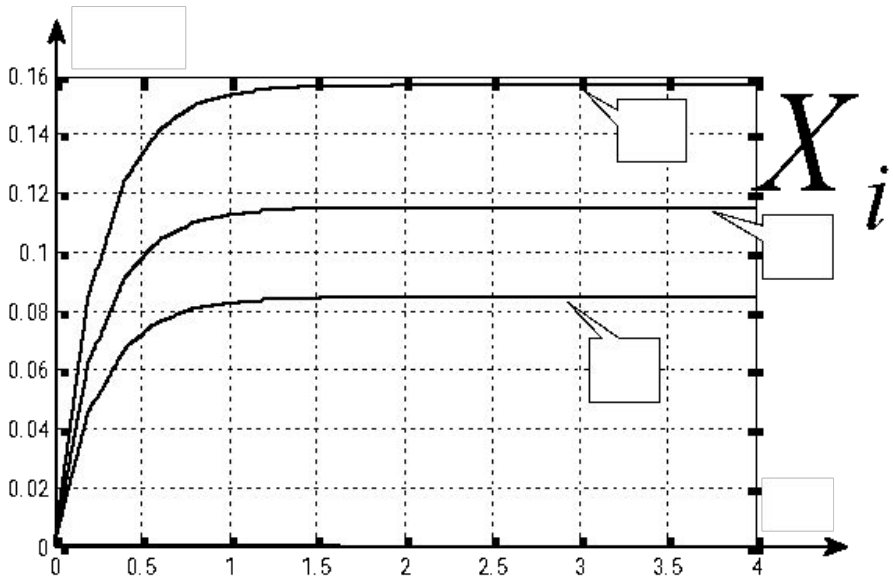
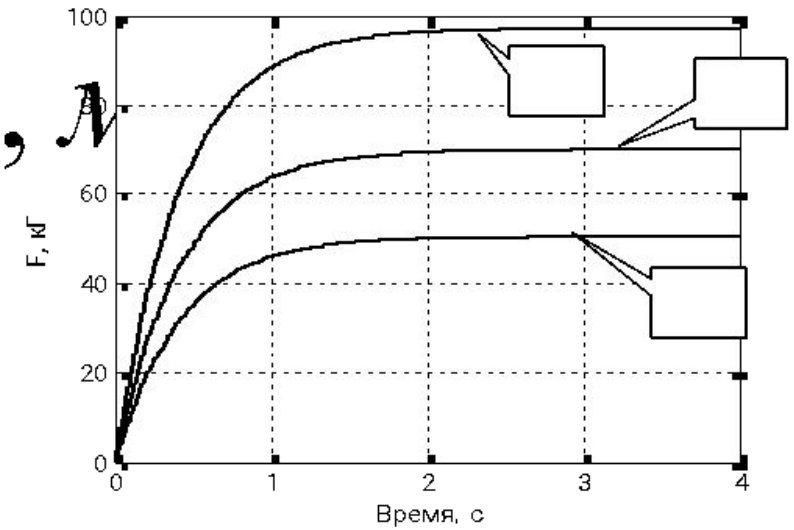


Схема формирования площади срезаемого слоя

Пример процесса точения заготовки диаметра $d = 80, мм$, технологический режим: $S_P^{(0)} = 0.1, мм/об$, $t_P^{(0)} = 2.0, мм$, $V_P^{(0)} = 0.8, м/с$; время одного оборота $T = 0.2, с$; угловые коэффициенты ориентации силы резания $\chi = \{0{,}54;\ 0{,}75;\ 0{,}39\}^T$; матрица жесткости подвеска инструмента $c^{(1)} = [120 \quad 60 \quad 20; 60 \quad 200 \quad 30; 20 \quad 30 \quad 120], кГ/мм$; $\rho = 350, кГ/мм^2$

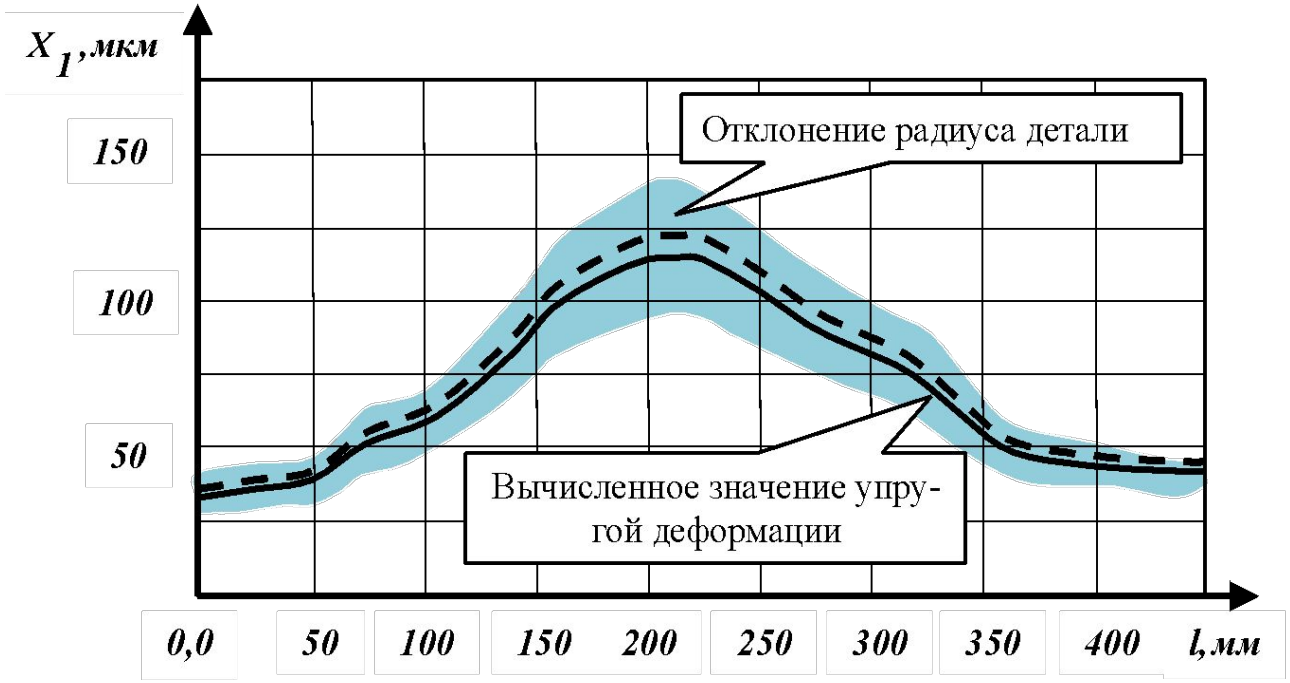


Пример изменения упругих деформационных смещений вершины инструмента при врезании инструмента в заготовки



Пример изменения сил резания с учетом упругих деформации при врезании инструмента в заготовки

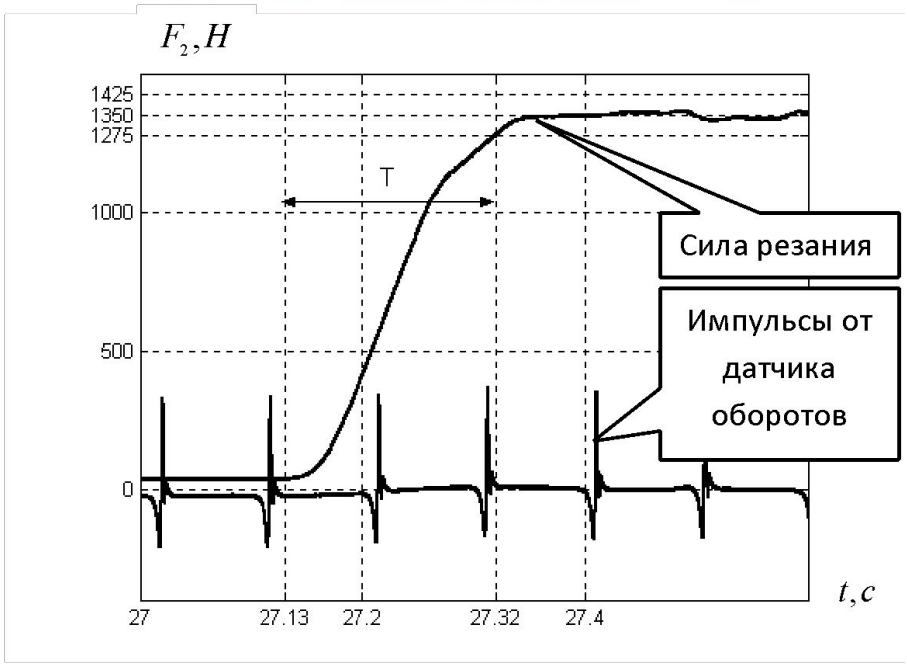
Пример обработки точением стали 20Х: диаметр 20 мм, длина 450 мм при следующем технологическом режиме: скорость резания $V_P = 1{,}2 м/с$; глубина $t_P^{(0)} = 2{,}5 мм$; подача на оборот - $S_P^{(0)} = 0{,}14 мм/об$.



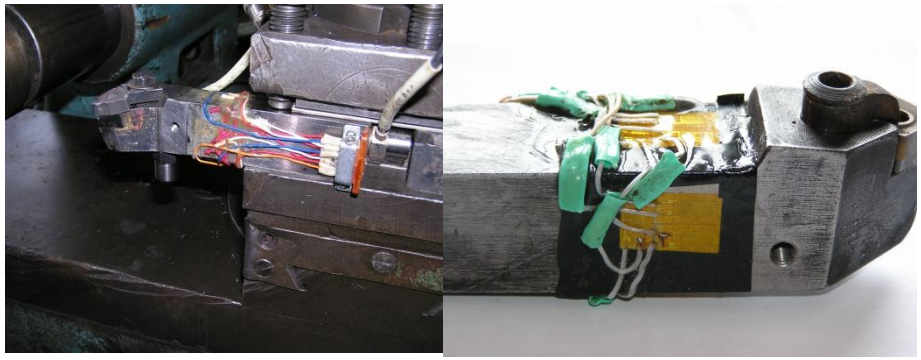
Упругая деформация вершины инструмента в направлении вдоль координат обработки и соответствующий разброс отклонения радиуса

Обрабатываемая заготовка

Пример обработки точением стали 20Х на следующих режимах: скорость резания $V_P = 1{,}2\,м/с$; глубина $t_P^{(0)} = 2{,}5\,мм$; подача на оборот - $S_P^{(0)} = 0{,}14\,мм/об$. Этим режимам соответствует частота вращения шпинделя $300,об/мин$ и период вращения $T = 0{,}2с$.



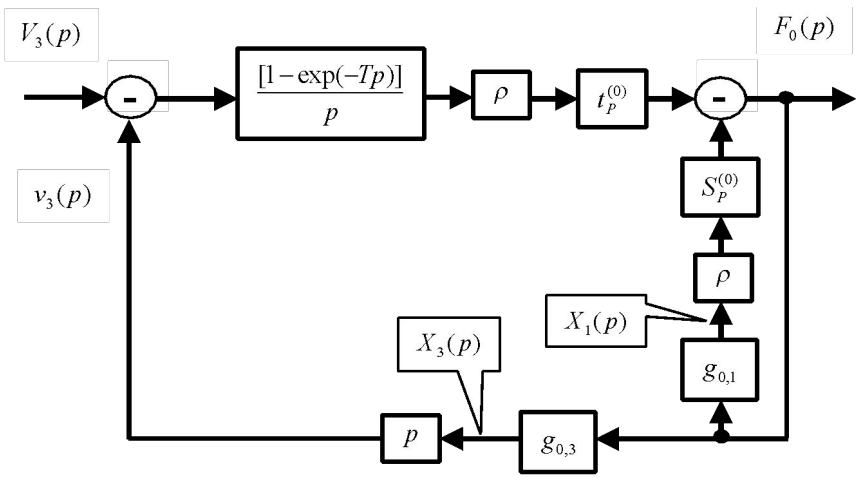
Пример экспериментально измеренного изменения главной составляющей силы резания при врезании инструмента в заготовку



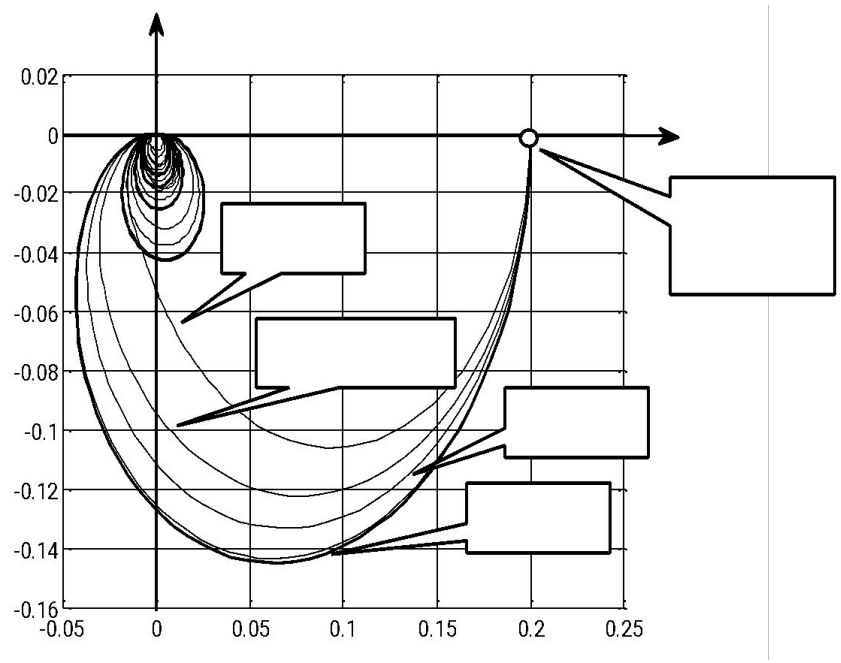
Резец с укрепленными датчиками сил

Частотные свойства преобразования скорости продольной подачи в вариации сил резания и деформационных смещений инструмента

$$\frac{F_0(j\omega)}{V_3(j\omega)} = \frac{\rho t_P^{(0)}}{j\omega(1+g_{0,1}\rho S_P^{(0)})} \frac{[1-\exp(-T\omega j)]}{1+\dfrac{g_{0,3}\rho t_P^{(0)}}{1+g_{0,1}\rho S_P^{(0)}}[1-\exp(-T\omega j)]}$$



Структурная схема преобразования скорости подачи в силы резания с учетом упругих деформационных смещений вершины инструмента

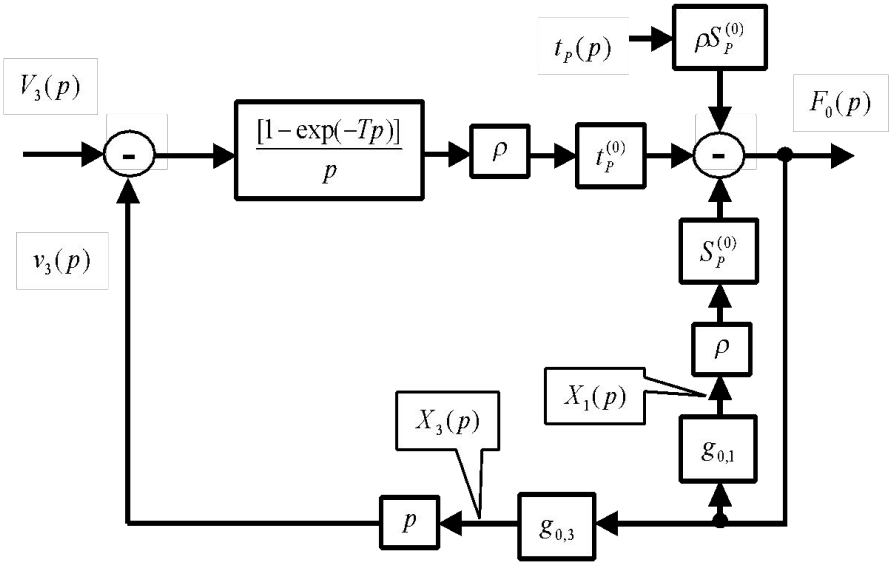


Изменения АФЧХ системы в зависимости от приведённой жёсткости подсистемы режущего инструмента

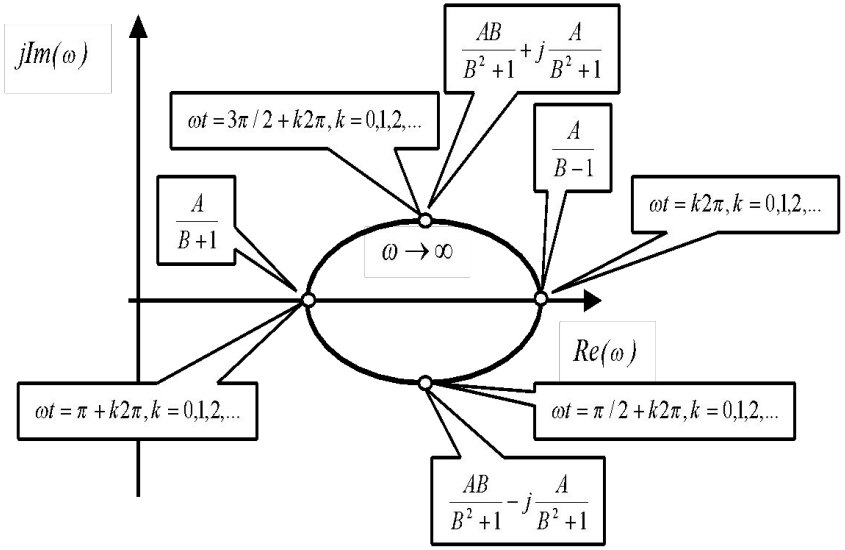
Частотные свойства преобразования скорости поперечной подачи в вариации сил резания и деформационных смещений инструмента

$$\frac{F_0(j\omega)}{t_P(j\omega)} = W_{t_P,F_0}(j\omega) = \frac{A(B-\cos(T\omega)-j\sin(\omega T))}{(B-\cos(\omega T))^2+\sin^2(\omega T)}$$

где $A = \dfrac{S_P^{(0)}}{g_{0,3}t_P^{(0)}}$ $\quad B = \dfrac{1+g_{0,1}\rho S_P^{(0)}+g_{0,3}\rho t_P^{(0)}}{g_{0,3}\rho t_P^{(0)}}$

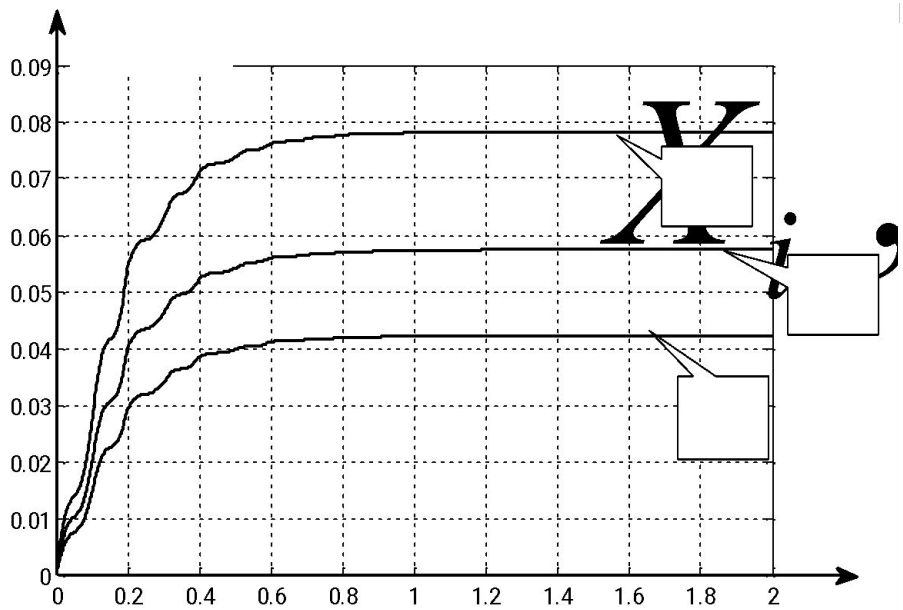


Структурная схема преобразования вариаций припуска в силы резания с учетом упругих деформационных смещений вершины инструмента в линеаризованном представлении

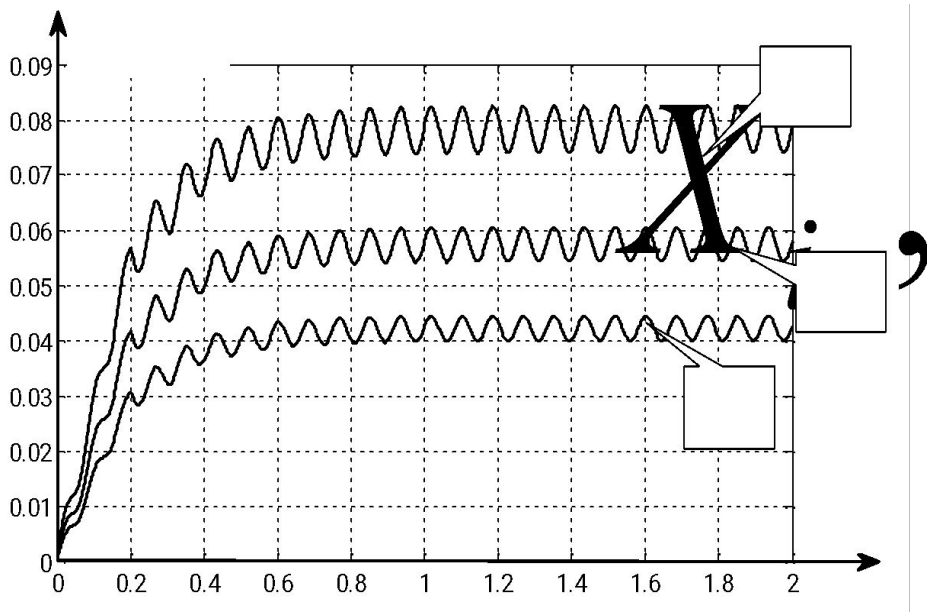


Годограф АФЧХ преобразования вариаций припуска и положения инструмента относительно оси вращения заготовки с вариации модуля сил резания

Пример влияние переменной составляющей скорости подачи на изменение упругих деформационных смещений инструмента относительно заготовки

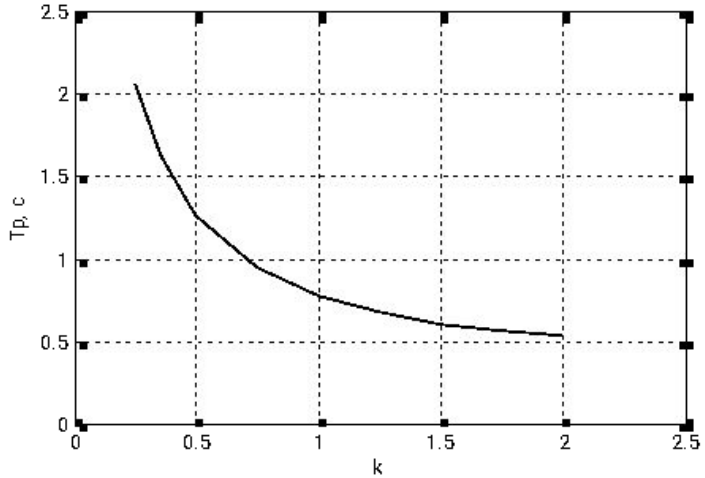


«а»

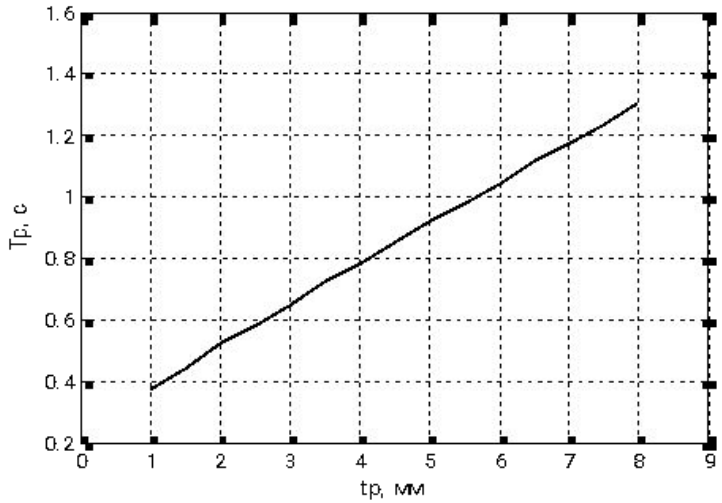


«б»

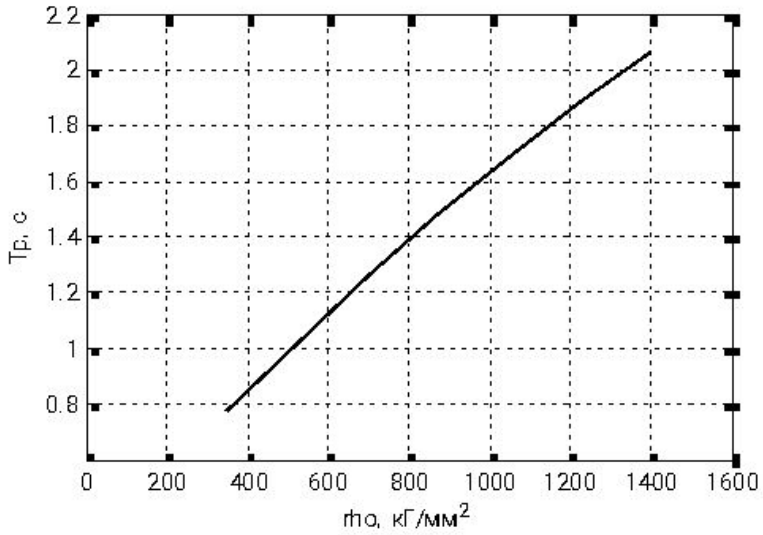
Траектории изменения упругих деформационных смещений инструмента при $V_3\ (t) = 0.5 + 0.4 \cdot \cos 2\Omega t$ «а», $V_3\ (t) = 0.5 + 0.4 \cdot \cos 2{,}4\Omega t$ «б» Ω - частота вращения шпинделя



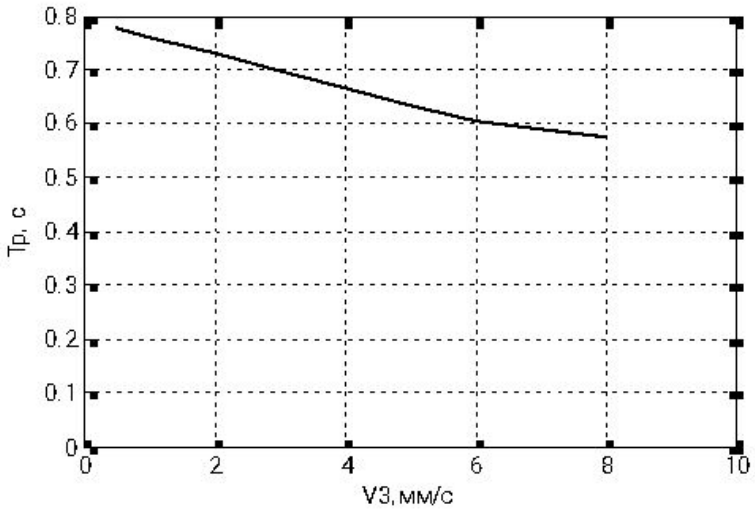
«а»



