

Міністерство освіти і науки України

Системні технології

System technologies

6 (149) 2023

Регіональний міжвузівський збірник наукових праць

Засновано у січні 1997 року.

У випуску:

- ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА ОРГАНІЗАЦІЯ СУЧАСНОГО ВИРОБНИЦТВА**
- МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ**
- СИСТЕМНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ
ТА КІБЕРБЕЗПЕКА**

Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 6 (149). - Дніпро, 2023. – 144 с.
ISSN 1562-9945 (Print).
ISSN 2707-7977 (Online).

Редакційна колегія випуску:

Алпатов А.П. - д.т.н., проф. (відп. редактор)
Архипов О.Є. - д.т.н., проф.
Білозьоров В.Є. - д.ф.-м.н., проф.
Бабічев С.А. (Чеська Республіка) - д.т.н., доц.
Єрьомін О.О. - д.т.н., проф.

Прогресивні інформаційні
технології та організація
сучасного виробництва

Гече Ф.Е. - д.т.н., проф., (відп. редактор)
Гуда А.І. - д.т.н., проф.
Гнатушенко Вік.В. - д.т.н., проф.
Скалозуб В.В. - д.т.н., проф.

Математичне
та програмне забезпечення
інтелектуальних систем

Гнатушенко В.В. - д.т.н., проф., (відп. редактор)
Гожий О.П. - д.т.н., проф.
Кіріченко Л.О. - д.т.н., проф.
Светличний Д.С. (Польща) - д.т.н., проф.
Хандецький В.С. - д.т.н., проф.

Системні технології
обробки інформації
та кібербезпека

Збірник друкується за рішенням Вченої Ради
Українського державного університету науки і технологій
від 23.01.2023 р., № 4

Адреса редакції: 49600, Дніпро, пр. Гагаріна, 4
Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій»
кафедра Інформаційних технологій та систем.
Тел. +38(097)6854525
E-mail: st@nmetau.edu.ua
<https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st>

© Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій»,
ІВК «Системні технології», 2023

ПОШУК КЛЮЧОВИХ ТОЧОК НА ЗОБРАЖЕННЯХ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ МЕДИКО-БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Анотація: У статті представлений аналіз оптимальних інструментів для створення цифрового двійника внутрішніх органів людини (на прикладі отоларингології) на основі потокових відеоданих, що надходять у реальному часі з камери медичного приладу. Досліджено два основних методи: алгоритмічна реконструкція та використання нейронної мережі. Порівняння методів виконано за критеріями: ефективність, точність, швидкість реакції та практичність застосування в медичному середовищі. Особлива увага приділена підходам на основі нейронних мереж через їх високу адаптивність, точність і здатність ефективно обробляти зашумлені та неповні дані. Визначено основні переваги та особливості цього методу у контексті медичного застосування. Результати дослідження підтверджують високий потенціал нейронних мереж у створенні точних цифрових моделей внутрішніх органів, що відкриває нові перспективи для розроблення програмоного забезпечення процесів створення цифрових двійників медико біологічних об'єктів.
Ключові слова: 3D візуалізація, цифрові двійники, медичне програмне забезпечення.

Постановка проблеми. З інтенсивним розвитком цифрової медицини актуальність створення деталізованих цифрових моделей анатомічних структур людини зростає. Цифрові двійники можуть слугувати важливим інструментом для діагностики, навчання медичних фахівців, планування хірургічних втручань та розробки інноваційних методів лікування. При цьому основним джерелом інформації для моделювання часто є відеодані з ендоскопічних або інших медичних приладів. Однак, перетворення цих даних у точні тривимірні моделі виявляється значущим викликом. Сучасні методики реконструкції часто засновані на алгоритмах визначення ключових точок на зображеннях. Ці методи можуть виявлятися нестабільними у випадках, коли відеопотоки є зашумленими, неповними або викривленими. Водночас, нейронні мережі пропонують нові перспективи завдяки своїй здатності адаптуватися до складних даних та вивчати неявні залежності. У зв'язку з цим, ключовою проблемою є визначення оптимального підходу до реконструкції цифрових двійників медико-біологічних об'єктів.

Стан предметної галузі та актуальність дослідження. Аналіз досліджень зі створення цифрових двійників у галузі медицини дає змогу стверджувати, що безпосередньо ця тема дуже мало висвітлена у наукових виданнях. У більшості випадків програмне забезпечення цифрових двійників для галузі медицини створюється як стартап-проекти, які зберігають принципи реалізації свого програмного продукту як комерційну таємницю. Тому можна стверджувати, що технологічна зрілість програмних продуктів у цій галузі знаходиться за шкалою рівня технологічної готовності ТЮВЕ [1] на стадії прототипування. Отже, задача створення медичних програмних систем з відкритим кодом, які ґрунтуються на застосуванні технології цифрових двійників, є актуальною.

Метою дослідження є розроблення методу створення цифрових двійників медико-біологічних об'єктів. Для досягнення поставленої мети необхідно обрати найбільш доцільний підхід, виходячи з аналізу переваг та обмежень можливих рішень задачі створення цифрового двійника медико-біологічного об'єкта з точки зору точності, швидкості обробки та практичної застосовності у медичному середовищі. Дослідження виконується на прикладі створення цифрового двійника гортані для подальшого застосування у медичній практиці лікарів-отоларингологів.

Викладення основного матеріалу. Розглянемо основні підходи до тривимірної реконструкції гортані з подальшим створенням цифрового двійника: алгоритмічний та з використанням нейронних мереж.

Алгоритмічний підхід до тривимірної (3D) реконструкції заснований на математичних моделях та алгоритмах, які роблять можливим створення 3D моделей на основі таких вхідних даних, як 2D зображення. Наприклад, можуть бути використані окремі кадри відеопотоку [2]. Цей підхід відзначається детермінованістю, що забезпечує стабільність отримання результатів при однакових типах вхідних даних. Проте, алгоритмічний підхід може вимагати ручного налаштування цифрової моделі у разі використання нового типу даних.

3D реконструкція на основі застосування нейронних мереж для створення 3D моделей з набору 2D зображень вимагає етапу навчання мережі на великих наборах даних. Методи на основі нейронних мереж відзначаються високою адаптивністю і гнучкістю, що дозволяє розв'язувати широкий спектр задач без специфікації конкретних алгоритмічних правил. Проте, навчання нейронних мереж вимагає значних обчислювальних ресурсів і великих наборів даних.

Проаналізуємо можливість та доцільність застосування кожного з цих підходів при побудові цифрової моделі для застосування в отоларингології.

Дані, які можуть надходити з медичних приладів, що використовуються в отоларингології, а саме кадри гортані та голосових зв'язок, наведено на рис.1.

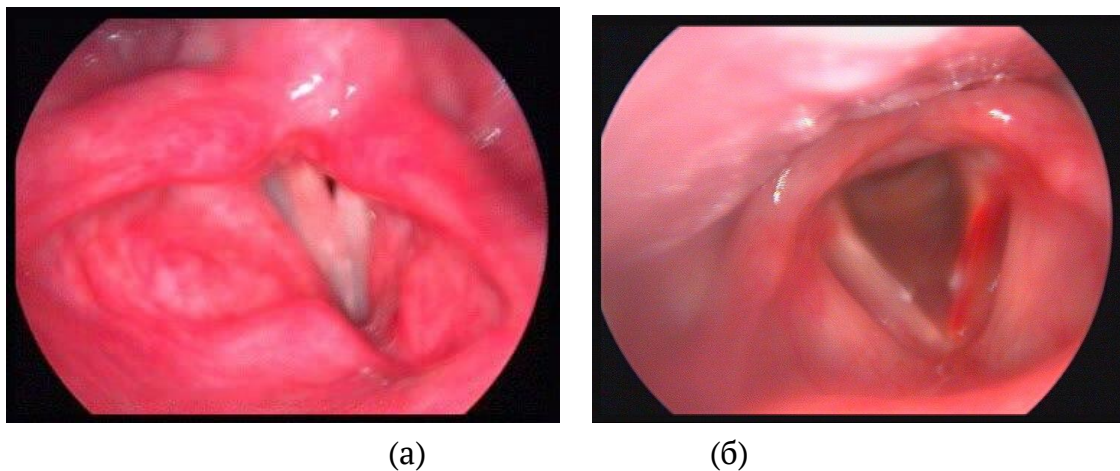


Рисунок 1 - Приклади зображення гортані, отриманого з медичного обладнання:
(а) зображення гортані зі зміщеними анатомічними орієнтирами (фаза фонації); (б) зображення частково ураженої гортані зі зміною кольору тканин (фаза дихання)

Проаналізуємо зображення на рис. 1а за допомогою алгоритмічного підходу до розпізнавання та реконструкції зображень, взявши за основу метод Харіса [3-5].

Основною задачею у цьому випадку є виявлення низки ключових точок для створення візуалізації цифрового двійника, а також фіксація змін, які відбуваються протягом дослідження. Останнє пов'язано з тим, що дані для побудови валідного двійника мають бути темпоральними.

Реалізація алгоритмічного підходу для пошуку та візуалізації ключових точок з використанням мови Python та бібліотеки OpenCV [6] наведена на Лістингу 1.

Лістинг 1. Визначення ключових точок.

```
img = cv2.imread('sample.jpg', 0)
orb = cv2.ORB_create(200)
keypoint, des = orb.detectAndCompute(img, None)
img_final = cv2.drawKeypoints(img, keypoint, None,
flags=cv2.DRAW_MATCHES_FLAGS_DRAW_RICH_KEYPOINTS)
```

Результат застосування алгоритмічного підходу до зображення на рис. 1а наведено на рис. 2. Час виконання обробки зображення склав 240 мс. Аналіз результату експерименту дозволяє зробити висновок, що з точки зору подальшої побудови 3D моделі знайдені ключові точки є недостатньо інформативними, оскільки, окрім центральної частини зображення, ключові точки на решті зображення майже відсутні, що значно ускладнює задачу реконструкції. Також на якість подальшого 3D моделювання може негативно вплинути те, що зміна інтенсивності кольору у майже кожній області представленого зображення є незначною.

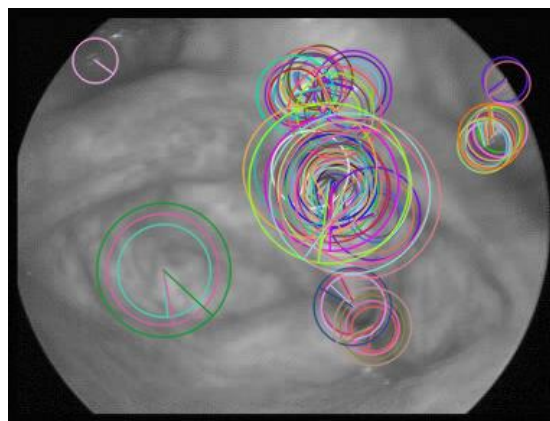


Рисунок 2 - Ключові точки, знайдені алгоритмічним методом

Тепер проведемо експеримент із застосуванням методу виявлення ключових точок за допомогою використання нейронних мереж з використанням бібліотеки TensorFlow [7]. Результат експерименту на основі нейронних мереж наведено на рис. 3.

