

С.В. Струтинський, ст. викл., к.т.н.

А.А. Гуржій, аспір.

Національний технічний університет України «КПІ»

І.В. Кузьо, магістрант

Національний університет України «Львівська політехніка»

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ НА ОСНОВІ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ АНАЛІЗУ ДВОВИМІРНИХ НЕСТАЦІОНАРНИХ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ ТИПУ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ

Надана коротка характеристика технічних пристроїв, параметри яких описуються двовимірними нестационарними випадковими процесами. Це, зокрема, сили, які діють у зубчастому зчепленні, та проекції сили різання. Показані особливості двовимірного нестационарного випадкового процесу, що визначає зусилля в зубчастій передачі. Для даного процесу сформульовані основні особливості розробленої інформаційної технології, суть якої полягає в побудові кластерної моделі двовимірного випадкового процесу. Інформаційна технологія використана під час аналізу двовимірного нестационарного випадкового процесу, одержаного за допомогою експериментальних вимірів сили різання, яка виникає в процесі токарної обробки. Наведено ряд реалізацій проекції сили різання, вимірних експериментально. Встановлено наявність високочастотних пульсацій сили різання. Розроблено методику побудови кластерної моделі процесу. Для цього застосовані штучні нейронні мережі у вигляді карт, що самоорганізуються. Центри кластерів визначаються в процесі навчання штучної нейронної мережі. Показано як розташовуються центри кластерів для однієї реалізації процесу. Вони займають певну область, обмежену криволінійним контуром. У цій області виділяються підобласті зі збільшеною концентрацією центрів кластерів. Узагальнено область розташування центрів кластерів для експериментально визначеного набору реалізацій процесу. Визначено середні значення модуля та аргументу вектора відповідного набору центрів кластерів. Надана характеристика випадкового процесу у вигляді контурів рівної ймовірності реалізації відповідного окремого центру кластера. Визначено закони розподілу розташування центрів кластерів за модулем і аргументом випадкового вектора.

За результатами проведених досліджень зроблені висновки про суттєві групи кластерів та рекомендовані напрямки подальших досліджень, які полягають у застосуванні двовимірних рядів Фур'є для характеристики нестационарного двовимірного випадкового процесу.

**Ключові слова:** двовимірний випадковий процес; проекція; сила різання; нейронна мережа; кластер; область; осереднення; закони розподілу.

**Вступ. Постановка проблеми.** Двовимірні випадкові процеси описують властивості реальних технічних систем, тому розробка спеціальних методів аналізу таких процесів є актуальною.

Двовимірний нестационарний випадковий процес описується набором взаємопов'язаних одновимірних випадкових процесів. Зміни процесу відбуваються в обмежений інтервал часу і мають складний характер. Для опису статистичних характеристик таких змін необхідна велика кількість реалізацій випадкового процесу. При цьому статистична обробка набору реалізацій утруднюється через наявність хаотичних змін процесів. Проблема в загальному вигляді може бути вирішена накопиченням інформації про процес у всьому діапазоні області його визначення та використанням одержаної інформації для побудови узагальнених статистичних моделей процесу.

Розробка методів аналізу двовимірних нестационарних випадкових процесів забезпечує вирішення важливих наукових і практичних завдань дослідження механічних систем. Це є основою створення прогресивних конструкцій технологічного обладнання різного виду.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** В літературних джерелах наявна значна кількість досліджень нестационарних випадкових процесів [1, 2]. В основному вони спрямовані на знаходження статистичних характеристик стаціонарних (квазістаціонарних) процесів. Застосовуються методи кореляційного та спектрального аналізів [3, 4]. Недоліком даних методів є суттєве спрощення процесу під час його аналізу, що призводить до втрати інформації про особливості процесу. Більш раціональним є застосування статистичних характеристик у вигляді кореляційних моментів [5]. Однак застосування даних методів у процесі аналізу нестационарних двовимірних випадкових процесів не забезпечує необхідної точності та достовірності аналізу.

Суттєвого підвищення точності і достовірності статистичного аналізу процесу можна досягти застосуванням прогресивних інформаційних технологій. Перспективним є застосування нейронних мереж для аналізу динамічних нестационарних процесів у вигляді випадкових векторів [6].

**Метою** дослідження, викладеного у статті є розробка методу статистичного аналізу нестационарного двовимірного випадкового процесу на основі його кластерної моделі, визначеної із застосуванням нейронних мереж. Завданнями дослідження є встановлення особливостей експериментально визначеного набору реалізацій двовимірного випадкового процесу, побудова та аналіз кластерної моделі випадкового процесу з використанням нейронних мереж.