«б»

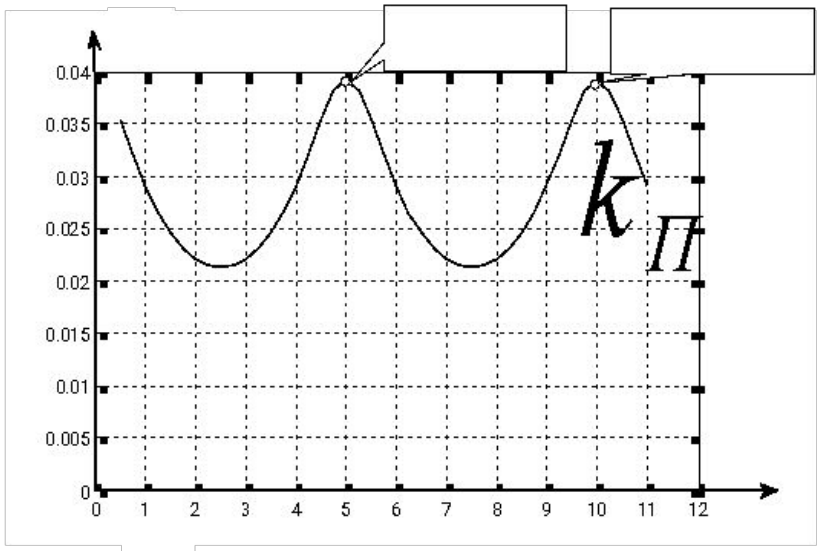


«с»

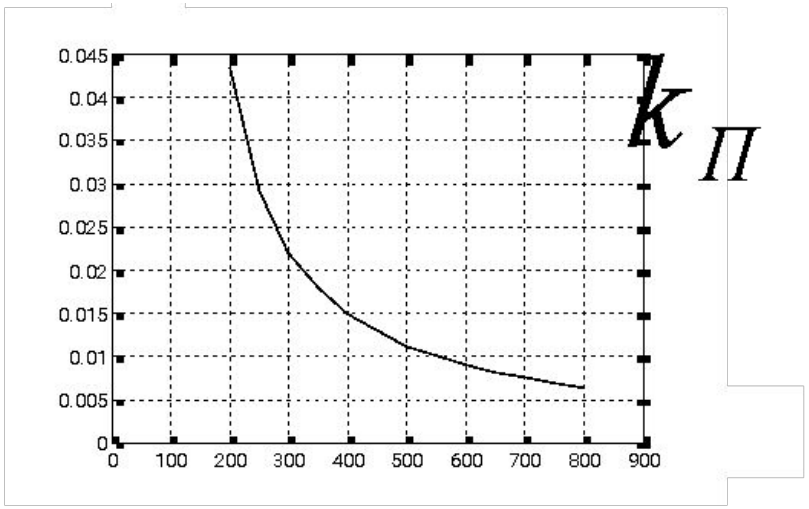


«г»

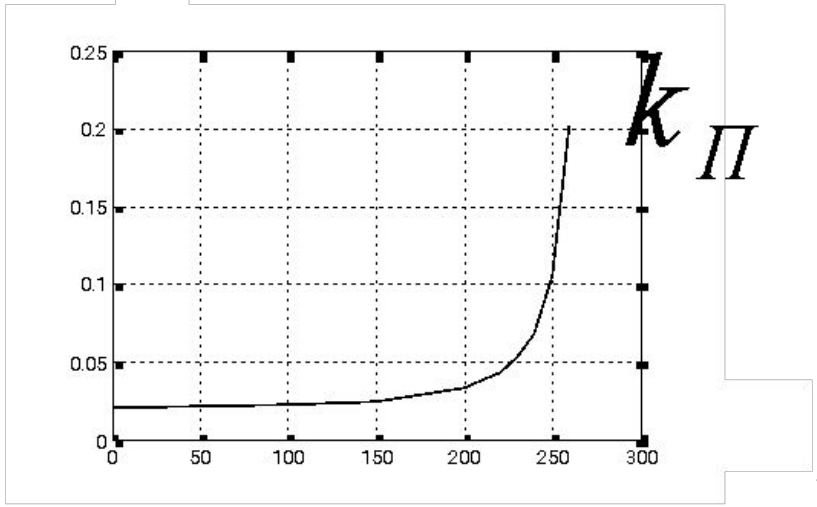
Влияние матрицы жесткости «а», глубины резания «б», коэффициента «с», скорости подачи «г» на длительность переходного процесса



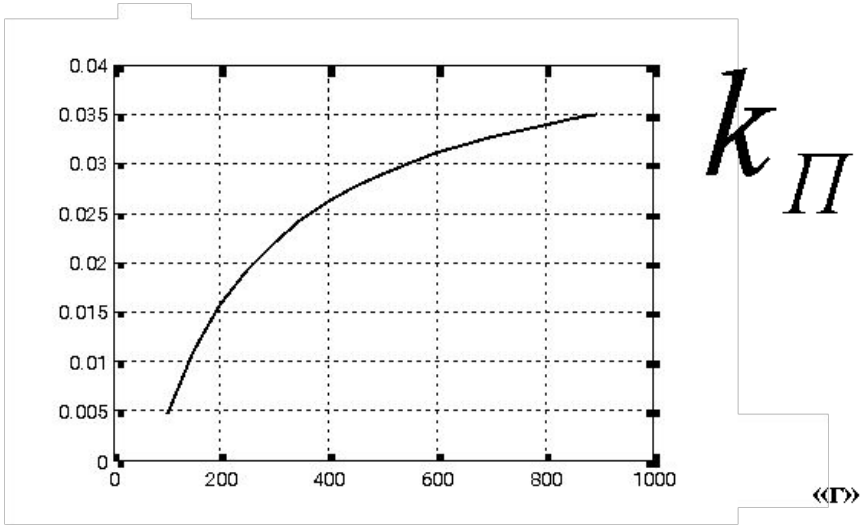
«а»



«б»



«с»



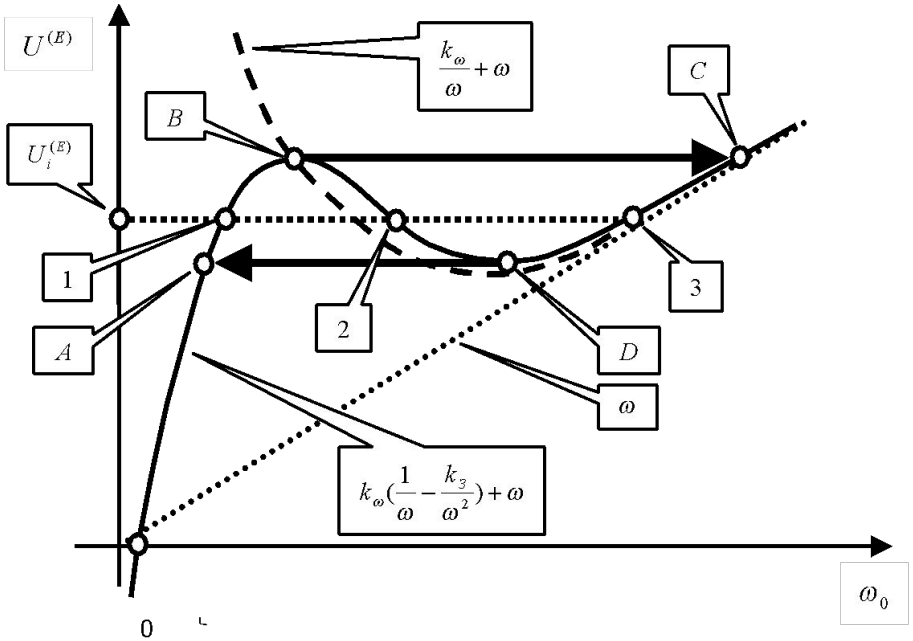
«г»

Зависимость коэффициента от частоты периодической составляющей колебания глубины резания «а», от жесткости «б», от жесткости при её варьировании от до , «с», от жесткости

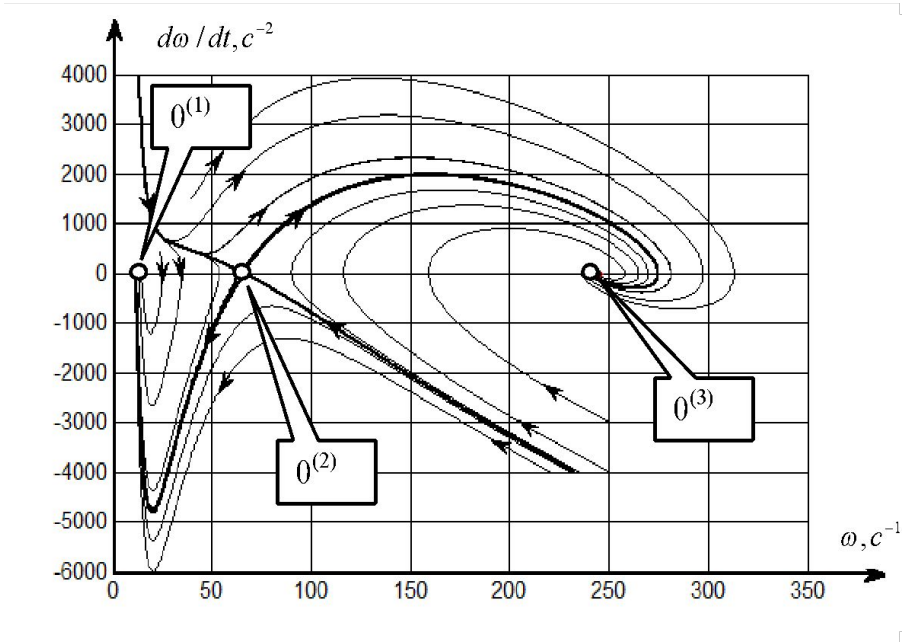
Влияние реакции со стороны процесса резания на устойчивость стационарных траекторий «медленных» движений

$$U^{(E)}(t) = T_{ЭМ}T_{Э}\frac{d^2\omega}{dt^2} + [k_\omega(\frac{2k_з}{\omega^3} - \frac{1}{\omega^2}) + T_{ЭМ}]\frac{d\omega}{dt} + \omega + k_\omega(\frac{1}{\omega} - \frac{k_3}{\omega^2}) \qquad (2.3)$$

$$U^{(E)} = \omega^0 + k_\omega[\frac{1}{\omega^0} - \frac{k_3}{(\omega^0)^2}]$$



Диаграммы смещения точек равновесия привода вращения шпинделя в зависимости от напряжения якоря



Фазовой потрет динамической системы привода вращения шпинделя с процессом резания

Устойчивость подсистемы «быстрых» движений

Линеаризованное уравнение в вариациях относительно траектории формообразующих движений

$$m\frac{d^2x}{dt^2}+h_\Sigma\frac{dx}{dt}+c_\Sigma x=0 \qquad (2.4)$$

где $m=[m_{s,k}]; h_\Sigma=\left[c_{s,k}-\frac{\partial\varphi_s(X^*,x,dx/dt)}{\partial(x_k)}\right]$; $c_\Sigma=\left[c_{s,k}-\frac{\partial\varphi_s(X^*,x,dx/dt)}{\partial(x_k)}\right]$; $s,k=1,2,\cdots,6$.

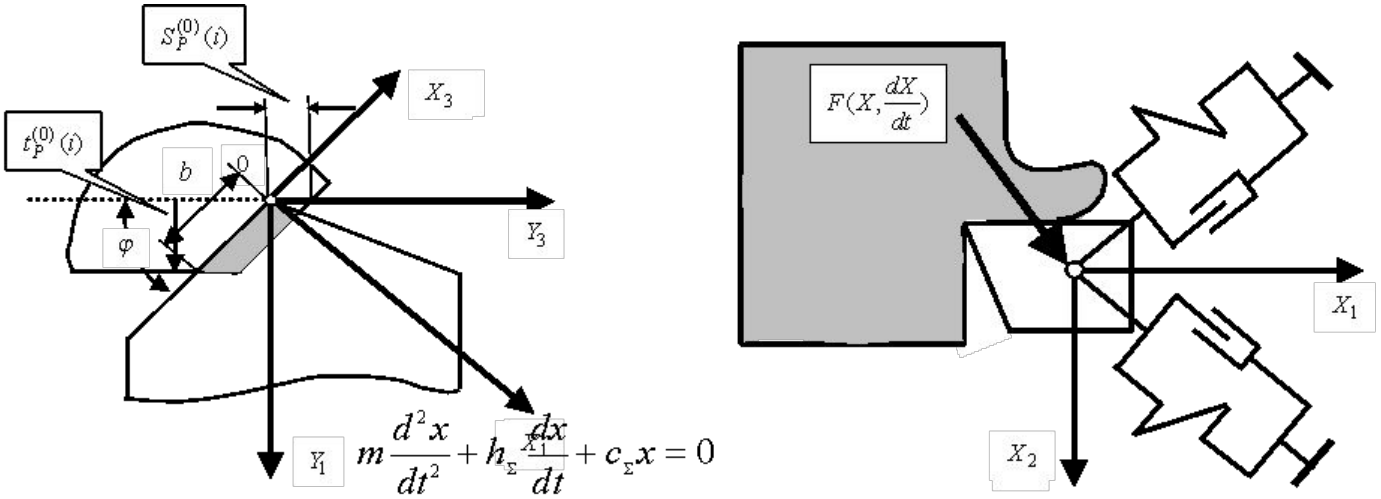
$$c_\Sigma=c_\Sigma^{(c)}+c_\Sigma^{(\kappa)};\ h_\Sigma=h_\Sigma^{(c)}+h_\Sigma^{(\kappa)} \qquad (2.5)$$

где $c_\Sigma^{(c)}=\frac{1}{2}[c_\Sigma+(c_\Sigma)^T]$, $h_\Sigma^{(c)}=\frac{1}{2}[h_\Sigma+(h_\Sigma)^T]$ - симметричные части суммарных матриц жёсткости и диссипации;

$c_\Sigma^{(\kappa)}=\frac{1}{2}[c_\Sigma-(c_\Sigma)^T]$, - кососимметричная часть суммарной матрицы жесткости, элементы которой формируют циркуляционные (непотенциальные) силы;

$h_\Sigma^{(\kappa)}=\frac{1}{2}[h_\Sigma-(h_\Sigma)^T]$ - кососимметричная часть суммарной матрицы диссипации, элементы которой формируют гироскопические силы.

Механизмы потери устойчивости подсистемы «быстрых» движений



$$m\frac{d^2x}{dt^2}+h_\Sigma\frac{dx}{dt}+c_\Sigma x=0$$

Схемы базовой модели динамической подсистемы резания

$$c_\Sigma=\begin{bmatrix} c_{1,1}+c_{1,1}^{(P)} & c_{2,1}-c_{2,1}^{(P)} \\ c_{1,2}+c_{1,2}^{(P)} & c_{2,2}-c_{2,2}^{(P)} \end{bmatrix} \quad h_\Sigma=\begin{bmatrix} h_{1,1}+h_{1,1}^{(P)} & h_{2,1}-h_{2,1}^{(P)} \\ h_{1,2}+h_{1,2}^{(P)} & h_{2,2}-h_{2,2}^{(P)} \end{bmatrix}$$

$$c_{1,1}^{(p)}=-\frac{\partial\varphi_1}{\partial x_1}=\rho\chi_1\frac{t_P^{(0)}}{\sin\varphi} \quad c_{1,2}^{(p)}=-\frac{\partial\varphi_2}{\partial x_1}=\rho\chi_2\frac{t_P^{(0)}}{\sin\varphi} \quad c_{2,1}^{(p)}=-\frac{\partial\varphi_1}{\partial x_2}<0 \quad c_{2,2}^{(p)}=-\frac{\partial\varphi_2}{\partial x_2}<0$$

$$h_{1,1}^{(p)}=T_1\frac{\partial\varphi_1}{\partial x_1}=-T_1c_{1,1}^{(p)} \quad h_{1,2}^{(p)}=T_2\frac{\partial\varphi_2}{\partial x_1}=-T_2c_{1,2}^{(p)} \quad h_{2,1}^{(p)}=-\frac{\partial\varphi_1}{\partial \dot{x}_2} \quad h_{2,2}^{(p)}=-\frac{\partial\varphi_2}{\partial \dot{x}_2}>0 \quad h_{2,1}^{(p)}=-\frac{\partial\varphi_1}{\partial \dot{x}_2} \qquad (2.6)$$

где ; ;

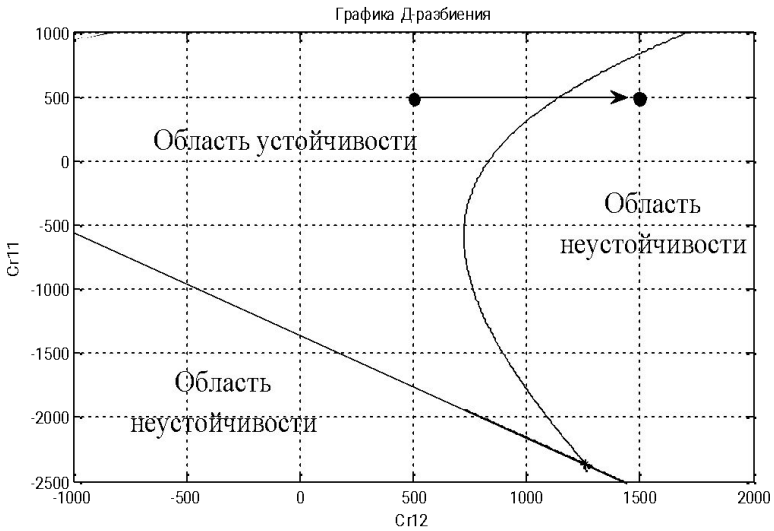
; ; ; ;

; ; ; ; .

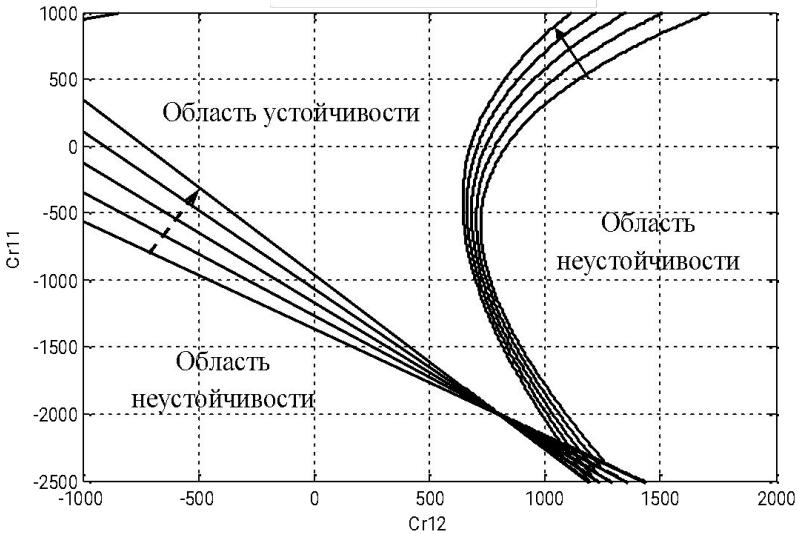
I. Потерь устойчивости за счет позиционных связей $h_\Sigma = 0$

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + h\frac{dx}{dt} + c_\Sigma^{(c)}x + c_\Sigma^{(k)}x = 0 \qquad (2.7)$$

$$c_\Sigma = \begin{bmatrix} c_{1,1} + c_{1,1}^{(p)} & c_{2,1} - c_{2,1}^{(p)} \\ c_{1,2} + c_{1,2}^{(p)} & c_{2,2} - c_{2,2}^{(p)} \end{bmatrix}; c_\Sigma^{(c)} = \begin{bmatrix} c_{1,1} + c_{1,1}^{(p)} & c_{2,1} + \frac{1}{2}(c_{1,2}^{(p)} - c_{2,1}^{(p)}) \\ c_{1,2} + \frac{1}{2}(c_{1,2}^{(p)} - c_{2,1}^{(p)}) & c_{2,2} - c_{2,2}^{(p)} \end{bmatrix}; c_\Sigma^{(\kappa)} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{2}(c_{1,2}^{(p)} + c_{2,1}^{(p)}) \\ \frac{1}{2}(c_{1,2}^{(p)} + c_{2,1}^{(p)}) & 0 \end{bmatrix}$$



Области D- разбиения в параметрической плоскости $(c_{1,1}^{(p)}, c_{1,2}^{(p)})$ «а» для ($c_{2,2}^{(P)} = c_{2,1}^{(P)} = 0$);

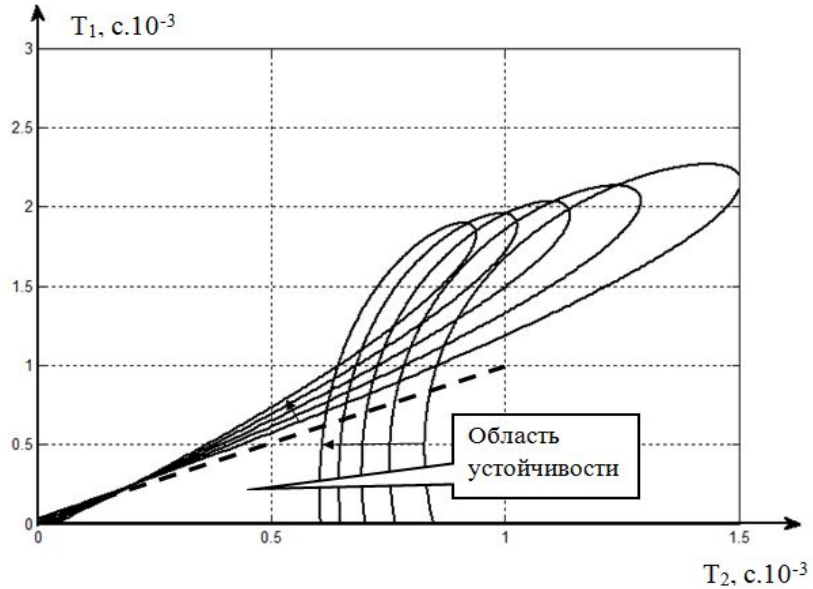


Преобразование областей D-разбиения при изменении $c_{2,1}^{(P)}$ ($c_{2,2}^{(P)} = 0.2c_{2,1}^{(P)}$): кривые трансформируются по направлению стрелки при $c_{2,1}^{(P)}$ = [0, 100, 200, 300, 400].

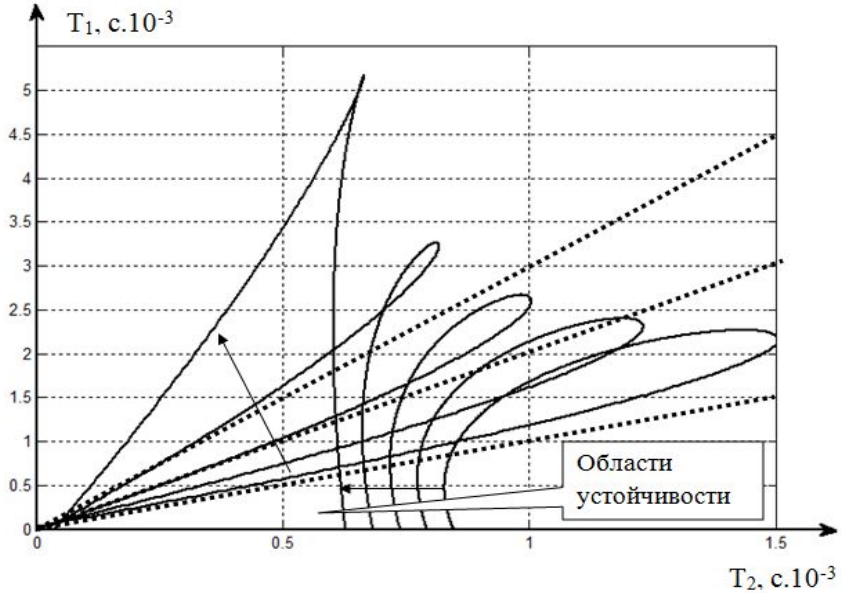
II. Потерь устойчивости за счет скоростных связей

$$m\frac{d^2x}{dt^2}+h_\Sigma^{(c)}\frac{dx}{dt}+h_\Sigma^{(k)}\frac{dx}{dt}+c_\Sigma^{(c)}x+c_\Sigma^{(k)}x=0 \qquad (2.8)$$

$$h_\Sigma=\begin{bmatrix} h_{1,1}+h_{1,1}^{(P)} & h_{2,1}-h_{2,1}^{(P)} \\ h_{1,2}+h_{1,2}^{(P)} & h_{2,2}-h_{2,2}^{(P)} \end{bmatrix};\ h_\Sigma^{(c)}=\begin{bmatrix} h_{1,1}+h_{1,1}^{(p)} & h_{2,1}+\frac{1}{2}(h_{1,2}^{(p)}-h_{2,1}^{(p)}) \\ h_{1,2}+\frac{1}{2}(h_{1,2}^{(p)}-h_{2,1}^{(p)}) & h_{2,2}-h_{2,2}^{(p)} \end{bmatrix};\ h_\Sigma^{(\kappa)}=\begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{2}(h_{1,2}^{(p)}+h_{2,1}^{(p)}) \\ \frac{1}{2}(h_{1,2}^{(p)}+h_{2,1}^{(p)}) & 0 \end{bmatrix}$$



Область устойчивости в плоскости T_1, T_2 при значениях $c^p_{2,1}$=[0, -100, -200, -300, -400] (*кГ/мм*), $c^p_{2,2}$=[0, -20, -40, -60, -80] (*кГ/мм*), $c^p_{1,2}$=1000(*кГ/мм*), $c^p_{1,1}$=500(*кГ/мм*)



Области устойчивости в плоскости T_1, T_2 при значениях $c^p_{2,1}$=0 (*кГ/мм*), $c^p_{2,2}$=0 (*кГ/мм*), $c^p_{1,2}$=1000(*кГ/мм*), $c^p_{1,1}$=[500, 400, 300, 200, 100](*кГ/мм*). Уменьшению $c^p_{1,1}$ соответствует преобразование областей по направлению стрелки