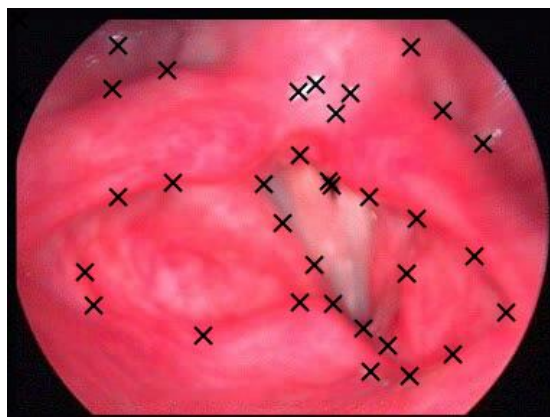


Рисунок 3 - Ключові точки, знайдені за допомогою нейронної мережі

Час виконання обробки зображення на рис. 1а методом виявлення ключових точок за допомогою використання нейронних мереж склав 301 мс. Модель натренована на наборі даних, що являє собою кадри відеопотоку ендоскопічного дослідження гортані. У експерименті використано 60 кадрів. Для кожного кадра цього набору даних виконана ручна розмітка ключових точок, що становлять інтерес для подальшої 3D візуалізації. Через невеликий розмір набору даних, використаного для тренування нейронної мережі, точність пошуку ключових точок є недостатньо високою, однак порівняння результатів пошуку на рис. 2 та рис. 3 дозволяє зробити висновок про більш широкий розподіл ключових точок при застосуванні методу на основі нейронних мереж, що дозволяє рекомендувати його для використання при створенні 3D моделі медико-біологічного об'єкту.

Висновок про доцільність використання підходу з використанням нейронних мереж також підкріплюється наступними аргументами, які ґрунтуються на особливостях задач, що вирішуватимуться за допомогою програмного забезпечення, яке реалізуватиме цей підхід:

– *Адаптивність*: нейронні мережі базуються на механізмах самонавчання, що дозволяє їм поліпшувати якість роботи на основі додаткових об'ємів даних. Це також означає, що вони можуть легко масштабуватися для вирішення інших задач – у нашому випадку для моделювання інших внутрішніх органів.

– *Точність*: у дослідженні було продемонстровано, що нейронні мережі можуть забезпечувати більш високу точність, а саме гарантувати рівномірне виявлення ключових точок на всіх поверхні об'єкту. Це є особливо важливим за наявності шуму, що становить одну з важливих проблем, яка виникає при обробленні потоку даних у реальному часі.

Сформулюємо функціональні та нефункціональні вимоги до програмного продукту, який ґрунтуватиметься на обраному підході.

Функціональні вимоги:

1. Введення даних:

– отримання вхідних медичних зображень та даних у найбільш поширених форматах (avi, mp4) або у вигляді відеопотоку;

– забезпечення підтримки декількох каналів уведення даних для можливого подальшого масштабування.

2. Обробка даних:

– препроцесінг зображень (підсилення контрасту, видалення шумів);

– виділення ключових характеристик з вхідних даних.

3. Реконструкція:

– модифікація шаблону медико-біологічного об'єкту з урахуванням вхідного потоку даних для створення цифрового двійника;

– забезпечення можливості зміни цифрового двійника у реальному часі.

4. Збереження та експорт:

– можливість експорту моделі (цифрового двійника) до локального сховища з використанням форматів, що найчастіше використовуються у прикладній галузі (наприклад, STL, OBJ).

Нефункціональні вимоги:

1. Швидкість: програмне забезпечення має виконувати реконструкцію максимально швидко, враховуючи об'єм вхідних даних.

2. Точність: відтворення анатомічних деталей має відбуватись з максимальною точністю.

3. Інтеграційність: можливість інтеграції програмного продукту з іншими системами та надання API для розширення функціональності.

4. Безпека: захист медичних даних пацієнтів, шифрування даних та дотримання стандартів конфіденційності.

5. Сумісність: підтримка різних форматів медичних зображень і даних.

6. Масштабованість: можливість обробки великих наборів даних без втрати продуктивності.

7. Адаптивність: можливість адаптування програмного забезпечення до реалізації різних медико-біологічних об'єктів або їх систем.

8. Стійкість: здатність працювати без збоїв та відновлювати роботу після відмов.

Висновки. У дослідженні було проаналізовано основні методи пошуку ключових точок для 3D моделювання як етапу створення цифрових двійників медико-біологічних об'єктів. Дослідження проведено на прикладі аналізу зображень гортані для застосування розроблюваного програмного забезпечення в отоларингології. У результаті аналізу двох основних підходів до визначення ключових точок на зображеннях об'єктів, які потребуються 3D моделювання, виявлено, що доцільно розроблювати програмне забезпечення для створення цифрових двійників медико-біологічних об'єктів із застосуванням нейронних мереж. Цей підхід забезпечує стійкість до шумів на зображеннях та є менш чутливим до роздільності вхідного відеопотоку. У статті також сформульовані функціональні та нефункціональні вимоги до програмного забезпечення процесів створення цифрових двійників медико-біологічних об'єктів.

Автори висловлюють подяку Шидловській Т.А., доктору медичних наук, професору, завідувачці лабораторії голосу і слуху Державної установи «Інститут отоларингології ім. проф. О.С. Коломійченка АМН України», за надання медичних зображень та консультаційну допомогу. Медичні зображення надані з дотриманням вимог медичної етики і конфіденційності інформації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Steneker, M., 2016. *Towards an empirical validation of the TIOBE Quality Indicator* (Doctoral dissertation, Eindhoven University of Technology).
2. Zhen, W. and Luan, L., 2021, February. Physical World to Virtual Reality–Motion Capture Technology in Dance Creation. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1828, No. 1, p. 012097). IOP Publishing.
3. Peng, K., Chen, X., Zhou, D. and Liu, Y., 2009, December. 3D reconstruction based on SIFT and Harris feature points. In *2009 IEEE international conference on robotics and biomimetics (ROBIO)* (pp. 960-964). IEEE.
4. Kamel Boulos, M.N. and Zhang, P., 2021. Digital twins: from personalised medicine to precision public health. *Journal of personalized medicine*, 11(8), p.745.
5. Sipiran, I. and Bustos, B., 2011. Harris 3D: a robust extension of the Harris operator for interest point detection on 3D meshes. *The Visual Computer*, 27, pp.963-976.
6. Bradski, G. and Kaehler, A., 2000. *OpenCV. Dr. Dobb's journal of software tools*, 3(2).
7. Pang, B., Nijkamp, E. and Wu, Y.N., 2020. Deep learning with tensorflow: A review. *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 45(2), pp.227-248.

REFERENCES

1. Steneker, M., 2016. *Towards an empirical validation of the TIOBE Quality Indicator* (Doctoral dissertation, Eindhoven University of Technology).
2. Zhen, W. and Luan, L., 2021, February. Physical World to Virtual Reality–Motion Capture Technology in Dance Creation. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1828, No. 1, p. 012097). IOP Publishing.
3. Peng, K., Chen, X., Zhou, D. and Liu, Y., 2009, December. 3D reconstruction based on SIFT and Harris feature points. In *2009 IEEE international conference on robotics and biomimetics (ROBIO)* (pp. 960-964). IEEE.
4. Kamel Boulos, M.N. and Zhang, P., 2021. Digital twins: from personalised medicine to precision public health. *Journal of personalized medicine*, 11(8), p.745.
5. Sipiran, I. and Bustos, B., 2011. Harris 3D: a robust extension of the Harris operator for interest point detection on 3D meshes. *The Visual Computer*, 27, pp.963-976.

6. Bradski, G. and Kaehler, A., 2000. OpenCV. *Dr. Dobb's journal of software tools*, 3(2).

7. Pang, B., Nijkamp, E. and Wu, Y.N., 2020. Deep learning with tensorflow: A review. *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 45(2), pp.227-248.

Received 01.12.2023.

Accepted 07.12.2023.

Detection of key points on images for creating digital twins of medical and biological objects

The paper presents an analysis of optimal tools for creating a digital twin of human organs (on the example of otolaryngology) based on streaming video data received in real time from the camera of a medical device. Two main methods were studied: algorithmic reconstruction and the use of a neural network. The comparison of methods was performed according to the following criteria: efficiency, accuracy, speed of reaction and practicality of application in the medical environment. Special attention is paid to approaches based on neural networks due to their high adaptability, accuracy and ability to efficiently process noisy and incomplete data. The main advantages and features of this method in the context of medical application are determined. The results of the study confirm the high potential of neural networks in creating accurate digital models of internal organs, which opens up new perspectives for the development of software for the creation of digital twins of medical and biological objects.

Песчанський Владислав Юрійович – аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ.

Сулєма Євгенія Станіславівна – доктор технічних наук, завідувачка кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ.

Vladyslav Peschanskii – Post-Graduate Student of Computer Systems Software Department National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv.

Yevgeniya Sulema – DSc, Head of Computer Systems Software Department. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv.

ЗАСТОСУВАННЯ ГЛИБОКИХ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ДАНИХ

Анотація: Розвиток програмних і апаратних технологій дозволяє отримувати, зберігати та обробляти набори мультимодальних даних, які краще описують стан досліджуваного об'єкта, ніж дані однієї модальності. Тому дослідження та розвиток методів ефективної обробки таких даних є актуальною задачею. У статті запропоновано спосіб організації обробки мультимодальних даних, який адаптується до наявних обчислювальних можливостей системи, для використання у системі цифрового двійника в режимі «цифрової тіні» або відокремленої симуляції. Також описано приклад створення програмного модуля класифікації мультимодальних даних у реальному часі.

Ключові слова: мультимодальні дані, класифікація, паралельні обчислення, штучні нейронні мережі.

Вступ. Розвиток різноманітних технічних засобів збору, зберігання та передачі даних роблять можливим різноплановий моніторинг та збір інформації про певні об'єкти, результатом яких є набори мультимодальних гетерогенних даних. Приклади систем, що генерують такі набори, наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Приклади мультимодальних даних в різних галузях

Галузь	Дані	Область використання
Виробництво	Інформація про стан машин та продуктів виробництва із контролерів станків з ЧПУ та зовнішніх сенсорів, в тому числі мережі ІоТ; введення операторів	Моделювання та прогнозування процесу виробництва, обслуговування обладнання
Медицина	Медичні дані пацієнтів (вік, вага, тощо) та результати досліджень від вимірів температури і тиску до багат шарових зображень КТ	Діагностика захворювань та виявлення ризиків для здоров'я

Інтернет	Неструктуровані зображення, відео та аудіо, тексти	Веб-скрейпінг, індексація, добування даних, виявлення трендів
Розумні будинки	Показники сенсорів мережі IoT	Моніторинг та автономна підтримка стану вощадливий спосіб

Наявність більшої кількості даних про об'єкт дозволяє точніше визначити та передбачити його стан завдяки додатковій безпосередній інформації з одного боку та наявності змістовної інформації у зв'язках між модальностями, які впливають одна на одну з іншого. Окрім цього, різні джерела даних дозволяють зменшити вплив шуму та аномальних викидів на результати класифікації. Тому, методи обробки таких наборів даних є предметом численних досліджень в областях поєднання даних, класифікації та кластеризації, моделювання, прогнозування та цифрових двійників.

Постановка проблеми. Задача, що розв'язується за допомогою методів класифікації, полягає у визначенні приналежності об'єкту до одного з визначених класів за певними ознаками при заданій вибірці об'єктів, для яких відома їх класова приналежність. Використання мультимодального набору даних як навчальної вибірка передбачає виділення ознак для класифікації із різних модальностей, певним чином логічно пов'язаних (як правило, синхронізованих за часом).

Ця стаття присвячена створенню програмного модуля для класифікації мультимодальних даних у режимі реального часу або близькому до нього з метою його використання як компонента системи цифрового двійника, який працює як цифрова тінь або відокремлений симулятор.

Аналіз літературних джерел. У статті [1] наведено детальний огляд принципів, задач та викликів мультимодального машинного навчання, теоретичні засади їх вирішення та їх розвиток в інших роботах.

