

УДК 621.2.082.18

## **ОЦЕНКА И УПРАВЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТЬЮ ТРИБОСИСТЕМАМИ ПРИ ВНЕШЕМ ТРЕНИИ И РЕЗАНИИ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ, ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ И НЕЙРОННОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Иванов С.В., аспирант, II курс

Научный руководитель: Кабалдин Ю.Г., д.т.н., профессор  
Нижегородский государственный технический университет им.  
Р.Е.Алексеева  
г. Нижний Новгород

Трение деталей машин – сложный физико-механический процесс [1,2]. При скольжении двух поверхностей в зависимости от их шероховатостей, соприкосновение (рис.1) может быть только в отдельных точках, что создает высокие контактные напряжения на вершинах неровностей и способствует пластической деформации и разрушению выступов.

При резании процессы контактного взаимодействия стружки с инструментом и процесс трения в значительной степени связаны с особенностями характера нагружения режущей части и локализацией пластической деформации в зоне вторичной деформации стружки с передней поверхностью инструмента [3,4].

На устойчивость процесса внешнего трения и резания оказывает влияние большое число факторов [1-4]. Однако динамика и устойчивость трибосистем при внешнем трении и резании изучена недостаточно. С позиций теории самоорганизации система трения - открытая термодинамически неустойчивая самоорганизующаяся система [3-9]. Одним из методов, позволяющих оценить устойчивость трибосистем, являются также подходы нелинейной динамики, теории фракталов и нейронносетевого моделирования [6].

В этой связи, предоставляется возможность разработать методику оценки устойчивости процессов трения и управление ее с применением алгоритмов нелинейной динамики теории фракталов, и нейронносетевого моделирования [10-13].

### **Описание экспериментального стенда при внешнем трении**

Экспериментальные исследования производилось на токарно-винторезном станке 16К20. В качестве заготовки использовался пруток Ø45 мм из стали 45с 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. Державка помещалась в резцодержатель динамометра конструкции УДМ3. Фиксировались силы F и N для оценки коэффициента трения  $\mu$ .

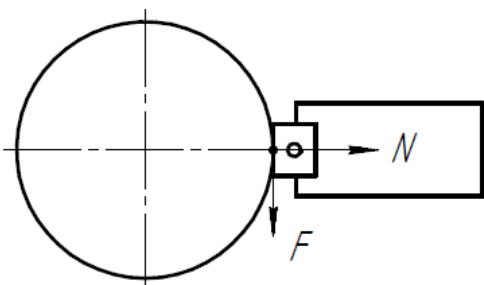


Рисунок 1. Модель процесса трения

Коэффициент трения  $\mu$  определялся как отношение силы трения  $F$  на силу давления  $N$  ( $\mu = F/N$ ).

С помощью датчиков акустической эмиссии AP2037-100, закрепленных на державки, регистрировали сигналы виброакустической эмиссии (ВАЭ).

### Методика исследования

Для исследования эволюции динамики и устойчивости трибосистем, были проведены экспериментальные исследования. В ходе каждого эксперимента синхронно с процессом внешнего трения и резания, регистрировались сигналы виброускорений. Использовались аналого-цифровые преобразователи 4431 и 6356 производства компании National Instruments и персональный компьютер со специально разработанным нами ПО [11].

Для этой цели берется временной ряд сигналов ВАЭ, снятый с трибосистемы при внешнем трении и в процессе резания. Однако временной ряд, полученный непосредственно с датчиков, помимо полезной информации несет значительную долю шума. Следовательно, перед использованием этого сигнала необходимо выполнить его очистку от шума. Очистка сигнала ВАЭ от шума осуществлялась с помощью алгоритмов, основанных на вейвлет-преобразовании.