Самоорганизация и бифуркация в динамической системе резания

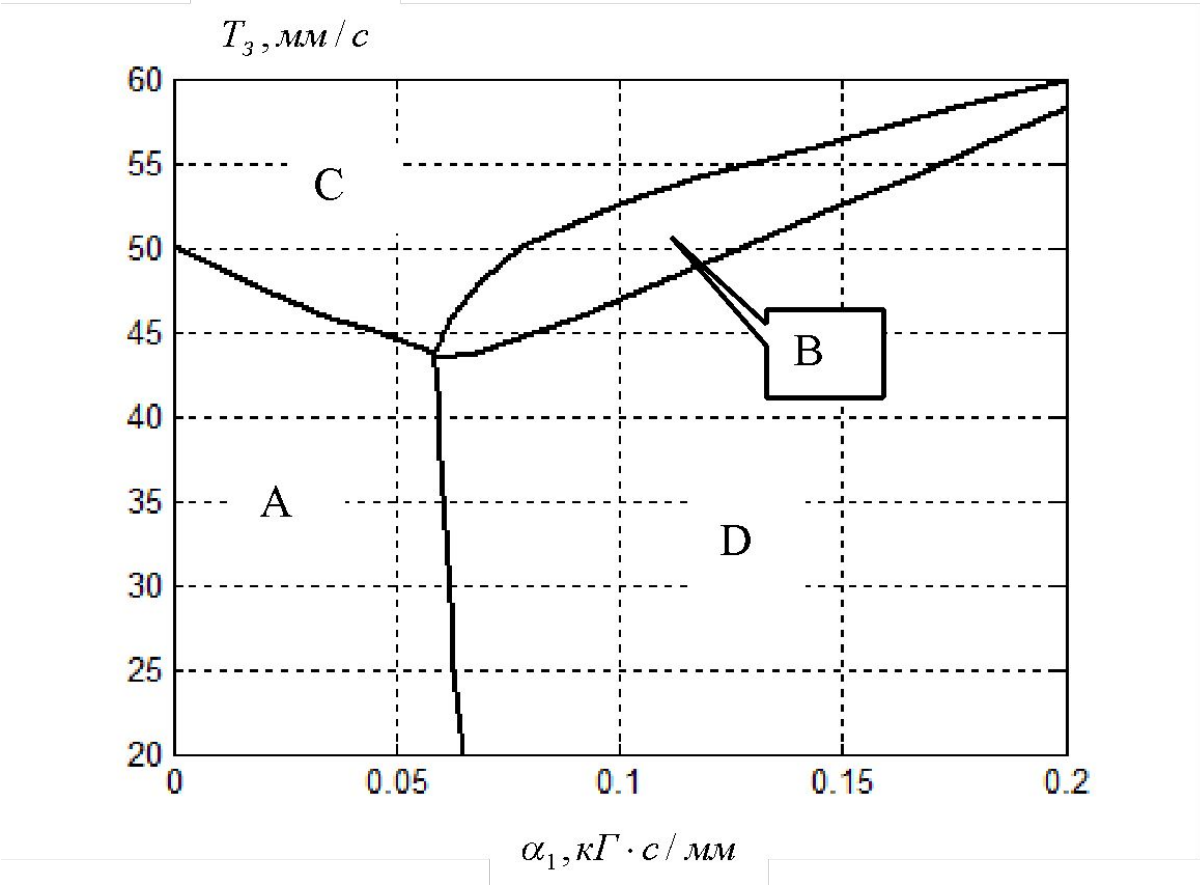
Первая базовая модель динамической системы резания

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2X_1}{dt^2}+h_{1,1}\dfrac{dX_1}{dt}+h_{2,1}\dfrac{dX_2}{dt}+c_{1,1}X_1+c_{2,1}X_2=\chi_1\rho\cdot b\cdot(a-Y_1)+\Phi_1^{(1)}(0)\cdot e^{-\frac{dX_1/dt}{T_3}} \\ m\dfrac{d^2X_2}{dt^2}+h_{1,2}\dfrac{dX_1}{dt}+h_{2,2}\dfrac{dX_2}{dt}+c_{1,2}X_1+c_{2,2}X_2=\chi_2\rho\cdot b\cdot(a-Y_2)+\alpha_1[\dfrac{dX_2}{dt}-\alpha_2(\dfrac{dX_2}{dt})^3] \\ T_1\dfrac{dY_1}{dt}+Y_1=X_1 \\ T_2\dfrac{dY_1}{dt}+Y_2=X_1 \end{cases} \qquad (2.9)$$

Вторая базовая модель динамической системы резания

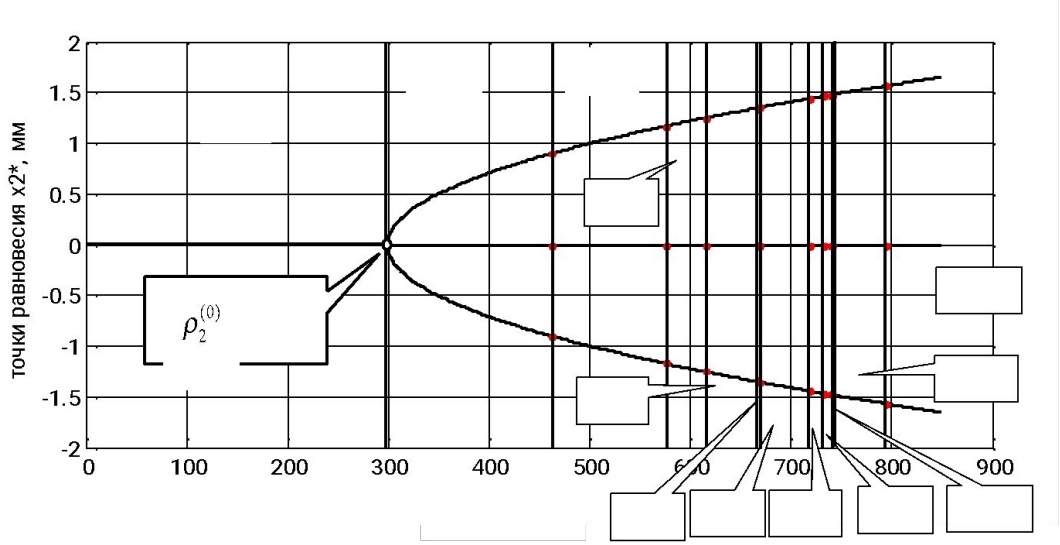
$$\begin{cases} m\dfrac{d^2X}{dt^2}+h_\Sigma\dfrac{dX}{dt}+c_\Sigma X=F_0^{(1)}+F^{(2)} \\ T_{P,1}\dfrac{dF_1^{(2)}}{dt}+F_1^{(2)}=\rho_1(X_2)^3 \\ T_{P,2}\dfrac{dF_2^{(2)}}{dt}+F_2^{(2)}=\rho_2X_2 \end{cases} \qquad (2.10)$$

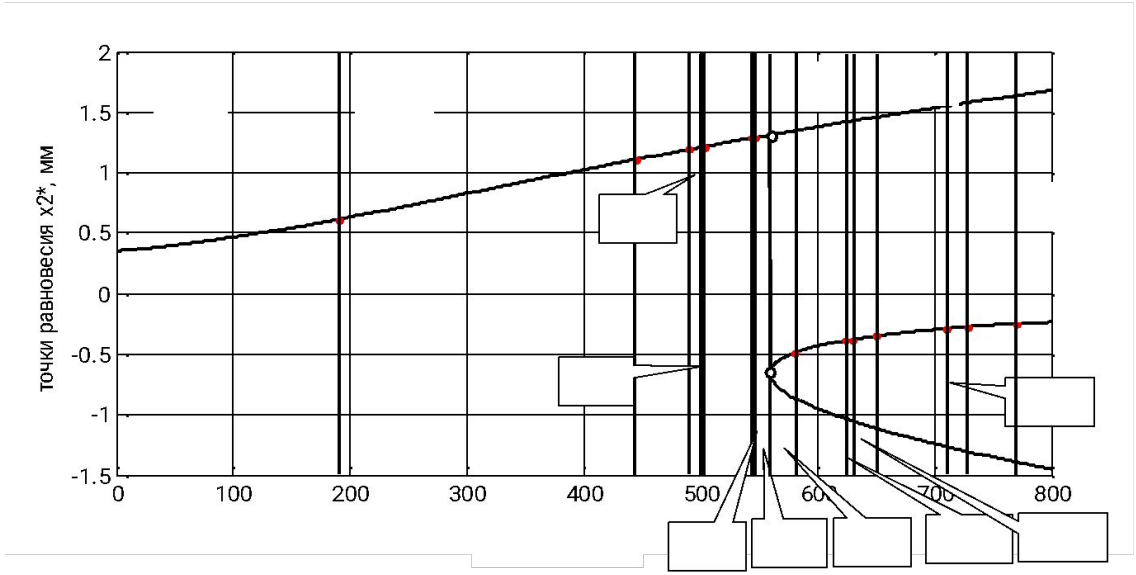
Бифуркационная диаграмма для первой базовой модели

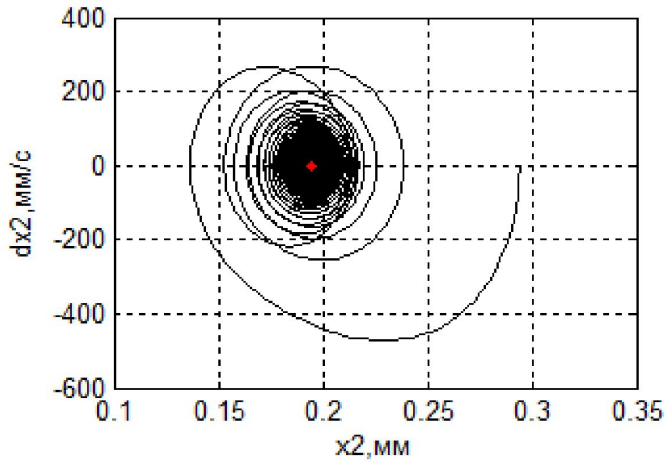


Бифуркационные преобразования инвариантных многообразий на параметрической плоскости $(T_з, \alpha_1)$: A – область асимптотических устойчивых точек равновесия; B – область формирования двумерных инвариантных торов; C- область формирования предельных циклов на высокой частоте; D – область формирования орбительно асимптотически устойчивых предельных циклов на низкой частоте.

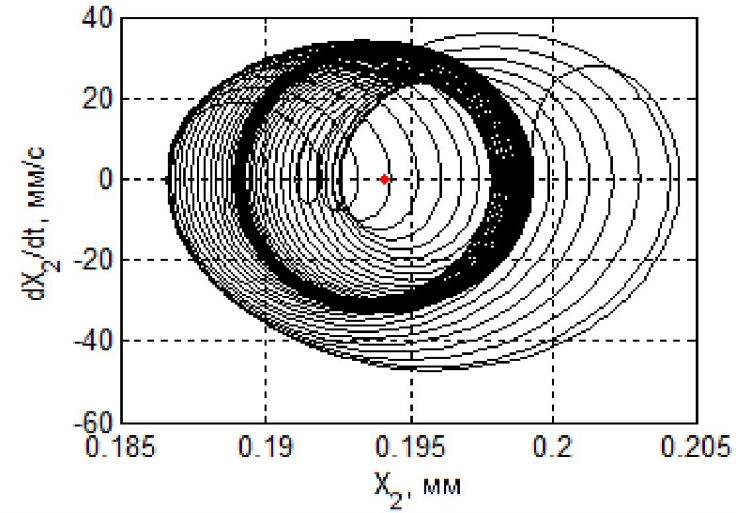
Бифуркационная диаграмма для второй базовой модели



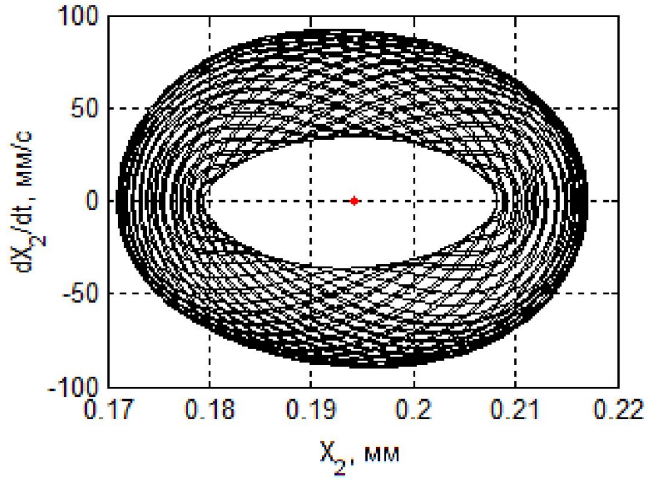




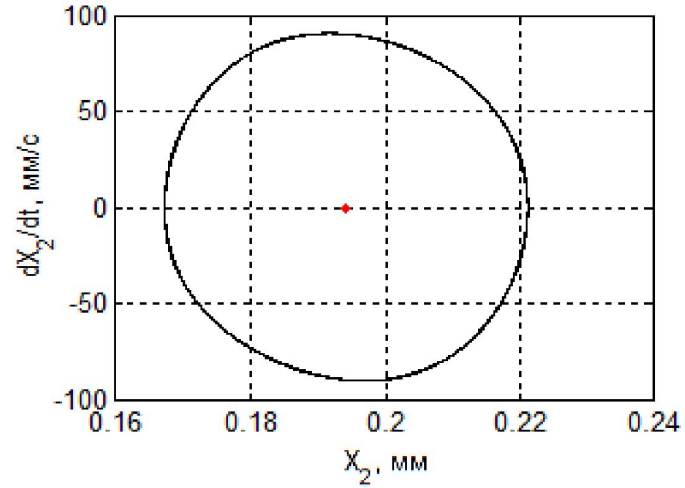
a)



б)



c
)

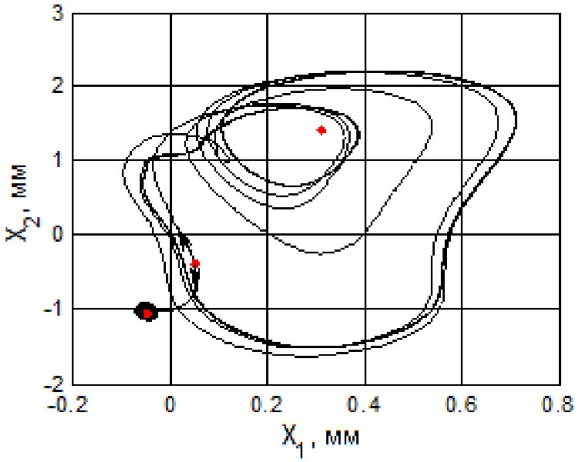


d)

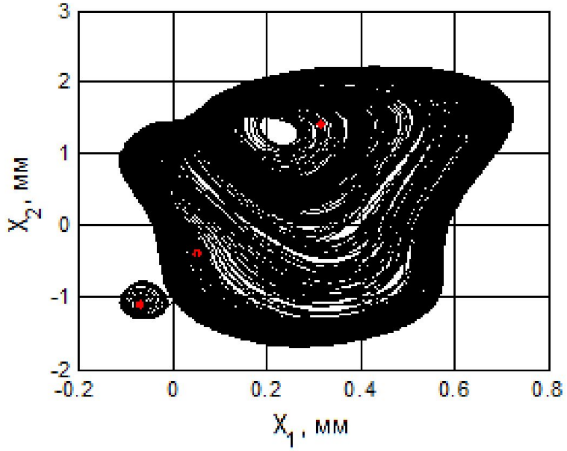
Проекции фазовых траекторий на плоскости ($X_2, dX_2/dt$): a - $\alpha_1 = 0.02, кГ \cdot с/мм$**;**

b - $\alpha_1 = 0.05, кГ \cdot с/мм$**; c-** $\alpha_1 = 0.1, кГ \cdot с/мм$**; d -** $\alpha_1 = 0.15, кГ \cdot с/мм$

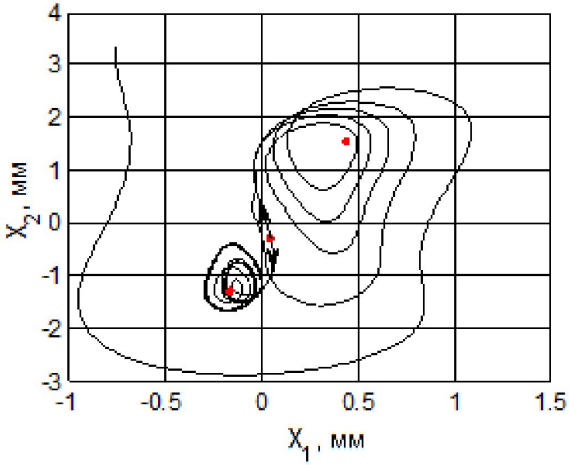
Преобразование многообразий в зависимости от параметров системы для случая несимметричного ветвления точки равновесия



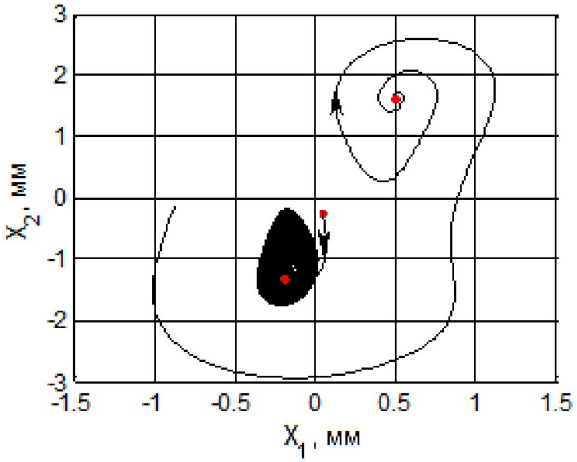
a)



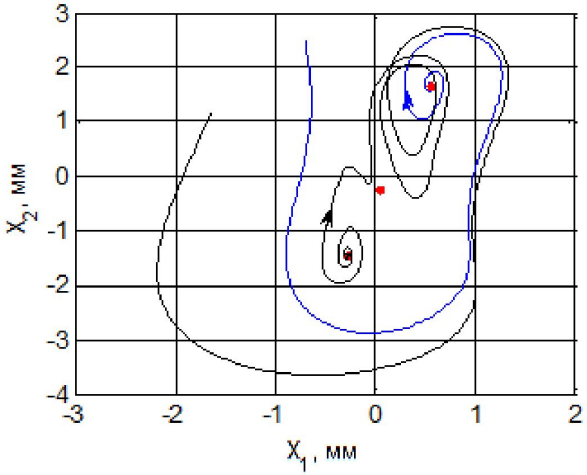
b)



c)



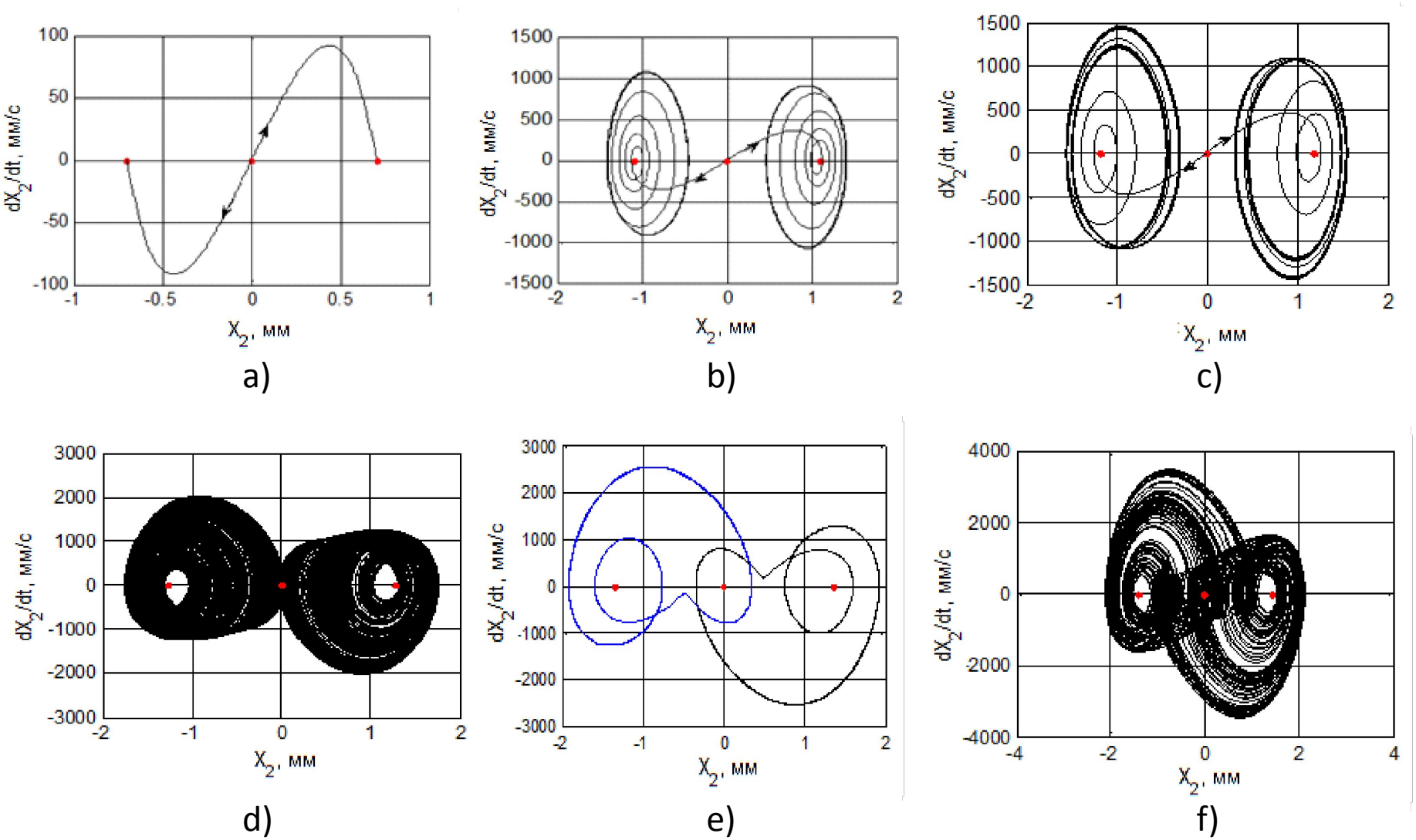
d)



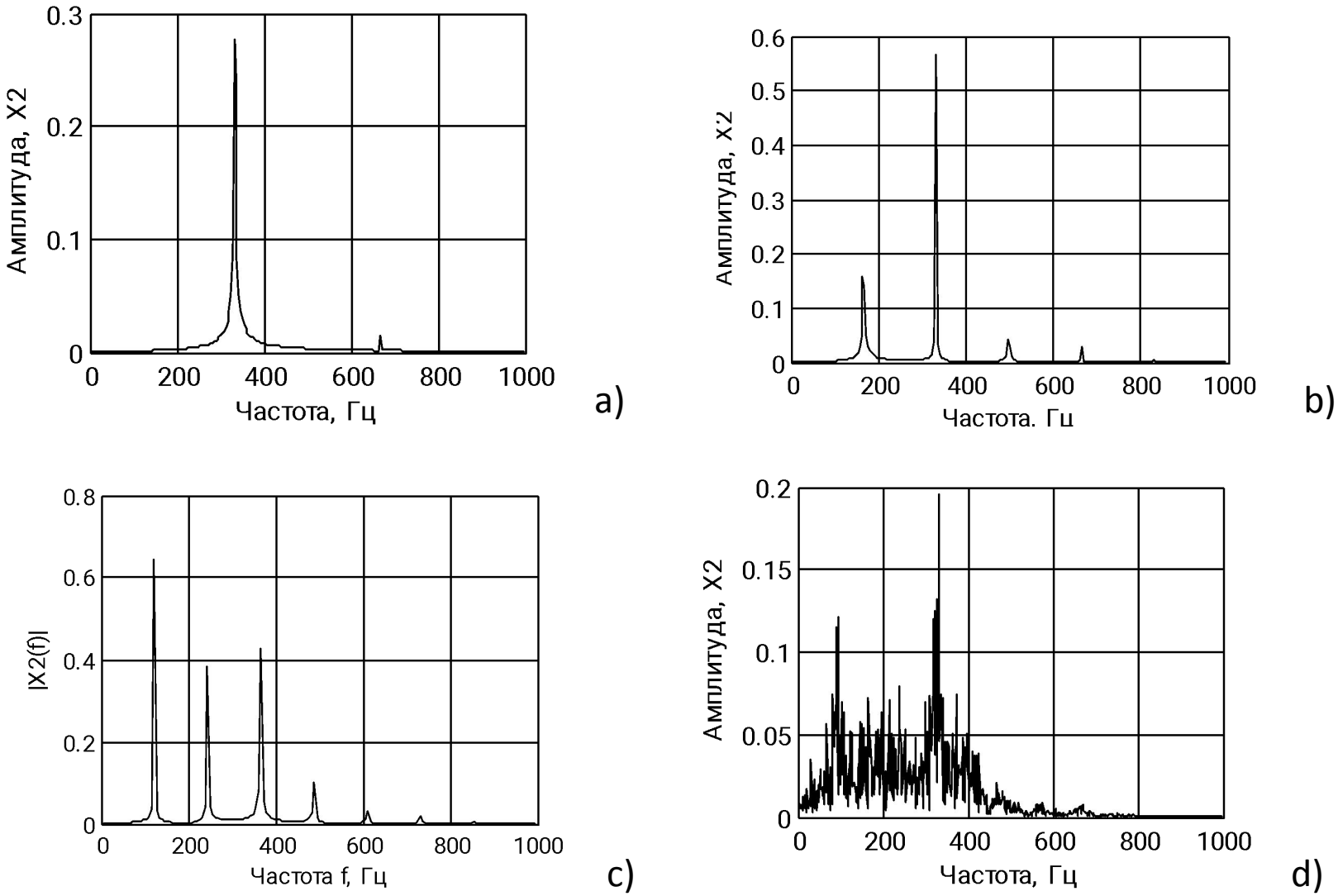
e)

Пример преобразования траекторий движения вершины инструмента в плоскости $X_1 - X_2$ **по мере увеличения параметра** ρ_2 **для** $s \neq 0$**: a-** $\aleph 11$**; b -** $\aleph 12$**; c-** $\aleph 14$**; d -** $\aleph 15$**; e -** $\aleph 16$

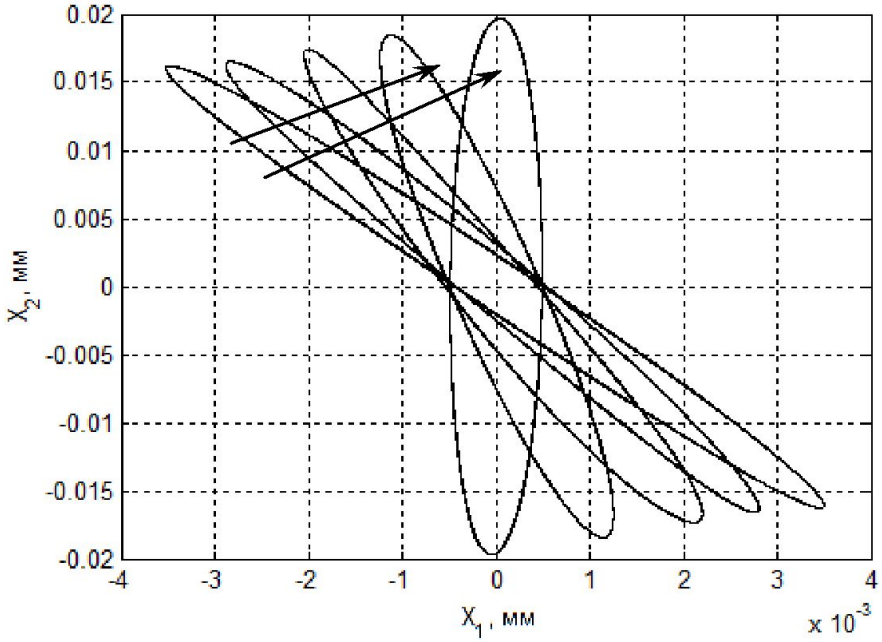
Преобразование многообразий в зависимости от параметров системы для случая симметричного ветвления точки равновесия



Некоторые примеры проекций стационарных траекторий на фазовую плоскость $X_2, dX_2/dt$ по мере увеличения параметра ρ_2 для $s=0$: a - №2; b - №3; c - №4; d - №5 ; e - №6; f - №9.

