

УДК 621.9.01

**ДИАГНОСТИРОВАНИЕ  
АВТОКОЛЕБАНИЙ  
ОДНОМЕРНОГО ПРОЦЕССА ТОЧЕНИЯ***Костенко Г. Ю.<sup>1</sup>, Тетенко О. В.<sup>2</sup>*<sup>1</sup>МПК «Ростгорсвет», Ростов-на-Дону,  
Российская Федерация<sup>2</sup>Донской государственный  
технический университет, Ростов-на-Дону,  
Российская Федерация[galinakostenko25@gmail.com](mailto:galinakostenko25@gmail.com)[olga.tetenko@yandex.ru](mailto:olga.tetenko@yandex.ru)

Рассмотрены вопросы диагностирования автоколебаний одномерного процесса точения на основе анализа амплитудного дискретного спектра колебаний подсистемы режущего инструмента. Показано, что при различных видах, развивающихся в системе резания движений будут наблюдаться различные спектральные картины. Такое различие в частотных дискретных спектрах позволяет выделить диагностические признаки, которые однозначно отражают появление автоколебательного движения в подсистеме режущего инструмента. Выделенные диагностические признаки могут быть автоматически обработаны на основе методов теории распознавания образов. Для исследования спектров колебательных процессов разработана одномерная математическая модель процесса точения, позволяющая моделировать динамические свойства технологического процесса. В математической модели учтены базовые особенности процесса точения, такие как конечная жесткость подсистемы инструмента, нелинейная функция сопротивления движению резца в глубину заготовки, запаздывания силы резания относительно смещения режущего инструмента.

**Ключевые слова:** автоколебания, процесс точения, виброакустическая диагностика, диагностические признаки, частотный спектр, нелинейная динамика, математическое моделирование.

**Введение.** Автоколебания процессов резания являются частым наблюдаемым процессом при обработке металлов точением. Этот вид движения элементов технологической системы воз-

UDC 621.9.01

**DIAGNOSTIC OF SELF - OSCILLATIONS  
OF ONE - DIMENSIONAL TURNING  
PROCESS***Kostenko G.Y.<sup>1</sup>, Tetenko O. V.<sup>2</sup>*<sup>1</sup>MSE «Rostgorsvet», Rostov-on-Don, Russian  
Federation<sup>2</sup>Don State Technical University, Rostov-on-Don,  
Russian Federation[galinakostenko25@gmail.com](mailto:galinakostenko25@gmail.com)[olga.tetenko@yandex.ru](mailto:olga.tetenko@yandex.ru)

The paper considers self-oscillation diagnostics of one-dimensional turning process based on the analysis of the discrete spectrum of the amplitude fluctuations of the subsystem of the cutting tool. It is shown that different spectral patterns will be observed for different types of movements developing in the cutting system. This difference in the frequency discrete spectra allows us to identify diagnostic features that clearly reflect the appearance of self-oscillating motion in the subsystem of the cutting tool. The selected diagnostic features can be automatically processed based on the methods of pattern recognition theory. To study the vibrational process spectra, a one-dimensional mathematical model of the turning process is developed, which allows us to simulate the dynamic properties of the process. The mathematical model takes into account the basic features of the turning process, such as the final rigidity of the tool subsystem, the nonlinear function of resistance to the movement of the cutter into the depth of the workpiece, the delay of the cutting force relative to the displacement of the cutting tool.

**Keywords:** self-oscillations, turning process, vibroacoustic diagnostic, diagnostic markers, frequency spectrum, nonlinear dynamics, mathematical modeling.

