

**Меранова Н.О. Моделювання процесів теплопереносу під час нанесення газотермічних покриттів з використанням гіперболічних рівнянь теплопровідності**

Наведено дані математичного моделювання процесів теплопереносу в системі "напилована частинка-основа" на стадії дії імпульсного тиску ( $\tau \leq 10^{-9}$  с). Представлено результати щодо встановлення закономірностей впливу на розв'язок розглянутої задачі врахування залежності теплофізичних властивостей матеріалів від температури. Оцінено релаксаційні ефекти для широко використовуваних сполучень матеріалів покриття і основи. Розглянуто можливості лінеаризації застосовуваної математичної моделі, заснованої на використанні гіперболічного рівняння теплопровідності, в якому беруть до уваги скінченність швидкості розповсюдження теплоти.

**Ключові слова:** математичне моделювання, процеси теплопереносу, газотермічне наплення, релаксаційні ефекти.

**Meranova N.O. Simulation of Heat Transfer Processes when Applying Thermal Spray Coatings Using Hyperbolic Heat Equation**

Data of mathematical modeling of heat transfer processes in the system "sprayed particles-base" on the stage of pulse pressure action ( $\tau \leq 10^{-9}$  s) is given. The results of the establishment of influence laws on the solution of these problems of dependent thermo physical properties of materials on temperature are presented. The estimation of the relaxation effects of commonly used combinations of coating and substrate materials is proposed. The possibility of linearization the used mathematical model based on the use of hyperbolic heat equation, which takes into account the speed finite of heat propagation is reviewed.

**Keywords:** mathematical modeling, heat transfer processes, gas-thermal spraying, relaxation effects.

УДК 681.518:622.248:004.94

*Доц. Л.Я. Чигур, канд. техн. наук –  
Івано-Франківський НТУ нафти і газу*

**КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБ'ЄКТА НА ОСНОВІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ**

Запропоновано метод контролю технічного стану об'єкта під час роботи складних систем, на основі засобів штучного інтелекту. Вибір розглянутого методу зумовлений особливістю ідентифікації технічного стану об'єкта та передаварійних ситуацій, що виникають у процесі функціонування складних технологічних систем. Здійснено моделювання у середовищі SOM Toolbox програмного пакету Matlab на прикладі контролю технічного стану породоруйнівного інструменту в процесі поглиблення свердловини. Результати проведених наукових досліджень довели доцільність використання штучних нейронних мереж для вирішення завдань цього напрямку. А також це дасть змогу розробляти адаптивні системи контролю технічного стану об'єкту, що значно підвищить вірогідність контролю, оскільки вони можуть автоматично пристосовуватися до змінних умов функціонування, прогнозувати виникнення і розпізнавати відомі та невизначені передаварійні ситуації, які можуть трапитись під час роботи складних систем.

**Ключові слова:** технічний стан об'єкта, метод контролю, штучні нейронні мережі, складні технологічні системи.

**Вступ.** Складні технологічні процеси здебільшого є нелінійними, нестаціонарними, невідтворюваними, багатофакторними, динамічними. У складних технічних системах контрольований об'єкт функціонує за умов апріорної та поточної невизначеності щодо структури та параметрів, розвивається в часі і перебуває під впливом зовнішніх завад. Наявність таких специфічних ознак дає під-

стави говорити про специфічну методологію його дослідження, оскільки все це зумовлює погану організацію внутрішньої структури системи в розумінні нечіткого проявлення причинно-наслідкових зв'язків [1].

