

УПРАВЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТЬЮ ТРИБОСИСТЕМАМИ ПРИ ВНЕШНЕМ ТРЕНИИ И РЕЗАНИИ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ, ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ И НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Кабалдин Ю.Г., Иванов С.В., Башков А.А.

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева,
Нижний Новгород*

Ключевые слова: трибосистемы, акустические сигналы, показатель Ляпунова, фрактальный анализ, нелинейная динамика, оценка устойчивости.

Аннотация. Динамика и устойчивость трибосистем при внешнем трении и резании изучена недостаточно. Одним из методов, позволяющих оценить устойчивость трибосистем, являются подходы нелинейной динамики, теории фракталов и нейронносетового моделирования. В этой связи, предоставляется возможность разработать методику оценки устойчивости процессов трения и управление ее с применением алгоритмов нелинейной динамики теории фракталов, и нейронносетового моделирования.

ASSESSMENT AND CONTROL OF STABILITY OF TRIBOSYSTEMS UNDER EXTERNAL FRICTION AND CUTTING BASED ON ALGORITHMS OF NONLINEAR DYNAMICS, FRACTAL THEORY AND NEURAL NETWORK MODELING

Kabaldin Yu.G., Ivanov S.V., Bashkov A.A.

Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod

Keywords: tribosystems, acoustic signals, Lyapunov exponent, fractal analysis, nonlinear dynamics, stability assessment.

Abstract. The dynamics and stability of tribosystems under external friction and cutting have not been sufficiently studied. Nonlinear dynamics, fractal theory, and neural network modeling approaches are one of the methods to assess the stability of tribosystems. In this regard, it is possible to develop a methodology for assessing the stability of friction processes and controlling it using algorithms of nonlinear dynamics of fractal theory and neural network modeling.

Описание экспериментального стенда при внешнем трении

Экспериментальные исследования производилось на токарно-винторезном станке 16К20. В качестве заготовки использовался пруток $\varnothing 45$ мм из стали 45 с заранее нарезанными поясками шириной 3,7 мм. В качестве инструмента применялась державка с пластиной из инструментального материала ВК8. Схема процесса трения приведена на рисунке 1.

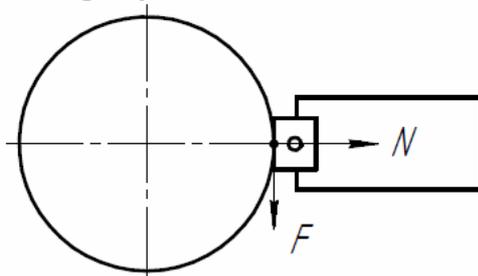


Рис. 1. Модель процесса трения

Методика исследования

При резании с помощью датчиков акустической эмиссии AP2037-100, закрепленных на корпусе резца в двух положениях (вдоль сил резания P_y и P_z), регистрировали сигналы виброакустической эмиссии (ВАЭ). Для регистрации и обработки сигналов использовался аналого-цифровой преобразователь (АЦП NI USB-4431) производства компании *National Instruments* и персональный компьютер со специальным ПО – *LabView*.

Результаты исследований

На рисунках 2-9 представлены результаты экспериментальных исследований при подаче $s_0=0,1$ мм/об. На рисунке 2 показан вид сигнала ВАЭ по оси Y . На рисунке 3 показан типичный сигнал ВАЭ по оси Z . На рисунках 4 и 5 приведены временные фазовые портреты сигналов ВАЭ.