На основе полученных сигналов ВАЭ, производилась реконструкция аттракторов динамической системы резания, определялась  $D_F$ , фрактальная размерность и  $\lambda_i$  показатели Ляпунова. Поэтому дальнейший анализ устойчивости процесса резания, проводился по критериям нелинейной динамики, указанным выше, согласно разработанным ПО, которое эффективно можно изучать по сигналам ВАЭ, определяя по ним  $D_F$  и  $\lambda_i$  с использованием специального программного обеспечения [11].

В ходе эксперимента производилось трение инструмента об материал заготовки на различных режимах ( $V$ -скорость трения и  $s_0$  – (скорость перемещения державки с пластиной относительно заготовки) с постоянной регистрацией сигнала ВАЭ во времени.

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).

### Результаты исследований

На рис. 2-9 представлены результаты экспериментальных исследований при подаче  $s_0=0,1$  мм/об. На рис.2 показан вид сигнала ВАЭ по оси Y.



Рисунок 2. Сигнал ВАЭ по осиY

На рис.3 показан типичный сигнал ВАЭ по оси Z.

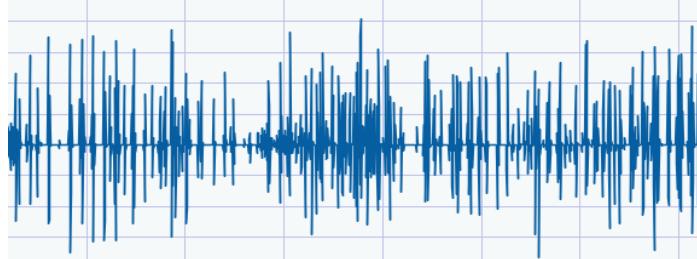


Рисунок 3. Сигнал ВАЭ по осиZ

На рис. 4 и 5 приведены временные фазовые портреты сигналов ВАЭ.



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



Рисунок 5. Временной фазовый 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.

Таблица 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

Таблица 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 табл.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 табл. 3и 4.

Таблица 3 – Результаты оценки показателя Ляпуновапо оси Y

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

Таблица 4 – Результаты оценки показателя Ляпуновапо 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 рис. 6-9.

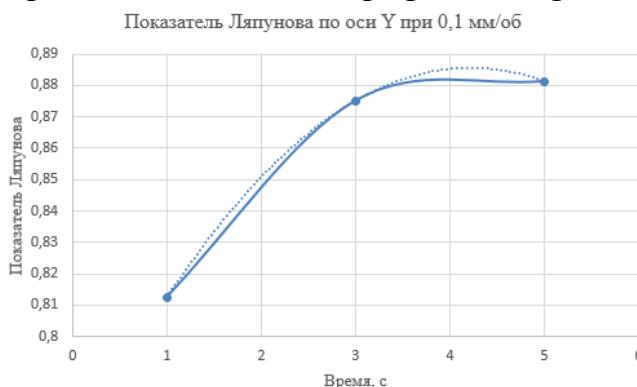


Рисунок 6. Временная зависимость показателя Ляпунова по оси Y

На рис. 7. представлена временная зависимость  $D_F$  фрактальной размерности сигнала ВАЭ сигнала ВАЭ при  $s_0=0,1$  мм/об по оси Z.

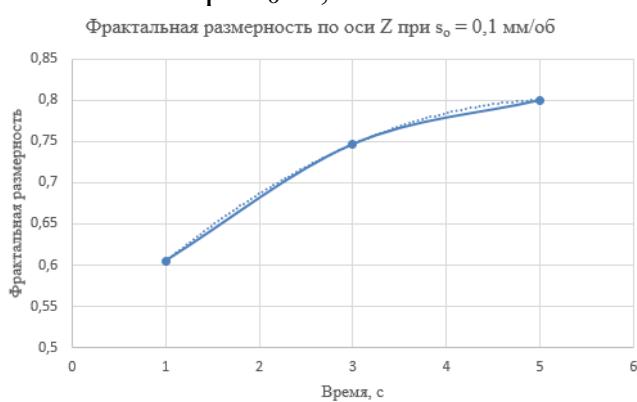


Рисунок 7. Временная зависимость  $D_F$  фрактальной размерности сигнала ВАЭ при  $S= 0,1$  мм/ об оси Z

Анализ рис. 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 рис.3 представлена зависимость старшего показателя Ляпунова от времени врезания инструмента в заготовку.

