

МЕЩАНИНОВ С.К., д.т.н., професор  
 ВОЛОШИН Р.В., зав. лабораторії  
 МАКАРЧУК С.І., аспірант

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

## ВИКОРИСТАННЯ ПОКАЗНИКА ЛЯПУНОВА ДЛЯ ОЦІНКИ ЗНОСУ РІЗЦІВ

**Вступ.** На даний час спостерігається все більш широке застосування токарних верстатів з числовим програмним керуванням, яке ставить за мету розробку технічних рішень з автоматичного контролю стану технологічної системи, зокрема інструменту. В процесі різання різець виходить з ладу в результаті затуплення (кінець періоду стійкості), поломки (повне руйнування ріжучої кромки або викришування частинок ріжучого матеріалу), розм'якшення (втрата твердості сталі і приварювання – явища, майже не спостережувані у твердого сплаву), в результаті чого збільшується знос. Характер зносу і його вплив на процес різання можуть бути різним [1].

При цьому основною вимогою є якомога більш висока достовірність отриманих результатів, що багато в чому визначається обраними методами аналізу інформації, яка характеризує стан технологічної системи. Стійкість інструменту повинна забезпечувати високу продуктивність і найменші матеріальні витрати, пов'язані з виготовленням виробу. Таку стійкість називають економічною. Її орієнтовні значення для різних ріжучих інструментів наводяться у відповідних довідниках [2].

Найбільш перспективними методами є синергетичні [3], найпоширенішими серед яких є методи нелінійної динаміки [3-5].

**Постановка задачі.** Одним із найважливіших результатів синергетики став висновок стосовно принципової обмеженості довжини часового горизонту прогнозу звернення навіть для порівняно простих систем. Це стосується систем, чутливих до початкових умов. Основним завданням є вибір характеристики або групи характеристик, за якими передбачається оцінювати стан обробної системи і встановити залежність оброчної характеристики від часу. В якості вихідних даних передбачається використовувати вібросигнал, який генерується процесом токарної обробки, а також знос різця [6].

**Результати роботи.** Процес зносу твердого сплаву при різанні є дуже складним. Велику роль при цьому відіграють не тільки механічні властивості ріжучого матеріалу, хімічні реакції між ним та оброблюваним матеріалом. Різноманіття оброблюваних матеріалів і операцій з різання вимагають великого диференціювання хімічного складу та структури твердих сплавів, що дуже ускладнює стандартизацію і позначення сплавів [7].

При обробці сталі питомий опір різанню в 2-3 рази вищий, ніж при обробці чавуну, отже утворюється значно більша кількість тепла. Довга стружка сходиться по передній поверхні різця, при цьому поверхня стикання з ріжучою кромкою велика, а час – відносно тривалий. В цей час стружка істотно деформується, що сприяє теплоутворенню. Всі ці фактори створюють значне навантаження на різальну кромку.

Сьогодні розроблено ряд величин, які використовуються для оцінки стану динамічної системи. Основними серед них є розмірність аттрактора, ентропія, показники Ляпунова та Херста [5, 6]. Показник Ляпунова використовується в нелінійній динаміці для оцінки ступеня нестійкості процесу [4].

Отже, якщо розглядати дві близькі траєкторії  $\bar{x}_1, \bar{x}_2$  в динамічній системі

$$\frac{d\bar{x}}{dt} = f_{(\bar{x}), \bar{x}_1(0)} = \overline{ax_2}(0) = \bar{a} + \bar{\varepsilon}, \quad (1)$$

то відстань між нескінченно близькими траєкторіями  $d(t)$  зростатиме з часом в середньому експоненціально:

$$d(t) = |\bar{x}_1(t) - \bar{x}_2(t)| \exp(\lambda t). \quad (2)$$

Величина  $\lambda$  називається показником Ляпунова і характеризує горизонт передбачуваності – проміжок часу, на який можна дати прогноз поведінки досліджуваної системи. Існує по одному показнику Ляпунова для кожного з вимірів фазового простору.

Формально показники Ляпунова динамічної системи  $\frac{d\bar{x}}{dt} = f(x)$  визначаються виразом

$$\lambda_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln |\tilde{x}_i(t)|, \quad (3)$$

де  $\tilde{x}(t)$  –  $i$ -те власне значення матриці, складеної з перших частинних похідних від вектор-функції  $f(x)$  за компонентами вектора  $\bar{x}$  (матриці Якобі).

Додатний показник Ляпунова характеризує розтягування фазового простору або швидкість розбігу близьких точок. Від’ємний показник Ляпунова відбиває стиснення, тобто швидкість, з якою система відновлюється після збурення.