Рис. 2. Сигнал ВАЭ по оси Y

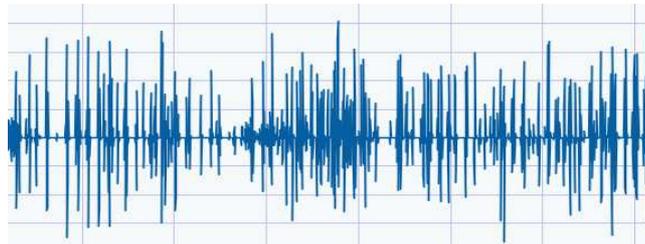


Рис. 3. Сигнал ВАЭ по оси Z



Рис. 4. Временные фазовые портреты сигнала ВАЭ при трении по оси Y

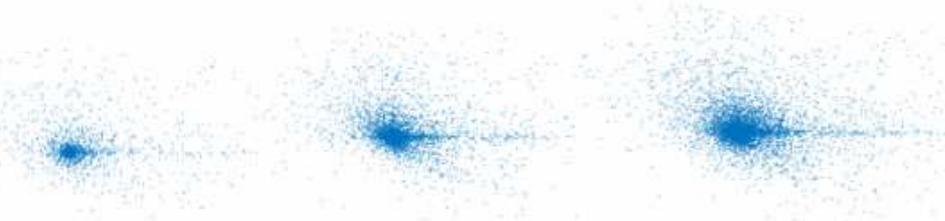


Рис. 5. Временной фазовой портрет сигнала ВАЭ при трении по оси Z

С использованием разработанного нами ПО, определяли также фрактальную размерность сигнала ВАЭ. Рассчитанные данные по оси Y и Z , представлены в таблице 1 и 2.

Табл. 1. Результаты оценки фрактальной размерности сигнала ВАЭ при трении по оси Y

Время, с	1	3	5
Фрактальная размерность D_F	4,0108	2,9260	3,1463

Табл. 2. Результаты оценки фрактальной размерности процесса трения по оси Z во времени

Время, с	1	3	5
Фрактальная размерность D_F	0,6048	0,7465	0,8001

Анализ показывает, что результаты оценки D_F фрактальной размерности сигнала ВАЭ, представленные в таблицах 1 и 2, следует рассматривать как эволюцию устойчивости процесса трения во времени.

Другим важным показателем состояния сложных термодинамически неустойчивых систем, является старший показатель Ляпунова. Рассчитанные с использованием специального ПО сигнала ВАЭ значения показателя Ляпунова по оси Y и Z, представлены в таблицах 3 и 4.

Табл. 3. Результаты оценки показателя Ляпунова по оси Y

Время, с	1	3	5
Показатель Ляпунова	0,8125	0,8751	0,8813

Табл. 4. Результаты оценки показателя Ляпунова по оси Z

Время, с	1	3	5
Показатель Ляпунова	0,65005	0,1604	0,5244

Экспериментальные данные по фрактальной размерности и показателю Ляпунова во времени, представлены в виде графиков на рисунках 6, 7.

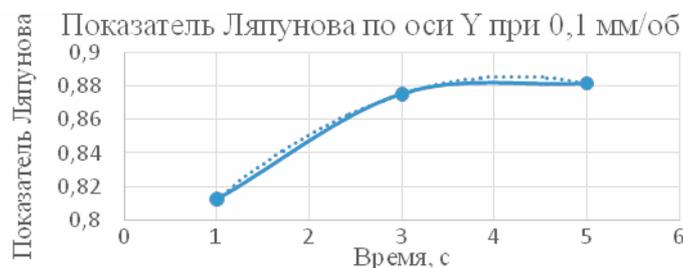


Рис. 6. Временная зависимость показателя Ляпунова по оси Y

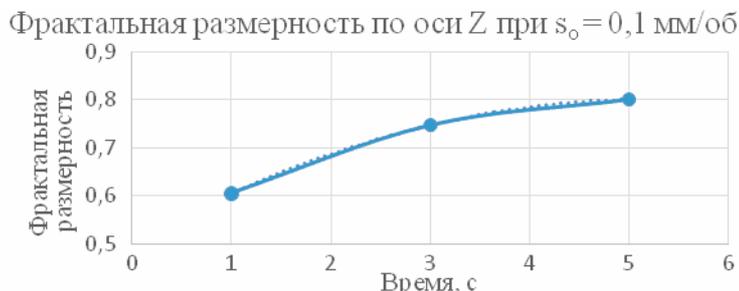


Рис. 7. Временная зависимость D_F фрактальной размерности сигнала ВАЭ при $s_0 = 0,1$ мм/об оси Z

Анализ рисунков 6-9 показывает, что полученные временные зависимости носят немонотонный характер. В частности, имеет место параболический характер зависимостей D_F .