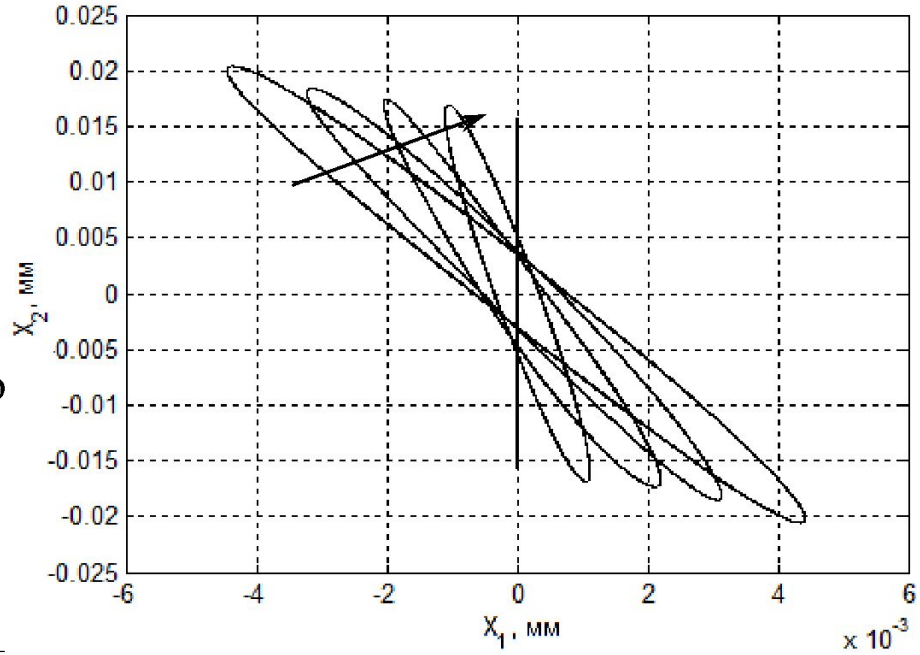


Изменение спектрального состава стационарных многообразий, соответствующих рис на слайде … «a» - $\rho_2 = 500$ **;«b» -** $\rho_2 = 590$**, «c» -** $\rho_2 = 610$ **и «d» -** $\rho_2 = 650$



Изменение ориентации колебаний инструмента в плоскости при изменении недиагональных элементов матрицы жесткости

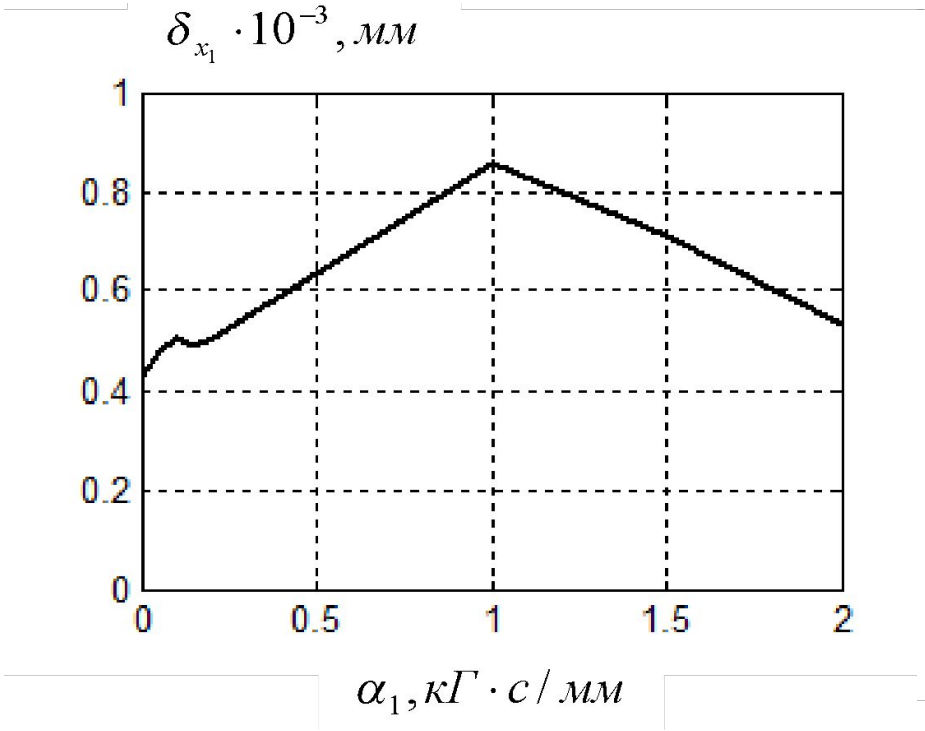
$c_{1,2} = c_{2,1} = \{800;\ 600;\ 400;\ 200;\ 0\}, кГ / мм$

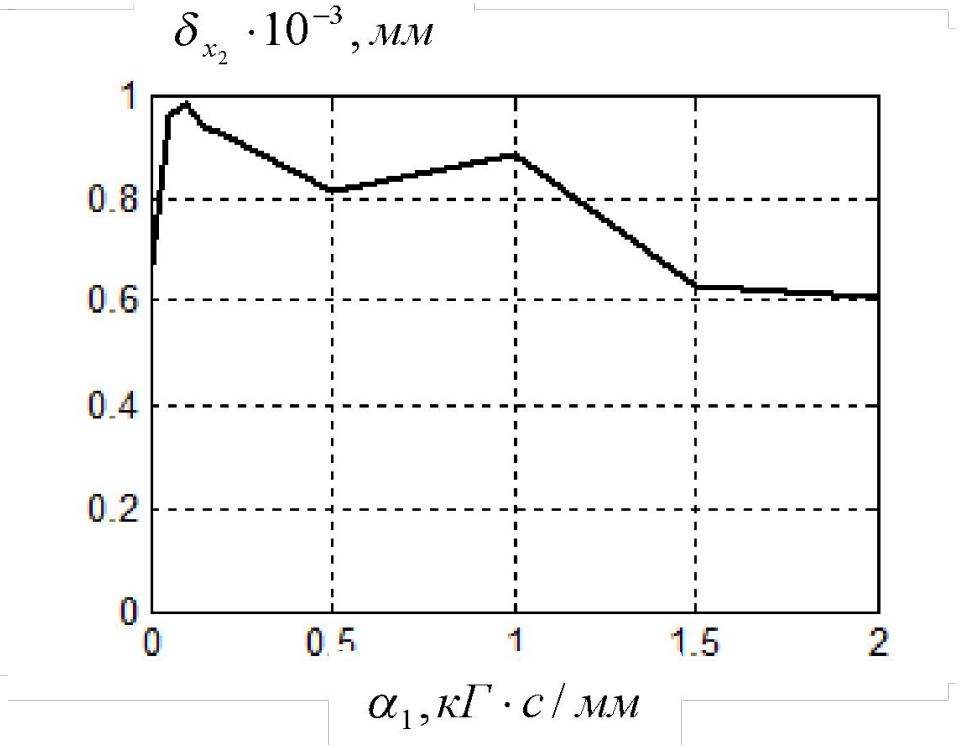


Изменение ориентации колебаний инструмента в плоскости при одновременно изменении недиагональных элементов матрицы жесткости и матрицы диссипации:

$c_{1,2} = c_{2,1} = \{800;\ 600;\ 400;\ 200;\ 0\}, кГ / мм$ и

$h_{1,2} = h_{2,1} = \{0.028;\ 0.024;\ 0.02;\ 0.014;\ 0\}, кГ \dfrac{с}{мм}$





Динамические смещения точки равновесия за счет формированных многообразий при изменении параметра $\alpha_1 = [0-2], \frac{кГ \cdot с}{мм}$

Экспериментальная проверка формирования стационарных многообразий при точении

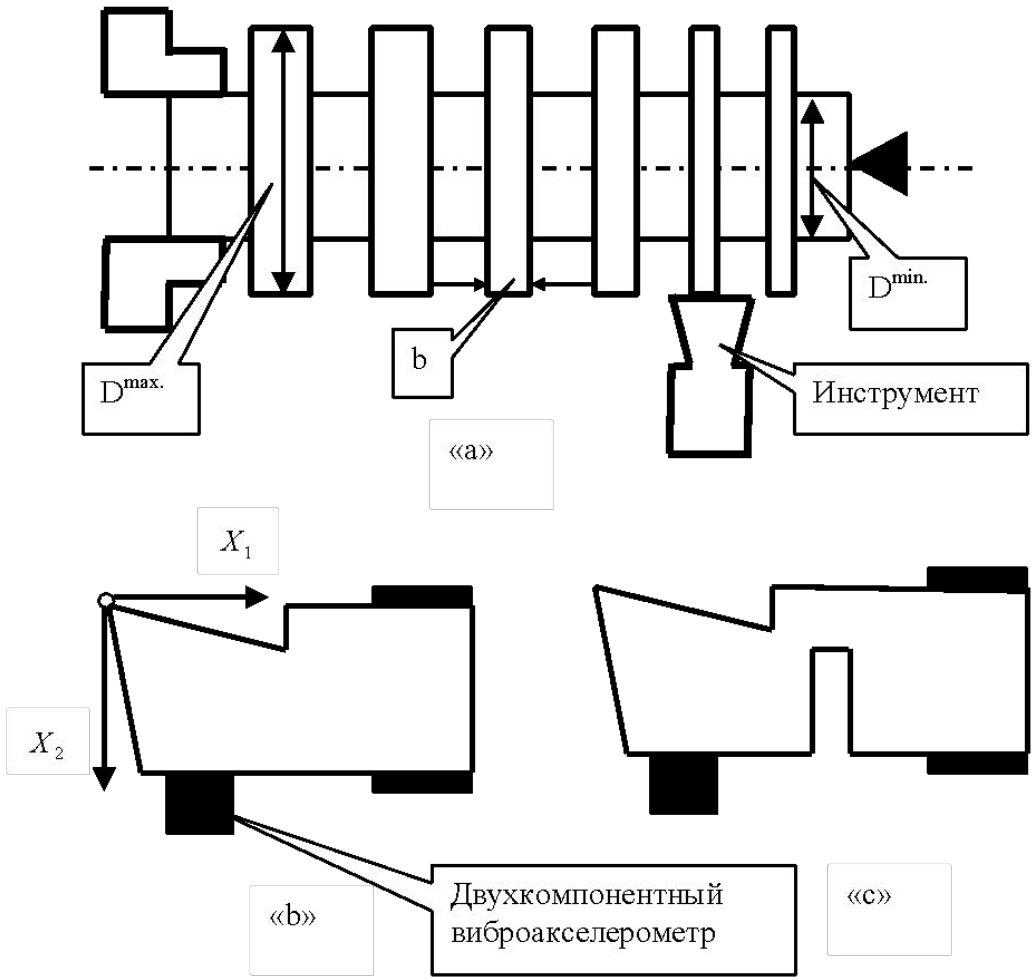
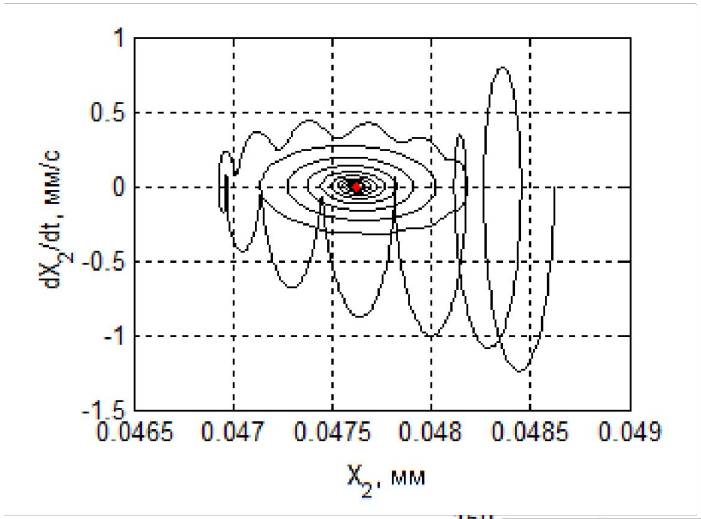
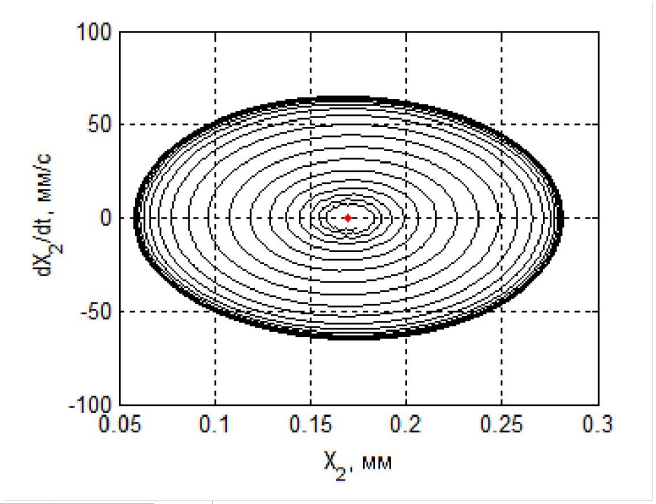


Схема проведения экспериментов: a – схема обработки; b – схема первого инструмента; c – схема второго инструмента с малой изгибной жесткостью

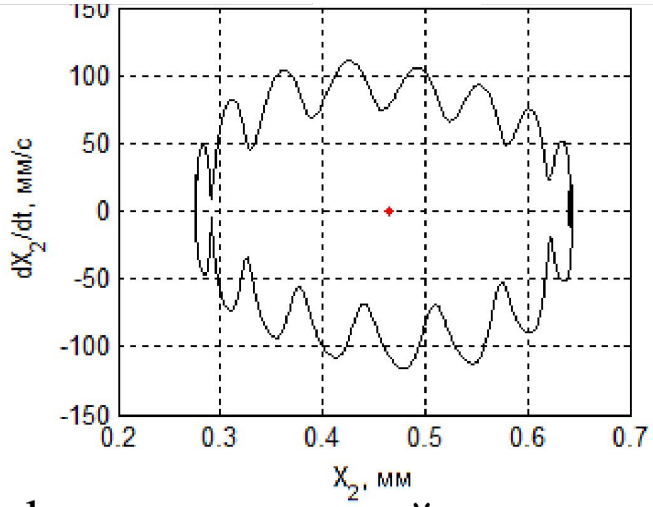
Пример стационарных многообразий, полученных при расчетах



a)



b)



c)

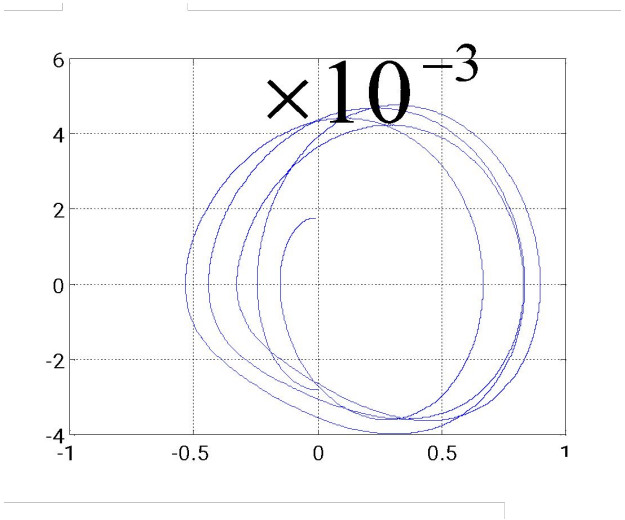
Проекции фазовых траекторий на плоскости $X_2 - dX_2/dt$

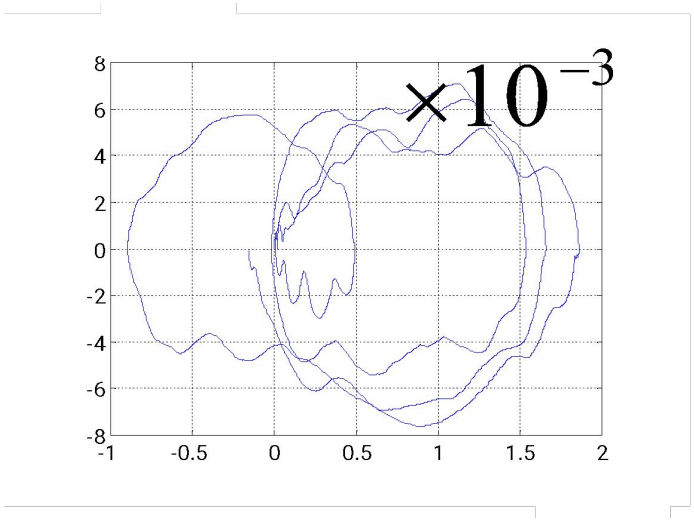
a) - $b = 2, мм$; $\rho = 190.5, кГ/мм^2$; $T_з = 59, мм/с$; $\alpha_1 = 0.095, кГ \cdot с/мм$; $\alpha_2 = 0.095 \cdot 10^{-4}, кГ \cdot (с/мм)^3$

b) - $b = 5.5, мм$; $\rho = 263, кГ/мм^2$; $T_з = 52, мм/с$; $\alpha_1 = 0.41, кГ \cdot с/мм$; $\alpha_2 = 0.41 \cdot 10^{-4}, кГ \cdot (с/мм)^3$;

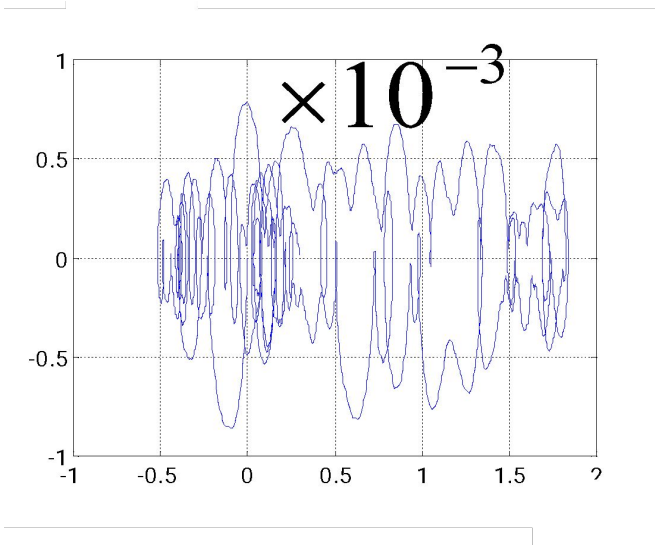
c) - $b = 7, мм$; $\rho = 295, кГ/мм^2$; $T_з = 49.5, мм/с$; $\alpha_1 = 0.54, кГ \cdot с/мм$; $\alpha_2 = 0.54 \cdot 10^{-4}, кГ \cdot (с/мм)^3$.

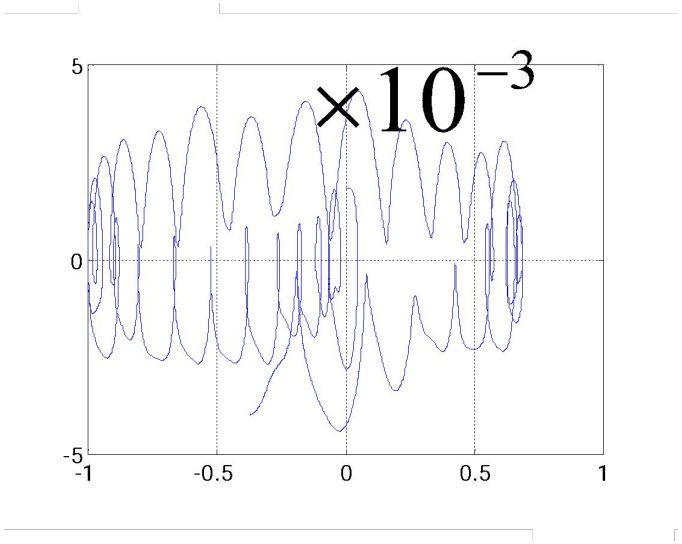
Пример стационарных многообразий, полученных при экспериментах





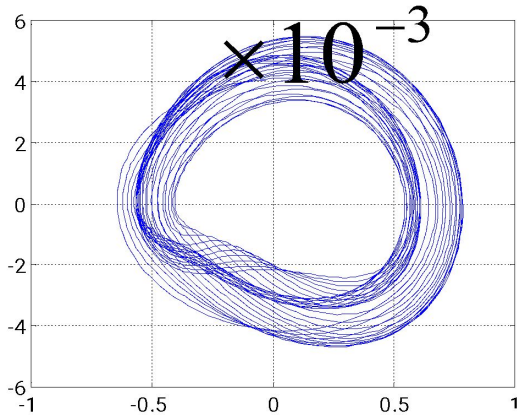
Пример экспериментально измеренных автоколебаний инструмента при резании



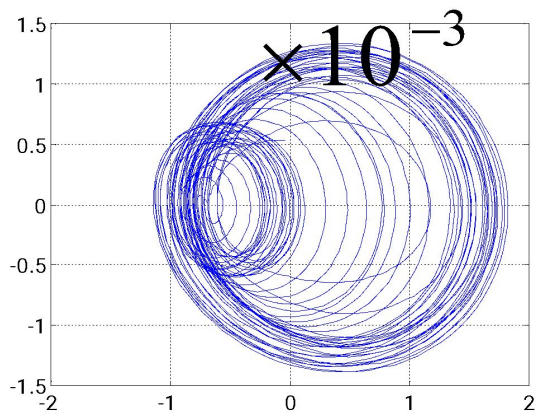


Пример преобразования предельного цикла в двумерный инвариантный тор

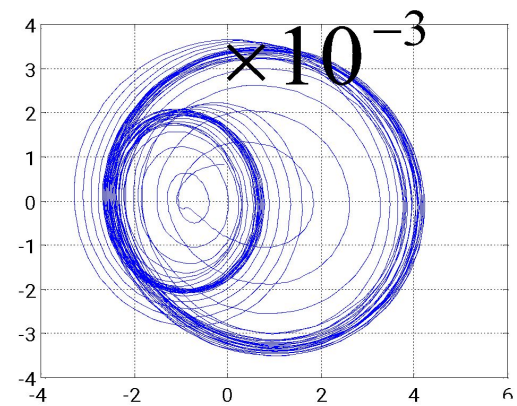
Пример стационарных многообразий, полученных при экспериментах



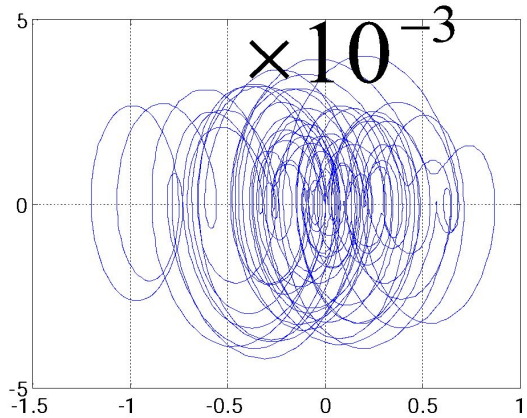
a)



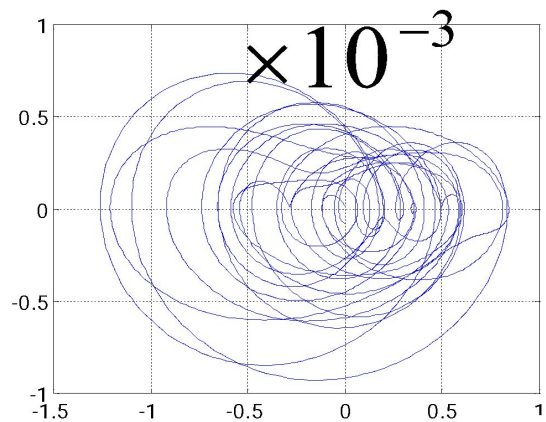
b)



c)



d)



e)

Пример экспериментально наблюдаемого преобразования предельного цикла в хаотический аттрактор через бифуркации удвоения периода

ПЕРЕСТРОЙКА ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РЕЗАНИЯ В ХОДЕ ЕЕ ЭВОЛЮЦИИ

Уравнение динамики процесса резания с учетом эволюционных преобразований динамической связи, формируемой процессом резания

$$\begin{cases} m\dfrac{d^2X(t)}{dt^2}+h\dfrac{dX(t)}{dt}+cX(t)=F[S_P^{(0)},t_P^{(0)},X,\dfrac{dX}{dt},Y,\dfrac{dY}{dt},p_1(A,N),p_2(A,N),...,p_s(A,N)] \\ M\dfrac{d^2Y(t)}{dt^2}+H\dfrac{dY(t)}{dt}+CY(t)=F[S_P^{(0)},t_P^{(0)},X,\dfrac{dX}{dt},Y,\dfrac{dY}{dt},p_1(A,N),p_2(A,N),...,p_s(A,N)] \\ p^{(i)}(A)=p_{i,0}+\alpha_i\int\limits_0^A w_i(A-\varsigma)N(\varsigma)d\varsigma,\ i=1,2...s \\ A(t)=\int\limits_0^t N(\tau)d\tau \\ N(t)=V(t)F(t) \end{cases} \qquad (3.1)$$

Система определяет стационарные эволюционные траектории смещения точки равновесия

$$\begin{cases} cX^*(A)=F[S_P,t_P,V_P,X^*,0,Y^*,0,p_1(A,N),p_2(A,N),...,p_s(A,N)] \\ CY^*(A)=F[S_P,t_P,V_P,X^*,0,Y^*,0,p_1(A,N),p_2(A,N),...,p_s(A,N)] \\ p_i(A)=p_{i,0}+\alpha_i\int\limits_0^A w_i(A-\varsigma)N(\varsigma)d\varsigma,\ i=1,2...s \\ A(t)=\int\limits_0^t N(\tau)d\tau; \\ N(t)=V(t)F(t). \end{cases} \qquad (3.2)$$

где $w_i(A-\varsigma)=\exp[-\dfrac{1}{T_{i,1}}(A-\varsigma)]+\beta_i\exp[\dfrac{1}{T_{i,2}}(A-\varsigma)]$

Вычисление стационарной эволюционной траектории и траектории параметров динамической связи, формируемой процессом резания

↓

Исследование устойчивости стационарной эволюционной траектории. Определение областей, в которых траектория является неустойчивой.