никает за счет различных нелинейных связей, имеющих место в системе резания. Вопросам возникновения автоколебаний посвящены работы ряда исследователей [1–8]. Автоколебания, возникающие в процессе точения, негативно влияют на точность геометрических параметров обрабатываемых поверхностей и качество поверхности деталей. Одним из важных направлений повышения точности процесса точения является предотвращение развития его автоколебаний. Для достижения этой цели большое значение имеет своевременная диагностика такого вида движения элементов технологической системы, как автоколебания. Важно отметить, что такой метод должен быть пригоден для автоматического режима работы металлорежущих станков. Цель данной работы — путем анализа спектров колебаний резца выделить диагностические признаки, свидетельствующие о развитии в системе резания автоколебательного движения элементов технологической системы. Это позволит разработать алгоритм диагностирования такого вида движения и создать автоматическую систему диагностирования автоколебаний процесса точения. В статье приведены первичные исследования диагностирования автоколебаний процесса прерывистого точения методами виброакустической диагностики, основанные на работах [9, 10].

**Математическая модель динамики прерывистого процесса точения.** Для анализа вида спектров колебаний элементов металлорежущего станка прежде всего необходима математическая модель динамики исследуемой системы. В данной работе использована математическая модель одномерного прерывистого процесса точения, которая подробно описана в статье [10]. Тем не менее, в статье приведены схема исследуемой системы (рис. 1) и система дифференциальных уравнений (1), описывающих динамику прерывистого процесса точения.

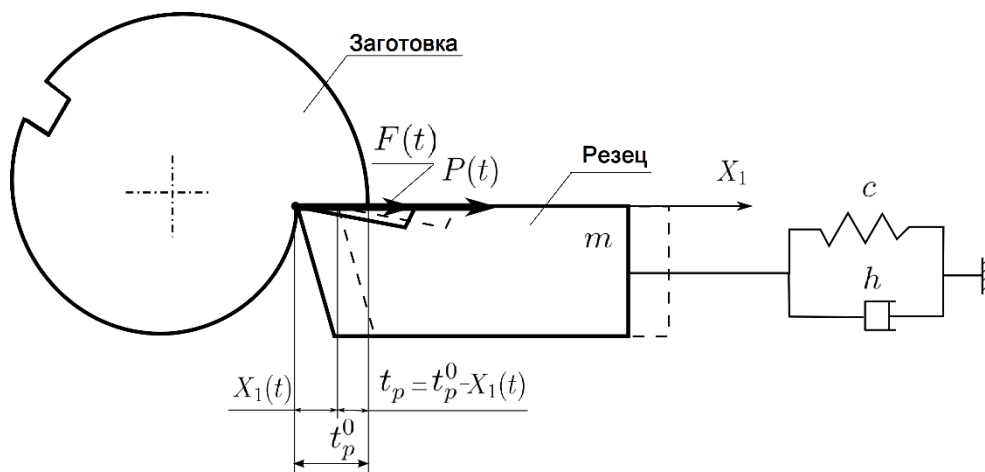


Рис. 1. Расчетная схема одномерного прерывистого процесса точения

$$\begin{cases} m \frac{d^2 X_1(t)}{dt^2} + h \frac{dX_1(t)}{dt} + cX_1(t) = \rho U_1(t) + P_0 e^{-\frac{1}{T_1} X_1(t)} \\ T_2 \frac{dU_1(t)}{dt} + U_1(t) = t_p^0 - X_1(t) \end{cases} \quad (1)$$

где  $m$  – приведенная масса подсистемы инструмента,  $\frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{мм}}$ ;

$h$  – приведенный коэффициент диссипации подсистемы инструмента,  $\frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{мм}}$ ;

$c$  – приведенный коэффициент жесткости подсистемы инструмента,  $\frac{\text{кг}}{\text{мм}}$ ;

$\rho = \kappa S$  – жесткость процесса резания,  $\frac{\text{кг}}{\text{мм}}$ ;

$t_p^0$  – глубина резания по наладке, мм;

$P_0$  – силовой коэффициент, характеризующий сопротивление перемещению резца в направлении заготовки, кг [5];

$T_1$  – параметр, определяющий крутизну нарастания силы, действующей на заднюю грань инструмента, мм [5];

$T_2$  – постоянная времени запаздывания силы резания, с;

$X_1(t)$  – перемещение резца в радиальном направлении, мм.