При резании также были проведены экспериментальные исследования механизма потери устойчивости процесса резания и оценки роли трения и контактных процессов на его устойчивость при врезании режущего инструмента в заготовку.

На рисунке 8 представлена зависимость старшего показателя Ляпунова от времени врезания инструмента в заготовку.

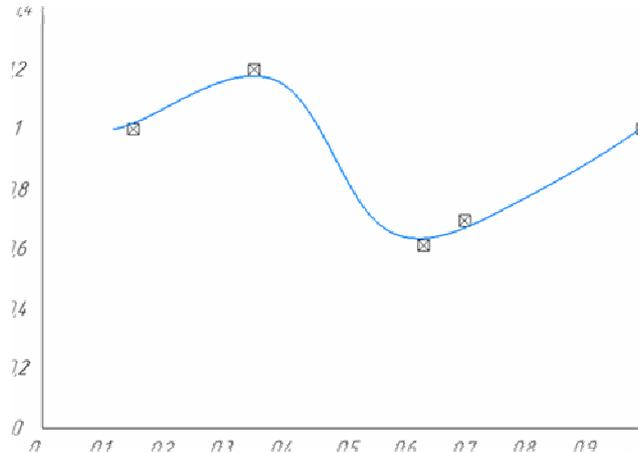
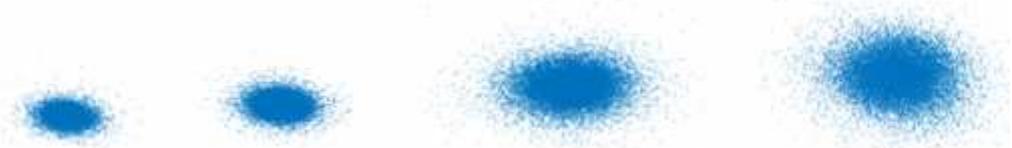


Рис. 8. Зависимость старшего показателя Ляпунова при врезании инструмента в заготовку по анализу сигналов ВАЭ: резец ВК8; сталь 45, $V = 15$ м/мин, $a = 0,1$ мм, $v = 2$ мм; свободное резание

Из рисунка 8 видно, что представленная зависимость старшего показателя Ляпунова при врезании инструмента в заготовку, имеет периодический характер. Переходный период (запаздывание) сил резания, при этом составило 0,03 с, что соответствует запаздыванию системы под действием силового фактора [1-3].

На рисунке 9 представлены также эволюция динамики аттракторов при врезании инструмента в заготовку, значения фрактальной размерности и показателя Ляпунова при анализе сигналов ВАЭ.



Участок	1	2	3	4
Время, с	0,4	0,7	0,95	1,2
Фрактальная размерность	4,1227	3,927	3,5988	3,7903
Показатель Ляпунова	-0,3778	-0,521	-0,4844	-0,2615

Рис. 9. Формирование аттрактора при врезании инструмента в заготовку: сталь 45, резец ВК8, $V = 15$ м/мин, $a = 0,2$ мм, $v=2$ мм; свободное резание

Из рисунка 9 видно также, что происходит периодический рост и снижение фрактальной размерности.

На рисунке 10 представлена зависимость фрактальной размерности и амплитуды колебаний УДСС от скорости резания стали 45.