У роботі [2] пропонується спільне використання візуальних та звукових даних для підвищення точності розпізнавання мови. Автори використовують бімодальний автокодувальник, який навчають на модифікованому наборі даних, де в частині даних відсутні значення однієї з модальностей, але мережа повинна виділити ознаки обох. Таким чином, очікується, що мережа навчанні

мережа виявлятиме кореляцію між ознаками, виділеними з окремих модальностей.

Автори статті [3] використовують декілька незалежних мереж для обробки модальностей із подальшим поєднанням результатів класифікації завдяки зваженому середньому, ваги якого підбираються на значеннях валідаційного набору. В контексті задачі дослідження цей підхід має декілька переваг: мережі не пов'язані між собою, тому обчислення їх результатів може відбуватись паралельно, при цьому вони функціонують як “чорна скринька” і можуть бути швидко замінені іншими, більш точними мережами або взагалі іншими засобами класифікації із однаковим форматом результату.

У статті [4] пропонується використання генеративної рекурентної мережі, яка використовує ознаки зображень, виділені згортковою мережею. Сигнали рекурентної мережі та виділені ознаки поєднуються у мультимодальному шарі, забезпечуючи спільну імовірнісну генерацію речень для опису зображень.

Ці та інші нещодавні публікації фокусуються на конкретних задачах, які або не потребують подальшого розвитку, наприклад у статті [3] розв'язується задача діагностики раку, але не приділено увагу інтеграції отриманих рішень у програмні системи. Отже, дослідження цього напрямку обробки мультимодальних даних є актуальними.

Побудова системи класифікації мультимодальних даних в реальному часі. Поставлена задача в загальному вигляді передбачає обробку даних декількох модальностей. Залежно від того, наскільки вони пов'язані між собою, результати класифікації можуть або доповнювати стан об'єкта, у випадку, коли модальності слабко пов'язані (рис. 1а), або уточнювати його завдяки злиттю результатів (рис. 2б).

При використанні штучних нейронних мереж як методу класифікації, реалізація такого поєднання передбачає обчислення результату мереж для кожної модальності з подальшою обробкою результатів допоміжним блоком. Це може бути як просте зважене середнє результатів, так і ще одна мережа, навчена класифікувати об'єктами за результатами обробки мереж, що відповідають за окремі модальності. Дослідження показують, що другий спосіб побудови класифікатора є більш точним. Він використовує мережі для виділення ознак із точок мультимодальних даних, в той час як класифікатор приймає рішення, спираючись на поєднаний вектор ознак. При цьому мережі, як правило, інтегровані і окремі мережі попередньо навчаються на відповідних окремих модальностях, після чого вони і класифікатор донавчаються на повному наборі.

Втім, для більш ефективної з точки зору часу виконання реалізації, окремі мережі доцільно тримати ізольованими з ряду причин. По-перше, це робить програмну систему, яка реалізує класифікатор, модульною, що дозволяє розподілити обчислення паралельно, а також дозволяє частково оновлювати компоненти без необхідності повного повторного навчання та розгортання системи. Навіть підходи з використанням інтегрованих мультимодальних мереж можуть бути розділені на окремі мережі, за умови відсутності великої кількості наскрізних зв'язків (shortcuts). В такому випадку, деякі внутрішні шари стають частиною вхідного.

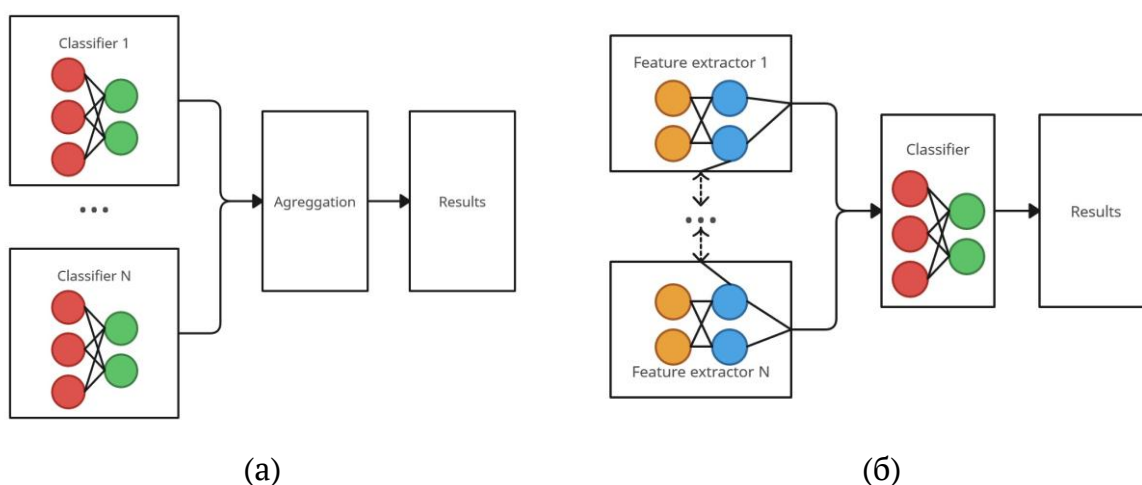


Рисунок 1 - а – незалежні класифікатори слабко пов'язаних модальностей.
б – спільні класифікатори пов'язаних модальностей

Розглянемо механізм організації обчислень, який керує роботою мереж. Для ефективного паралельного виконання необхідний спосіб регулювання навантаження. Для цього використовується паралельна черга за шаблоном producer-consumer. Процес отримання даних з певною частотою отримує нову точку даних, виконує їх попередню обробку для приведення у формат, придатний для подальшої обробки та поміщає їх у чергу. За наявності вільного процесу-обробника, він зчитує дані з черги та розподіляє їх по процесам, які виконують обчислення, визначені відповідними нейронними мережами. Отримані результати синхронізуються та агрегуються. Як зазначалось раніше, агрегація може передбачати алгоритм класифікації за отриманими результатами або просте їх поєднання. Результат обробки передається далі як виведення, наприклад, для його відображення користувачу. При цьому, сигнал про завершення обробки передається на процес отримання даних (рис. 2).

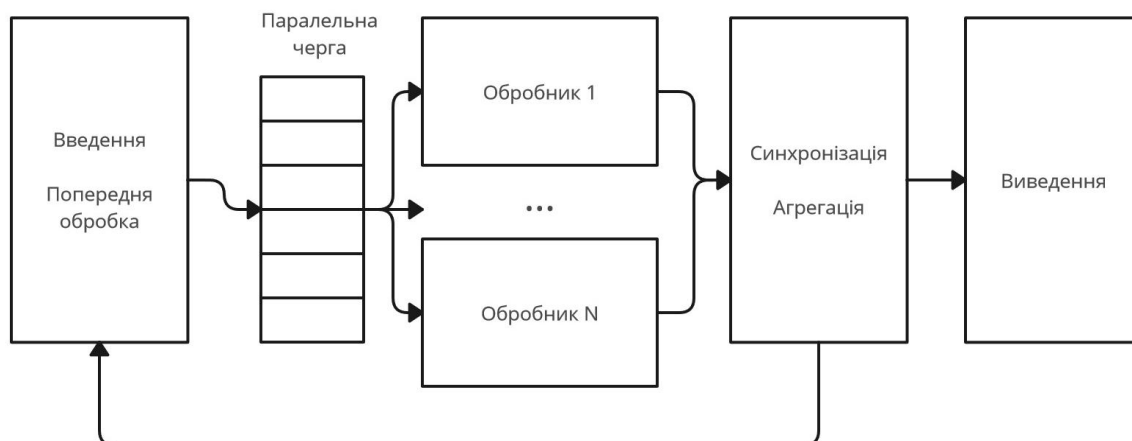


Рисунок 2 - Схема системи паралельної обробки мультимодальних даних

Частота отримання точки даних оновлюється таким чином, щоб максимізувати пропускну здатність системи. При цьому, якщо процеси-обробники зайняті довше, то черга виступає буфером, який забезпечує, хоч і з затримкою, обробку отриманих даних, але частота їх зчитування в подальшому зменшиться, доки черга не буде опрацьована. Якщо ж обробники очікують на надходження даних довше, ніж частота зчитування, то вона збільшиться, дозволяючи отримати більшу швидкодію системи.

Створення експериментальної програмної системи. Для підтвердження такої організації системи було проведено експеримент з класифікації відео з використанням кадрів для визначення об'єкта та звуку для уточнення його стану. Для цього було використано відкриті набори даних VGG Sound [5] та Dogs vs. Cats [6].

Розглянемо основні етапи створення експериментальної програмної системи.

Отримання та підготовка даних. Основний набір даних для валідації і тренування - VGG Sound. Формат записів включає ідентифікатор відео на Youtube, час початку фрагменту, мітку класу, яка містить назву об'єкта та відповідний звук та мітку розподілу: навчальні або тестові дані (табл. 2).

Для отримання безпосередніх даних, було створено утиліту для завантаження відео, виділення фрагменту околom 2 секунди навколо зазначеного в наборі часу та збереження елементів цього фрагменту:

- кадрів відео з інтервалом в 1 секунду у форматі JPG;
- звукової доріжки у форматі WAV.

Формат даних набору VGG Sound

YouTubeID	StartSeconds	Label	Split
---g-f_I2yQ	1	people marching	train
--0PQM4-hqg	30	waterfall burbling	train
--5OkAjCI7g	40	people belly laughing	train

Збереження проміжних кадрів із відео призводить до низької якості більшості зображень, тому набір даних для візуального розпізнавання було доповнено зображеннями з набору Dogs vs. Cats до загальної кількості у 650 зображень. Звук із відео було кодовано у моно-каналі з частотою 44,1 кГц. Для навчання було відібрано якісні, менш зашумлені фрагменти, які належать до трьох класів, по 250 файлів на клас.

При навчанні нейронних мереж отримані набори даних було випадково розділено на навчальні (85%) та тестові (15%) дані.

Навчання мережі розпізнавання об'єктів. У задачі розпізнавання образів себе добре зарекомендували згорткові нейронні мережі. Дослідження фокусуються на двох типах архітектури таких мереж: R-CNN та YOLO. R-CNN та різноманітні модифікації в цьому класі вважаються більш точними, але є більш обчислювально витратними і, відповідно, потребують більше часу для навчання та класифікації. Натомість архітектури типу YOLO мають меншу точність, особливо для невеликих об'єктів на зображенні, але працюють швидше і є придатними для розпізнавання у режимі реального часу, тому для даної задачі було обрано мережу YOLOv3 із розмірністю вхідного шару 416x416x3 [7].

Нейронні мережі створені за допомогою відкритої бібліотеки машинного навчання Tensorflow v2. Під час навчання використовуються поширені засоби покращення якості навчання глибоких нейронних мереж: використання пакетного навчання, ініціалізація початкових ваг мережі невеликим випадковими числами, використання шарів пакетної нормалізації, проходження декількох розігрівальних (warm-up) епох, після яких використовується поступово спадуючий до заданого ліміту темп навчання (рис. 3), проведення декількох спроб навчання з різними початковими вагами та поділом даних на навчальні та тестові для уникнення перенавчання [8, 9].