**Викладення основного матеріалу.** Двовимірні нестационарні випадкові процеси мають місце в різноманітному технологічному обладнанні. Вони описують проекції випадкового вектора під час виконання технологічних операцій. Випадкові вектори визначають енергетичні процеси зі значною дисипацією енергії. До таких процесів належать сили різання; сили в періодично діючих фрикційних парах; зусилля контактного деформування, ударні процеси; зусилля в зубчастих передачах та багато інших.

При взаємодії зубців передачі в контакті виникає нестационарне зусилля ступінчастого виду. У момент дотику зуба шестерні із зубом колеса в точці А (рис. 1, а) виникають сили нормальної та дотичної взаємодії.

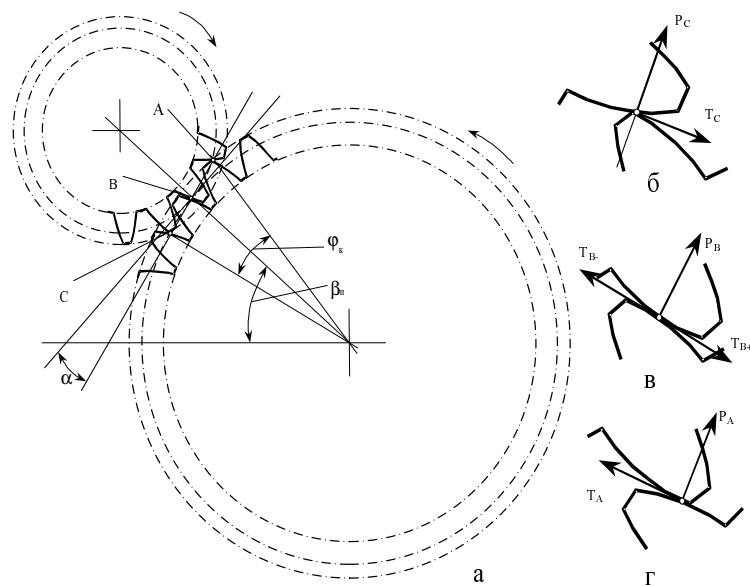


Рис. 1. Виникнення нестационарних сил нормальної та дотичної взаємодії в процесі роботи зубчастої передачі: а – схема зачеплення; б – дія сил на початку взаємодії зубців; в – контакт зубців по ділільних колах зі зміною знака сили дотичної взаємодії; з – контакт зубців у кінці зачеплення

Зусилля в контакті зубців є суттєво нестационарним випадковим процесом. У проекціях на вісі рухомої системи координат  $x, z$  випадковий вектор сили описується двома взаємопов'язаними випадковими процесами (рис. 2).

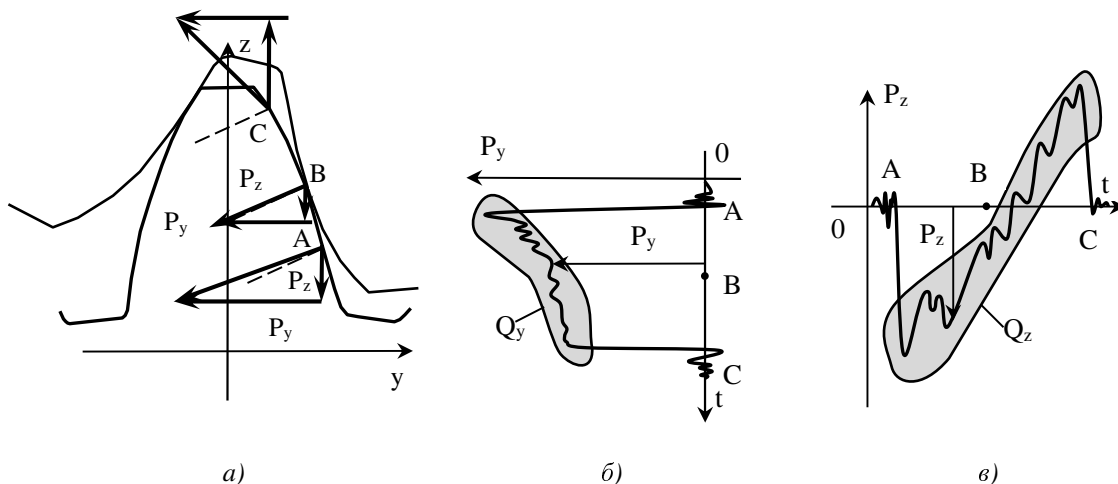


Рис. 2. Схема формування нестационарних випадкових зусиль у зубчастому зачепленні (а) та реалізації двовимірного нестационарного процесу, що визначає зусилля в контакті зубців, визначена проекцією на вісь у (б), та проекції на вісь z (в)