Как было показано в работах [9, 10], даже при таком простейшем представлении прерывистого процесса точения возникают автоколебания системы. Связано это с конкуренцией двух явлений: нелинейной функцией контактного взаимодействия между обработанной поверхностью заготовки и задней поверхностью резца и свойством запаздывания силы резания относительно перемещения резца в радиальном направлении.

**Анализ частотных спектров.** Выполняя цифровое моделирование системы (1) и рассматривая полученные решения в частотной области, можно выделить особенности амплитудного спектра виброакустического сигнала, указывающие на развитие в системе автоколебаний. Необходимо отметить, что численные значения для параметров системы (1) были позаимствованы из [10].

Рассмотрено несколько вариантов развития движения резца и его отображение в частотном спектре. Моделирование производилось как для случая наблюдения за сигналом без помехи, так и для случая наблюдения за сигналом с аддитивной помехой.

На рис. 2 показан частотный спектр виброакустического сигнала для случая затухающих колебательных движений резца, когда колебания затухают до очередного прохождения резцом шпоночного паза. По незашумлённому спектру сигнала (рис. 2а) можно видеть, что амплитудный спектр имеет одну составляющую, соответствующую собственным колебаниям резца. При добавлении к выходному сигналу аддитивного шума эта составляющая будет замаскирована (рис. 2б). Таким образом, составляющая полезного сигнала, соответствующая затухающему колебательному процессу, не может быть выделена на амплитудном спектре.

На рис. 3 приведены спектры затухающих радиальных колебаний резца, но для случая, когда вынужденные колебания не успевают затухнуть до очередного прохождения резцом шпоночного паза.