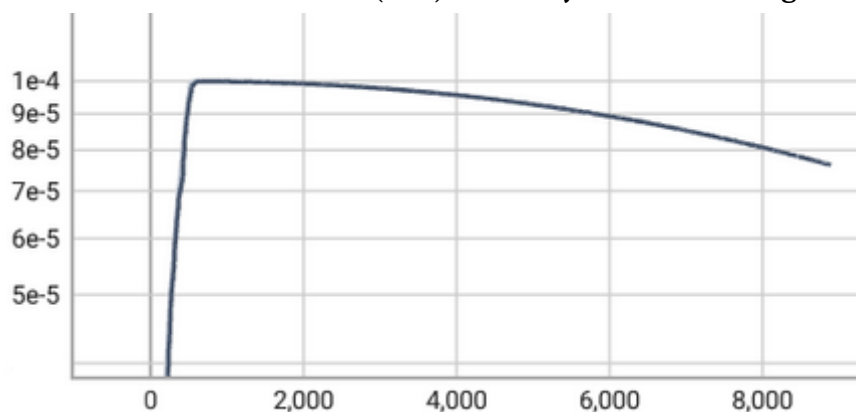


Рисунок 3 - Темп навчання під час тренування мережі в залежності від кроку

Для оцінки якості навчання використовується моніторинг функції втрат, яка складається з втрат координат (використано метрику GIOU), втрат впевненості та втрат класифікації. Значення втрат найкращих мереж з трьох спроб навчання наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Значення функцій втрат декількох спроб навчання

№	Втрати координат	Втрати впевненості	Втрати класифікації	Загальні втрати
1	0.0464	0.5032	0.0186	0.5682
2	0.0413	0.3748	0.0117	0.4278
3	0.0670	0.7037	0.0102	0.7809

На рис. 4 приведено динаміку втрат під час навчання використаної мережі.

Навчання мережі класифікації звуку. Для обробки звукового сигналу, виділені фрагменти були доповнені до однакової довжини в 4 секунди та перетворені в частотний спектр за допомогою віконного перетворення Фур'є із частковим перекриттям вікон. Для класифікації спектрограм використовується нейронна мережа з двома згортковими шарами для виділення ознак та повнозв'язним шаром для класифікації. Для кращої чисельної стабільності навчання, значення частот на вході нормалізуються. Також, для уникнення перенавчання використовується випадкове випадання ваг після виділення ознак та класифікації.

Метрики навчання мереж: значення функції втрат (розріджена категоріальна перехресна ентропія) та точність класифікації. Навчання проходить у 20 епох, але передчасно припиняється, якщо функція втрат не зменшується про-

тягом трьох епох поспіль. Значення метрик для трьох спроб навчання наведено в табл. 4.

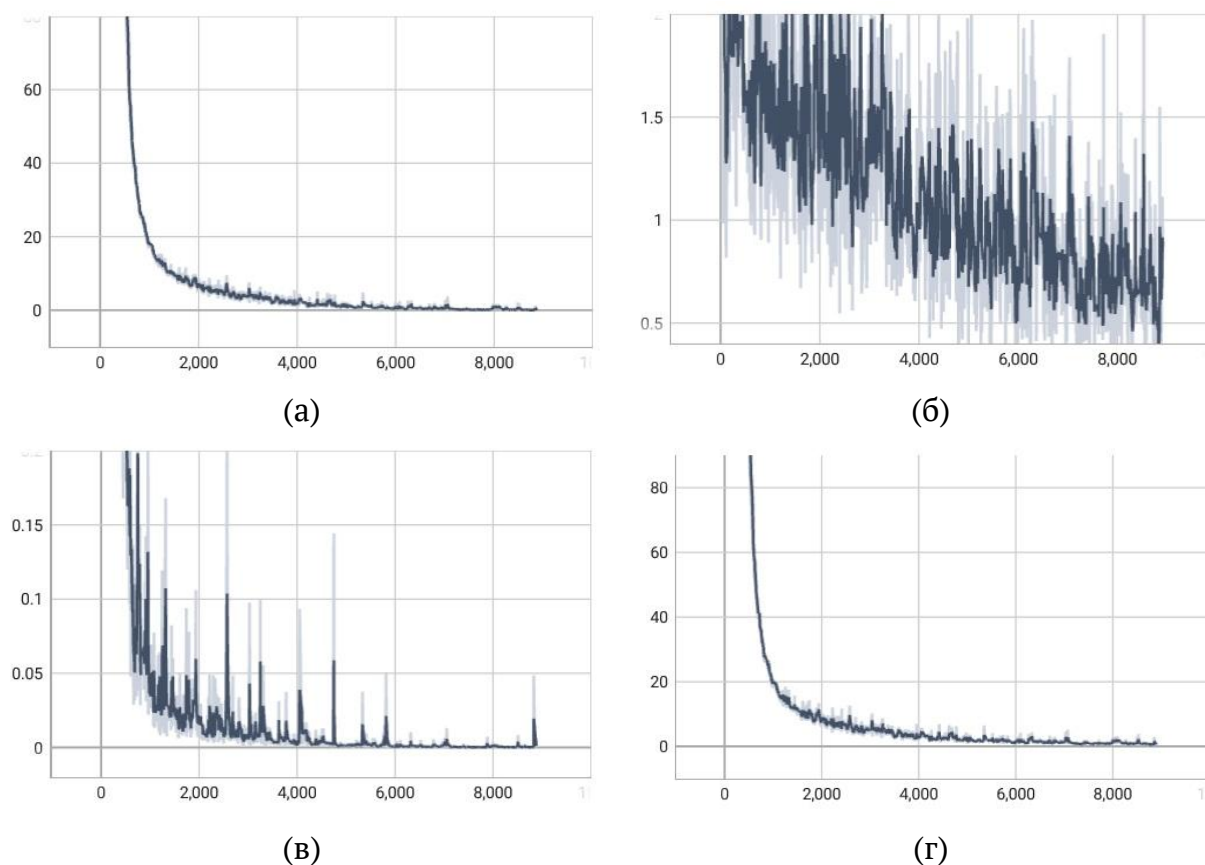


Рисунок 4 - Складові функції втрат під час тренування мережі в залежності від кроку. а – впевненість. б – координати. в – класифікація. г – загальні втрати

Таблиця 4

Значення метрик декількох спроб навчання

№	Фактичні епохи	Втрати	Точність (%)
1	7	0.75	72
2	15	0.68	78
3	11	0.62	83

На рис. 5 наведено поведінку метрик під час навчання.

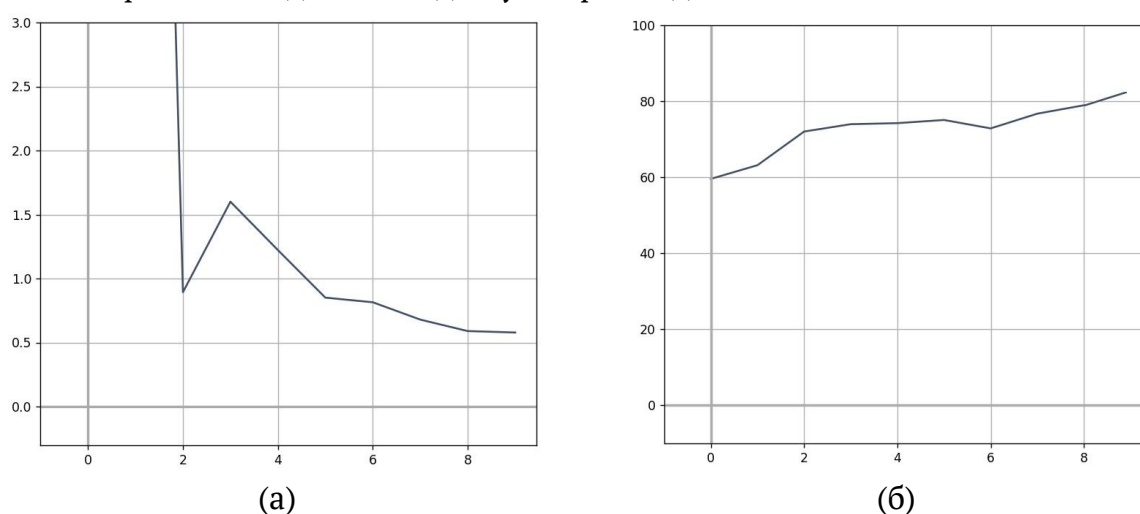


Рисунок 5 - Значення метрик під час тренування мережі в залежності від епохи.
а – функція втрат. б – точність

Створення програмного модуля мультимодальної класифікації. Створений програмний модуль, який використовує підготовані мережі для класифікації відео в реальному часі, майже повністю відповідає схемі, наведеній на рис. 2. Блок введення отримує дані із відео, виконує необхідну попередню обробку для приведення їх у формат, придатний до обробки з певною періодичністю:

- для зображень: отримання кадру з відео, перетворення кольорової схеми, пропорційне масштабування карду, щоб найбільша розмірність складала 416 пікселів та заповнення іншої частини зображення чорним;
- для звуку: виділення чотирьохсекундного фрагменту, виконання відповідного кодування та отримання частотного спектру.

Результати попередньої обробки поміщаються в чергу, звідки вони зчитуються і паралельно обробляються мережами для класифікації, результати якої синхронізуються та подаються як виведення модуля. Виведення використовується для відображення результатів, в даній реалізації окрема допоміжна програма накопичує результати класифікації та відповідні часові мітки і монтує копію початкового відео з відображенням результатів (рис. 6).

Періодичність обробки стабілізується в середньому на 0.2 секунди, дозволяючи опрацювання 5 кадрів в секунду, що близько до режиму реального часу. Час оброблення можна суттєво зменшити із застосуванням обчислень на графічному процесорі.

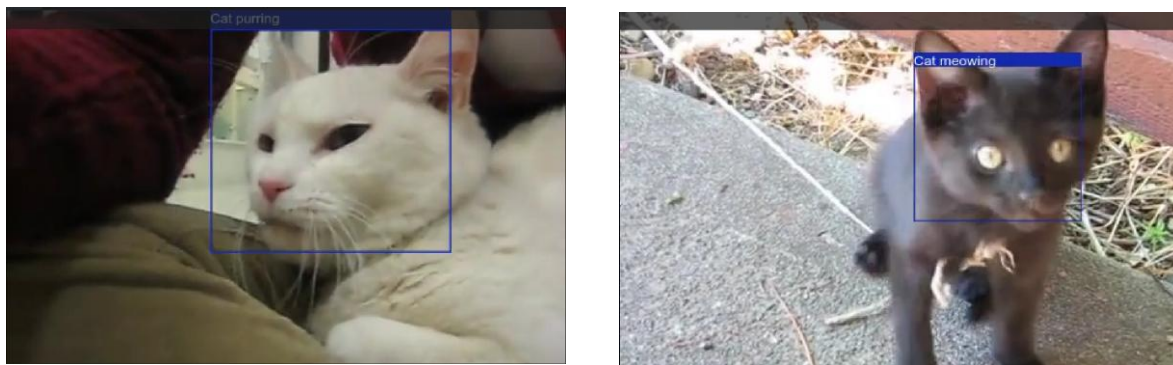


Рисунок 6 - Приклади результатів класифікації

Висновки і подальша робота. У статті запропоновано метод створення програмного модуля для виконання класифікації мультимодальних даних у режимі реального часу або близькому до нього.

Також було розглянуто створення прикладу програмного модуля із використанням штучних нейронних мереж для класифікації мультимодальних даних. Створений модуль здатен виконувати класифікацію 5 кадрів з відео в секунду з прийнятною точністю. Його ефективність може бути значно підвищена за рахунок використання спеціалізованого апаратного забезпечення (напр. графічного процесора) або використання більшого ступеня паралельності, за якого декілька процесів можуть виконувати задачі класифікації.