Двовимірний випадковий процес, що визначає силу в контакті зубчастого зачеплення, має певну випадкову складову, яка змінює реалізацію процесу. Випадкові відхилення визначаються змінами геометрії зубців та умовами їх взаємодії. Випадкова складова процесу проявляється у вигляді пульсацій на кривих, що визначають зміни проекції зусилля в часі. Випадкові процеси зміни зусиль змінюються залежно від реалізації процесів у певних областях  $Q_y$  та  $Q_z$ .

Для аналізу двовимірних нестационарних процесів даного виду запропонована спеціальна інформаційна технологія на основі штучних нейронних мереж. Вона полягає у наступному. Реалізації випадкових проекцій вектора подаються у вигляді двовимірного випадкового процесу. Реалізація даного процесу в площині з координатами  $(P_y, P_z)$  має вигляд кривої OABC, що є годографом випадкового вектора (рис. 3).

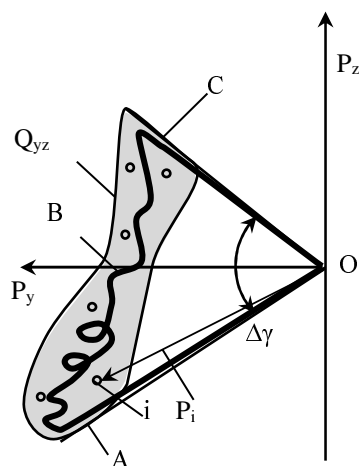


Рис. 3. Графічна інтерпретація двовимірного випадкового вектора та його кластерна модель

Область розташування годографів випадкового вектора сили взаємодії зубців  $Q_{yz}$  охоплює всі можливі реалізації двовимірного випадкового процесу. Для характеристики даної області використана кластерна модель випадкового процесу. Для побудови кластерної моделі взаємопов'язані випадкові процеси змін у часі проекцій випадкового вектора піддаються кластерному аналізу. Для цього використовуються штучні нейронні мережі. Одержана кластерна модель має вигляд набору векторів  $P_i$ , де кінець вектора відповідає  $i$ -му кластеру. У подальшому здійснюються необхідні операції з кластерною моделлю.

Розроблена інформаційна технологія застосована для обробки масиву експериментальних даних, одержаних вимірюванням випадкового вектора сили різання під час токарної обробки (рис. 4).

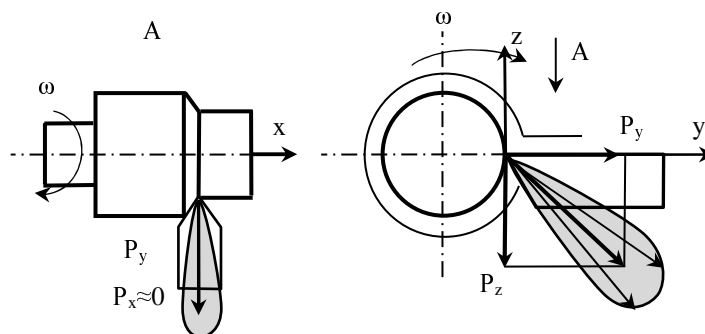


Рис. 4. Схема токарної обробки деталі, що характеризується випадковими змінами сили різання

Під час токарної обробки деталей вектор сили різання має випадкові зміни. Як правило, сили різання в напрямку вісі обертання деталі є незначними, порівняно з силами, які діють в напрямках  $P_y$  і  $P_z$ . Тому можна вважати, що проекції сили різання, виміряні експериментально, являють собою нестационарний випадковий вектор із проекціями  $P_y$  і  $P_z$ . Реалізації даного процесу охоплюють достатньо широкую смугу і мають високочастотні пульсації, амплітуда яких може сягати 10 % максимального значення (рис. 5).