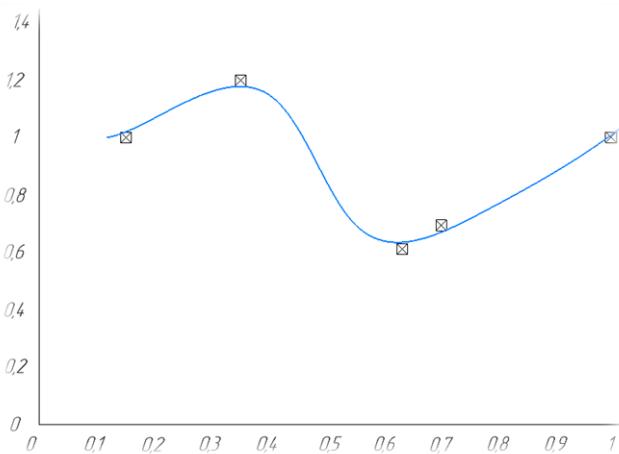


Рисунок 3 - Зависимость старшего показателя Ляпунова при врезании инструмента в заготовку по анализу сигналов ВАЭ. Резец BK8. Сталь 45,  $V=15$  м/мин,  $a=0,1$ мм,  $b=2$  мм. Свободное резание.

Из рис. 3 видно, что представленная зависимость старшего показателя Ляпунова при врезании инструмента в заготовку, имеет периодический характер. Переходный период (запаздывание) сил резания, при этом составило 0,03с, что соответствует запаздыванию системы под действием силового фактора [7-9].

На рис.4 представлены также эволюция динамики аттракторов при врезании инструмента в заготовку, значения фрактальной размерности и показателя Ляпунова при анализе сигналов ВАЭ.



Рисунок 4 - Формирование аттрактора при врезании инструмента в заготовку. Сталь 45, резец BK8,  $V=15$ м/мин,  $a=0,2$  мм,  $b=2$  мм. Свободное резание.

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

На рис. 4 показано формирование фазовой траектории колебаний упругой динамической системы станка (УДСС) при врезании инструмента в заготовку. Из табл. видно также, что происходит периодический рост и снижение фрактальной размерности.

На рис. 5 представлена зависимость фрактальной размерности и амплитуды колебаний УДСС от скорости резания стали 45.

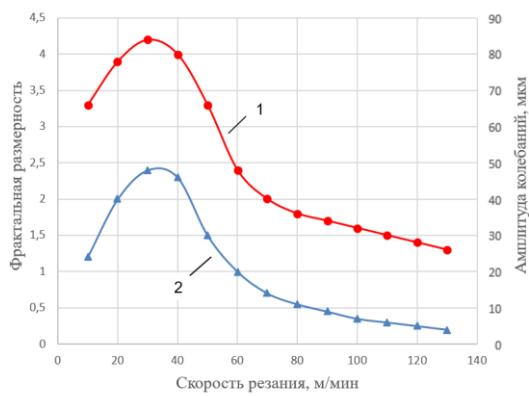


Рисунок 5 – Зависимость  $D_F$  фрактальной размерности аттракторов сигнала ВАЭ и амплитуды колебаний УДСС от скорости резания при обработке стали 45, ( $a = 0.1$  мм/об). Резец ВК8: 1 - фрактальная размерность; 2 - амплитуда колебаний.

Из рис. 5 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 максимальны, 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 рис. 6 представлена структура нейронной сети [12,13], 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.