Порушення обмежень, накладених на систему, призводить до аварій, непродуктивних втрат енергоресурсів, швидкого зношення обладнання, потреби мати великий штат технологічного персоналу і ремонтних служб для ліквідації наслідків аварій. Ця проблема ускладнюється тим, що часто найефективніші режими роботи багатьох складних систем близькі до гранично допустимих, а також тим, що об'єкт керування є істотно нестаціонарним, функціонує під інтенсивним впливом неконтрольованих збурень, має запізнення в каналах управління, розвивається в часі. Під час роботи складних систем, перед людиною-оператором, що приймає рішення, виникає задача оцінювання ситуацій з метою передбачення можливого характеру перебігу процесу та прийняття рішення про вибір керувальних дій для ефективного ведення робіт [2]. При цьому доводиться стикатися з об'єктами і процесами, які характеризуються великою кількістю якісних і кількісних ознак. Для вирішення таких завдань інженеру важливо мати формалізований опис об'єкта, процесу або ситуації, що розглядають з урахуванням того, що вони залежать від великої кількості чинників, які визначають поведінку об'єктів, багато з яких мають ймовірнісний характер. Ситуації оцінюють при цьому в умовах невизначеності і мають характер розпізнавання образів.

**Матеріали та методи.** Математичний апарат прийняття рішень про образ розглядуваних об'єктів набув значного розвитку в різних галузях знань через широке впровадження комп'ютерів в інженерну практику, оскільки створена можливість швидкого перероблення великих об'ємів інформації.

Головними задачами теорії розпізнавання образів є віднесення конкретного об'єкта або ситуації до тієї або іншої, заздалегідь оговореної категорії (дискретизація, ідентифікація, розпізнавання об'єкта); розподіл множини об'єктів на групи, що характеризуються спільними родинними властивостями (класифікація, кластеризація).

Під образом будемо розуміти деяке узагальнення множини різних уявлень про об'єкт, із яких відокремлюються найбільш стійкі його характеристики. Кожен індивідуальний об'єкт має набір ознак, якими можуть слугувати показники властивостей робочих агентів, режимні характеристики роботи обладнання, відомості про зовнішні впливи, номенклатура використаних матеріалів та обладнання й ін. При цьому велика кількість факторів, що залучаються до розгляду, пов'язана з недостатньою точністю вимірювань і складністю апріорного визначення найбільш інформативних ознак. Й подібній ситуації дуже ефективним є залучення до розгляду непрямих ознак, узгодженість яких під час розпізнавання переконає у правильності прогнозів.

У загальному випадку об'єкт характеризується вектором стану або ознак  $X(X_1, X_2, \dots, X_n)$ , залежно від конкретних значень компонент якого можна стверджувати належність об'єкта до того чи іншого образу. Рішення задачі про дискримінацію об'єкта передбачає створення певних правил, які залежно від значень компонент вектора ознак  $X(X_1, X_2, \dots, X_n)$  дасть змогу прийняти рішення про належність об'єкта до того чи іншого образу.

Створити систему подібних правил, які є сукупністю деяких "роздільних" функцій  $g_i(X)$  і умов прийняття рішень при їх відомих значеннях, можна на основі попередньо зібраних вибірок з представниками різних образів – навчання із вчителем або за допомогою автоматичних процедур кластеризації, в яких розбиття на образи здійснюється на основі деяких адаптаційних процедур і вибраних критеріїв близькості об'єктів.

Використання конкретного методу зумовлюється постановкою задачі і ознаками, які характеризують об'єкт. Наприклад, для розпізнавання образів за мірою подібності, потрібним є кількісне завдання вектора ознак. Два інших підходи (розпізнавання образів за мірою близькості між об'єктами різних класів та ймовірнісне розпізнавання за фазовим інтервалом) можуть оперувати як кількісними, так і якісними факторами. Окрім цього, збільшення кількості класів істотно ускладнює використання першого і третього підходів, тоді як ймовірнісне розпізнавання є найбільш універсальним і узагальнюючим.

**Результати.** Отже, для формування бази класів можливих станів об'єкта потрібно виконати кластерний аналіз, що розбиває множину станів на класи. Кластерний аналіз, на відміну від задач класифікації, не потребує апріорних припущень про набір даних, не накладає обмеження на подання досліджуваних об'єктів, дає змогу аналізувати показники різних типів даних (інтервальні, частоти, бінарні дані).