Запропонований підхід є модульним і дозволяє інкрементне покращення окремих складових з мінімальним впливом на всю систему. Також запропонований підхід до розподілення навантаження дозволяє зробити систему масштабованою, додаючи обчислювальної потужності. Подальша робота буде направлена на дослідження цієї властивості, в тому числі і з використанням хмарних сервісів, які надають можливість використовувати майже довільну кількість віртуалізованого апаратного забезпечення і підтримують паралельні системи потоків даних.

ЛІТЕРАТУРА

1. Liang P. P., Zadeh A., Morency L. P. Foundations and recent trends in multimodal machine learning: Principles, challenges, and open questions //arXiv preprint arXiv:2209.03430. – 2022.
2. Ngiam J. et al. Multimodal deep learning //Proceedings of the 28th international conference on machine learning (ICML-11). – 2011. – С. 689-696.
3. Sun D., Wang M., Li A. A multimodal deep neural network for human breast cancer prognosis prediction by integrating multi-dimensional data //IEEE/ACM

transactions on computational biology and bioinformatics. – 2018. – Т. 16. – №. 3. – С. 841-850.

4. Mao J. et al. Explain images with multimodal recurrent neural networks //arXiv preprint arXiv:1410.1090. – 2014.

5. Chen H. et al. Vggsound: A large-scale audio-visual dataset //ICASSP 2020-2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – IEEE, 2020. – С. 721-725.

6. Dogs vs. Cats Dataset. URL: <https://www.kaggle.com/c/dogs-vs-cats>

7. Redmon J., Farhadi A. Yolov3: An incremental improvement //arXiv preprint arXiv:1804.02767. – 2018.

8. Bjorck N. et al. Understanding batch normalization //Advances in neural information processing systems. – 2018. – Т. 31.

9. You Y., Gitman I., Ginsburg B. Large batch training of convolutional networks //arXiv preprint arXiv:1708.03888. – 2017.

REFERENCES

1. Liang P. P., Zadeh A., Morency L. P. Foundations and recent trends in multimodal machine learning: Principles, challenges, and open questions //arXiv preprint arXiv:2209.03430. – 2022.

2. Ngiam J. et al. Multimodal deep learning //Proceedings of the 28th international conference on machine learning (ICML-11). – 2011. – P. 689-696.

3. Sun D., Wang M., Li A. A multimodal deep neural network for human breast cancer prognosis prediction by integrating multi-dimensional data //IEEE/ACM transactions on computational biology and bioinformatics. – 2018. – Т. 16. – №. 3. – P. 841-850.

4. Mao J. et al. Explain images with multimodal recurrent neural networks //arXiv preprint arXiv:1410.1090. – 2014.

5. Chen H. et al. Vggsound: A large-scale audio-visual dataset //ICASSP 2020-2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). – IEEE, 2020. – P. 721-725.

6. Dogs vs. Cats Dataset. URL: <https://www.kaggle.com/c/dogs-vs-cats>

7. Redmon J., Farhadi A. Yolov3: An incremental improvement //arXiv preprint arXiv:1804.02767. – 2018.

8. Bjorck N. et al. Understanding batch normalization //Advances in neural information processing systems. – 2018. – Т. 31.

You Y., Gitman I., Ginsburg B. Large batch training of convolutional networks //arXiv preprint arXiv:1708.03888. – 2017.

Received 04.12.2023.

Accepted 08.12.2023.

Using deep artificial neural networks for multimodal data classification

Multimodal data analysis is gaining attention in recent research. Pu Liang et al. (2023) provide a comprehensive overview on multimodal machine learning, highlighting its foundations, challenges and achievements in recent years. More problem-oriented works propose new methods and applications for multimodal ML, such as Ngiam et al. (2011) propose to use joint audio and video data to improve speech recognition accuracy; Sun, Wand and Li (2018) describe application of multimodal classification for breast cancer prognosis prediction; Mao et al. (2014) propose an architecture of multimodal recurrent network to generate text description of images and so on. However, such works usually focus on the task itself and methods therein, and not on integrating multimodal data processing into other software systems.

The goal of this research is to propose a way to conduct multimodal data processing, specifically as a part of a digital twin systems, thus efficiency and near-real-time operation are required.

The paper presents an approach to conduct parallel multimodal data classification, adapting to available computing power. The method is modular and scalable and intended for in digital twin application as a part of analysis and modeling tools.

Later, the detailed example of such a software module is discussed. It uses multimodal data from open datasets to detect and classify the behavior of pets using deep learning models. Videos are processed using two artificial neural networks: YOLOv3 object detection network to process individual frames of the video and a relatively simple convolutional network to classify sounds based on their frequency spectra.

Constructed module uses a producer-consumer parallel processing pattern and allows processing 5 frames per second of a video on available hardware, which can be sufficiently improved by using GPU acceleration or more paralleled processing threads.

Пеня Олександр Романович – аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Київського політехнічного інституту ім. Ігоря Сікорського.

Сулема Євгенія Станіславівна – д.т.н., доцент, завідувач кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Київського політехнічного інституту ім. Ігоря Сікорського.

Oleksandr Penia – Post-Graduate Student of Computer Systems Software Department, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

Yevgeniya Sulema – DSc, Associate Professor, Head of the Computer Systems Software Department, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

О.Ю. Потап, В.М. Куваєв, О.О. Бойко,

М.О. Рибальченко, В.І. Шibaкинський, М.О. Потап

МІНІМІЗАЦІЯ МІЖКЛІТЬОВОГО НАТЯГУ НА БЕЗПЕРЕРВНИХ СТАНАХ ЗА ЯКІРНИМИ СТРУМАМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ПРОКАТНИХ КЛІТЕЙ

Анотація. Досліджено дієвість методу мінімізації натягу сортового прокату за інформацією про якірні струми головних електроприводів, який базується на гіпотезі про незмінність відношення якірного струму приводу наступної кліті до якірного струму приводу попередньої кліті в режимі вільної прокатки та передбачає прогнозування струму вільної прокатки в прокатних електроприводах за інформацією про струм вільної прокатки в електроприводах попередніх клітей. Дослідження базувалось на комплексній моделі процесу безперервної сортової прокатки у чотирьох чистових клітях дрібносортового стана з індивідуальними електроприводами, оснащеними системами підлеглого керування швидкості.

Шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання доведено, що застосування під час прокатки оперативного переходу від регулювання натягу шляхом коригування завданої частоти обертання електроприводу наступної кліті до безпосереднього регулювання якірного струму у ній в режимі стеження запобігає виникненню динамічних струмів і їхньому впливу на якість регулювання натягу.

Ключові слова: безперервна сортова прокатка, натяг прокату, струм вільної прокатки, регулювання, комп'ютерне імітаційне моделювання.

Постановка проблеми. Головною вимогою до сортового прокату, що висувається його споживачами, є точність геометричних розмірів перетину.

Переважає більшість сортового прокату виробляється на безперервних прокатних станах, особливістю яких є одночасна прокатка заготовки у валках кількох (від 4-х до 15-ти) прокатних клітей. Загально визнано, що основним технологічним збуренням, яке негативно впливає на розміри перетину прокату, є натяг, що виникає в прокаті через неузгодженість швидкостей входу металу до валків наступної і виходу з валків попередньої кліті. Найбільшу чутливість до змін натягу проявляє горизонтальний розмір (ширина) прокат-

© Потап О.Ю., Куваєв В.М., Бойко О.О.,

Рибальченко М.О., Шibaкинський В.І., Потап М.О., 2023

ного профілю. Встановлено, що стабілізація питомого натягу на рівні до 10 Н/мм² звужує коливання ширини прокату до прийняттого рівня [1, 2]. Проте, забезпечення такої стабілізації на практиці стикається з великими технічними труднощами через неможливість прямого вимірювання натягу в сортовому прокаті і відсутність відповідних вимірювачів. Відтак зусилля численних науковців і розробників систем автоматизації впродовж майже 50 років були спрямовані на винайдення непрямих методів регулювання натягу.

Найширшого розповсюдження набули системи автоматичного регулювання натягу (САРН) за інформацією про прогин прокату у проміжках між прокатними клітями [3]. Такі системи, незважаючи на низку притаманних їм недоліків, ефективно вирішують задачу мінімізації натягу при прокатці дрібних сортових профілів в останніх міжклітьових проміжках безперервних дрібносортових станів. На жаль, вони не можуть бути застосовані при прокатці більш масивних профілів та профілів, що мають відчутну згинальну жорсткість, через замалий прогин, зміни якого впродовж прокатки неможливо виміряти. Така ж проблема виникає, якщо малою є відстань між суміжними прокатними клітями.

Отже, винайдення і обґрунтування ефективних методів вимірювання і мінімізації натягу при безперервній сортовій прокатці за відсутності відчутного прогину металу між суміжними прокатними клітями є актуальною проблемою, що потребує нестандартного вирішення.

Інший перспективний підхід до непрямого регулювання натягу пов'язаний з отриманням інформації про натяг зі змін якірного струму прокатних двигунів [4]. Ідея мінімізації натягу за інформацією про якірні струми прокатних двигунів базується на впливі натягу на момент прокатки, а відтак і на момент, що створює електропривод валків. При цьому про спричинені змінами натягу зміни моменту прокатки міркують по змінах якірного струму відповідного прокатного двигуна. Проте, питання однозначної ідентифікації натягу за якірним струмом стикається з низкою суттєвих технічних труднощів і досі не може вважатись вирішеним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій дозволяє виділити два підходи до вирішення проблеми регулювання натягу на сортопрокатних станах з використанням інформації про якірні струми електроприводів.

За першим підходом визнається неможливість коректного визначення натягу впродовж тривалого часу прокатки і пропонується здійснювати регулювання впродовж обмеженого часу лише при прокатці початкової частини роз-

кату [1, 5]. Сутність цього підходу полягає у фіксації (запам'ятовуванні) якірного струму приводу першої за ходом прокатки кліті певного міжклітьового проміжку перед надходженням прокату до наступної кліті, порівнянні поточного якірного струму приводу першої кліті із зафіксованим струмом вільної прокатки, який розглядається як уставка, та подальшому регулюванні якірного струму першої кліті шляхом впливу на частоту обертання приводу наступної кліті. Тобто, якщо якірний струм приводу попередньої кліті після входження заготовки до наступної кліті зазнав змін через виникнення натягу, здійснюють коригування частоти обертання приводу наступної кліті аж до усунення натягу, про що свідчитиме повернення якірного струму приводу попередньої кліті до зафіксованого значення струму вільної прокатки.

Відносна простота описаного підходу нівелюються низькою точністю стабілізації натягу через дію технологічних збурень. Дійсно, в реальних умовах зміни моменту прокатки (якірного струму приводу) залежатимуть не тільки від зміни натягу, але й від змін температури прокату, що надходить до кліті, висотного розміру підкату тощо. Тобто зафіксований струм вільної прокатки, що мав місце при прокатці початкової ділянки заготовки, відповідає температурі і висоті саме цієї ділянки заготовки, а отже його стабілізація аж ніяк не гарантує стабілізації натягу по всій довжині заготовки.

Втім САРН, що використовують інформацію про якірні струми прокатних двигунів, все ж таки застосовуються на практиці, хоча і в дещо «урізаному» вигляді [5]. При цьому виходять з того, що стрибкоподібне зміна якірного струму в двигуні попередньої кліті, що спостерігається в момент входження прокату до валків наступної кліті, скоріш за все, спричинена саме натягом, що виник у цей момент, а ймовірність різкої зміни інших технологічних збурень саме в цей момент є замалою. В такому випадку можна на короткий час дозволити регулювання якірного струму двигуна попередньої кліті, а після відновлення в ньому струму вільної прокатки припинити процес регулювання. Іншими словами, регулювання натягу дозволяється тільки тоді, коли є впевненість, що умови прокатки в попередній кліті не встигли помітно змінитися і зареєстроване значення якірного струму відповідає струму вільної прокатки.