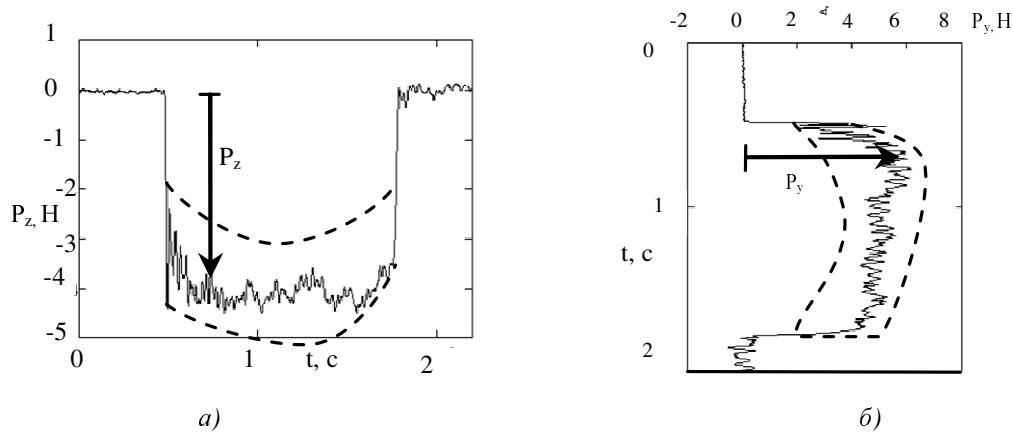


Рис. 5. Експериментально визначені реалізації складових двовимірного випадкового процесу, що визначає вектор сили різання під час токарної обробки та смуги змін вказаних реалізацій: а – зміна в часі проекції  $P_z$  і б – зміна проекції  $P_y$

Смуги розташування випадкових змін проекцій сили різання мають значну ширину, що пояснюється впливом широкого кола факторів на випадковий процес зміни сили різання. Статистична обробка даного двовимірного процесу традиційними методами утруднена суттєвими змінами реалізацій окремих процесів. Тому для аналізу двовимірного процесу застосована розроблена інформаційна технологія.

Використані результати експериментальних вимірів 10 реалізацій процесу. Для кожної реалізації проведено якісний аналіз складових процесу. Встановлено характер процесу на початковій і кінцевій ділянках (рис. 6).

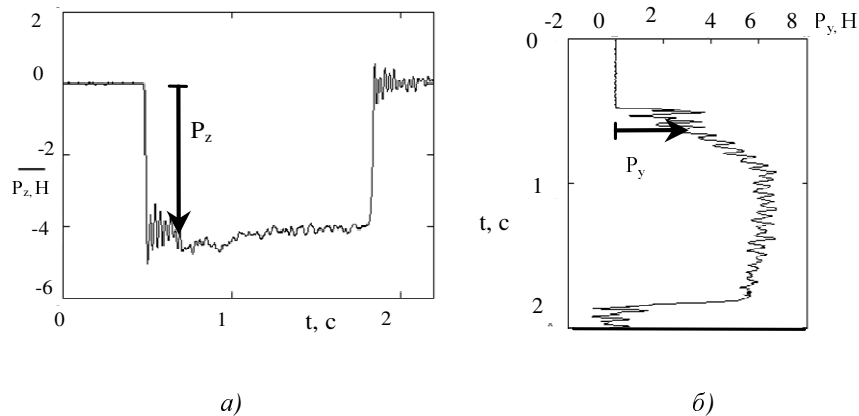


Рис. 6. Окрема визначена експериментально реалізація нестационарного двовимірного випадкового процесу, що визначає зміни в часі проекцій вектора сили різання, яка використана для побудови кластерної моделі: а – проекція  $P_z$ ; б – проекція  $P_y$

Реалізації проекцій випадкового вектора мають перехідні складові незначної протяжності. У реалізаціях простежуються квазістационарні ділянки. На цих ділянках наявні складові різних частотних діапазонів.

Згідно з розробленою інформаційною технологією побудована кластерна модель процесу. Для цього використано нейронні мережі у вигляді карт, що самоорганізуються [6]. Ці нейронні мережі є модифікацією шару конкуруючих нейронів (шару Кохонена) [7]. Карті, що самоорганізуються, виявляють у процесі навчання центри кластерів двовимірного випадкового процесу.

Основою штучної нейронної мережі є адитивна обчислювальна процедура, реалізована в кожному зі штучних нейронів (рис. 7) [8].