↓

Коррекция функций изменения сил вдоль траектории за счет инвариантных многообразий, формируемых в окрестностях эволюционной траектории. Уточнение эволюционной траектории и параметров

↓

Оценивание влияния эволюционных преобразований на параметры качества изготовления деталей

Обобщенный алгоритм исследования эволюционных преобразований в динамической системе резания

Метод определения стационарных эволюционных траекторий на основе дифференцирования интегральных уравнений

$$p_i(A) = p_{i,0} + \alpha_i^{(1)} \int_0^A e^{-\eta_i^{(1)}(A-\varsigma)} N[p_1(\varsigma), p_2(\varsigma), \ldots, p_s(\varsigma)] d\varsigma + \alpha_i^{(2)} \int_0^A e^{-\eta_i^{(2)}(A-\varsigma)} N[p_1(\varsigma), p_2(\varsigma), \ldots, p_s(\varsigma)] d\varsigma,$$
$$= p_{i,0} + \alpha_i^{(1)} Q_i^{(1)} + \alpha_i^{(2)} Q_i^{(2)}, i = 1, 2, \ldots, s \qquad (3.3)$$

где $Q_i^{(1)} = \int_0^A e^{\eta_i^{(1)}(A-\varsigma)} N(p_1(\varsigma), p_2(\varsigma), \ldots, p_s(\varsigma)) d\varsigma$, $Q_i^{(2)} = \int_0^A e^{-\eta_i^{(2)}(A-\varsigma)} N(p_1(\varsigma), p_2(\varsigma), \ldots, p_s(\varsigma)) d\varsigma$

Продифференцируем интегральные уравнения (3.3), после предварительного преобразования, получим

$$\frac{dp_i(A)}{dA} = (\alpha_i^{(1)} + \alpha_i^{(2)}) N(p_1(A), p_2(A), \ldots, p_s(A)) + \alpha_i^{(1)} \eta_i^{(1)} Q_i^{(1)} + \alpha_i^{(2)} \eta_i^{(2)} Q_i^{(2)}, i = 1, 2, \ldots, s \qquad (3.4)$$

Из (3.3) и (3.4) находим

$$Q_i^{(1)} = \frac{\eta_i^{(2)}(p_i - p_{i,0}) - \frac{dp_i(A)}{dA} + (\alpha_i^{(1)} + \alpha_i^{(2)}) N(p_1(A), p_2(A), \ldots, p_s(A))}{\alpha_i^{(1)}(\eta_i^{(2)} - \eta_i^{(1)})},$$

$$Q_i^{(2)} = \frac{-\eta_i^{(1)}(p_i - p_{i,0}) + \frac{dp_i(A)}{dA} - (\alpha_i^{(1)} + \alpha_i^{(2)}) N(p_1(A), p_2(A), \ldots, p_s(A))}{\alpha_i^{(2)}(\eta_i^{(2)} - \eta_i^{(1)})}, \; i = 1, 2, \ldots, s \qquad (3.5)$$

Продифференцируем интегральные уравнения (3.4), имеем

$$\frac{d^2 p_i(A)}{dA^2} = (\alpha_i^{(1)} + \alpha_i^{(2)})\frac{dN(p_1(A), p_2(A),..., p_s(A))}{dA} + \alpha_i^{(1)}\eta_i^{(1)}\frac{dQ_i^{(1)}}{dA} + \alpha_i^{(2)}\eta_i^{(2)}\frac{dQ_i^{(2)}}{dA} =$$

$$= (\alpha_i^{(1)} + \alpha_i^{(2)})\Pi(p_1(A), p_2(A),..., p_s(A), \frac{dp_1(A)}{dA}, \frac{dp_2(A)}{dA},..., \frac{dp_s(A)}{dA}) +$$

$$+ (\alpha_i^{(1)}\eta_i^{(1)} + \alpha_i^{(2)}\eta_i^{(2)})N(p_1(A), p_2(A),..., p_s(A)) + \alpha_i^{(1)}(\eta_i^{(1)})^2 Q_i^{(1)} + \alpha_2\eta_2^2 Q_i^{(2)}, i = 1, 2,..., s \qquad (3.6)$$

где $\Pi(p_1(A), p_2(A),..., p_s(A), \frac{dp_1(A)}{dA}, \frac{dp_2(A)}{dA},..., \frac{dp_s(A)}{dA}) = \frac{dN(p_1(A), p_2(A),..., p_s(A))}{dA}$

Поставим (3.5) в (3.6), получим следующую систему дифференциальных уравнений

$$\frac{d^2 p_i(A)}{dA^2} - (\alpha_i^{(1)} + \alpha_i^{(2)})\Pi(p_1(A), p_2(A),..., p_s(A), \frac{dp_1(A)}{dA}, \frac{dp_2(A)}{dA},..., \frac{dp_s(A)}{dA}) - (\eta_i^{(1)} + \eta_i^{(2)})\frac{dp_i(A)}{dA} +$$

$$+ (\alpha_i^{(1)}\eta_i^{(2)} + \alpha_i^{(2)}\eta_i^{(1)})N(p_1(A), p_2(A),..., p_s(A)) + \eta_i^{(1)}\eta_i^{(2)} p_i(A) = \eta_i^{(1)}\eta_i^{(2)} p_{i,0}, i = 1, 2,..., s \qquad (3.7)$$

Поставляя значение $A = 0$ в равенства (3.3) и (3.4), получим начальные условия

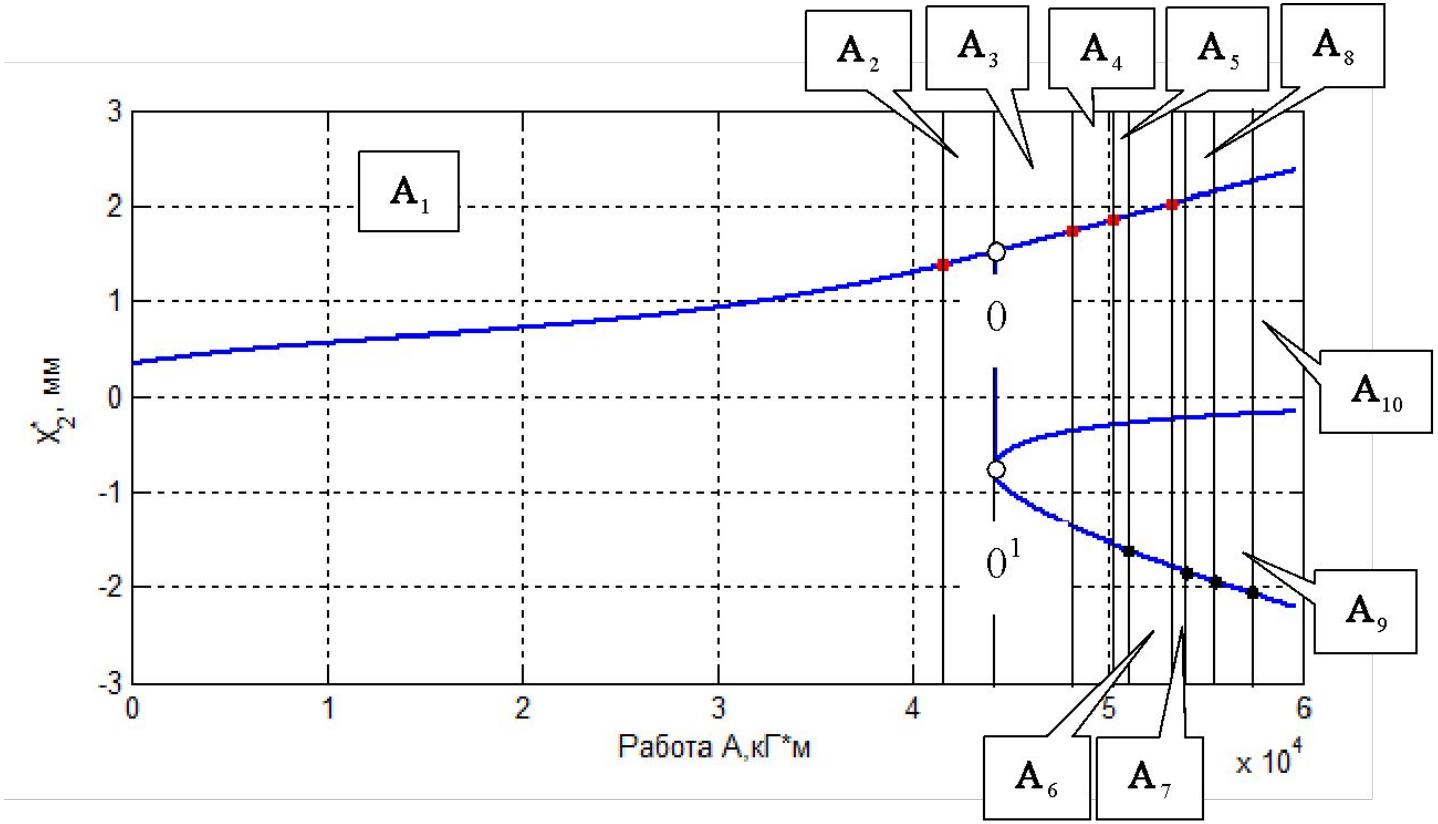
$$p_i(0) = p_{i,0}, \quad \frac{dp_i}{dA}(0) = (\alpha_i^{(1)} + \alpha_i^{(2)})N(p_1(0), p_2(0),..., p_s(0)) \qquad (3.8)$$

Базовая модель динамической системы резания с учетом эволюции связей

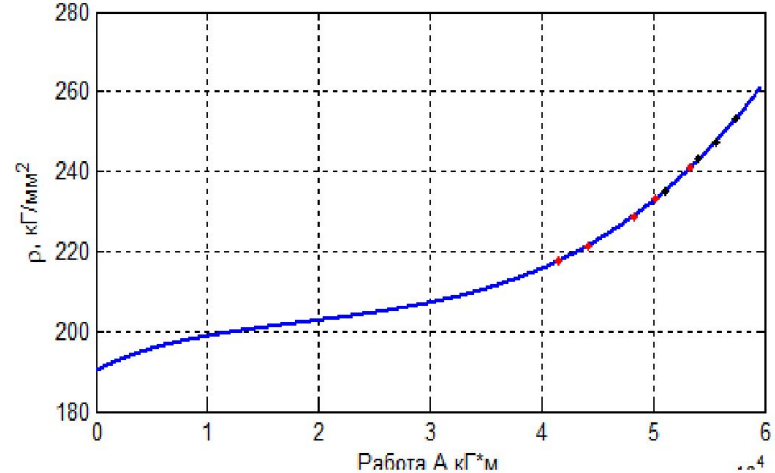
$$
\begin{cases}
m\dfrac{d^2X}{dt^2}+h_\Sigma\dfrac{dX}{dt}+c_\Sigma X=F_0^{(1)}+F^{(2)} \\
T_{P,1}\dfrac{dF_1^{(2)}}{dt}+F_1^{(2)}=k_1(X_2)^3 \\
T_{P,2}\dfrac{dF_2^{(2)}}{dt}+F_2^{(2)}=k_2X_2 \\
p_i(A)=p_{i,0}+\alpha_i^{(1)}\int\limits_0^A e^{-\eta_i^{(1)}(A-\varsigma)}N(\varsigma)d\varsigma+\alpha_i^{(2)}\int\limits_0^A e^{\eta_i^{(2)}(A-\varsigma)}N(\varsigma)d\varsigma, i=1,2,...,5 \\
p_1=\rho,\ p_2=k_1,\ p_3=k_2,\ p_4=T_1,\ p_5=T_2 \\
N(\varsigma)=V_PF_2(\varsigma), \qquad A(t)=\int\limits_0^t N(\tau)d\tau
\end{cases}
\tag{3.9}
$$

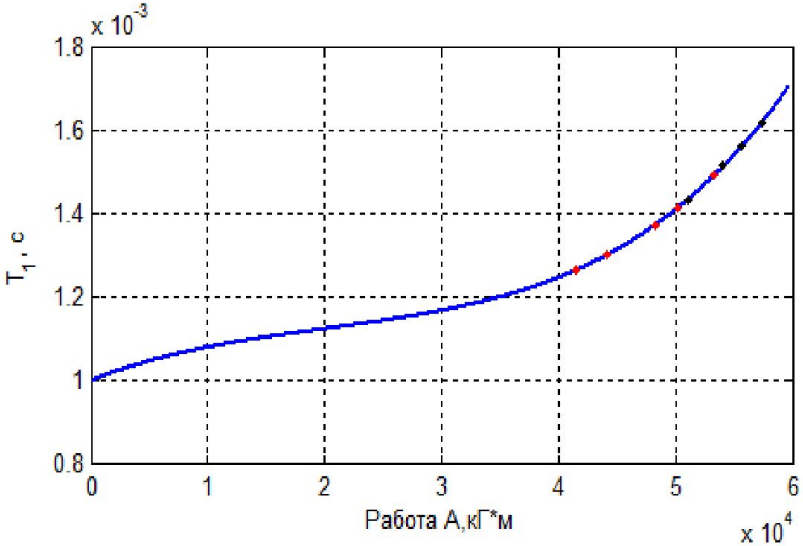
Коэффициенты интегральных операторов

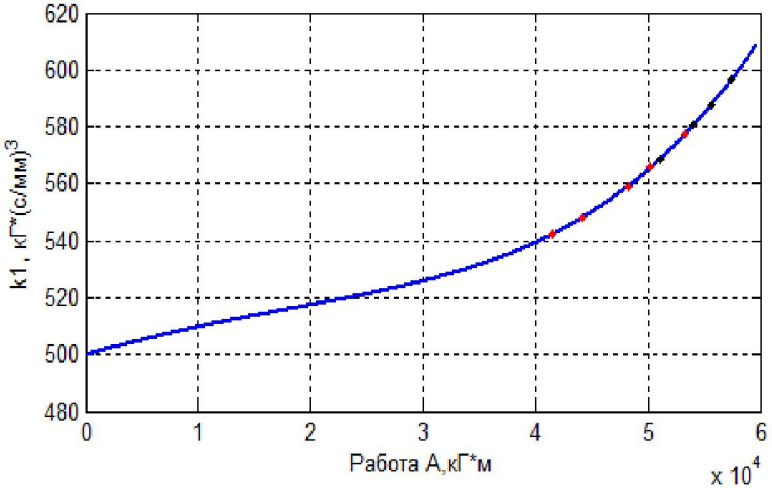
p_i	$p_{i,0}$	$\alpha_i^{(1)}$	$\eta_i^{(1)}$	$\alpha_i^{(2)}$	$\eta_i^{(2)}$
$p_1=\rho$	190	$1.1106\cdot10^{-5}$	$-2.3247\cdot10^{-4}$	$3.6723\cdot10^{-8}$	$6.7388\cdot10^{-5}$
$p_2=k_1$	100	$7.3937\cdot10^{-6}$	$-9.7620\cdot10^{-5}$	$2.0617\cdot10^{-7}$	$5.3995\cdot10^{-5}$
$p_3=k_2$	500	$1.5664\cdot10^{-4}$	$-3.3020\cdot10^{-4}$	$3.8137\cdot10^{-6}$	$1.7199\cdot10^{-5}$
$p_4=T_1$	10^{-3}	$8.43\cdot10^{-11}$	$-1.65\cdot10^{-4}$	$3.93\cdot10^{-14}$	$1.18\cdot10^{-4}$
$p_5=T_2$	$0.8\cdot10^{-3}$	$4.41\cdot10^{-11}$	$-1.69\cdot10^{-4}$	$5.25\cdot10^{-14}$	$1.01\cdot10^{-4}$

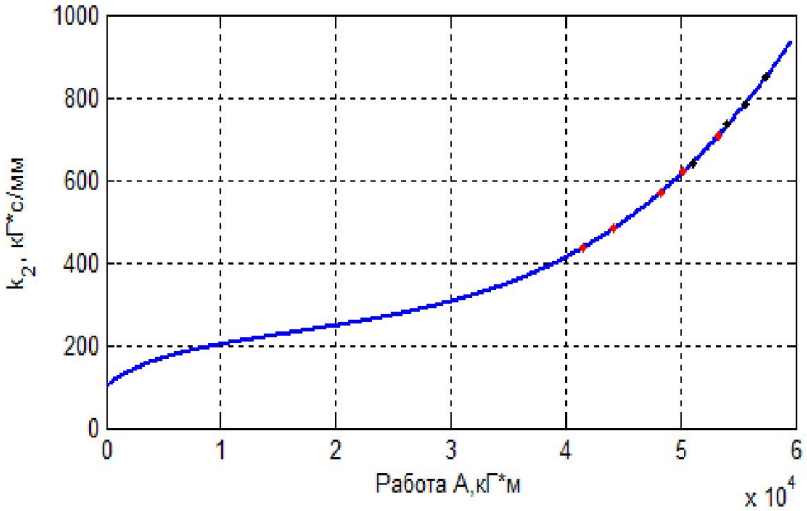


Бифуркационная эволюционная диаграмма точки равновесия по совершенной работе резания



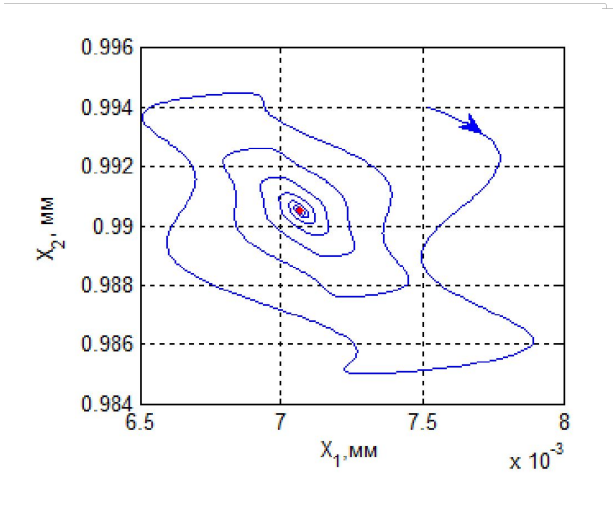




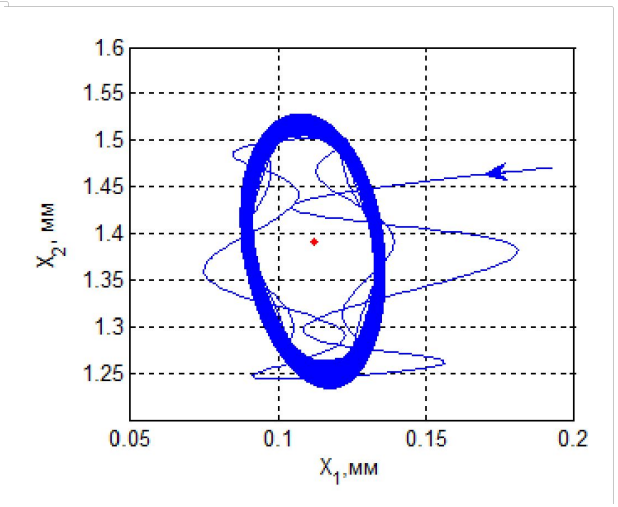


Эволюционные диаграммы изменений параметров по совершенной работе силы резания

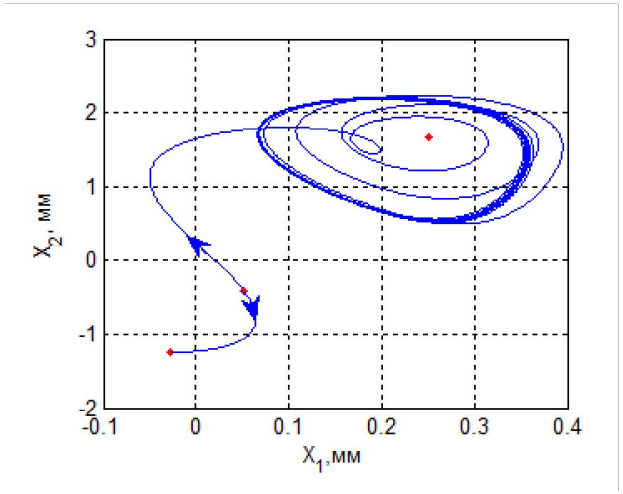
Преобразование многообразий в ходе эволюции системы



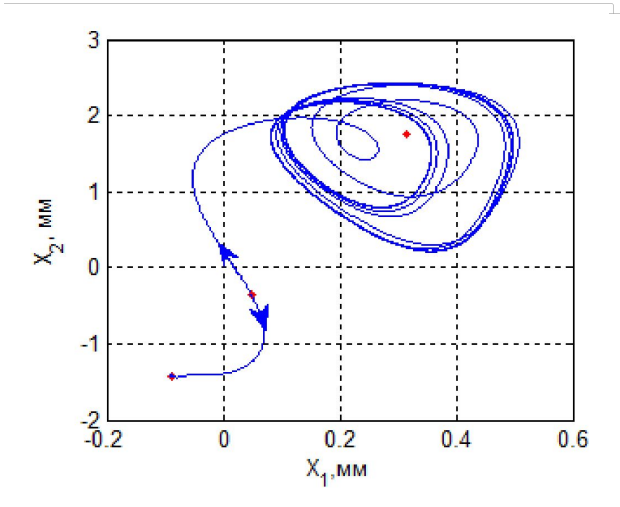
«а1»



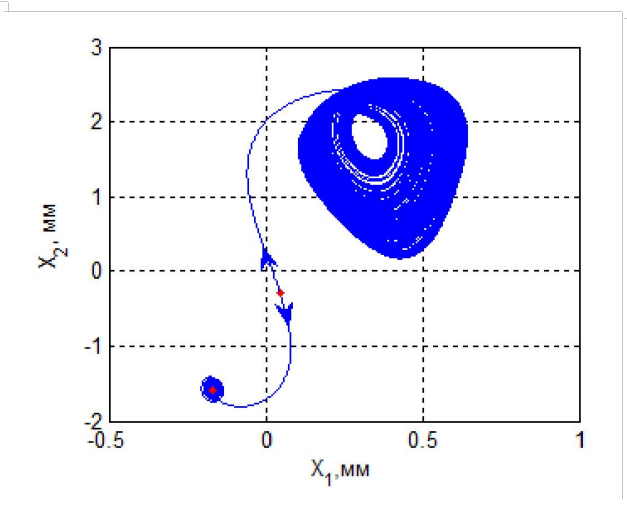
«а2»



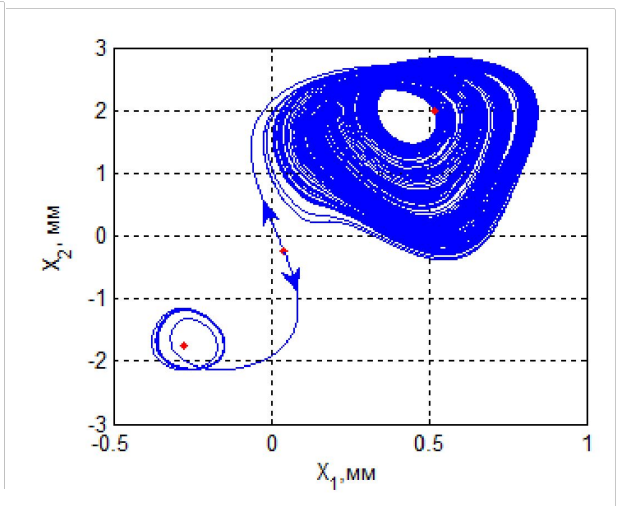
«а3»



«а4»

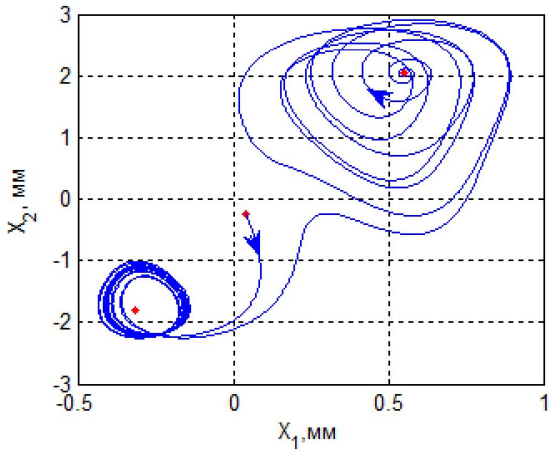


«а5»

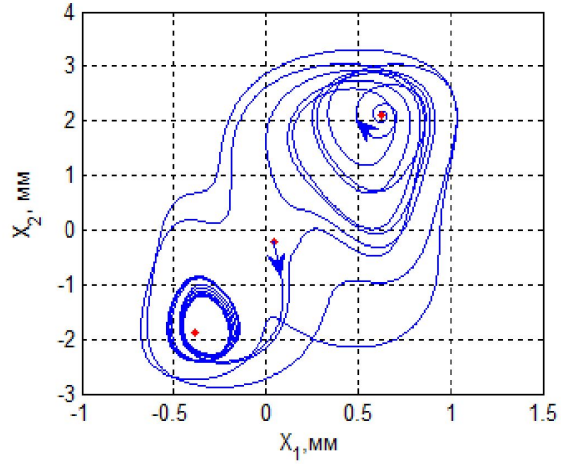


«а6»

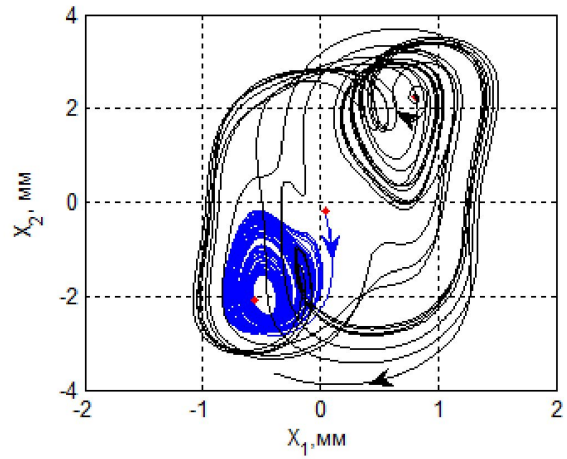
Преобразование многообразий в ходе эволюции системы



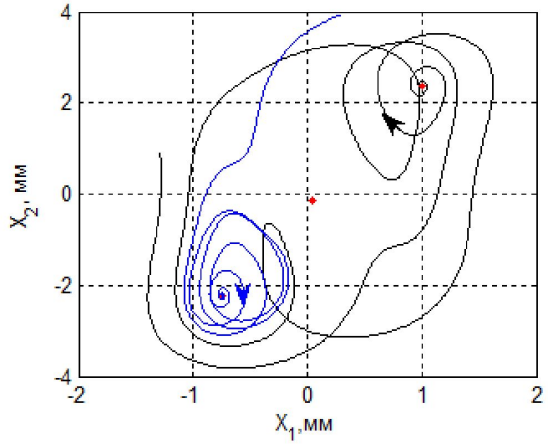
«a7»