Впорядкований за спаданням такий набір показників утворює спектр показників Ляпунова.

Для визначення значення показника Ляпунова необхідно, в першу чергу, реконструювати фазову траєкторію еволюції системи [5-7].

Реконструкція проводилася на підставі теореми Такенса [5, 6], маючи часову залежність досліджуваного сигналу ( $x$ ), фазову траєкторію (аттрактор) можна відновити як безліч векторів:

$$\overline{z(t)} = A_m(\overline{x(t)}) = \{x(t), \dots, x(t), \dots, (t + (m-1) \times \tau)\}, \quad (4)$$

де  $\tau$  – часова затримка;

$m$  – топологічна розмірність фазового простору;

$x(t)$  – значення вектора вихідних даних.

Після реконструкції аттрактора треба безпосередньо приступити до визначення показника Ляпунова.

У даній роботі визначається лише старший показник Ляпунова [5]. При негативних значеннях показника процес є стійким, а при позитивних – нестійким. У даному випадку для визначення показника Ляпунова застосовувався метод визначення показника Ляпунова по одновимірній реалізації [9].

Сенс даної методики полягає в наступному.

1. Вибирається стартова точка на фазовій траєкторії і знаходиться найближча до неї точка фазової траєкторії, після чого обчислюється відстань між ними.

2. У момент часу, коли відстань між точками стане рівною, знаходимо точку, яка задовольняє двом умовам: відстань між нею і стартовою точкою є мінімальною, і мінімальним є кутове відхилення  $t_1$ .

3. Проводиться переміщення по аттрактору до того моменту, поки часовий ряд не закінчиться. Максимальний показник Ляпунова обчислюється за формулою

$$\lambda = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \log_2 \left( \frac{L(t_i)}{L(t_{i-1})} \right). \quad (5)$$

де  $N$  – кількість точок в початковому часовому ряді.

Залежність старшого показника Ляпунова від ширини фаски зносу представлено на рис. 1.

Наступним кроком є встановлення зв’язку між показником Ляпунова і вихідними

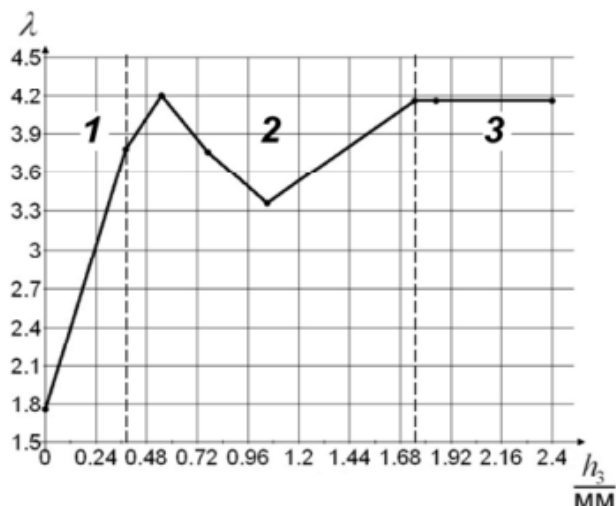


Рисунок 1 – Залежність показника Ляпунова від ширини фаски зносу

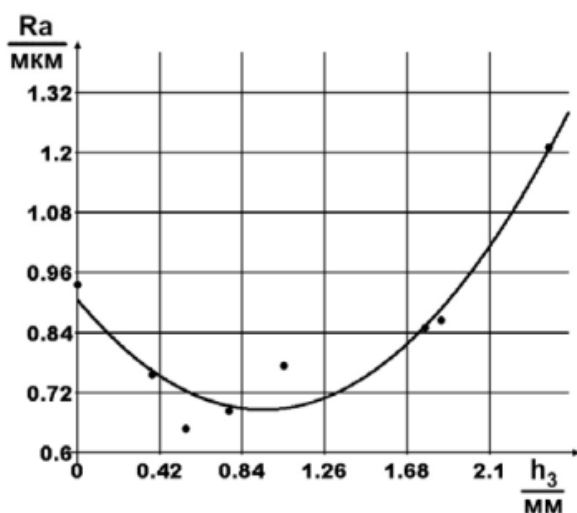


Рисунок 2 – Залежність шорсткості поверхні від ширини фаски зносу

параметрами процесу механічної обробки. У даній роботі в якості вихідного параметра використано шорсткість обробленої поверхні. Залежність шорсткості поверхні від ширини фаски зносу представлено на рис.2.

Для з'ясування того, чи є цей зв'язок чи ні, необхідно визначити взаємну кореляцію між значеннями вихідних параметрів процесу обробки і величиною старшого показника Ляпунова.