Отже, САРН з обмеженням часу регулювання здійснює короткочасне «підстроювання» швидкісного режиму під час проходження переднього кінця розкату крізь стан. При цьому прокатка більшої частини заготовки здійснюється без регулювання.

Прибічники другого підходу, до регулювання натягу за якірними струмами прокатних електроприводів, до яких, зокрема, належать НДІАчормет (Україна), Інститут чорної металургії (Україна), GEP Industrie-Systeme GmbH (Німеччина) тощо, намагаються поширити процес мінімізації натягу на всю довжину заготовки [6, 7]. Цей підхід базується на припущенні, що в режимі вільної прокатки якірний струм приводу наступної кліті є подібним до якірного струму попередньої кліті, тобто відношення якірного струму приводу наступної кліті до якірного струму приводу попередньої кліті в режимі вільної прокатки залишається незмінним. При цьому пропонується після усунення натягу на передньому кінці розкату обчислити і запам'ятати відношення

$$k = \frac{I_{i+1}(t)}{I_i(t - \tau)} \quad (1)$$

якірного струму електроприводу наступної кліті $I_{i+1}(t)$ до якірного струму електроприводу попередньої кліті $I_i(t - \tau)$, що мав місце при прокатці тієї ж самої ділянки прокату. Це дозволяє в подальшому визначати бажане (задане) значення $I_{i+1}^*(t)$ струму електроприводу наступної кліті за формулою

$$I_{i+1}^*(t) = k I_i(t - \tau), \quad (2)$$

де τ – час переміщення прокату від i -тої до $(i+1)$ -ої кліті і підтримувати його на заданому рівні за допомогою системи, що стежить.

Очевидно, що можливість практичної реалізації описаного підходу до мінімізації натягу на усій довжині прокату і його ефективність цілковито залежать від достовірності гіпотези, на якій він базується. З огляду на принципову неможливість здійснити її доведення експериментальним шляхом єдиним ефективним методом розв'язання зазначеної проблеми є імітаційне комп'ютерне моделювання.

Певною технічною проблемою на шляху реалізації другого підходу виступає виникнення динамічних струмів в якірних ланцюгах під час коригування частоти обертання валків. Динамічна складова суттєво спотворює струм $I_i(t - \tau)$, і перешкоджає визначенню завдання $I_{i+1}^*(t)$ за формулою (1) впродовж здійснення зазначеного коригування, унеможливаючи дотримання режиму вільної прокатки на всій довжині прокату. Перспективні пропозиції з вирішення зазначеної проблеми містяться в роботі [8], де авторами береться до уваги, що головні електроприводи сучасних безперервних сортопрокатних станів оснащені двоконтурними автоматизованими системами підлеглого ре-

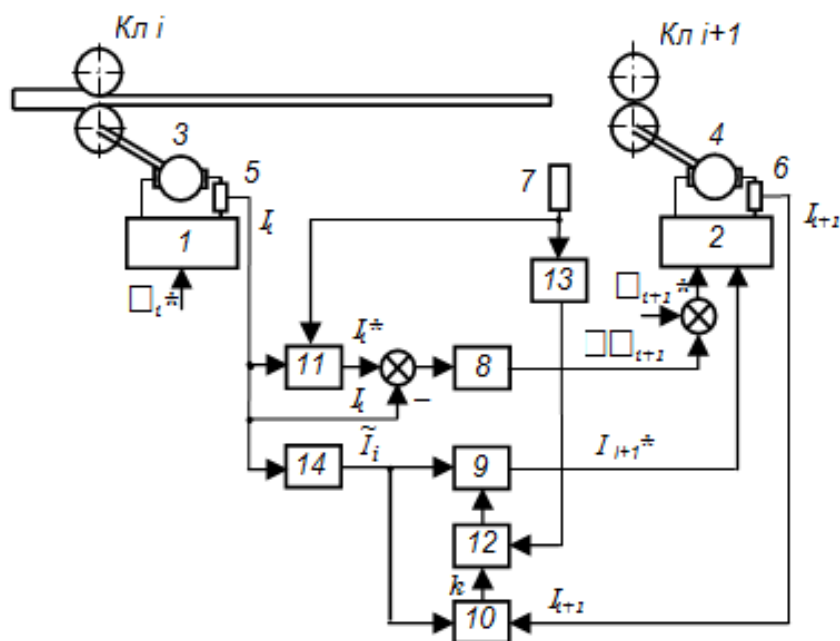
гулювання частоти (СПРЧ) з внутрішнім контуром регулювання струму якоря та зовнішнім – регулювання частоти обертання.

У запропонованій в [8] системі (рис. 1):

- в момент спрацьовування датчика 8, що безпосередньо передуює входженню прокату до наступної кліти, запам'ятовують якірний струм електроприводу 3 попередньої кліти;

- після входження прокату до валків наступної кліти усувають розбіжність ΔI між поточним I_1 та зафіксованим I_1^* значеннями якорного струму електроприводу попередньої кліти, коригуючи завдання ω_2^* частоти обертання електроприводу 4 наступної кліти на величину $\Delta\omega_2^*$;

- після усунення зазначеної розбіжності ΔI визначають і фіксують відношення k за формулою (1), визначають бажане значення I_2^* струму електроприводу наступної кліти за формулою (2) та подають його в якості завдання на вхід контуру регулювання струму ПСРЧ2 з одночасним відключенням регулятора частоти.



- 1 та 2 –автоматичні системи підлеглого регулювання частоти (СПРЧ) обертання прокатних двигунів 3 та 4; 5 та 6 – вимірювачі струму; 7 – датчик наявності прокату; 8 – регулятор натягу; 9 та 10 – блоки множення та ділення; 11 та 12 – блоки пам'яті; 13 – блок часової затримки; 14 – блок чистого запізнювання

Рисунок 1 – Функціональна схема системи автоматичної мінімізації натягу прокату в одному з проміжків безперервного сортового стана

Теоретично за такої роботи системи динамічний струм взагалі не повинен спостерігатись як у приводі попередньої кліті при регулюванні натягу на передньому кінці прокату, так і в приводі наступної кліті під час регулювання натягу впродовж прокатки основної частини прокату. Проте, можливість практичної реалізації системи потребує додаткових досліджень.

Метою статті є дослідження дієвості методу мінімізації натягу сортового прокату за інформацією про якірні струми головних електроприводів, який базується на гіпотезі про незмінність відношення якірного струму приводу наступної кліті до якірного струму приводу попередньої кліті в режимі вільної прокатки та доведення ефективності коригування швидкісного режиму безперервної прокатки шляхом безпосереднього регулювання якірних струмів

Опис методики проведення дослідження. Розробка нових алгоритмів для систем автоматичного управління багатозв'язним процесом виробництва сортового прокату на безперервних станах неминуче стикається з необхідністю експериментальної перевірки їхньої ефективності та порівняльного аналізу з системами аналогічного призначення за точністю, швидкодією, частотними характеристиками тощо. Проте, організація промислового експерименту на діючому обладнанні представляє собою надзвичайно складний в організаційному плані та занадто витратний захід, пов'язаний з високою імовірністю аварій. До того ж для розробників принципово важливо отримати позитивну відповідь на питання про дієвість системи та визначити орієнтовні показники якості ще до початку проектування [1, 3]. З огляду на це чи не єдиним ефективним методом розв'язання зазначеної проблеми є імітаційне комп'ютерне моделювання роботи систем.

Виходячи з цього в роботі обґрунтовано:

- структуру моделі прокатки у чистовій групі клітей безперервного сортопрокатного стану,
- математичний опис процесу прокатки в окремих прокатних клітях та модель формування натягу у міжклітьових проміжках;
- моделі електроприводів прокатних клітей;
- модель власне САПР, що убудована до моделі технологічного процесу.

Виклад основного матеріалу і отриманих наукових результатів.

Структура моделі процесу прокатки та САРН.¹ Запропонована структура моделі процесу одноступенчової безперервної прокатки наведена на рис. 2. Модель містить низку типових блоків, що моделюють геометричні, кінематичні та енергосилові параметри прокатки в клітках (блоки **KL**), стан металу в міжкліткових проміжках (блоки **PR**), роботу головних електроприводів прокатних клітей (блоки **EP**) та власне САРН (блоки **SARN**), а також імітують параметри заготівки (блок **IZ**).

Вхідними змінними кожного блоку **KL_i**, що моделює процес деформації металу в кліті, є геометричні розміри (ширина b_{0i} та висота h_{0i}) підкату, передній $\sigma_{i,i+1}$ та задній $\sigma_{i-1,i}$ натяг, а також частота n_i обертання прокатного двигуна та міжвалковий зазор z_i . До вихідних змінних блоків **KL_i** відносяться геометричні розміри (ширина b_{1i} та висота h_{1i}) на виході з кліті, швидкість металу на вході V_{0i} та виході V_{1i} , а також момент M_i прокатки.

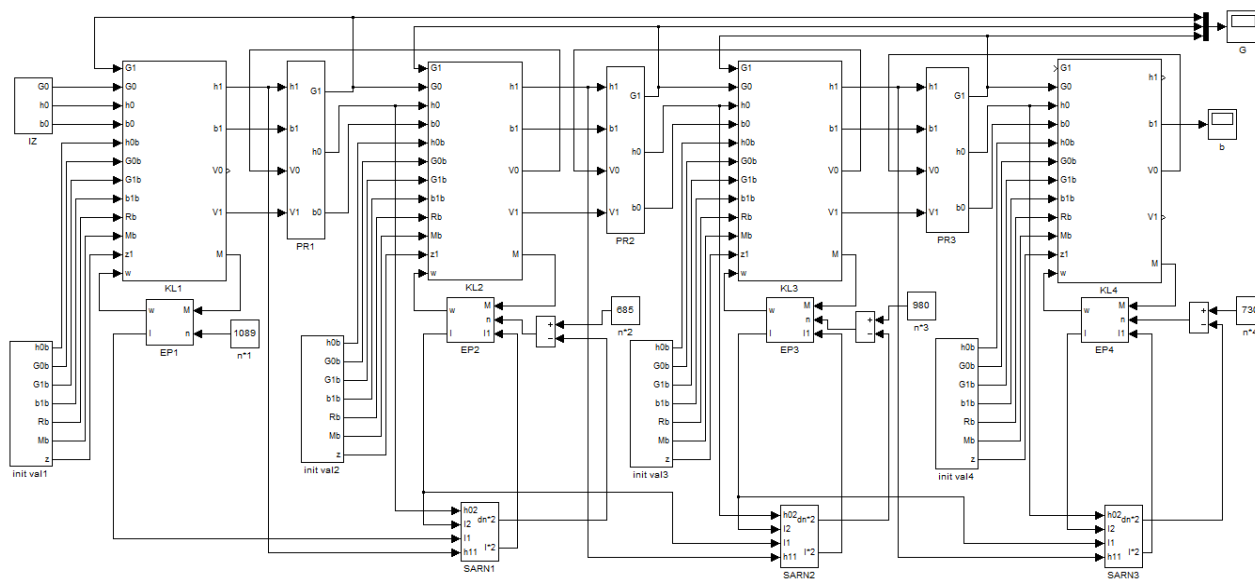


Рисунок 2 - Структура моделі процесу безперервної сортової прокатки в пакеті MATLAB Simulink

Розрахунок натягів в моделі здійснюється в блоках **PR_{i,i+1}**, що моделюють стан металу в проміжках між клітками. Вхідними змінними цих блоків є швид-

¹ У налаштуванні моделі та проведенні на ній експериментальних досліджень брав участь магістр С.В. Біневич

кість прокату на виході з попередньої V_{li} та на вході до наступної V_{oi+1} кліті, а також геометричні розміри прокату b_{li} та h_{li} на виході з попередньої кліті. На вихід же блоків $PR_{i,i+1}$ видається питомий натяг $\sigma_{i,i+1}$ та геометричні розміри b_{oi+1} і h_{oi+1} прокату на вході до наступної кліті. При цьому значення геометричних розмірів прокату на вході в наступну кліть повторюють значення на виході з попередньої з транспортним запізненням, що відповідає часу переміщення металу через міжклітьовий проміжок.