«a8»

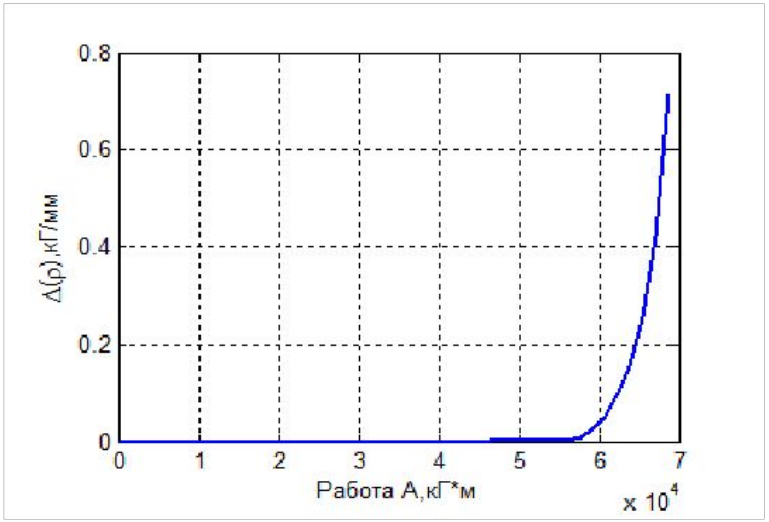


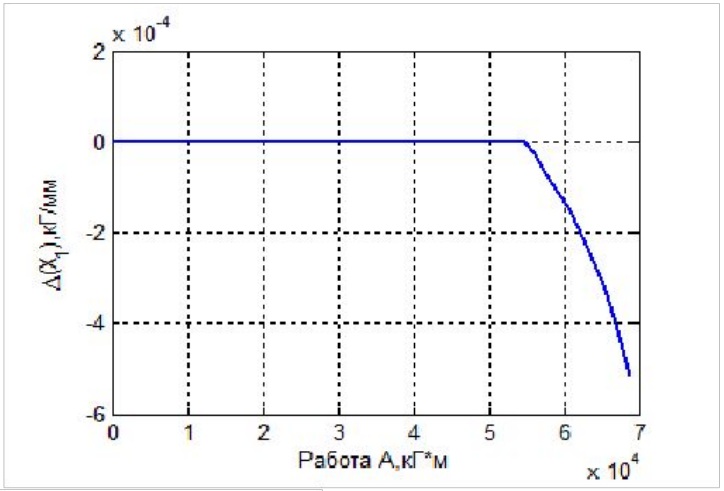
«a9»

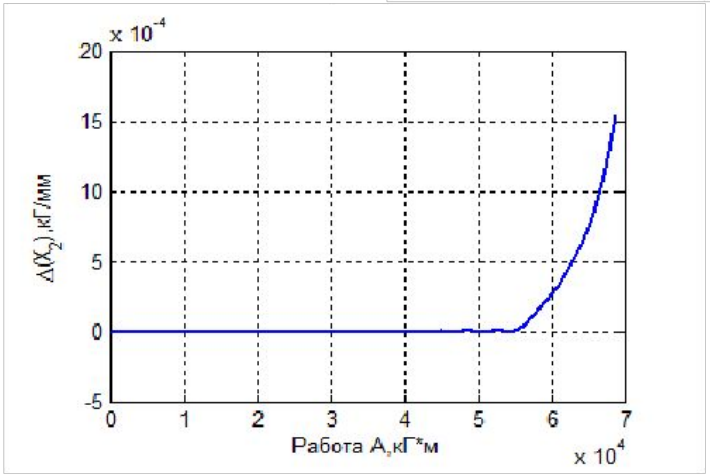


«a10»

«a1» - $A = 3.2082 \cdot 10^4, кГ \cdot м$; **«a2»** - $A = 4.1841 \cdot 10^4, кГ \cdot м$; **«a3»** - $A = 4.7015 \cdot 10^4, кГ \cdot м$;
«a4» - $A = 4.8787 \cdot 10^4, кГ \cdot м$; **«a5»** - $A = 5.0738 \cdot 10^4, кГ \cdot м$; **«a6»** - $A = 5.2907 \cdot 10^4, кГ \cdot м$;
«a7» - $A = 5.3489 \cdot 10^4, кГ \cdot м$; **«a8»** - $A = 5.4707 \cdot 10^4, кГ \cdot м$; **«a9»** - $A = 5.6684 \cdot 10^4, кГ \cdot м$;
«a10» - $A = 5.9653 \cdot 10^4, кГ \cdot м$.







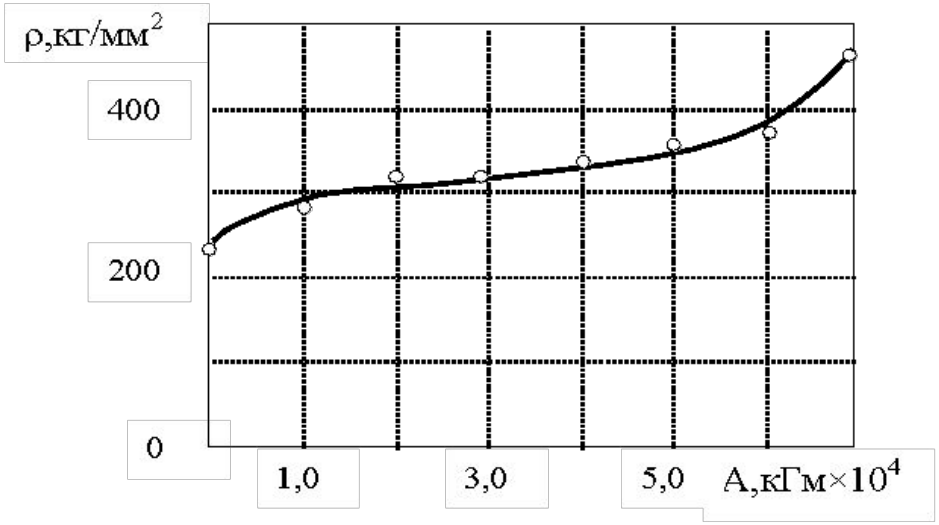
Отклонение эволюционной стационарной траектории от среднего значения за счет формированных многообразий

Принцип идентификации параметров и ядер интегральных операторов

$$p_i(A) = p_{i,0} + N \cdot [\frac{\alpha_1}{\eta^{(1)}}(1-\exp(-\eta^{(1)}A)) - \frac{\alpha_2}{\eta^{(2)}}(1-\exp(-\eta^{(2)}A))] \qquad (3.11)$$

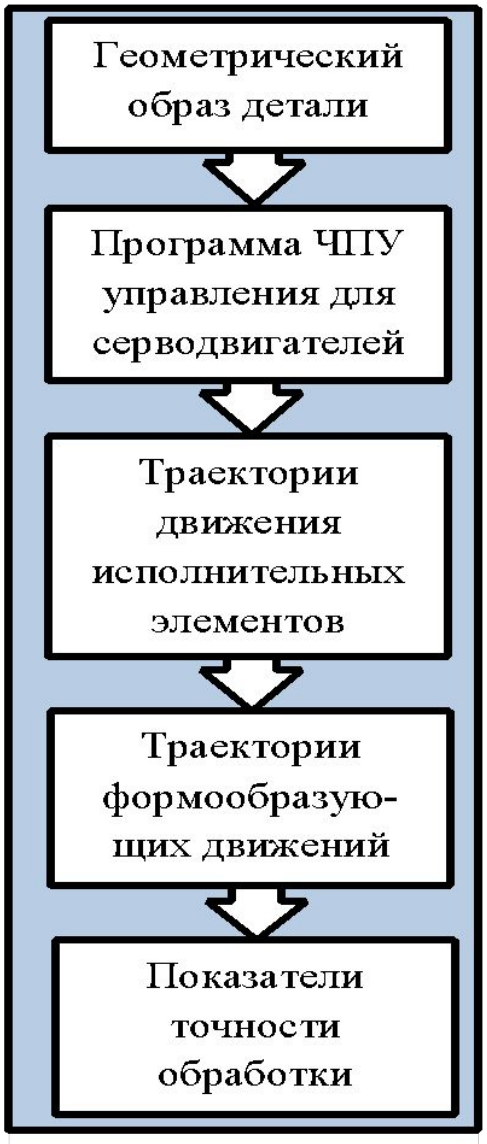
Пусть заданы значения работы сил резания $A = \{A_1, A_2, A_3, ...A_s, ...A_n\}$, которым соответствуют параметры $p_i = \{p_i(A_1), p_i(A_2), p_i(A_3), ...p_i(A_s), ...p_i(A_n)\}$. N, $p_{i,0}$ - заданы и неизменны в процессе экспериментов. Тогда для оценивания α_1, α_2, $\eta^{(1)}$, $\eta^{(2)}$ можно ввести в рассмотрение функционал

$$I(\alpha_1, \alpha_2, \eta^{(1)}, \eta^{(2)}) = \sum_{s=1}^{s=n} \{p_i(A_s) - p_{i,0} - N[\frac{\alpha_1}{\eta^{(1)}}(1-\exp(-\eta^{(1)}A_s)) - \frac{\alpha_2}{\eta^{(2)}}(1-\exp(-\eta^{(2)}A_s))]\}^2 = \min \qquad (3.12)$$

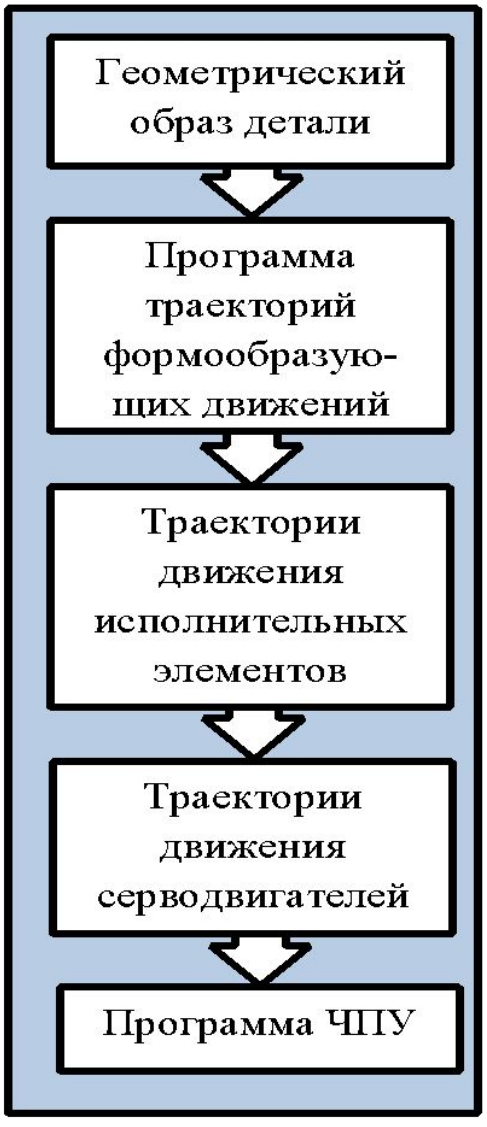


Сравнение вычисленной эволюционной траектории параметра и экспериментальных точек

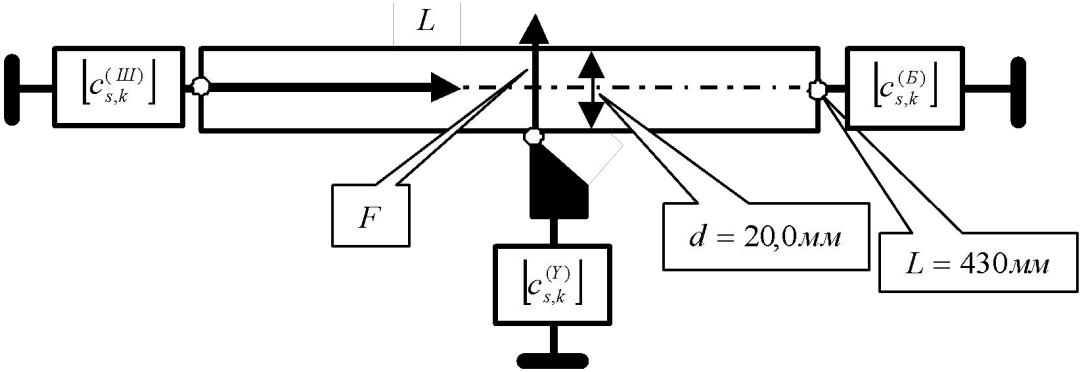
Синергетическая концепция управления точностью обработки



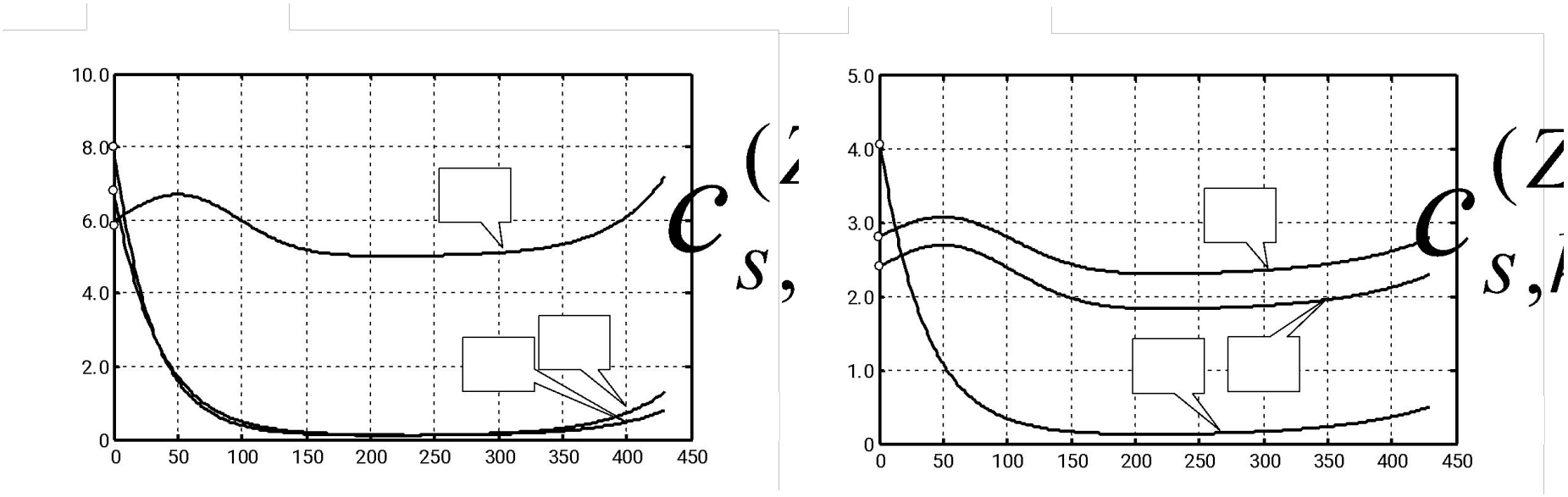
Традиционная схема управления точностью



Управление точностью на основе синергетической концепции



Пример базовой детали



Вычисленные средние значения матрицы жесткости заготовки вдоль оси L: «a» - диагональные элементы; «b»- недиагональные элементы

Для вычисления усредненных упругих деформационных смещений на каждом i-ом обороте заготовки можно воспользоваться системой

$$c_{\Sigma}(i)X(i)=\Phi(i), \tag{4.1}$$

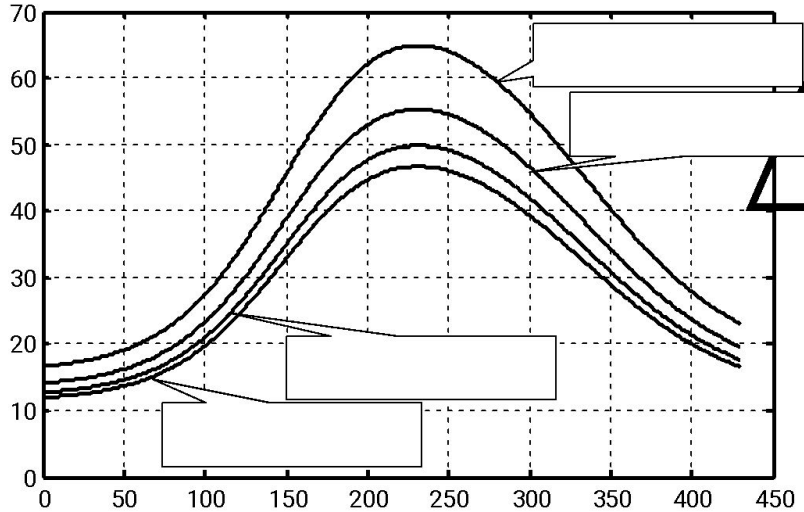
где

$$c_{\Sigma}(i)=\begin{bmatrix} c_{1,1}+\rho(i)\chi_1 S_P^{(0)}(i) & c_{2,1} & c_{3,1}+\rho(i)\chi_1 t_P^{(0)}(i) & \rho(i)\chi_1 S_P^{(0)}(i) & 0 & \rho(i)\chi_1 t_P^{(0)}(i) \\ c_{1,2}+\rho(i)\chi_2 S_P^{(0)}(i) & c_{2,2} & c_{3,2}+\rho(i)\chi_2 t_P^{(0)}(i) & \rho(i)\chi_2 S_P^{(0)}(i) & 0 & \rho(i)\chi_2 t_P^{(0)}(i) \\ c_{1,3}+\rho(i)\chi_3 S_P^{(0)}(i) & c_{2,3} & c_{3,3}+\rho(i)\chi_3 t_P^{(0)}(i) & \rho(i)\chi_3 S_P^{(0)}(i) & 0 & \rho(i)\chi_3 t_P^{(0)}(i) \\ \rho(i)\chi_1 S_P^{(0)}(i) & 0 & \rho(i)\chi_1 t_P^{(0)}(i) & c_{4,4}(i)+\rho(l_i)\chi_1 S_P^{(0)}(i) & 0 & \rho(i)\chi_1 t_P^{(0)}(i) \\ \rho(i)\chi_2 S_P^{(0)}(i) & 0 & \rho(i)\chi_2 t_P^{(0)}(i) & \rho(i)\chi_2 S_P^{(0)}(i) & c_{5,5}(i) & \rho(i)\chi_2 t_P^{(0)}(i) \\ \rho(i)\chi_3 S_P^{(0)}(i) & 0 & \rho(i)\chi_3 t_P^{(0)}(i) & \rho(i)\chi_3 S_P^{(0)}(i) & 0 & c_{6,6}(i)+\rho(i)\chi_3 t_P^{(0)}(i) \end{bmatrix}$$

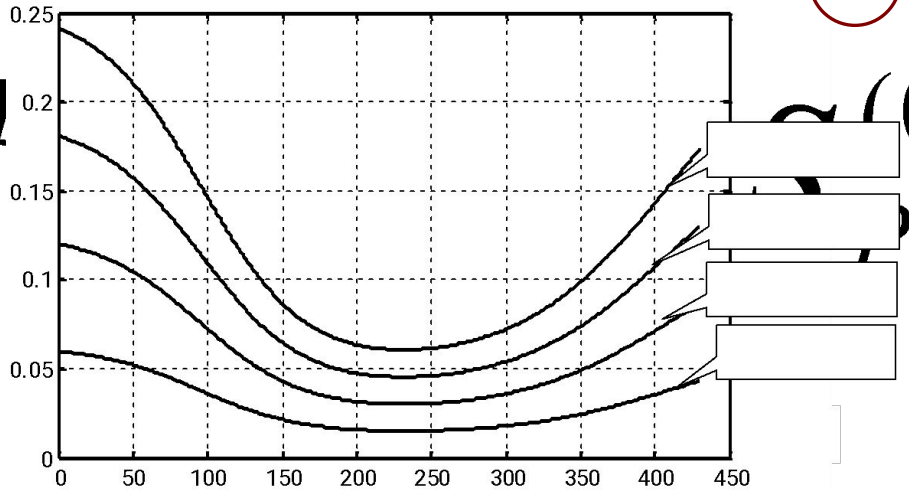
$$\Phi(i)=\rho(i)[t_P^{(0)}(i)S_P^{(0)}(i)+t_P^{(0)}(i)X_3(i-1)+t_P^{(0)}(i)X_6(i-1)]\{\chi_1,\chi_2,\chi_3,\chi_1,\chi_2,\chi_3\}^T$$

Задача синтеза управления заключается в вычислении на каждом i-ом обороте заготовки величины подачи $S_P^{(0)}(i)$, при которой обеспечивается условие

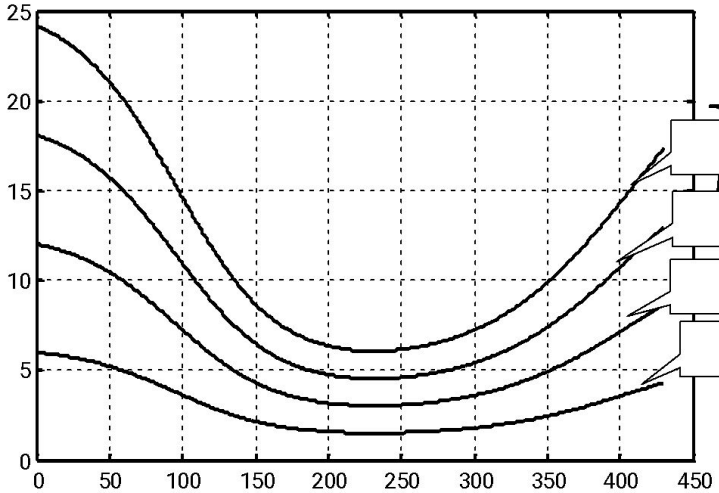
$$X_1(i)+X_4(i)=const \tag{4.2}$$



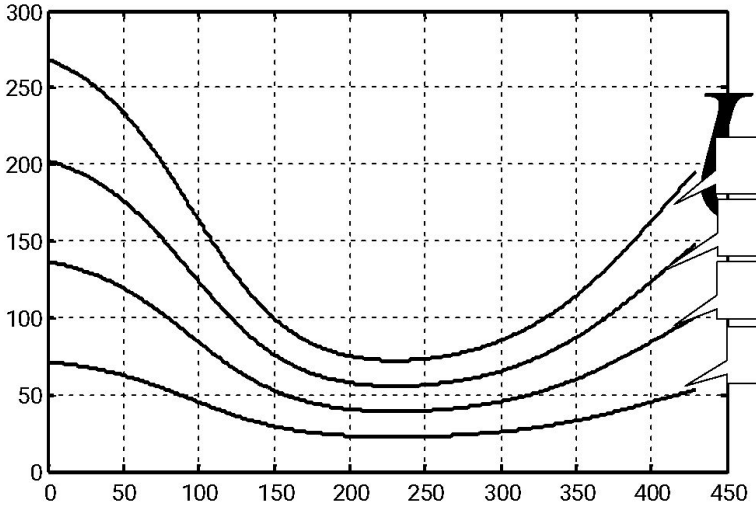
«а»



«б»



«в»

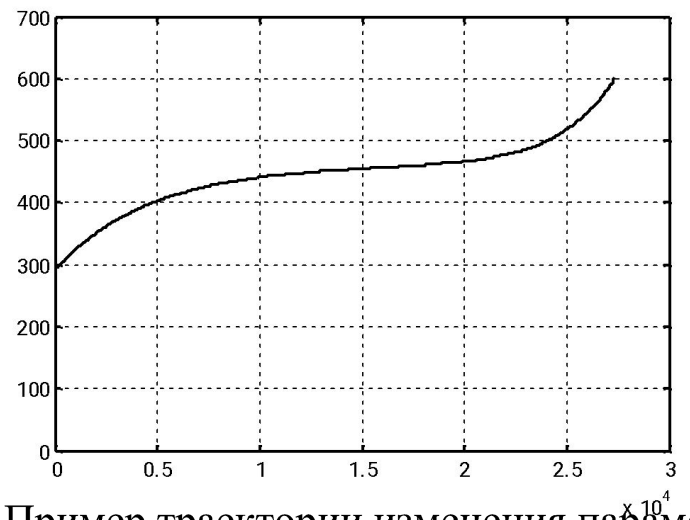


«г»

Изменение диаметра детали без управления «а». Вычисленные значения величины подачи «б», соответствующие им значения скорости подачи «в» и напряжения якоря серводвигателя (программа ЧПУ) «г», обеспечивающие постоянство диаметра детали.