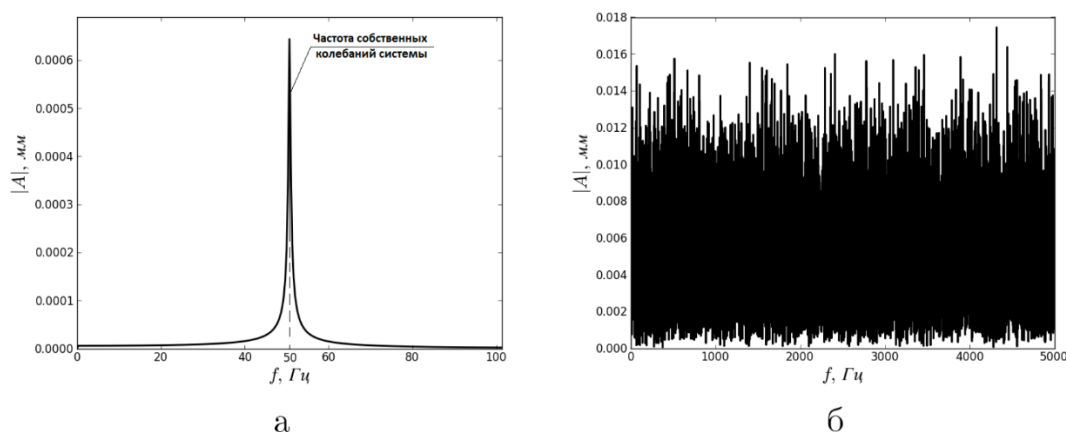


Рис. 2. Амплитудно-частотные спектры сигнала затухающего процесса для параметров

$T_2 = 0,005c$ ,  $\rho = 50 \frac{кг}{мм}$ : а) без шума, б) с аддитивным шумом

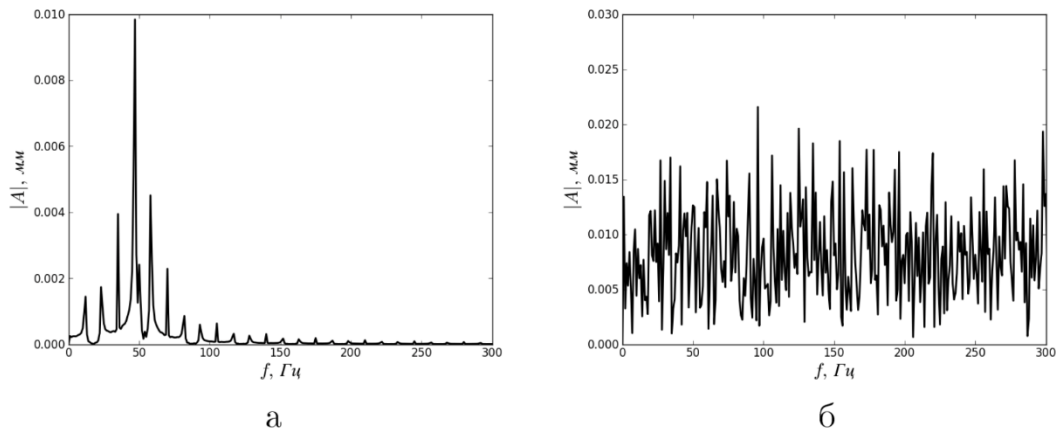


Рис. 3. Амплитудно-частотные спектры вынужденного сигнала для параметров  $T_2 = 0,005c \frac{\text{кг}}{\text{мм}}$ ,  $\rho = 50 \frac{\text{кг}}{\text{мм}}$ : а) без шума, б) с аддитивным шумом

Как можно видеть на спектре рис. 3, а при отсутствии шума так же, как и для случая, показанного на рис. 2а, наблюдается одна составляющая спектра на собственной частоте колебаний резца — основная составляющая. Но в отличие от случая, приведенного на рис. 2а, в рассматриваемом спектре (рис. 3а) вблизи основной составляющей спектра образуется ещё ряд составляющих меньшей амплитуды. Тем не менее, величина амплитуды основной составляющей имеет очень малое значение, при наложении на выходной сигнал аддитивного шума маскируется и не может быть выявлена на спектре.

Рассмотрен последний вариант — отображение в амплитудно-частотном спектре автоколебательных движений системы (1). На рис. 4 показаны спектры для автоколебательных движений системы (1), как для случая без шума (рис. 4а), так и для случая с зашумленным сигналом (рис. 4б).

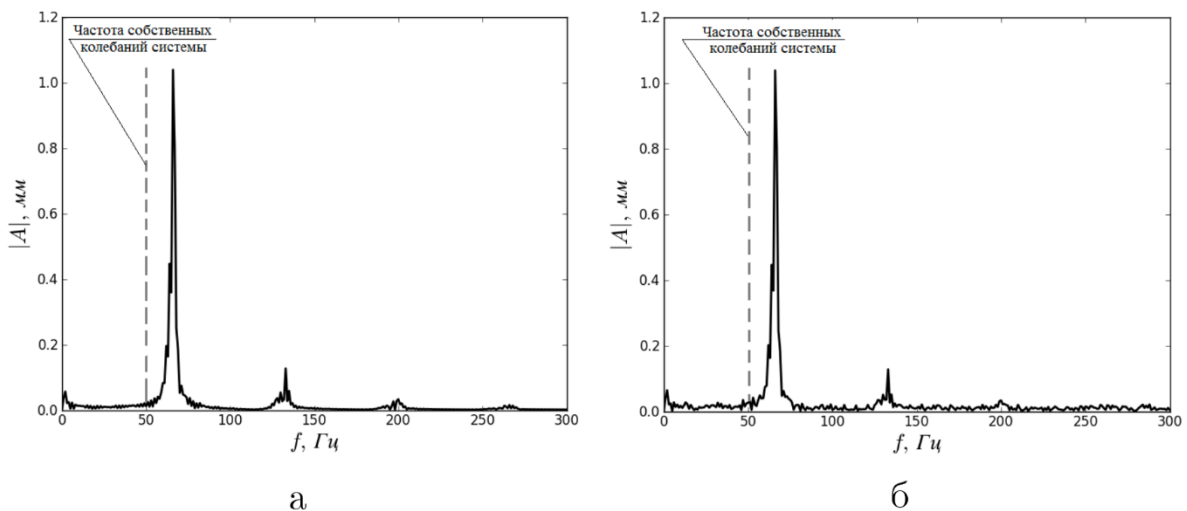


Рис. 4. Амплитудно-частотные спектры сигнала автоколебательного процесса для параметров  $T_2 = 0,005c \frac{\text{кг}}{\text{мм}}$ ,  $\rho = 120 \frac{\text{кг}}{\text{мм}}$ : а) без шума, б) с аддитивным шумом