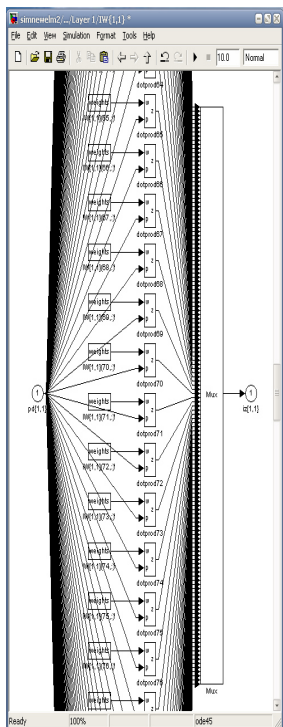


Рис. 7. Структурна схема окремого штучного нейрона

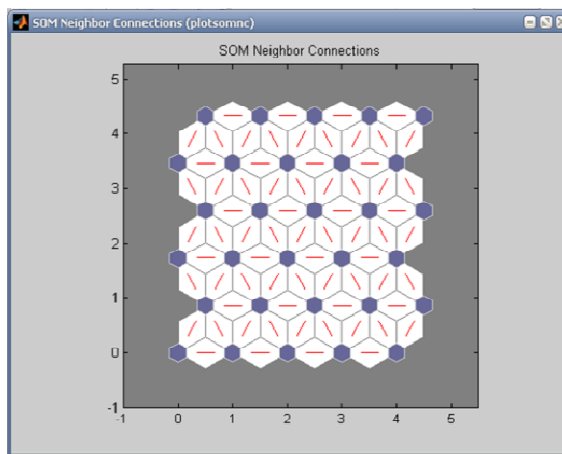


Рис. 8. Топологія створеної нейронної мережі у вигляді карти, що самоорганізується

У процесі навчання штучної нейронної мережі визначаються вагові коефіцієнти в окремих синаптичних блоках нейрона.

У використаній для кластерного аналізу нейронній мережі нейрони розташовані у вузлах гексагональної решітки. Для створення нейронної мережі використано 30 нейронів, які розташовані у вигляді гексагональної решітки розмірністю  $5 \times 6 = 30$ . Решітка має 5 шарів нейронів по 6 нейронів у кожному (рис. 8).

На вхід мережі подається двовимірний випадковий процес у вигляді двох масивів, які містять експериментально визначені значення процесів, наведених на рисунку 6.

Для навчання нейронної мережі використана стандартна ітераційна процедура (рис. 9) [9].

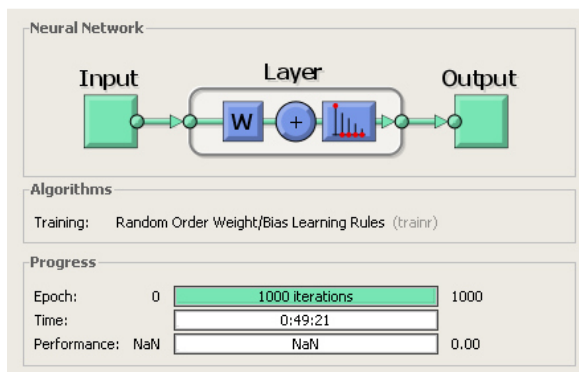


Рис. 9. Графічний супровід процесу навчання штучної нейронної мережі

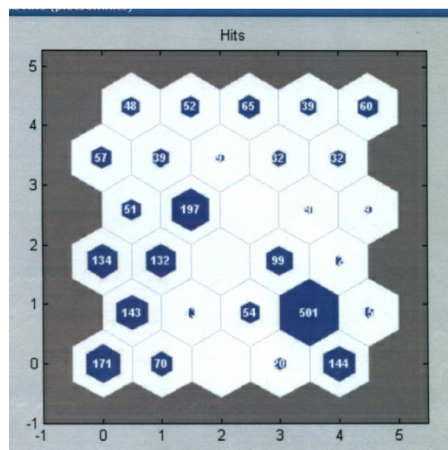
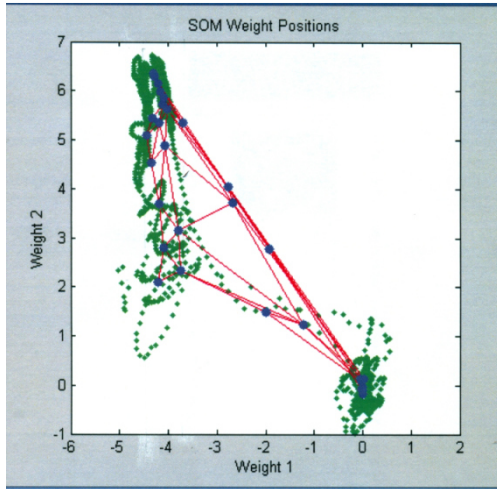


Рис. 10. Графічна інтерпретація ступеня активності окремих нейронів, яка має місце в кінці навчання мережі