Результатом кластерного аналізу є розбиття станів на групи, що задовольняють деякий критерій оптимальності. До основних станів контрольованого об'єкта відносять працездатний, непрацездатний, передаварійний, невизначений стани. Для проведення кластерного аналізу доцільно використати шар Кохонена, що складається з деякої кількості  $n$  адаптивних лінійних суматорів, які діють паралельно (лінійних формальних нейронів) [3, 4]. Усі вони мають однакову кількість входів  $m$  і отримують на свої входи один і той же вектор вхідних сигналів  $x = (x_1 \dots x_n)$  (рис. 1).

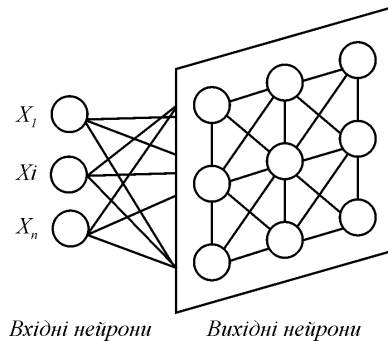


Рис. 1. Структура нейромережі Кохонена

Дані, що подаються на входи шару Кохонена, мають бути у вигляді вектора діагностичних ознак (станів) у  $N$ -вимірному евклідовому просторі, а також правильно промасштабовані для подальшого їх оброблення. Вихідним результатом роботи шару Кохонена є множина класів – стани, в яких перебуває контрольований об'єкт.

Моделювання проведено в середовищі SOM Тообох програмного пакету Matlab на прикладі контролю технічного стану породоруйнівного інструменту в процесі поглиблення свердловини. До вхідних параметрів нейромережевого алгоритму відносять: осьове навантаження на долото –  $P$ ; частота обертання долота –  $n$ ; крутний момент –  $M$ ; механічна швидкість проходження –  $v$ .

Для навчання і дослідження алгоритму контролю, згенеровано по 50 вхідних параметрів для ідентифікації можливої зміни технічного стану бурового до-

лота та утворення передаварійних ситуацій. Карта Кохонена є вихідним прошарком нейромережі Кохонена, і складається з нейронів, які розміщені на двовимірній решітці карти (розмірність –  $6 \times 11$  нейронів). Кожен нейрон має власний вектор стану. Після навчання сусідні нейрони мають подібні вектори стану. У процесі ініціалізації вхідні дані накладаються на карту Кохонена і нейрони карти змінюють свої ваги, випадковим чином розміщуючись на ділянках карти.

Оскільки ініціалізація нейромережі здійснюється шляхом призначення нейронам мережі випадкових значень синаптичних ваг, то на початковому етапі роботи нейрони у вхідному шарі нейромережі повністю дезорганізовані. Набір даних, призначених для навчання мережі, містить т. зв. "мітки", які надалі стануть центрами кластерів станів долота. Кожна "мітка" характеризується набором з чотирьох вхідних параметрів, які визначають один із станів контрольованого об'єкта. Візуалізацію карти Кохонена у процесі навчання можна спостерігати у вигляді, зображеному на рис. 2.