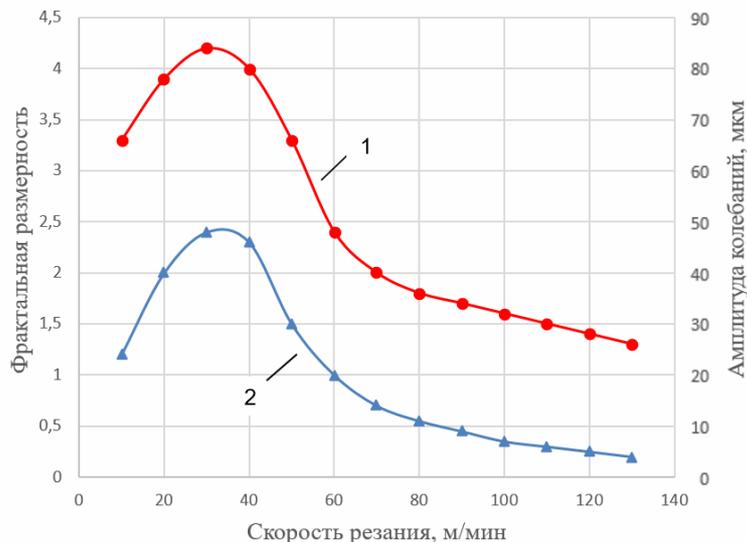


Рис. 10. Зависимость D_F фрактальной размерности аттракторов сигнала ВАЭ и амплитуды колебаний УДСС от скорости резания при обработке стали 45, ($a = 0,1$ мм/об); резец ВК8: 1 – фрактальная размерность: 2 – амплитуда колебаний

Из рисунка 10 следует, что фрактальная зависимость и амплитуда колебаний УДСС от скорости резания также являются немонотонными. Имеется скорость резания, где фрактальная размерность и амплитуда колебаний в системе резания максимальна, т.е. устойчивость процесса резания при этой скорости является минимальной.

Созданная нами база данных по устойчивости процесса трения в зависимости от условий обработки позволила разработать цифровой двойник устойчивости трения с целью управления ею на режимах обработки даже на таких, где резание не производилось.

На рисунке 11 представлена структура нейронной сети [4, 5], т.е. цифровой двойник устойчивости процесса трения. На входе нейронной сети указаны основные параметры – это сам коэффициент трения, а также параметры, определяющие устойчивость трения при резании, а на выходе – показатель Ляпунова. Как указывалось выше, на устойчивость процесса трения при резании влияет большое число факторов, такие как скорость резания, подача, глубина резания, передний угол, S_k действительный предел прочности, длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента, усадка стружки, СОЖ, вибрации, покрытия и др.

Учесть все параметры сложно, т.к. это требует большего количества экспериментов и специального оборудования. Поэтому на вход в нейронную сеть мы ограничили количество параметров, рассматриваемых для ее обучения и влияющих на устойчивость трения.

Обучение нейронной сети проводилось в среде *Matlab*. Проведена также проверка цифрового двойника устойчивости по параметрам, отличающихся от тех, на которых он обучался.

На рисунке 12 представлена зависимость коэффициента трения при резании от фрактальной размерности сигнала ВАЭ при нейронносетевом моделировании.

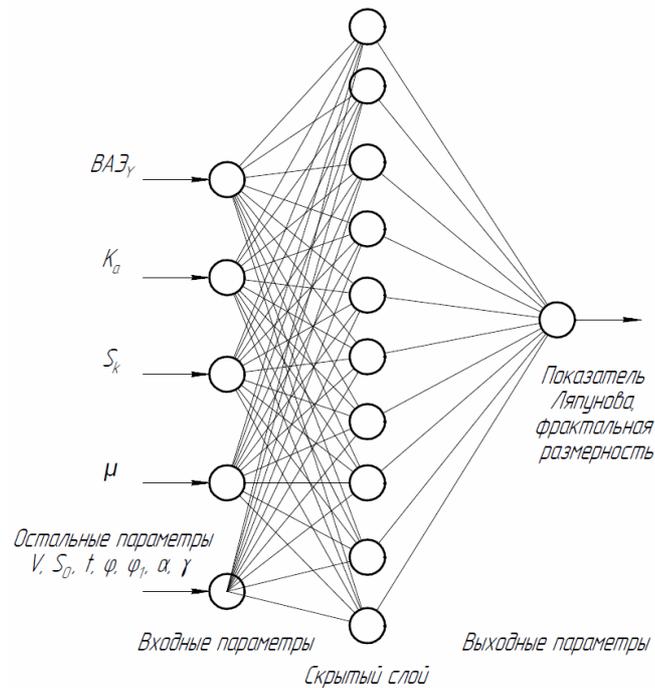


Рис. 11. Структура нейронной сети для прогнозирования устойчивости процесса трения при резании