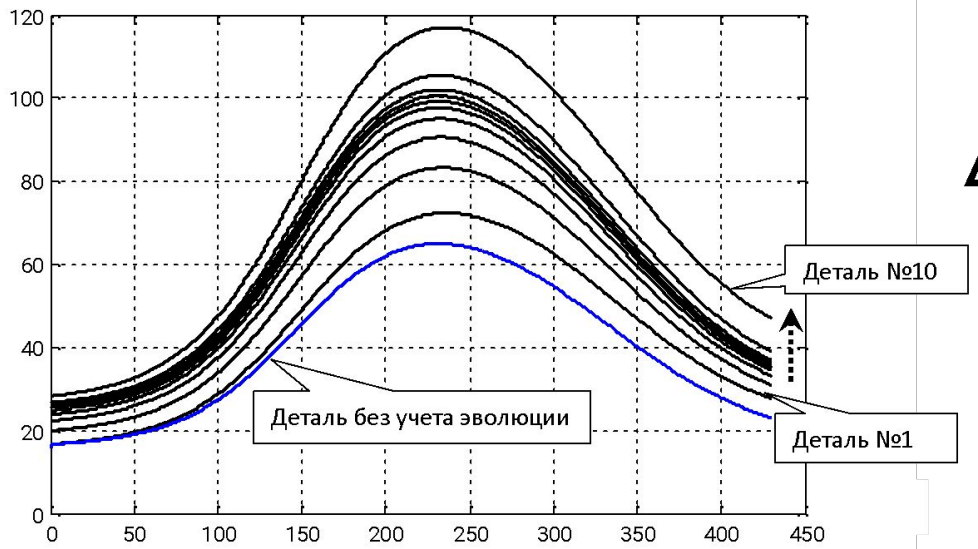
Синергетическая концепция управления точностью обработки с учетом эволюции системы

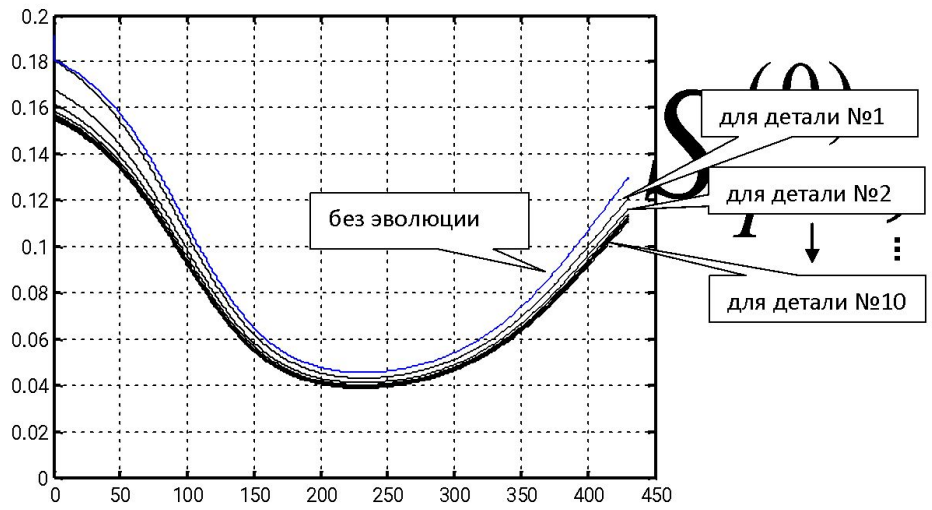
$$
\begin{cases}
\rho(i) = \rho_0 + \sum\limits_{s=2}^{s=i} N(s)[\alpha_1 \int\limits_{A(s-1)}^{A(s)} e^{\frac{\xi - A(i)}{T_1}} d\xi + \alpha_2 \int\limits_{A(s-1)}^{A(s)} e^{\frac{\xi - A(i)}{T_2}} d\xi]; \\
N(s) = V_P \chi_2 \rho(i-1)[S_P^{(0)}(i-1) t_P^{(0)}(i-1) - \ldots \\
- S_P^{(0)}(i-1)(X_1(i-1) + X_4(i-1)) + \ldots \\
- t_P^{(0)}(i-1)(X_3(i-1) + X_6(i-1)) + t_P^{(0)}(i-1)(X_3(i-2) + X_6(i-2))]; \\
A(i) = \sum\limits_{s=1}^{s=i} N(s) T.
\end{cases}
\qquad (4.3)
$$



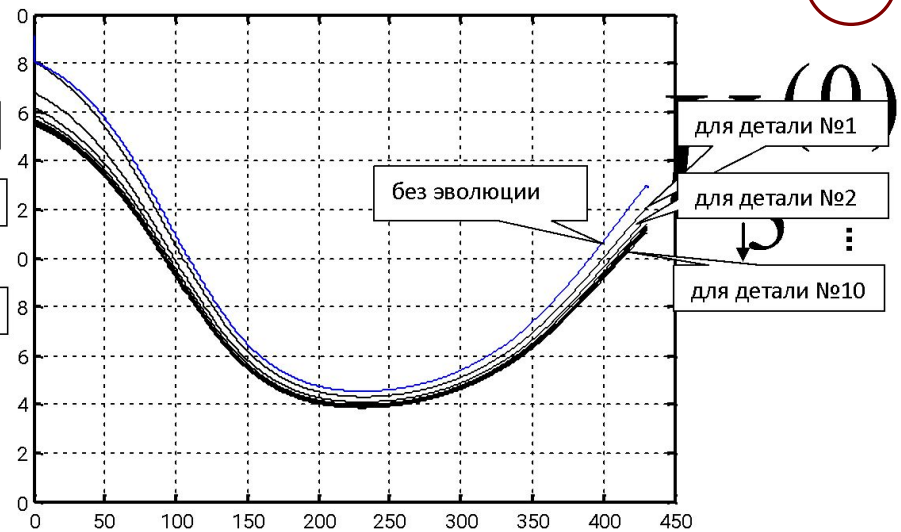
Пример траектории изменения параметра ρ по совершенной работе резания

Изменение диаметра детали вдоль координат обработки без учета и с учетом эволюции системы при обработке партии из 10 деталей при постоянных режимах резания: скорость резания $V_P^{(0)} = 60{,}0 м/мин$, глубина резания $t_P^{(0)} = 2{,}0 мм$, подача на оборот $S_P^{(0)} = 0{,}2 мм/об$.

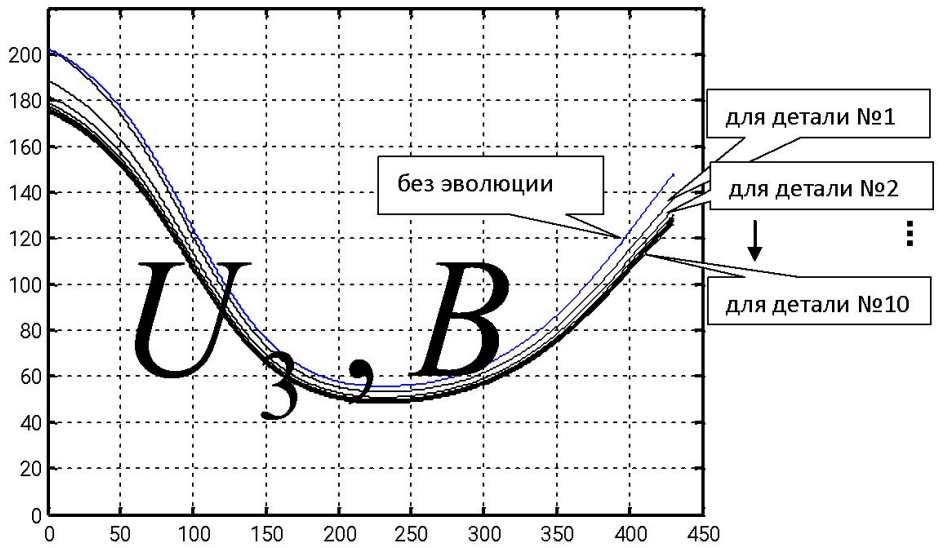




«a»

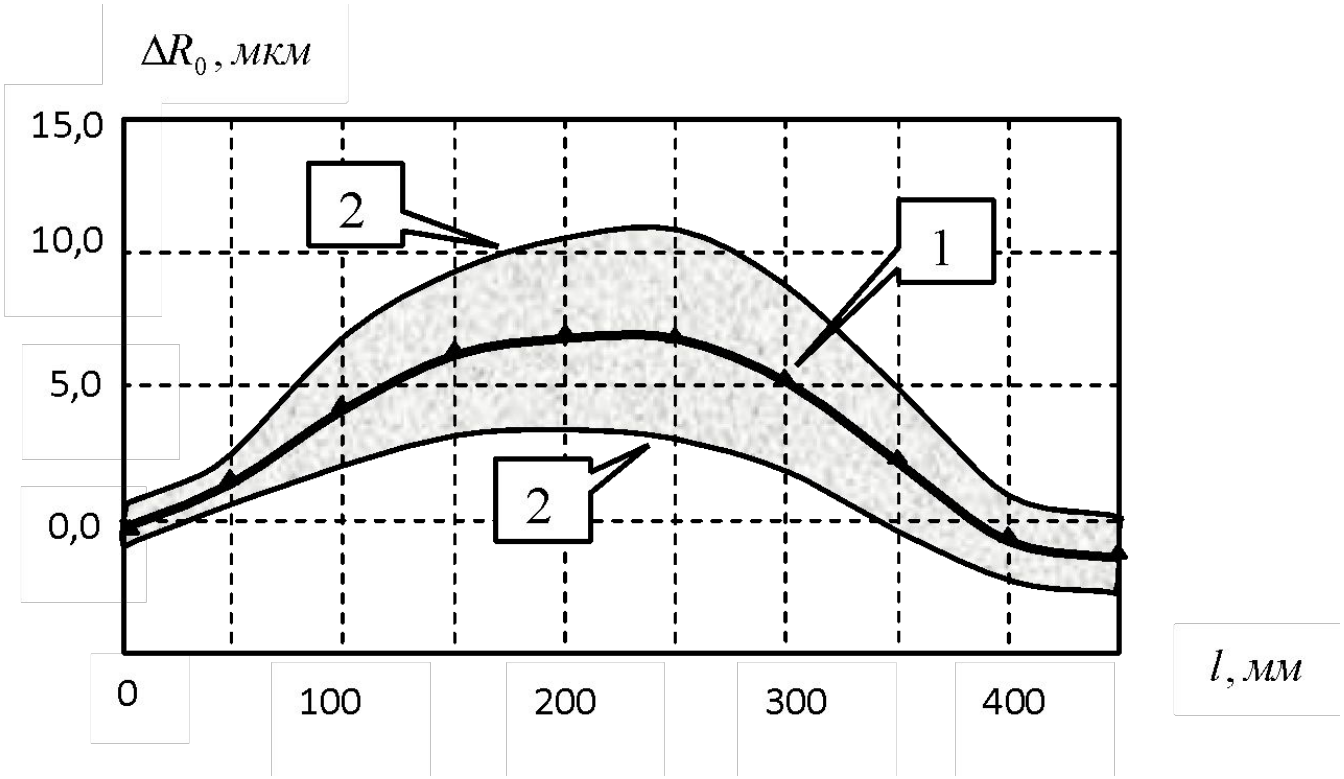


«b»



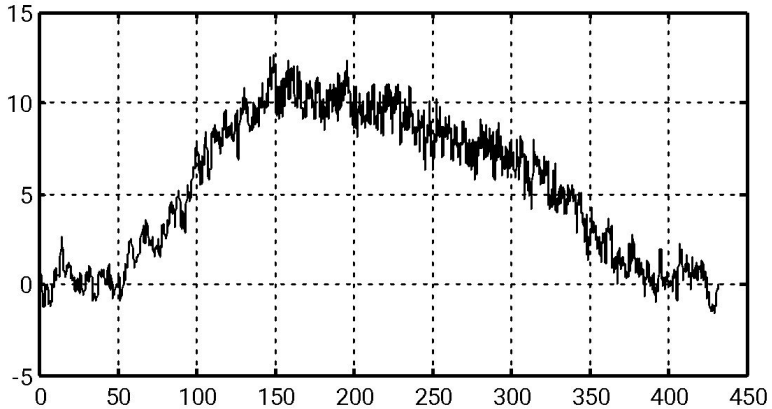
«c»

Вычисленные значения величины подачи, обеспечивающие постоянство диаметра детали «a», соответствующие им траектории изменения скорости подачи «b», напряжения якоря серводвигателя «c»: скорости резания $V_P^{(0)} = 60, м/мин$, глубине резания $t_P^{(0)} = 2, мм$.



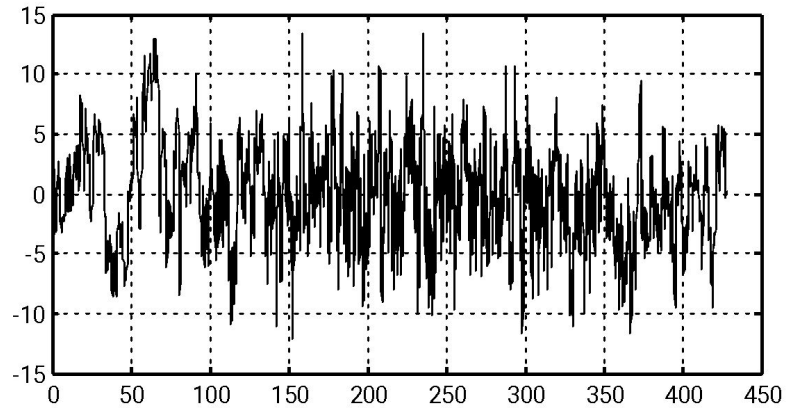
Экспериментально полученные вариации текущего значения диаметра детали при обработке партии из десяти деталей. 1 – математическое ожидание, 2 – поле разброса.

Пример кинематических возмущений и их влияние на точность обработки



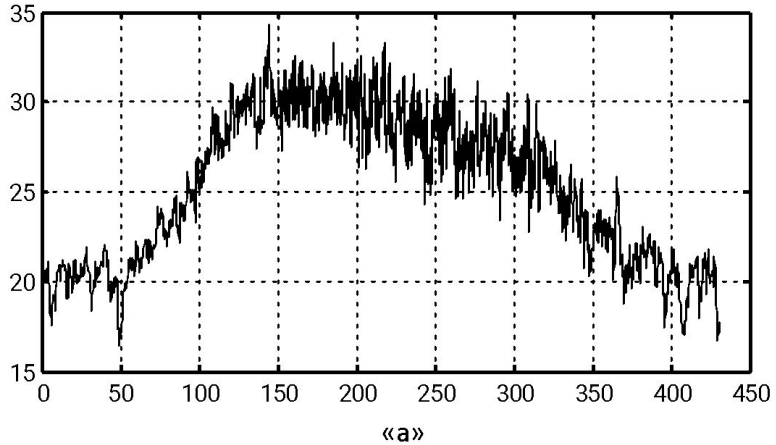
$\hat{X}$

Пример реализации кинематических возмущений в направлении, нормальном к оси вращения заготовки

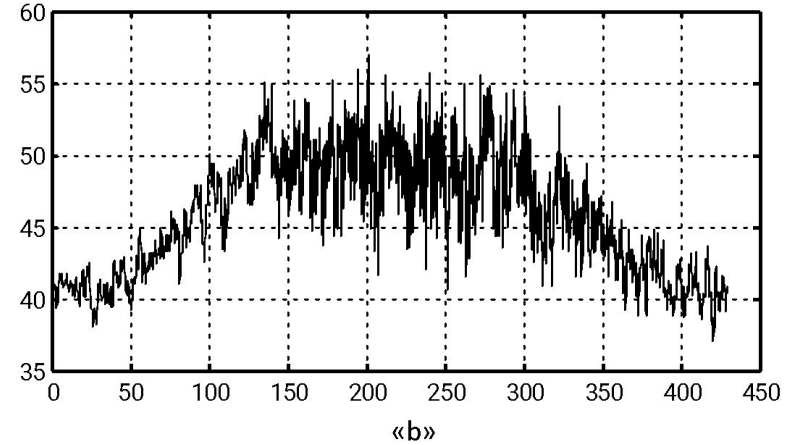


S

Пример реализации кинематических возмущений в направлении скорости продольного перемещения суппорта



Δ



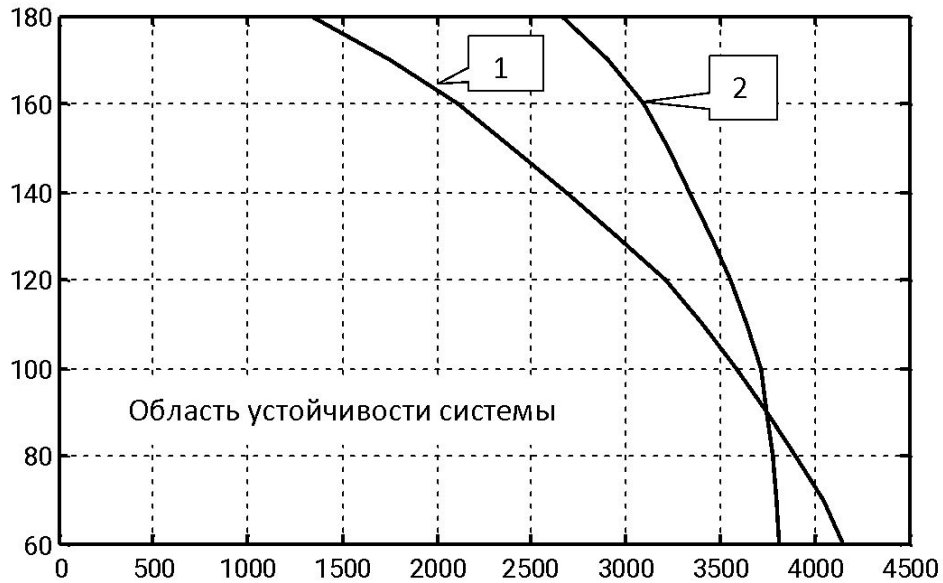
Δ

Изменение геометрической погрешности обработанной детали: «a»-для $\rho = 290, кГ/мм^2$, «b»-для $\rho = 600, кГ/мм^2$

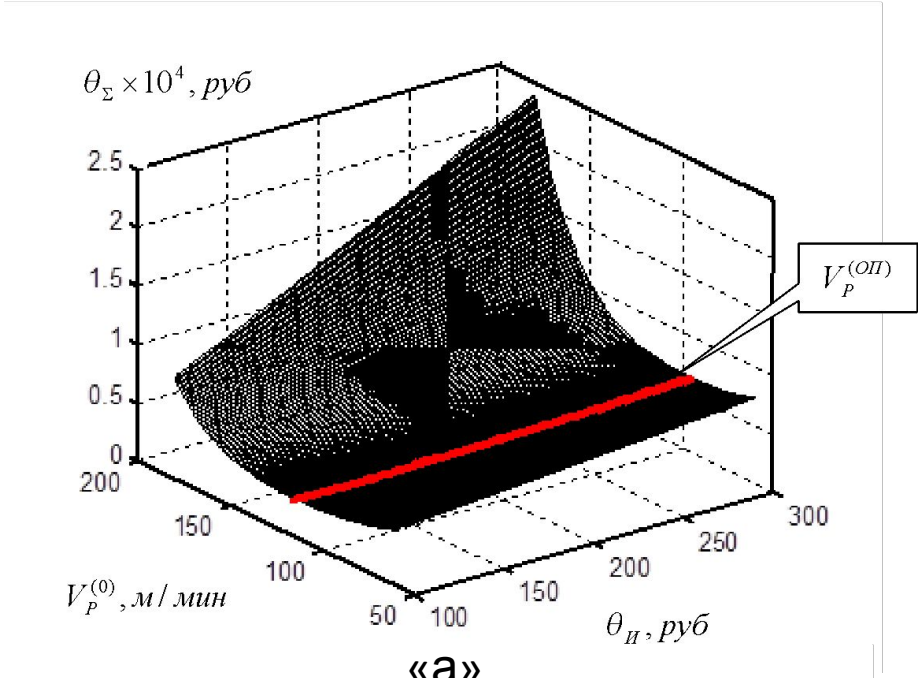
Выбор оптимальной траектории на многообразии желаемых траекторий формообразующих движений

$$\theta_{\Sigma} = \theta_{C}(T_{M} + N\Delta T) + \theta_{И}(kT_{И}) \qquad (4.4)$$

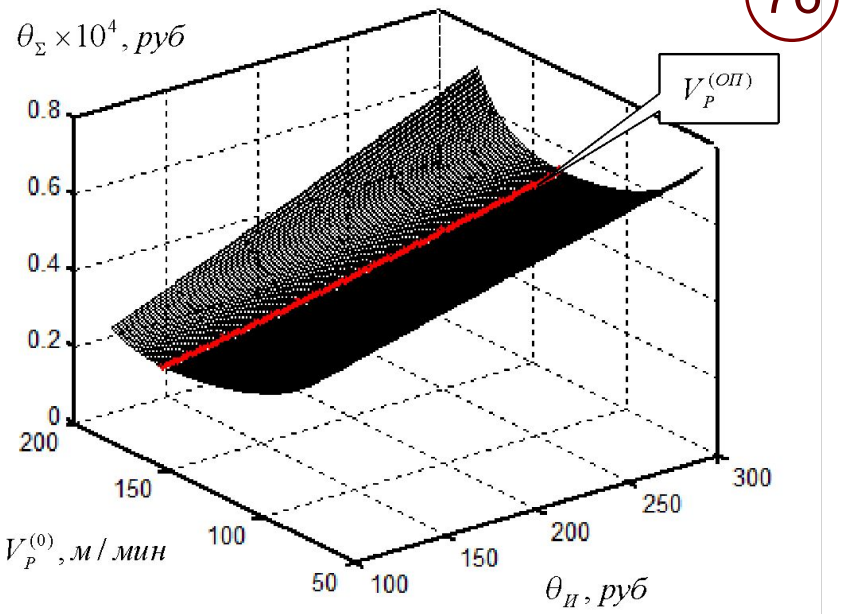
где T_{M} - время процесса резания; ΔT - время на установку детали и ее замену; $T_{И}$ - приведенное время, затрачиваемое на замену инструмента и его настройку (всего k замен); стоимость станкоминуты θ_{C} и стоимость инструмента с учетом его замены, установки и настройки на размер $\theta_{И}$.



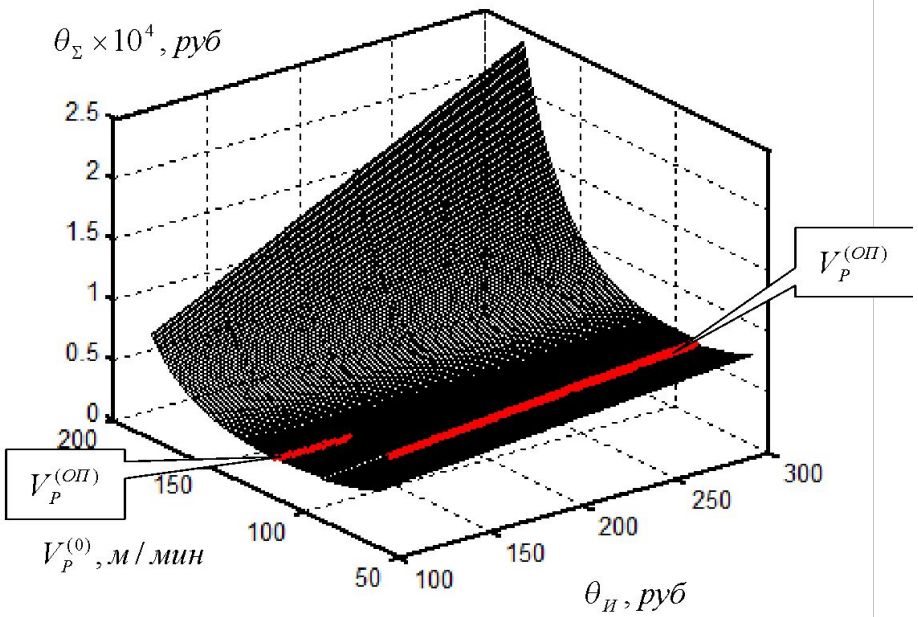
Терминальные траектории системы резания по пути при различных скоростях резания: 1- терминальная траектория по критерию устойчивости системы, 2 – терминальная траектория по критерию износа инструмента



«a»



«b»



«c»

Изменение оптимальных значений скорости резания в зависимости стоимости инструмента: «а» - по критическому износу инструмента; «б» - по условию потери устойчивости; «с» при одновременном учете двух критериев

Характеристический полином базовой динамической системы резания

$$\Delta(p) =$$

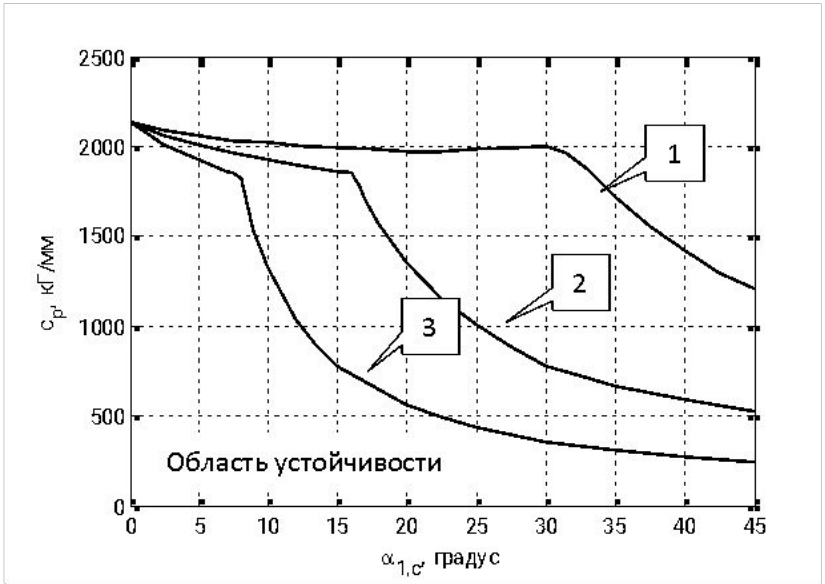
$$= \left| \begin{array}{l} m_{0,1}p^2 + [h_{0,1} - \dfrac{\rho t_P^{(0)}[T_1 \cos\alpha_2 \sin\alpha_{1,c} - T_2 \sin\alpha_2 \cos\alpha_{1,c}]\cos\alpha_2}{\sin\varphi}]p + c_{0,1} + \dfrac{\rho t_P^{(0)} \cos\alpha_2 \sin(\alpha_{1,c} - \alpha_2)}{\sin\varphi} \quad \Leftrightarrow \\ \quad - \dfrac{\rho t_P^{(0)}[T_1 \sin\alpha_2 \sin\alpha_{1,c} + T_2 \cos\alpha_2 \cos\alpha_{1.C}]\cos\alpha_2}{\sin\varphi} p + \dfrac{\rho t_P^{(0)} \cos\alpha_2 \cos(\alpha_{1,c} - \alpha_2)}{\sin\varphi} \quad \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \quad - \dfrac{\rho t_P^{(0)}[T_1 \cos\alpha_2 \sin\alpha_{1,c} - T_2 \sin\alpha_2 \cos\alpha_{1,c}]\sin\alpha_2}{\sin\varphi} p + \dfrac{\rho t_P^{(0)} \sin\alpha_2 \sin(\alpha_{1,c} - \alpha_2)}{\sin\varphi} \\ \Leftrightarrow \quad m_{0,2}p^2 + [h_{0,2} - \dfrac{\rho t_P^{(0)}[T_1 \sin\alpha_2 \sin\alpha_{1.c} + T_2 \cos\alpha_2 \cos\alpha_{1.c}]\sin\alpha_2}{\sin\varphi}]p + [c_{0,2} + \dfrac{\rho t_P^{(0)} \sin\alpha_2 \cos(\alpha_{1,c} - \alpha_2)}{\sin\varphi}] \end{array} \right| = 0 \qquad (4.5)$$

где $T_1 = \dfrac{\xi l_u}{V_P^{(0)}}; T_2 = \dfrac{l_u}{V_P^{(0)}}$, l_u - длина контакта стружки с передней поверхностью инструмент $l_И = S_P^{(0)} \sin\varphi \xi^{0,1}[\xi(1 - tg\gamma) + \dfrac{2}{\cos\gamma}]$; $\rho(V_P^{(0)}) = \rho_0 \exp(-\dfrac{V_P^{(0)}}{T_{V_P}}) + \rho_\infty$;

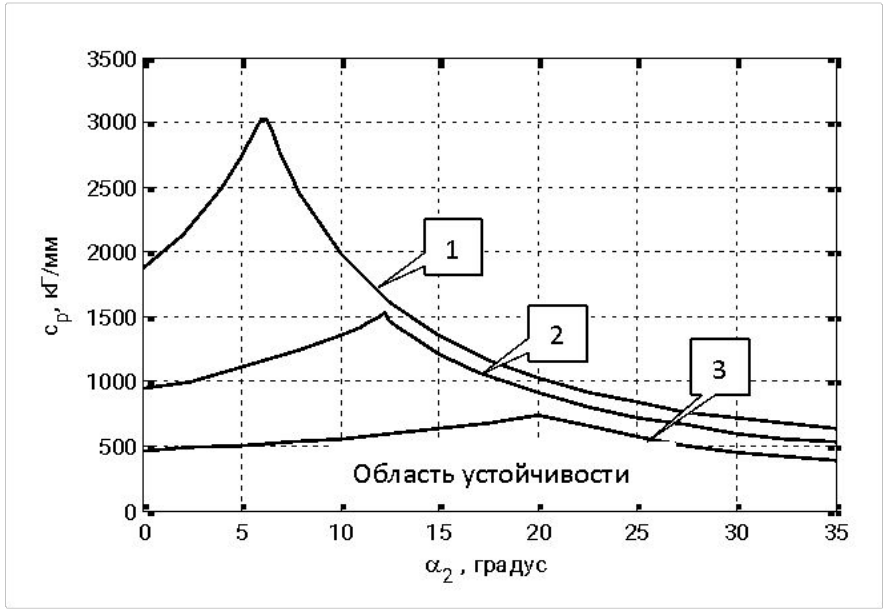
- $\alpha_{1,c}$ - угол ориентации сил резания, который при заданных технологических режимах и физико-механических свойствах обрабатываемой заготовки зависит от геометрии инструмента;
- α_2 - угол ориентации осей эллипса жесткости, изменению которого соответствующее конструкционное изменение элементов подсистем;
- φ - главный угол на плане.