В блоках EP_i моделюється робота головних електроприводів прокатних клітей. На виході зазначених блоків формується поточне значення частоти обертання прокатного двигуна, а вхідними змінними виступають задані значення n_i^* частоти обертання та момент опору на валу двигуна, що являє собою момент M_i прокатки в даній кліті.

На виходах блоків $SARN_i$ згідно з раніше наведеним алгоритмом формуються доданки до уставок частоти обертання та уставки якірного струму відповідних електроприводів.

Математичний опис процесів в зоні деформації. В практиці моделювання процесів, що відбуваються в осередку деформації при безперервній гарячій прокатці, набули популярності два типи моделей. В моделях першого типу виходять з припущення, що зміни технологічних параметрів прокатки відбуваються в межах незначних відхилень від базових значень за лінійним законом [9]. При цьому рівняннях, що використовуються для визначення таких параметрів, записують у лінійних прирощеннях з відповідними постійними коефіцієнтами. На жаль результати застосування таких моделей не можна вважати достовірними при значних відхиленнях параметрів через відповідність застосовуваних коефіцієнтів лише для фіксованого режиму налаштування процесу.

Основу моделей другого типу складають рівняння, що базуються на формулах, відомих з теорії поздовжньої прокатки [10, 11]. Вони певною мірою вільні від недоліків моделей першого типу, завдяки чому дозволяють глибше оцінити отримані результати і викликають у дослідників більшу довіру.

Привабливість моделі другого типу через простоту інтерпретації результатів моделювання зумовила використання в даній роботі моделі процесу деформації металу у кліті безпервного дрібно сортного стана з роботи [11].

Математичний опис процесів в міжклітьовому проміжку. Згідно з дослідженнями [1], натяг в міжклітьовому проміжку визначається відносною не-

узгодженістю швидкостей кінцевих перерізів прокату $\Delta v_{i,i+1} = \frac{(V_{0,i+1} - V_{1,i})}{V_{1,i}}$ та пов'язаний з нею виразом

$$\sigma_{i,i+1}(t) = E \Delta v_{i,i+1}(t) [1 - \exp(-V_{0,i+1} t / L_0)],$$

де E - модуль пружності матеріалу прокату, L_0 – відстань між клітями.

Якщо розглядати $\sigma_{i,i+1}(t)$ та $\Delta v_{i,i+1}(t)$ як вихідну та вхідну величини динамічної ланки, що характеризує поведінку прокату в міжклітьовому проміжку, то відношення їхніх перетворень за Лапласом визначить функцію передачі $W_{i,i+1}(p)$

$$W_{i,i+1}(p) = \frac{\sigma_{i,i+1}(p)}{\Delta v_{i,i+1}(p)} = \frac{K_{i,i+1}}{T_{i,i+1} p + 1} \quad (6)$$

де $K_{i,i+1} = E$ – коефіцієнт підсилення, а $T_{i,i+1} = L_0 / V_{0,i+1}$ – постійна часу аперіодичної ланки. Отже модель формування натягу у міжклітьовому проміжку має вигляд, що наведений на рис. 3.

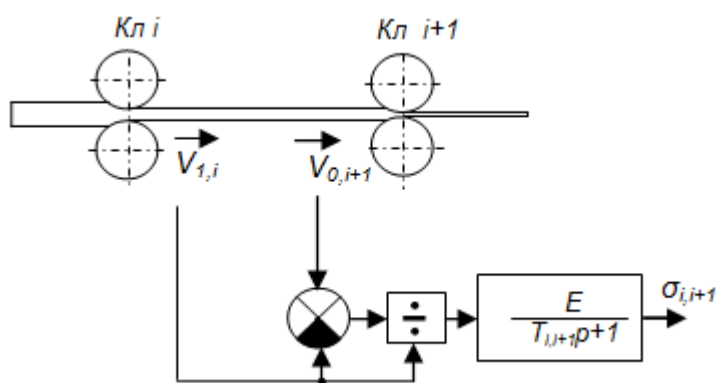


Рисунок 3 – Модель натягу у міжклітьовому проміжку

Модель електроприводу прокатних клітей. Тип та параметри регуляторів струму та частоти для електроприводів горизонтальних і вертикальних чистових клітей, що встановлені, зокрема, на дрібносортовних станах 250 ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг" і мають потужність 580 КВт та 200 КВт відповідно, були визначені за відомою інженерною методикою, що описана в роботі [1] (див. табл. 1).

Схема моделі електроприводу, що реалізована засобами MATLAB-Simulink, наведена на рис. 4. Наявність у схемі перемикача Switch забезпечує підключення до входу струмового контуру заданого значення струму, що сформований САРН

явлення прокату на виході першої кліті ($h_{11} > 0$). Це зафіксоване у блоці **ZU1** значення струму вільної прокатки порівнюється в елементі порівняння **Comp1** із поточним значенням струму I_1 . Результат порівняння надходить на вхід регулятора натягу **PID** через перемикач **Switch1**. Перемикач відкривається вихідним сигналом блока **Comp2** на обмежений час, заданий у блоці чистого запізнення **T2**, що відповідає часу регулювання натягу. При цьому відлік часу регулювання розпочинається з моменту появи смуги на вході наступної кліті ($h_{02} > 0$). Керуючий вплив у вигляді коригуючої добавки dn_2 до завдання n_2^* частоти обертання привода наступної кліті надходить на вхід блоку, що моделює електропривод.

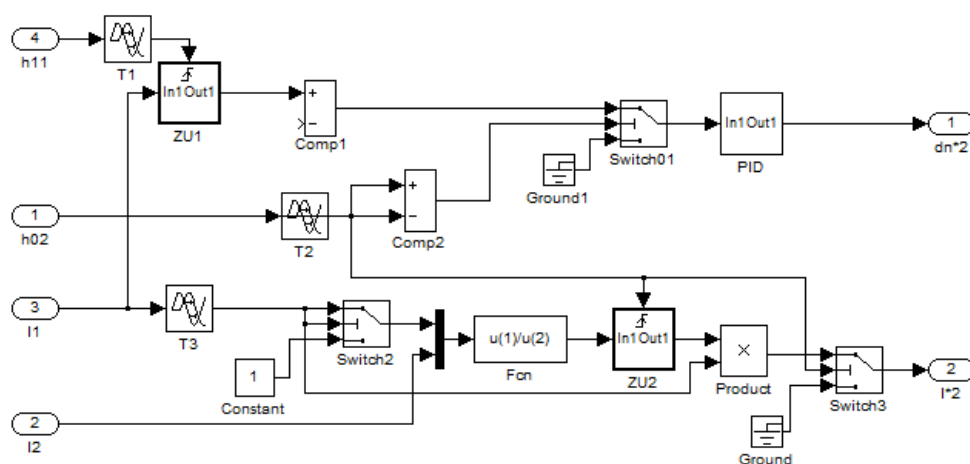


Рисунок 5 – Схема моделі CAPN в пакеті MATLAB Simulink

У блоці **Fcn** за формулою (1) обчислюється коефіцієнт k , блок **ZU2** запам'ятовує цей коефіцієнт, а в блоці **Product** множення за формулою (2) обчислюється бажане поточне значення I_2^* якорного струму двигуна наступної кліті, що відповідає струму вільної прокатки в ній.

Блок **T3** транспортного запізнення забезпечує використання для розрахунку I_2^* того значення струму \tilde{i}_1 , що спостерігалось у приводі попередньої кліті при прокатці в ній тієї ж ділянки розкату.

Методика та результати моделювання. Моделювання здійснювали для умов прокатки круглого профілю діаметром 12 мм в останніх чотирьох чистових клітках дрібносортового стана 250-2 ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг". Для спрощення моделювання було здійснено перехід від прокатки у калібрах до прокатки на гладких валках за методом відповідної смуги.

На виході блоку **IZ** імітації збурень (див. рис. 2) поточні значення висоти $h_{0b,1}$ і ширини $b_{0b,1}$ підкату на вході до кліті №1 формували як змінні, що лі-

нійно зростають у часі з інтенсивністю 0,02 мм/с від початкових значень 13,53 мм і 16,48 мм відповідно, та зазнають розподілені за нормальним законом випадкових відхилень з нульовим математичним очікуванням та середнім квадратичним відхиленням 0,02 мм. Такий чином імітували реальні змінення розмірів підкату, що спостерігаються на практиці в тому числі через вплив технологічних збурень.

На першому етапі моделювали процес безперервної прокатки у чотирьох клітках за відсутності САРН, маючи на меті перевірку адекватності створеної моделі.

Як відомо, адекватність моделей складних, багатозв'язних об'єктів, до яких належать безперервні прокатні стани, не може бути доведена класичними методами, зокрема, через надмірну складність і витратність постановки промислового експерименту та неможливість відтворення при моделюванні умов, що мали місце під час експерименту, для коректного зіставлення результатів моделювання з експериментальними даними [1].

Тому адекватність моделі довели зіставленням якісних і кількісних ефектів взаємного впливу різних модельованих параметрів з аналогічними ефектами, наявність яких однозначно встановлена на практиці і підтверджується досвідом промислової експлуатації об'єкта автоматизації. Зокрема, аналіз отриманих при моделюванні результатів показав, що значення геометричних (ширина), кінематичних (швидкість прокатки) і енергосилових (момент прокатки) параметрів перебували у прийнятних межах, а ефекти їх взаємного впливу та впливу на них переднього і заднього натягу, що спостерігались, цілком узгоджуються з існуючими уявленнями про закономірності модельованого процесу. Це дозволяє вважати, що створена динамічна модель чистової групи клітей безперервного дрібносортового стана адекватно описує процес прокатки та може бути використана для апробації створеної САРН.

Після вирішення питання щодо адекватності моделі вона була налаштована на прокатку з великими натягами. Для цього внесли розузгодження до частоти обертання електроприводів. Як впливає з наведених на рис. 6 експериментальних осцилограм, натяг в кожному з трьох міжклітьових проміжків (рис. 6,а) перевищує припустиме значення 10 Н/мм², сягаючи 20-25 Н/мм². При цьому ширина прокату на виході з останньої кліті (рис. 6,б), яка за завданням має становити 11.5 мм, змінюється в діапазоні 10.5 - 11.0 мм, тобто виходить далеко за межі поля допуску.