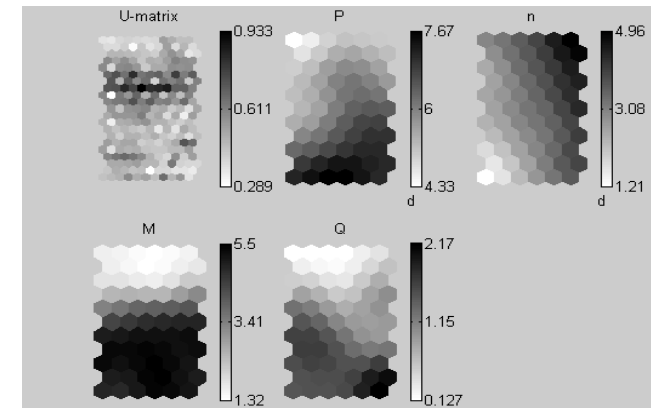


Рис. 2. Візуалізація карти Кохонена з допомогою функції SOM\_SHOW

Для перевірки функціонування розробленого нейромережевого алгоритму, змодельовано випадок виникнення ситуації, що характеризує зношення долота. Для цього подамо на вхід мережі вектор стану, характеристики якого подібні до відомих характеристик роботи зношеного долота на вибої свердловини.

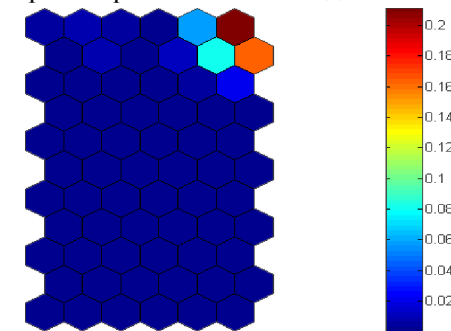


Рис. 3. Моделювання SOM

На рис. 3 чітко видно, що технологічна ситуація потрапила у верхню праву частину мапи, де знаходиться кластер стану, що відповідає зношенню породоруйнівного інструменту.

Змодельована самоорганізувальна мапа може працювати в реальному часі. У разі потрапляння будь-якого з наведених вище ускладнень на SOM, оператор матиме змогу швидко ідентифікувати її тип і прийняти відповідні рішення для їх усунення. Запропонований метод контролю на базі нейромережі Кохонена надалі може бути удосконалений і застосовуватись для ідентифікації технічних станів об'єктів, а також для прогнозування аварійних ситуацій і ускладнень, що можуть виникнути під час функціонування складних систем.

**Обговорення або дискусія.** Ефективність штучних нейромереж з різною кількістю внутрішніх (прихованих) прошарків нейронів разом з використанням адаптивних активаційних функцій було протестовано під час контролю технічного стану породоруйнівного інструменту. У всіх моделях було використано дев'ять вхідних параметрів, на основі яких формувався вихідний сигнал, що характеризував зношення породоруйнівного інструменту [5]. Кількість нейронів у внутрішньому шарі змінювали від 14 і 22. Зроблено висновок, що збільшення кількості нейронів у штучній нейромережі з адаптивними активаційними функціями призводить до зростання швидкості навчання порівняно з традиційною нейромережею прямого розповсюдження.

Мережу адаптивного резонансу було випробувано для визначення сильного пошкодження долота під час лабораторного дослідження процесу буріння [6]. Згідно з теорією адаптивного резонансу (TAP), адаптивний резонанс виникає тоді, коли ймовірності входу мережі і зворотного зв'язку збігаються. ART2-тип нейромереж було розроблено для задач розпізнавання в реальному часі. Нейромережі типу ART2 порівнюють вхідний вектор сигналів з попередніми взірцями, що траплялись раніше. Якщо вхід є аналогічним до деяких із зразків, він буде поміщений в категорію із подібними взірцями. З іншого боку, якщо вхід не подібний до жодного з попередньо представлених взірців, то цьому входу буде призначено нову категорію. Нейромережі типу ART2 вимагали в два три рази більше обчислювального часу під час класифікації вхідних сигналів, ніж інші нейромережеві методи. Однак кількість помилок класифікації у них виявилася набагато меншою.

На практиці технічний стан долота характеризується складними причинно-наслідковими зв'язками між великою кількістю інформативних параметрів і його технічним станом. Межа розділу в цьому випадку описується складною кривою або сукупністю кривих (площиною), що не дає змоги використовувати формальний нейрон як нейромережну модель класифікації технічного стану керованого об'єкта. Вирішення задачі в такому випадку припускає застосування нейронних мереж, що організована за типом багатошарових нейронних мереж прямого поширення. Використання цієї нейромережі дає змогу оцінити технічний стан об'єкта в межах від 0 до 1.