Влияние геометрических параметров инструмента на область устойчивости системы

$c_P = \dfrac{\rho t_P^{(0)}}{\sin\varphi}$ - коэффициент, который при прочих неизменных условиях зависит от глубины резания $t_P^{(0)}$. Именно поэтому в рекомендациях ЭНИМС при производственных испытаниях принято рассматривать предельную глубину резания, при которой система теряет устойчивость.

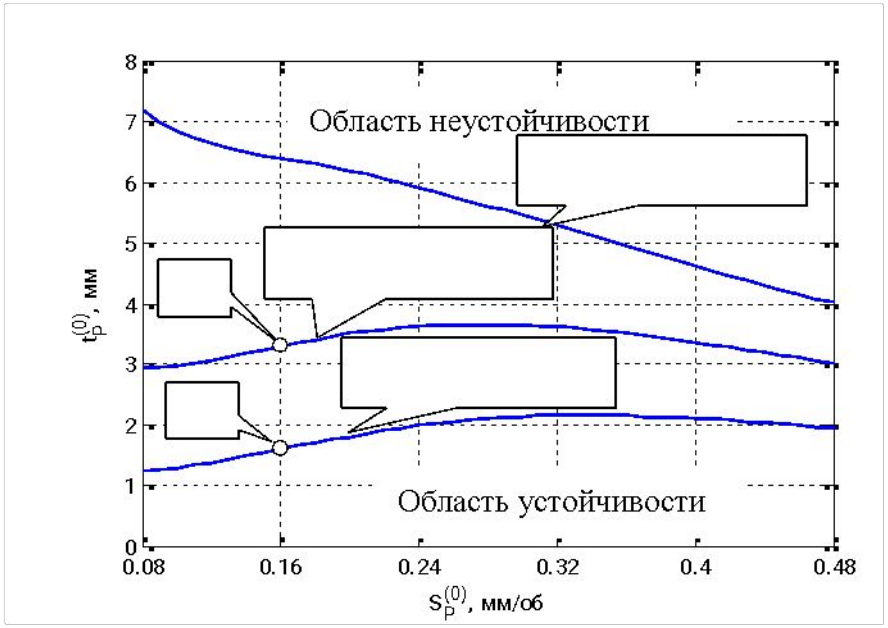


Смещение границы области устойчивости параметров и при заданной ориентации осей эллипса жесткости при изменении соотношения запаздывающих аргументов и : ( ) 1- ; 2- ; 3 - .

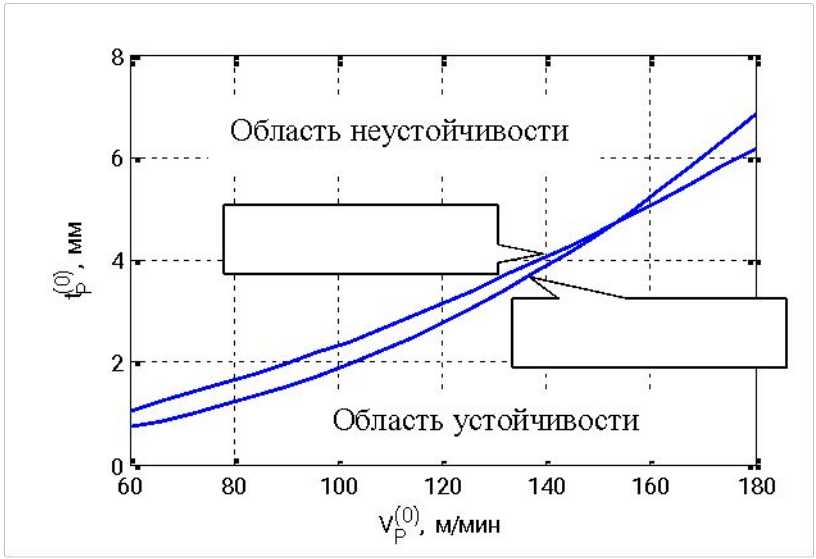


Смещение границы области устойчивости параметров и при заданной ориентации силы резания и при изменении соотношения запаздывающих аргументов и : ( ) 1- ; 2- ; .

Влияние технологических параметров на область устойчивости системы



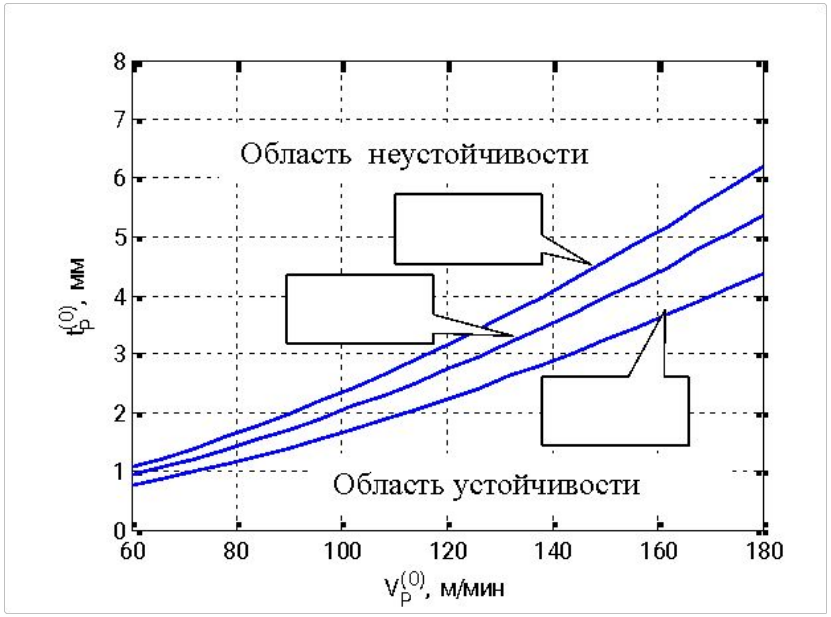
Области устойчивости на плоскости технологических параметров , при различных значениях скорости резания



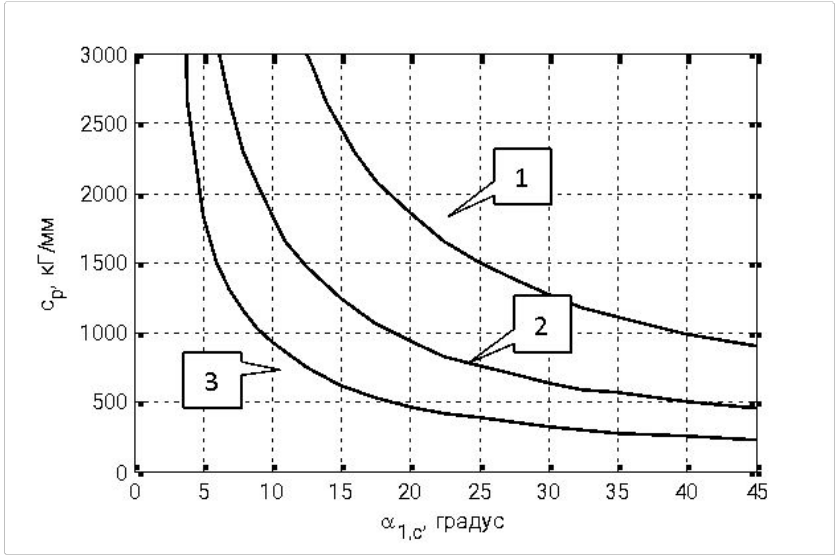
Области устойчивости на плоскости технологических параметров , при различных значениях подачи на оборот

Влияние конструктивных параметров подсистем инструмент и заготовки на область устойчивости системы

- Проектирования наклонных направляющих несущей системы станка
- Разработка резцедержавки со анизотропно структурированными свойствами упругости и диссипации



Области устойчивости на плоскости технологических параметров , при различных значениях главного угла на плане .



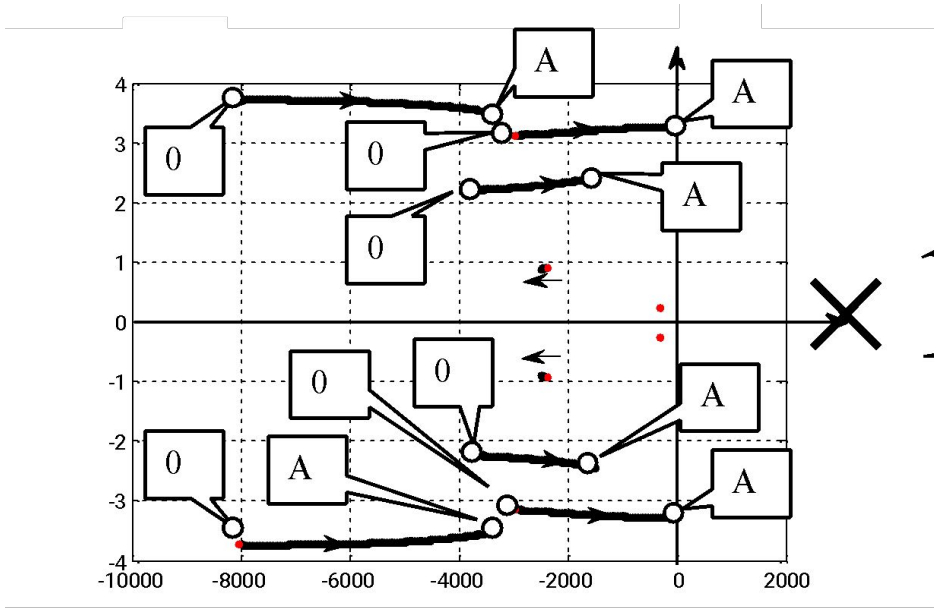
Смещение границы области устойчивости параметров и при заданной ориентации осей эллипса жесткости при изменении соотношения запаздывающих аргументов и : ( ) 1- ; 2- ; .

Динамический мониторинг

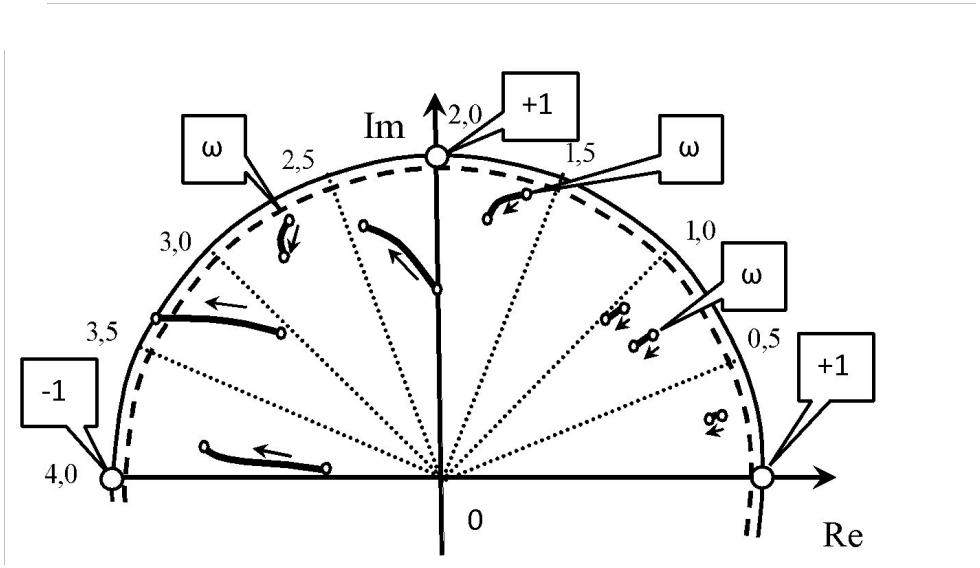
Отображение изменения состояния процесса резания и качества изготовления деталей в параметрах динамической системы

	Диагностируемый параметр	Диагностический признак
1	Износ инструмента. Эволюционные изменения системы резания	Смещения корней характеристического полинома авторегрессионной модели (АРМ), ответственных за общее решение линеаризованной динамической модели процесса резания. Изменение дисперсии распределения корней относительно центров их группирования
2	Интенсивность износа инструмента	Смещения корней характеристического полинома АРМ от единичной окружности к началу координат. Уширение спектральной линии основных осцилляторов.
3	Изменения динамических характеристик системы резания	Смещения корней характеристического полинома АРМ в комплексной плоскости по отношению корней системы без резания. Перестройка частот автоспектров в среднечастотном диапазоне (0,5-10) кГц.
4	Развитие определенности координат состояния процесса резания	Уменьшение функции когерентности между координатами. Увеличение дисперсии распределения корней относительно центров их группирования.
5	Смешение точки равновесия динамической системы резания. Параметры макрогеометрической погрешности	Смешения корней характеристического полинома АРМ, априорная информация о матрицах жесткости инструмента и заготовки, а также зависимостях сил от технологических режимов.
6	Параметры микрогеометрической погрешности (шероховатость формируемой поверхности)	Смешения корней характеристического полинома . Увеличение дисперсии распределения корней относительно центров их группирования.
7	Оценивание критических значений при резании (потери устойчивости, терминального значения износа и др)	Смешения корней характеристического полинома . Критические ситуации во всех случаях вызывают развитие нестационарности в сигнале виброакустической эмиссии.

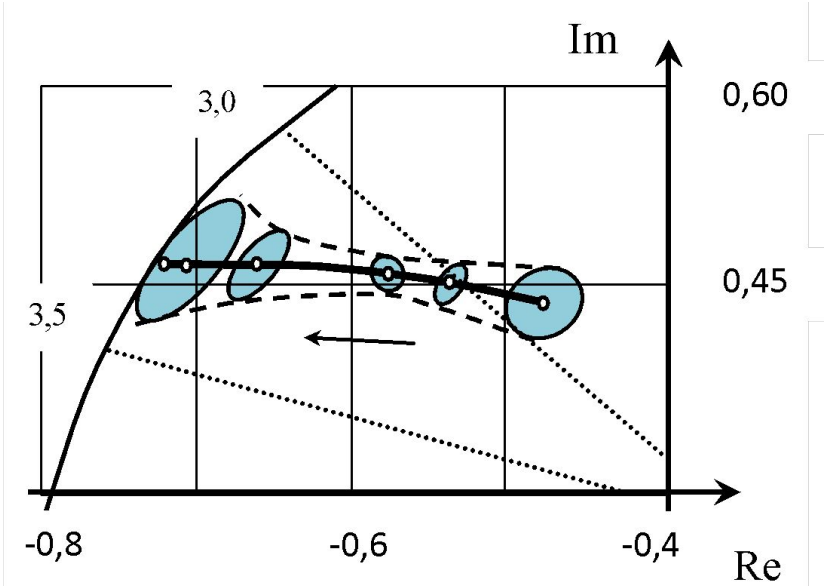
Пример прогнозирования потери устойчивости системы



Пример эволюционных траекторий смещения корней характеристического полинома

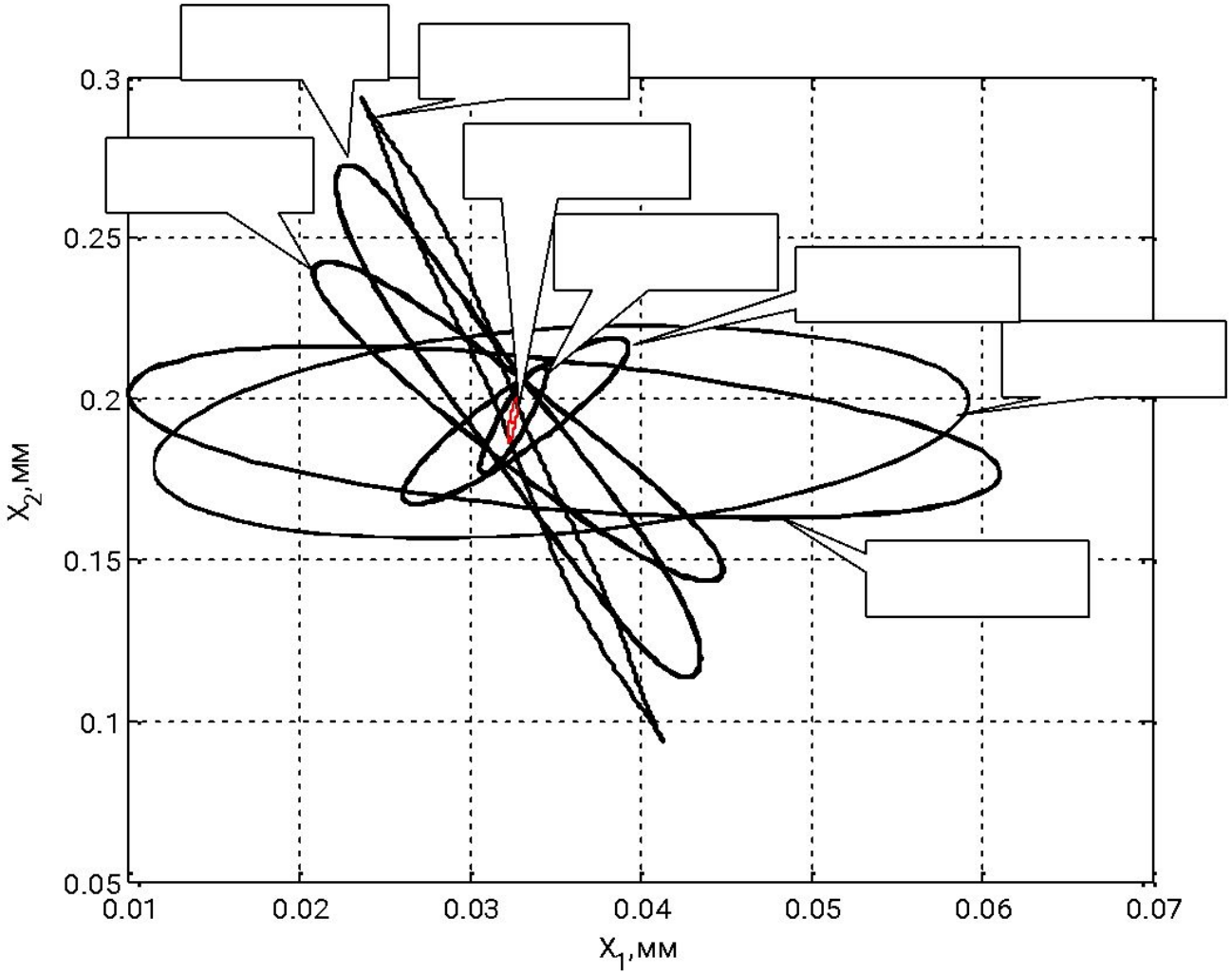


Пример эволюционных траекторий смещения модели корней характеристического полинома АРС



Эволюционные преобразования одного корня АРС модели

Вибрационное управление процессом резания



Управление ориентацией колебаний инструмента относительно заготовки в плоскости путем изменения частоты внешних силовых возмущений

ОБЩИЙ ВЫВОД

В работе разработаны методы анализа и синтеза управляемой динамической системы резания с учетом эволюционных изменений связей и процессов самоорганизации на основе системного анализа динамики процесса резания. Принципиальным отличием развиваемого подхода от существующих является анализ динамической системы резания в целом с раскрытием главной динамической связи, формируемой процессом резания, которая объединяет все подсистемы автономных движений приводов и взаимодействующие подсистемы инструмента и заготовки. Выполненные исследования показали, что изолированное рассмотрение подсистем, во первых, не учитывает их взаимодействий, во вторых, не позволяет раскрыть все возможности управления системой в целом.

Основные результаты исследований опубликованы в 50 работах. Основные из которых:

Монографии

1. *Заковоротный В.Л., Лукьянов А.Д., Нгуен Донг Ань., Фам Динь Тунг.* Синергетический системный синтез управляемой динамики металлорежущих станков с учетом эволюции связей. Издат. центр ДГТУ, -Ростов – на Дону, 2008.-323 с.

Публикации в журналах из перечня ВАК РФ

2. *Фам Динь Тунг.* Математическое моделирование эволюционных преобразований динамики механической системы, взаимодействующей со средой /*Заковоротный В.Л., Нгуен Донг Ань., Фам Динь Тунг*// Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. Специальный выпуск.−2007. –С. 30-38.
3. *Фам Динь Тунг.* Моделирование эволюции динамической системы, взаимодействующей со средой/ *Заковоротный В.Л., Фам Динь Тунг*// Вестник Донского государственного технического университета. − 2006.− Т. 6, №3.−С. 184-199.
4. *Фам Динь Тунг.* Устойчивость эволюционной траектории механической системы, взаимодействующей с трибосредой/ *Заковоротный В.Л., Нгуен Донг Ань., Фам Динь Тунг*// Вестник Донского государственного технического университета. − 2007.− Т. 7, №4.−С. 425-440.
5. *Фам Динь Тунг.* Устойчивость эволюционной траектории механической системы, взаимодействующей с трибосредой/ *Заковоротный В.Л., Фам Динь Тунг*// Вестник Саратовского государственного технического университета. − 2009. №3(41). Выпуск 2. с 84-92.
6. *Фам Динь Тунг.* Математическое моделирование и параметрическая идентификация динамических свойств подсистем инструмента и заготовки при точении/ *Заковоротный В.Л., Нгуен Суан Тьем, Фам Динь Тунг*// Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2011. №2. 38-46
7. *Фам Динь Тунг.* Моделирование деформационных смещений инструмента относительно заготовки при точении/ *Заковоротный В.Л., Нгуен Суан Тьем, Фам Динь Тунг*// Вестник Донской государственного технического университета. 2010. №7, с 1005-1015.
8. *Фам Динь Тунг.* Моделирование и идентификация инерционных и диссипативных свойств подсистем режущего инструмента и заготовки при точении/ *Заковоротный В.Л., Нгуен Суан Тьем, Фам Динь Тунг*// Вестник Донской государственного технического университета. 2010. №8, с 1165-1177.

9. *Фам Динь Тунг.* Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (позиционная связь)/ *Заковоротный В.Л., Нгуен Суан Тьем, Фам Динь Тунг*// Вестник Донской государственного технического университета. 2011. №3. С 301-312.
10. *Фам Динь Тунг.* Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (скоростная связь)/ *Заковоротный В.Л., Нгуен Суан Тьем, Фам Динь Тунг*// Вестник Донской государственного технического университета. 2011. №2. С 137-147.
11. *Фам Динь Тунг.* Особенности преобразования траекторий исполнительных элементов токарного станка в траектории формообразующих движений инструмента относительно заготовки/ *Заковоротный В.Л., Фам Динь Тунг*// Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2011. №4. С 69-75.
12. *Фам Динь Тунг.* Частотные свойства преобразования траекторий исполнительных элементов токарного станка в траектории формообразующих движений инструмента относительно заготовки/ *Заковоротный В.Л., Фам Динь Тунг*// Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2011. №5. С 30-37.
13. *Фам Динь Тунг.* Влияние скоростных связей на устойчивость равновесия динамической системы процесса точения/*Заковоротный В.Л., Нгуен Суан Тьем, Фам Динь Тунг*// Вестник Донской государственного технического университета. 2011. №8.
14. *Фам Динь Тунг.* Потеря устойчивости равновесия динамической системы процесса точения за счет позиционных связей процесса обработки/*Заковоротный В.Л., Нгуен Суан Тьем, Фам Динь Тунг*// Вестник Донской государственного технического университета. 2011. №8.
15. *Фам Динь Тунг.* Свойства стационарных многообразий, формируемых в окрестности точки равновесия динамической системы резания/ *Заковоротный В.Л., Фам Динь Тунг*// Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2011. №6. С 71-78.
16. *Фам Динь Тунг.* Бифуркация в динамической системе резания/ *Заковоротный В.Л., Фам Динь Тунг*// Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2011. №4. С29-37.\
17. *Фам Динь Тунг.* Перестройка динамической системы, взаимодействующей с процессом резания в ходе её эволюции/ *Заковоротный В.Л., Фам Динь Тунг*// Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2011. №6. С 49-62.

18. *Фам Динь Тунг.* Эволюция механической системы, взаимодействующей со средой. Проблемы самоорганизации и управления/ *Заковоротный В.Л., Фам Динь Тунг*//

19. *Фам Динь Тунг.* Кинематические возмущения стационарных траекторий формообразующих движений в динамической системе резания/ *Заковоротный В.Л., Лукьянов В.Ф., Фам Динь Тунг, Фам Тху Хыонг*// Вестник Донской государственного технического университета.

20. *Фам Динь Тунг.* Синергетическая концепция при построении систем управления точностью изготовления деталей сложной геометрической формы/ *Заковоротный В.Л., Флек М.П., Фам Динь Тунг*// Вестник Донской государственного технического университета.

Публикации в зарубежных журналах и сборниках трудов, включенных в международный индекс цитирования

21. *V.L. Zakovorotny, Nguyen Dong Anh, Pham Dinh Tung.* Mathematical modelling and control of the evolution of dynamic systems interacting with medium/ *V.L. Zakovorotny, Nguyen Dong Anh, Pham Dinh Tung*//Vietnam journal of machanics. 2011. Vol.33. N3, P.157-169.

22. *V.L. Zakovorotny, Nguyen Dong Anh, Pham Dinh Tung.* Self-organization and bifurcation of a dynamical system interacting with the cutting process/ *V.L. Zakovorotny, Nguyen Dong Anh, Pham Dinh Tung*//Vietnam journal of machanics. 2012 Vol.30. N2, P.99-108.

23. *Заковоротный В.Л., Нгуен Донг Ань., Фам Динь Тунг., Фан Данг Фонг.* Использование асимптотических методов нелинейной динамики для анализа эволюционной траектории движения вершины инструмента относительно заготовки при обработке на металлорежущих станках. Сборник трудов международной и всевьетнамской конференции по механике 6-7 декабря 2007. – Ханой, 2007г. Т.1.- С. 468-479. (публикация написана на вьетнамском языке).

24. *Заковоротный В.Л., Нгуен Донг Ань, Фам Динь Тунг.* Динамика процесса резания. Состояние и перспективы развития в совершенствовании технологии механической обработки на станков с ЧПУ. Материалы II международной научной технической конференции «Машиностроение и технология машин», Ханой 18/11/2009, с 198-208.

Благодарю Вас за внимание!