В отличие от вышерассмотренных случаев, при наличии в системе автоколебательного движения на спектре образуется составляющая, немного смещенная относительно собственной частоты режущего инструмента в высокочастотную область (это основная составляющая), но с заметно большей амплитудой (рис. 4а). Также в высокочастотной области образуются составляющие меньшей амплитуды на частотах, кратных частоте основной составляющей. Добавление адди-

тивного шума к выходному сигналу практически не сказывается на качестве спектра — все составляющие спектра остаются хорошо различимыми (рис. 4б).

**Заключение.** В результате проведенного анализа спектров колебаний резца можно выделить следующие диагностические признаки, свидетельствующие о развитии в системе резания автоколебаний в терминах амплитудно-частотных спектров:

1) имеет место составляющая со значительной величиной амплитуды (основная составляющая) на частоте, близкой к частоте собственных колебаний режущего инструмента;

2) составляющая со значительной величиной амплитуды несколько смещена в высокочастотную область относительно собственной частоты резца;

3) в высокочастотной области наблюдаются составляющие с амплитудой меньше, чем амплитуда основной составляющей, но имеющие частоты, кратные частоте основной составляющей.

Таким образом, имеет место четкая картина амплитудно-частотного спектра, свидетельствующая об образовании в системе резания автоколебательного движения элементов технологической системы, что позволяет разработать алгоритм диагностирования такого вида движения и создать автоматическую систему диагностирования автоколебаний процесса точения.

### Библиографический список

1. Заковоротный, В. Л. Один случай формирования хаотических аттракторов в динамической системе резания / В. Л. Заковоротный, А. А. Губанова, В. В. Христофорова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2015. — Т.15, № 2 (81). — С. 11–21.

2. Лукьянов, А. Д. Анализ возможности влияния изгибных колебаний заготовки на возникновение автоколебаний при глубоком сверлении маложестких деталей из гетерогенного материала / А. Д. Лукьянов, Т. С. Онойко, П. П. Верещетин // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2014. — Т.14, № 1 (76). — С. 162–168.

3. Моделирование динамической связи, формируемой процессом точения, в задачах динамики процесса резания (позиционная связь) / В. Л. Заковоротный [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — Т.11, № 3 (54). — С. 301–311.

4. Litak, G. Chaotic vibrations in a regenerative cutting process / G. Litak // Chaos, Solitons and Fractals – vol. 13, - 2002, - P. 1531-1535.

5. Заковоротный, В. Л. Самоорганизация и бифуркации динамической системы обработки металлов резанием / В. Л. Заковоротный, Фам Динь Тунг, В. С. Быкадор // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. — 2014. — № 3. — С. 26–39.

6. Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. — Москва : Машиностроение, 1967. — 359 с.

7. Заковоротный, В. Л. Введение в динамику трибосистем / В. Л. Заковоротный, В. П. Блохин, М. И. Алексейчик. — Ростов-на-Дону : ИнфоСервис, 2004. — 680 с.

8. Заковоротный, В. Л. Изучение многообразий в пространстве состояния трибосистем / В. Л. Заковоротный, Н. С. Семёнова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2005. — Т.5, № 1 (23). — С. 30–40.

9. Костенко, Г. Ю. Повышение эффективности прерывистого точения на основе раскрытия нелинейных свойств процесса резания : дисс. ... магистра техники и технологий / Г. Ю. Костенко. — Ростов-на-Дону, 2016. — 96 с.

10. Быкадор, В. С. Возникновение автоколебаний в простейшей системе резания металлов / В. С. Быкадор, Г. Ю. Костенко, Т. С. Бабенко // Вестник Воронежского гос. техн. ун-та. — 2016. — Т.12, № 2. — С. 119–123.