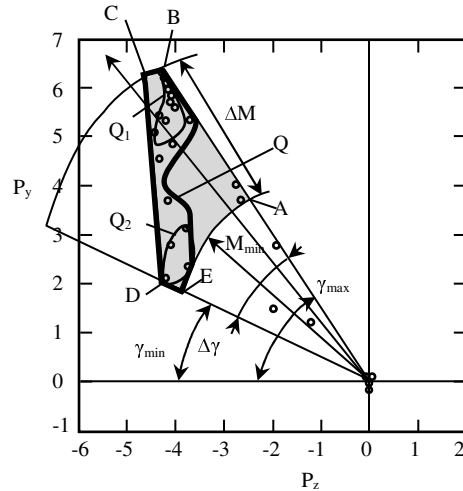
Проведено навчання нейронної мережі за кількості ітерацій 1000. Після досягнення даної кількості ітерацій процес навчання мережі вважається завершеним. На друк виводиться інформація про групи «конкуруючих» нейронів (рис. 10).

Цифрами на рисунку показано ступінь активності окремих нейронів, які є результатом навчання мережі. У результаті навчання мережі знаходяться центри кластерів, що відповідають окремим групам близьких за значенням випадкових векторів. Вони утворюють кластерну модель двовимірного випадкового процесу.

Центри кластерів надані в графічному вигляді набором точок у площині проєкції випадкового вектора (рис. 11, а).



а)



б)

Рис. 11. Графічне зображення центрів кластерів, визначених при навчанні нейронної мережі: а – вивід результатів навчання мережі; б – характеристики області розташування кластерів

Знайдені центри кластерів є основою для побудови кластерної моделі окремої реалізації випадкового вектора. Проведено аналіз розташування центрів кластерів. Суттєві за величиною значення випадкового процесу розташовані за межами круга радіуса  $M_{\min}$  (рис. 11 б). Максимальні за модулем значення вектора розміщені в середині круга радіусом  $M_{\min} + \Delta M$ . Область розташування кластерів обмежена сектором з куту  $\Delta\gamma$ . Розташування областей по куту в системі координат  $P_z P_y$  характеризується куту  $\gamma_{\min}$ .

Область розташування центрів суттєвих кластерів ABCDE в загальному вигляді характеризує двовимірний випадковий процес. Характеристику у вигляді області можна уточнити, зменшивши її до криволінійної області, обмеженої контуром Q. Для подальшої деталізації характеристики вводяться окремі ізольовані ділянки в межах основної області Q. Ділянки  $Q_1$  та  $Q_2$  визначають основні центри груп кластерів, які формують процес.

Кластерна модель узагальнена на набір реалізацій двовимірного випадкового процесу. Всього оброблено 10 реалізацій, які одержані за допомогою експериментальних вимірів сили різання. Одержані кластерні моделі розміщені в межах області  $Q_{\Sigma}$ , яка охоплює область Q відповідну одній реалізації процесу (рис. 12, а).

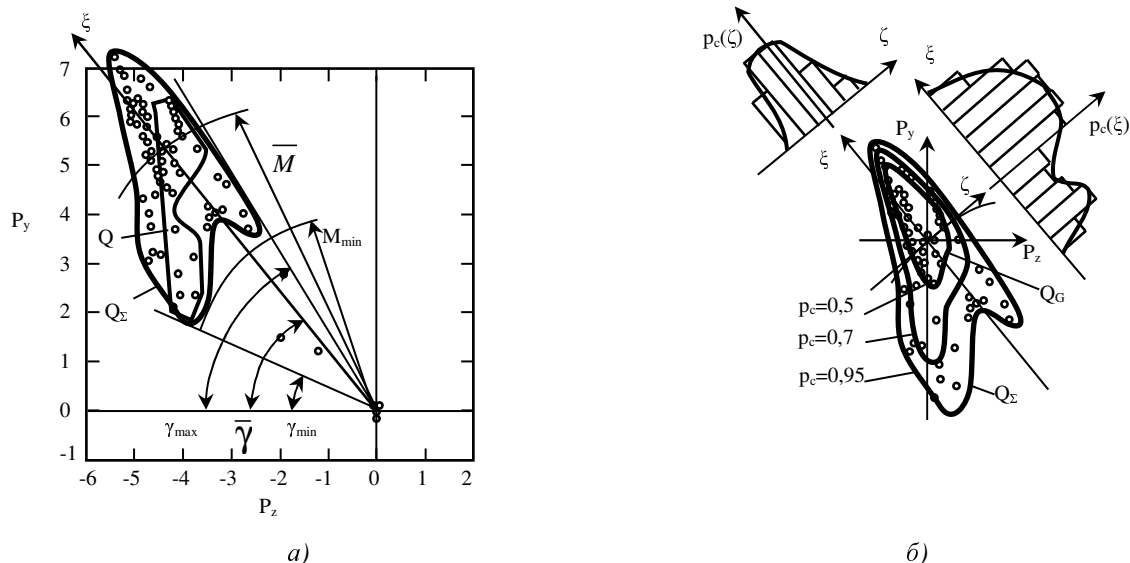


Рис. 12. Графічне зображення центрів суттєвих кластерів, визначених для десяти реалізацій двовимірного випадкового процесу (а), та статистичні характеристики процесу (б)