**Висновки.** Розрахунки взаємної кореляції показали, що її величина сягає 0.72 Ra/мкм, а це говорить про наявність залежності між величинами. На графіку, представленою на рис.2, можна виділити три характерні області. У першій області спостерігається інтенсивне зростання значень показника Ляпунова, у другій – незначні флуктуації значень показника, а при досягненні певного порогу фаски зносу – зміни значень показника Ляпунова вкрай невеликі (близько  $10^{-5} \dots 10^{-6}$ ) – дана область відповідає періоду катастрофічного зносу.

Як було встановлено в ході дослідження, залежність, представлена на рис.1, спостерігалася при проведенні всіх експериментів при чистовому точінні. Аналізуючи отримані результати, зробимо висновок, що застосування старшого показника Ляпунова виправдано для відстеження

патологічних змін стану технологічної системи, тобто за значенням показника Ляпунова можна судити про настання чи не настання катастрофічного зносу інструменту.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Аршинов В.А., Алексеев Г.А. Різання металів і різальний інструмент. М.: Машинобудування, 1976. 327с.
2. Глазова Г.А., Скобнікова К.Н. Технологія металів та інших конструкційних матеріалів. М.: Машинобудування, 1972. 367с.
3. Малова А.Н. Довідник технолога-машинобудівника. М.: Машинобудування, 1972. 408с.
4. Горбунов Б.І. Обробка металів різанням, металоріжучий інструмент і верстати. М.: Машинобудування, 1981. 337с.
5. Хакен Г. Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М.: Мир, 1985. 419с.

6. Кроновер Р.М. Фракталы и Хаос в динамических системах: Основы теории. М.: Постмаркет, 1994. 352с.
7. Шустер Г. Детерминированный хаос. Введение в теорию и приложения. М.: Наука, 1998. 253с.
8. Лоскутов А.Ю., Михайлов А.С. Динамический хаос. М.: Наука, 2000. 294с.
9. Брандт З. Анализ данных. Статистические и вычислительные методы для научных работников и инженеров. М.: Мир, ООО «Издательство АСТ», 2003. 686с.

Надійшла до редколегії 04.03.2019.

УДК 676.163.022

DOI 10.31319/2519-2884.34.2019.8

КАМЕЛЬ Г.И.\*, д.т.н., профессор  
ИВЧЕНКО П.С., к.т.н., доцент  
НОСЕНКО М.И.\*, к.т.н., доцент  
ЧАСОВ Д. П., к.т.н., доцент  
БЕЛОЗУБ Л.В.\*, инженер

Днепропетровский государственный технический университет, г. Каменское  
\*Запорожский авиационный колледж им. О.Г.Ивченко

## ОЦЕНКА ИЗНОСА СОПРЯГАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ КОНИЧЕСКИХ ТРИБОСИСТЕМ

**Введение.** Анализ работы роторных питателей транспортной системы установок непрерывной варки Камюр на протяжении 30-ти лет показал высокую эксплуатационную надёжность, долговечность и безаварийность работы в автоматизированных системах в качестве узлов трения-скольжения конических сопрягаемых поверхностей.

**Постановка задачи.** В процессе работы роторные питатели непрерывно в течение года подают щепу в варочный котёл щелочным раствором при температуре 160°C и давлении 1,2 МПа. При этом под давлением гидроабразивного потока щелочи происходит износ и увеличение зазора в питателе, что делает невозможной работу автоматизированной транспортной системы. Для уменьшения зазора в питателе используется механизм присадки ротора, позволяющий непрерывно в течение года компенсировать зазоры, образовавшиеся при износе.

Целью работы является установление общих закономерностей износа сопрягаемых поверхностей конических трибосистем до и после эксплуатации роторных питателей шведской фирмы Камюр.

**Результаты работы.** Среди методов повышения эксплуатационной надёжности, долговечности и безаварийности машин и механизмов новыми направлениями при проектировании машин являются: 1) создание конструкций, износ которых наименьшим образом влиял на работу механизма; 2) обеспечение принципа равномерности износа во времени; 3) циклическая компенсация износа [1]. Этим требованиям соответствуют детали и узлы, у которых конические рабочие поверхности. Известны работы [1-3], где описываются закономерности износа роторных питателей Камюр шведского производства, у которых сопрягаемые поверхности вращающегося ротора и корпуса выполнены с конусностью 1:20. Роторные питатели (РП) работают в тяжелых экстремальных условиях: щелочная среда; высокая температура более (160°C); избыточное давление (1,2 МПа) и необходимость подачи щепы в варочный котёл непрерывно в течение года. В процессе эксплуатации под действием щелочной гидроабразивной среды происходит