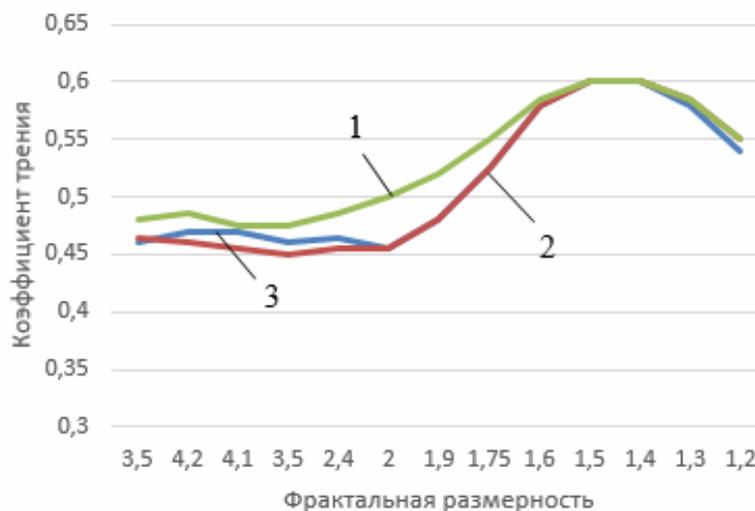


Рис. 12. Зависимость коэффициента трения от фрактальной размерности: сталь 45, $a = 0,2$ мм, $b = 2$ мм (резец BK8): 1 – данные машинного обучения; 2 – данные нейронносетевое моделирование; 3 – экспериментальные данные

Из рисунка 12 следует, что коэффициент трения в зависимости от фрактальной размерности имеет максимум при значении 0,6. Иначе говоря, рост коэффициента трения до 0,6, вызывает резкое снижение устойчивости УДСС при резании. Погрешность оценки при нейронносетевом моделировании составила 0,4%, при машинном – 3,29%.

Выводы

Показано, что временная устойчивость трибосистемы инструментальный материал-сталь, в зависимости от условий трения, существенно определяется параметрами трения. В ходе эксперимента выяснилось, что показатель Ляпунова и фрактальная размерность процесса трения между инструментальным

материалом ВК8 и заготовкой из стали 45 растет. Это свидетельствует о том, что система трения во времени периодически теряет устойчивость. Подобный характер эволюции трибосистемы наблюдается как при ее оценке по параметру фрактальная размерность, так и по показателю Ляпунова. Характер временных зависимостей D_F и λ обусловлен ростом энтропии (тепла) в трибосистеме. Разработан цифровой двойник устойчивости трибосистемы и проведено прогнозирование ее устойчивости по показателю Ляпунова и фрактальной размерности в зависимости от скорости перемещения державки с инструментальным материалом относительно заготовки.

Использование подходов теории синергетики и ее важнейших направлений, таких как нелинейная динамика, теория фракталов и нейросетевое моделирование, позволяет как оценивать и управлять устойчивостью процессом резания в широком диапазоне условий обработки, так и прогнозировать коэффициент трения, при котором процесс резания резко теряет устойчивость.

Список литературы

1. Хакен Г. Синергетика. Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. – М.: Мир, 1985. – 424 с.
2. Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. – М.: Наука. 1987. – 424 с.
3. Арнольд В.И., Афраймович В.С., Ильяшенко Л.П., Шильников И.П. Теория бифуркаций // Итоги науки и техники. Серия «Современные проблемы математики. Фундаментальные направления. – М.: ВИНТИ, 1986. – Т. 5. – С. 5-218.
4. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
5. Головкин В.А. Нейронные сети: обучение, организация и применение. – М.: ИПРЖР, 2001. – 256 с.

Сведения об авторах:

Кабалдин Юрий Георгиевич – д.т.н., профессор;

Иванов Сергей Владимирович – аспирант;

Башков Андрей Алексеевич – аспирант.