**Висновки.** Реалізація запропонованого методу на базі поєднання цих двох нейромереж дасть змогу розробляти адаптивні системи контролю технічного стану об'єкта. Це значно підвищить вірогідність контролю, оскільки вони

можуть автоматично пристосовуватися до змінних умов функціонування, прогнозувати виникнення і розпізнавати відомі та невизначені предаварійні ситуації, які можуть трапитись під час роботи складних систем.

## Література

1. Семенцов Г.Н. Автоматизація технологічних процесів у нафтовій і газовій промисловості / Г.Н. Семенцов, Я.Р. Когуч, Я.В. Куровець, М.М. Дранчук. – Івано-Франківськ : Вид-во ІФНТУНГ, 2009. – 300 с.
2. Мішенін, А.А. Підхід до підтримки прийняття рішень операторами складних технологічних процесів / А.А. Мішенін // Вісник Сумського державного університету : зб. наук. праць. – Сер.: Технічні науки. – 2005. – № 9(81). – С. 107-123.
3. Self-organizing maps. Teuvo Kohonen. – Helsinki, Finland, 2005. – 496 p.
4. Руденко О.Г. Штучні нейромережі : навч. посібн. / О.Г. Руденко, Є.В. Бодяньський. – Харків : ТОВ "Компанія СМІТ", 2006. – 404 с.
5. Liu T.I. Intelligent classification and measurement of drill wear / T.I. Liu, K.S. Anantharaman // Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME. – 1994. – Vol. 116. – Pp. 392-397.
6. Tansel I.N. Monitoring drill conditions with wavelet based encoding and neural network / I.N. Tansel, C. Mekdecı, O. Rodriguez, B. Urangun // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 1993. – Vol. 33 (4). – Pp. 559-575.

## *Чигур Л.Я.* Концептуальные основы метода контроля технического состояния объекта на основе искусственного интеллекта

Предложен метод контроля технического состояния объекта при работе сложных систем на основе искусственного интеллекта. Выбор рассматриваемого метода обусловлен особенностью идентификации технического состояния объекта и предаварийных ситуаций, возникающих в процессе функционирования сложных технологических систем. Осуществлено моделирование в среде SOM Toolbox программного пакета Matlab на примере контроля технического состояния породоразрушающего инструмента в процессе углубления скважины. Результаты проведенных научных исследований доказали целесообразность использования искусственных нейронных сетей для решения задач данного направления. А также это даст возможность разрабатывать адаптивные системы контроля технического состояния объекта, что значительно повысит вероятность контроля, поскольку они могут автоматически приспосабливаться к меняющимся условиям функционирования, прогнозировать возникновение и распознавать известные и неопределенные предаварийные ситуации, которые могут случиться во время работы сложных систем.

**Ключевые слова:** техническое состояние объекта, метод контроля, искусственные нейросети, сложные технологические системы.

## *Chygur L.Ya.* Some Conceptual Foundations for Control Method of Technical State of the Object Based on Artificial Intelligence

The method of object condition monitoring during the work of complex systems on the basis of artificial intelligence is proposed. The choice of this method is caused by the peculiarity of identifying the object technical state and situations that arise in the operation of complex technological systems. Modeling was performed in SOM Toolbox Matlab software package as an example of technical state of rock cutting tool in the process of deepening of wells. The results of the research showed the feasibility of using artificial neural networks to solve field problems. It will also enable developing adaptive systems for control of the technical state of the facility that will significantly increase the probability of control since they can automatically adapt to changing operating conditions, predict the emergence and identify known and uncertain pre-emergencies that may occur during the work of complex systems.

**Keywords:** technical state of object, control method, artificial neural networks, complex technological systems.