Кожен центр кластера відповідає окремому вектору. У своїй сукупності вектори несуть інформацію про двовірний випадковий процес.

Набір векторів являє собою математичну модель процесу. Вона дозволяє визначити його статистичні характеристики. Основними з них є середнє значення вектора, середнє значення кута дії сили різання та розсіяння положення і величини вектора сили різання відносно середнього значення.

Оцінка середнього значення знайдена шляхом осереднення по модулю вектора та куту його розташування.

Оцінка середнього значення модуля вектора:

$$\bar{M} = \frac{\sum_{i=1}^N M_i n_i}{\sum_{i=1}^N n_i}, \quad (1)$$

де  $M_i$  – значення модуля вектора, відповідне центру  $i$ -го кластера;  $n_i$  – кількість центрів кластерів із однаковим значенням модуля ( $n_i = 1$  для центрів кластерів, що не збігаються);  $N$  – загальна кількість суттєвих центрів кластерів.

Діапазон зміни модуля векторів, відповідних суттєвим кластерам, обмежено значеннями:

$$M_{\min} = \min(M_i), \quad M_{\max} = \max(M_i).$$

Оцінка розсіяння значень модулів:

$$\sigma_M^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2 n_i.$$

Аналогічно визначаються статистичні характеристики кутового розташування векторів.

Середнє значення кута дії сили різання визначено на основі залежності:

$$\bar{\gamma} = \frac{\sum_{i=1}^N \gamma_i n_i}{\sum_{i=1}^N n_i}, \quad (2)$$

де  $\gamma_i$  – кут розташування вектора відповідного кластера.

Діапазон кутового положення центрів суттєвих кластерів визначиться згідно з:

$$\gamma_{\min} = \min[\gamma_i], \quad \gamma_{\max} = \max[\gamma_i].$$

Оцінка розсіяння кутового розташування векторів:

$$\sigma_\gamma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\gamma_i - \bar{\gamma})^2 n_i.$$

Кластерна модель двовимірного випадкового вектора дає можливість оцінити закони розподілу окремих складових випадкового вектора. Центри суттєвих кластерів в основному містяться в області,

обмеженій контуром  $Q_{\Sigma}$  складної конфігурації (рис. 12, б). Для оцінки законів розподілу центрів кластерів у даній області розглянуті її ортогональні перетини в системі координат  $\zeta\xi$  з центром, який характеризується вектором з модулем  $\bar{M}$  та кутом  $\bar{\gamma}$ . В ортогональних перетинах побудовані гістограми та закони розподілу модуля вектора  $p_c(\xi)$  та його кутового положення  $p_c(\zeta)$ . Закон розподілу в радіальному перетині (напрямок  $\xi$ ) є двовершинним асиметричним. У даному перетині центри кластерів зміщені в напрямку зростання модуля. У тангенціальному перетині (напрямок  $\zeta$ ) закон розподілу  $p_c(\zeta)$  є близьким до симетричного. Для більш детальної оцінки двовимірного випадкового процесу визначено контури областей рівної ймовірності реалізації відповідного окремого центру кластера. Контури в цілому подібні межі області розташування центрів суттєвих кластерів. Основна частина центрів (50 %) зосереджена в межах контуру  $Q_G$ , форма якого близька до еліпса. Центр даного еліпса близький до загального середнього центра всіх кластерів. Тому можна вважати, що половина суттєвих центрів кластерів відповідає осередненим значенням, визначеним (1), (2).

#### Висновки:

1. Двовимірні нестационарні випадкові процеси описують динамічні властивості зубчастих передач, сил тертя і різання. Вони мають суттєво нестационарний імпульсний характер із високочастотними пульсаціями. Тому для їх статистичного аналізу традиційні методи є непридатними, а розроблена інформаційна технологія, яка базується на кластерному аналізі процесу за допомогою штучних нейронних мереж, є ефективною.