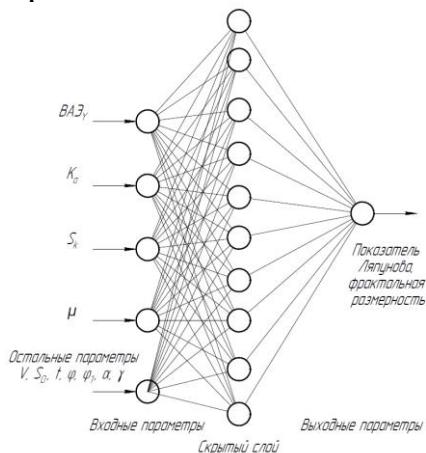


Рисунок 6 - Структура нейронной сети для прогнозирования устойчивости процесса трения при резании.

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 рис. 7 представлена зависимость коэффициента трения (рис. 2) при резании, от фрактальной размерности сигнала ВАЭ при нейронносетевом моделировании (рис. 6).

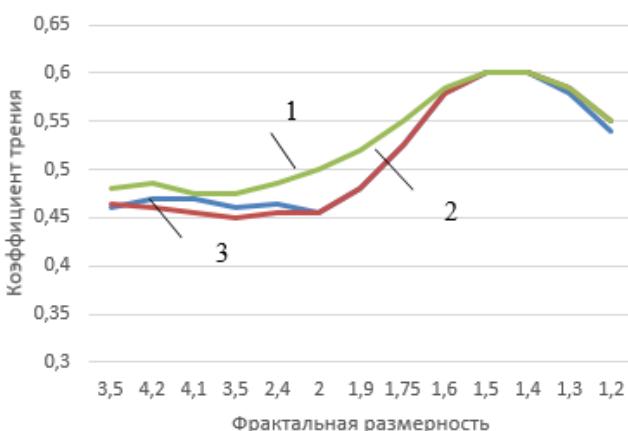


Рисунок 7 - Зависимость коэффициента трения от фрактальной размерности. Сталь 45.  $a = 0,2$  мм,  $v = 2$  мм (Резец ВК8): 1 – данные машинного обучения; 2 - данные нейронносетевого моделирования; 3 – экспериментальные данные.

Из рисунка 13 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 времененная 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  $\lambda$  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 нейронносетевое моделирование, позволяет как оценить 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. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение. 1968.-279с.
2. Заквортный В.Л. Динамика трибосистем. Самоорганизация, эволюция. Ростов –на Дону. Изд-во ДГТУ, 2003. -502с.
3. Кабалдин Ю.Г, Олейников А.И., Шпилев А.М., Бурков А.А. Математическое моделирование самоорганизующихся процессов в технологических системах резанием, Владивосток. Дальнаука. 2000.-195с.
4. Кабалдин Ю.Г. Самоорганизация иnanoструктурные процессы при резании металлов: монография; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. -Нижний Новгород.2014. -173с.
5. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. Современные проблемы нелинейной динамики. М.: УРСС, 2000. – 336 с.
6. Гленсдорф П., Пригожин И.Р. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флюктуаций. М.: Мир, 1973. – 280с.
7. Хакен Г. Синергетика. Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. м.: Мир, 1985. - 424 с.
8. Неймарк Ю.И., Ланда П.С. Стохастические и хаотические колебания. – М.: Наука. 1987. – 424 с.
9. Арнольд В.И., Афраймович В. С., Ильяшенко Л.П.,Шильников И.П., «Теория бифуркаций», Динамические системы –5, Итоги науки и техн. Сер. Соврем. пробл. мат. Фундам. направления, 5, ВИНИТИ, М., 1986, 5–218.
10. Мандельброт Б.Б. Фрактальная геометрия природы. Нью-Йорк, 1982. - 254 с.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №202366461. Программа для расчета количественных показателей сигнала акустической эмиссии.
12. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. – М.: Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
13. Головко В. А. Нейронные сети: обучение, организация и применение. - М.: ИПРЖР, 2001. - 256 с.