2. Для реалізації запропонованої інформаційної технології найбільш доцільно використати нейронні мережі у вигляді карт, що самоорганізуються. При цьому центри кластерів, які сформовані в двовимірному випадковому процесі, визначаються під час навчання штучної нейронної мережі, яке проводиться за допомогою подачі на вхід мережі проєкцій випадкового вектора, відповідного окремій реалізації двовимірного нестационарного випадкового процесу.

3. Центри суттєвої групи кластерів, відповідні одній реалізації двовимірного нестационарного процесу, є репрезентативними для характеристики процесу в цілому. Центри кластерів необхідної кількості (до 10) реалізацій процесу містяться в межах криволінійної області, в якій виділяються окремі підобласті характерних значень розташування годографа випадкового вектора. Криволінійну область розташування центрів кластерів доцільно прийняти як статистичні характеристики двовимірного нестационарного випадкового процесу і представити їх у вигляді набору контурів рівної ймовірності реалізації окремих центрів кластерів у даній області.

4. Контур, який охоплює 50 % центрів суттєвих кластерів, за формою відповідає еліпсу, центр якого близький до координат осередненого по всій групі суттєвих кластерів кінця вектора статистично середньої сили різання.

**Рекомендовані напрямки подальших досліджень.** Розроблений метод аналізу процесу у вигляді випадкового нестационарного вектора ґрунтується на застосуванні деяких групових (кластерних) інтегральних характеристик процесу. Інтегральні характеристики за своєю природою не можуть дати вичерпної інформації про особливості процесу. З метою підвищення інформативності аналізу в подальшому рекомендується поглибити розроблений метод, доповнивши його гармонічним та спектральним аналізом процесу з використанням двовимірних рядів Фур'є. На основі гармонічного аналізу планується визначити квазістационарні ділянки процесу. Статистичні характеристики процесу для даних ділянок рекомендується подати у вигляді тензора кореляційних моментів.

#### Список використаної літератури:

1. Експериментальне визначення характеристик стохастичного вектора сили різання при точінні / У.Хайзель, М.Г. Сторчак, В.М. Дрозденко, В.Б. Струтинський // Сучасні технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Вип. 3. – Харків : НТУ «ХПІ», 2009. – С. 114–124.
2. Heisel U. Determination of Cutting Parameters in Deep Hole Drilling with Single-Fluted Gun Drills of Smallest Diameters / U.Heisel, M.Storchak, R.Eisseler // Annals of the WGP, Production Engineering X/1. – 2003. – Pp. 51–54.
3. Heisel U. Entwicklung der Modellbildung von Zerspanprozessen / U.Heisel, M.Storchak // Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин : зб. наук. праць (Серія Г «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти») ; НАН України, ІНМ ім. В.М. Бакуля. – К., 2009. – С. 147–159.
4. Пугачев В.С. Введение в теорию вероятностей / В.С. Пугачев. – М. : Наука, 1968. – 368 с.
5. Струтинський В.Б. Тензорні математичні моделі процесів та систем : підручник / В.Б. Струтинський. – Житомир : ЖДТУ, 2005. – 635 с.
6. Круглов В.В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В.В. Круглов, М.И. Дли, Р.Ю. Голунов. – М. : Физматлит, 2001. – 221 с.



7. *Круглов В.В.* Искусственные нейронные сети. Теория и практика / *В.В. Круглов, В.В. Борисов.* – М. : Горячая линия–Телеком, 2001. – 382 с.
8. *Калан Р.* Основные концепции нейронных сетей / *Р.Калан.* – М. : Изд. дом «Вильямс», 2001. – 287 с.
9. *Медведев В.С.* Нейронные сети MATLAB 6 / *В.С. Медведев, В.Г. Потемкин.* – М. : Диалог МИФИ, 2002. – 488 с.

СТРУТИНСЬКИЙ Сергій Васильович – старший викладач кафедри Прикладної гідроаеромеханіки та мехатроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Наукові інтереси:

- математичне моделювання;
- прикладна гідроаеромеханіка та мехатроніка;
- системи приводів;
- гідравлічні машини та апарати.

E-mail: [strutynskyi@gmail.com](mailto:strutynskyi@gmail.com).

ГУРЖІЙ Андрій Андрійович – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Наукові інтереси:

- математичне моделювання;
- інформаційні технології;
- формоутворення складних поверхонь.

КУЗЬО Ігор Володимирович – магістрант Національного університету України «Львівська політехніка».

Наукові інтереси:

- системи штучного інтелекту;
- інформаційні технології.

Стаття надійшла до редакції 10.09.2014