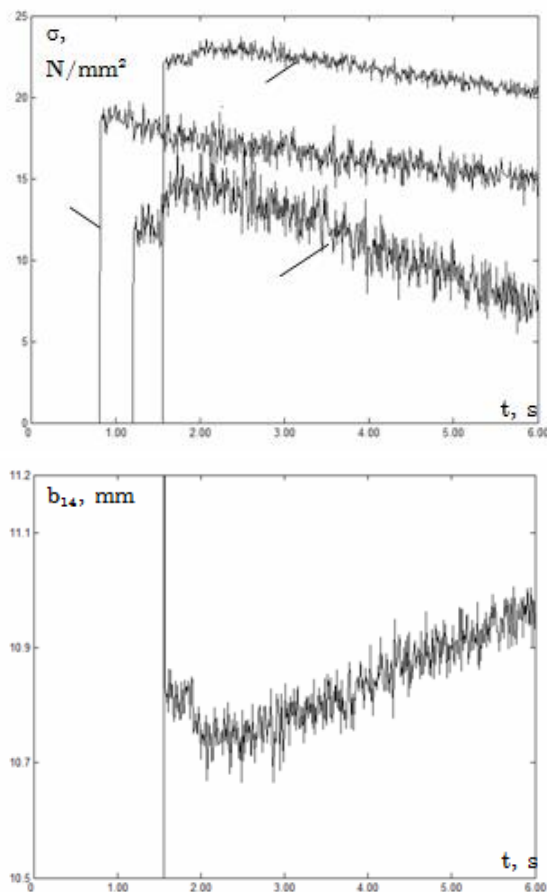


Рисунок 6 – Результати моделювання процесу прокатки за відсутності САРН

На другому етапі роботу створеної САРН досліджували на моделі, що була налаштована на прокатку з великими натягами. Наведені на рис. 7,а експериментальні осцилограми натягів свідчать, що після входження розкату до 2-ої ($t= 0.77$ с), 3-ої ($t= 1.15$ с) та 4-ої ($t= 1.49$ с) клітей в кожному зпроміжків виникає великий натяг (від 18 Н/мм^2 до 28 Н/мм^2). Процес регулювання натягу на передньому кінці розкату, що триває $0,3$ с, знижує його до прийняттого рівня $5-8 \text{ Н/мм}^2$. Після цього САРН формує за формулою (2) бажане значення (уставку) якісного струму для електропривода кожної наступної кліті.

Аналіз струмових осцилограм одного з електроприводів (рис. 8) доводить високу якість роботи регулятора струму і підтверджує ефективність коригування частоти уведенням керуючого впливу безпосередньо до струмового контуру системи підлеглого регулювання частоти привода.

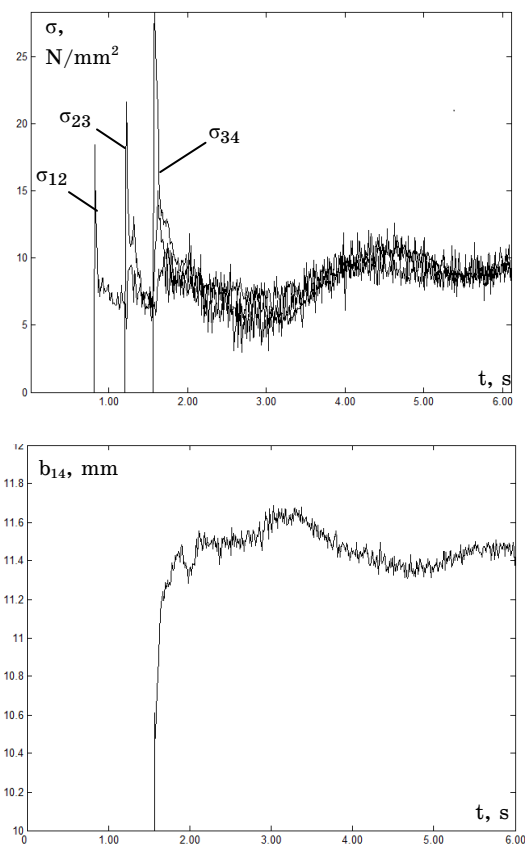


Рисунок 7 – Результати моделювання процесу прокатки в умовах функціонування САРН

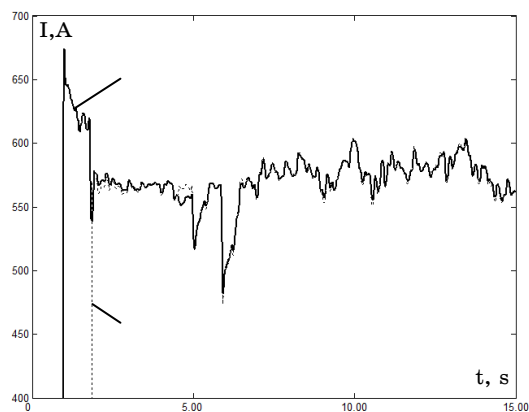


Рисунок 8 – Осцилограми сформованої САРН уставки та поточного якірного струму електродвигуна 3-ої кліті під час регулювання натягу

Результати комп'ютерного експерименту (рис.7,а) свідчать, що САРН впродовж усього процесу прокатки підтримує натяг у всіх міжклітьових промі-

жках на мінімальному рівні (близько 10 Н/мм²). Ширина прокату на виході зі стана (рис. 7,б) на усій довжині розкату перебуває в межах поля допуску (11.4 - 11.55 мм), що також вказує на високу ефективність системи.

Разом с тим необхідно визнати, що ефективна робота досліджуваної САРН потребує попереднього ретельного налаштування параметрів регулятора натягу (блок 8 на рис. 1 та блок PID на рис. 5), який забезпечує усунення натягу на передньому кінці розкату. Через обмежений час його роботи (адже процес регулювання має завершитись до входження прокату до наступної кліті проміжку) швидкодія стає критичним показником системи. Проведені авторами дослідження свідчать, що процедура налаштування значно спрощується, якщо прокатка ведеться на менших швидкостях, що має місце при прокатці профілів з більшого розміру.

Висновки. 1. В умовах безперервної прокатки сортових профілів з відсутнім або занадто малим прогином металу між суміжними прокатними клітями найбільш перспективним є регулювання натягу за інформацією про якірні струми головних електроприводів.

2. Запропоновано новий спосіб мінімізації натягу на усій довжині розкату, що базується на гіпотезі про подібність якірних струмів у суміжних клітках в режимі вільної прокатки.

3. З огляду на принципову неможливість апробації запропонованого способу методами промислового експерименту, перевірка його роботоспроможності потребує проведення комп'ютерного імітаційного моделювання.

4. Створена комп'ютерна модель дозволяє здійснювати адекватне імітаційне моделювання роботи САРН в умовах сортової прокатки у безперервній групі клітей з точністю, що є достатньою для висновків щодо ефективності її роботи.

5. Результатами дослідження системи шляхом комп'ютерного моделювання доведена ефективність її роботи, зокрема, зменшення питомого натягу в усіх міжкліткових проміжках чистової групи клітей до прийняттого рівня 10 Н/мм² та суттєве звуження діапазону змінення ширини готового прокату.

6. Подальші розвідки доцільно спрямувати на опрацювання інженерної методики налаштування параметрів регулятора натягу, що забезпечує усунення натягу на передньому кінці розкату, за критерієм максимальної швидкодії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Автоматизация технологических процессов на мелкосортных прокатных станах: монография/ А.С. Бешта, В.Н. Куваев, О.Е. Потап, А.П. Егоров. Днепропетровск: Журфонд, 2014. 283 с.
2. Kuzmenko M., Active control system of mill products tension at the outlet of roughing train in continuous light-section mill, M. Kuzmenko, M. Rybalchenko, O. Boyko, D. Beshta/ Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, Scientific and technical journal, 2018. №5 (167). P. 122 – 129.
3. Система АСРП – история создания и внедрения / Ю.П.Карпинский, В.Н. Куваев, О.Н. Кукушкин, В.А. Чигринский // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». Сб. науч. тр-ов Института черной металлургии НАН Украины им. З.И. Некрасова; вып.17. 2008. С. 301-310.
4. Куваев В.Н Идентификация межклетьевых усилий при непрерывной прокатке по статическому моменту нагрузки электроприводов клетей // Науковий вісник Національного гірничого університету. №7-8. С.77-81.
5. Автоматичне управління режимом прокатки з натягом на основі зміни струму якоря двигунів приводу валків/ О.П. Егоров, В.Б. Зворикін, О.І. Михальов, М.Ю. Кузьменко// Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 5 (112). Дніпро, 2017. С.108 -118.
6. Авт. свид. СССР № 1397110. Устройство стабилизации натяжения проката на непрерывном стане / НИИАчермет; Авт.: А.П. Егоров, В.С. Егоров, М.П. Пустыльник и др. МПК В21В 37/00. Заявка №4097500/23-02. Опубл. в БИ № 19, 1988.
7. Патент України № 26896 Спосіб визначення дійсних значень зусиль розтягання матеріалу, що прокатується в багатоклітьовому стані безперервної прокатки/GER Industrie-Systeme GmbH, МПК В21В 38/06, Опубл. 29.12.1999. Бюл. № 8.
8. Патент України № 124398. Спосіб автоматичної мінімізації натягу прокату на безперервному сортовому стані/ НМетАУ/ О.Ю. Потап, М.О. Рибальченко, С.О. Біневич. МПК В21В 37/52. Заявка № а201910384. Опубл. 08.09.2021. Бюл. № 36.
9. Исследование системы компенсации межклетевых усилий в черновой группе прокатного стана методом математического моделирования / А.Г. Шубин, А.Н. Гостев, Р.Р.Храмшин и др. // Теория и практика автоматизированного электропривода. ЭСик. №4(29). 2015.
10. Моделирование многосвязных систем управления скоростным режимом прокатки на непрерывном мелкосортном стане// В.Б. Зворыкин, А.П. Егоров,

А.И. Михалев, М.Ю. Кузьменко / Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 5 (106). Дніпро, 2016. С. 36-44.

11. Динамическая модель двухниточной прокатки в черновой группе клетей мелкосортного стана / А.С. Бешта, В.Н. Куваев, А.П. Егоров, О.Е. Потап и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 2. С. 119-122.

REFERENCES

1. A.S. Beshta, V.N. Kuvaev, O.E. Potap, A.P. Egorov (2014) “Automation of technological processes on light-section rolling mills”: monograph/. Dnepropetrovsk: Zhurfond - 283 p.

2. Active control system of mill products tension at the outlet of roughing train in continuous light-section mill, M. Kuzmenko, M. Rybalchenko, O. Boyko, D. Beshta/ *Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, Scientific and technical journal, 2018. №5 (167). P. 122 – 129.

3. System ASRS – the history of creation and implementation / [Yu.P. Karpinsky, V.N. Kuvaev, ON Kukushkin, V.A. Chigrinsky] // «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». *Sat. Sci. Of the Institute of Ferrous Metallurgy of the NAS of Ukraine*. Z.I. Nekrasov; Issue.17. 2008. P.301 - 310.

4. Kuvaev V.N. Identification of interstand efforts at continuous rolling on static loading moment of stand’s electric drives// *Naukovyy visnyk Natsional’noho hirnychoho universytetu*. P.77-81.

5. Automatic control of the rolling regime with tension based on the change in armature current of the roll drive mo-tors/ A. Egorov, V. Zvorykin, A. Mikhalyov, M. Kuzmenko// *System technologies*. N 5(112). Dnipro, 2017. P.108 - 118.

6. The patent 1397110 USSR, IPC B21B 37/00. Device for stabilizing rolled tension on a continuous mill. SHEE “NSU”.- №4097500/23-02. Publ. 23.05.1988. Bull. Number 19 (1988).

7. The patent 26896 Ukraine, IPC B21B 38/06. The method of determining the actual values of the tensile forces of the material rolled in the multi-cell state of continuous rolling. Publ. 29.12.1999. Bull. Number 8 (1999).

8. The patent 124398 Ukraine, IPC (2014.01) B21B 37/52. The method of automatic minimization of rolled tension on a continuous bar mill, SHEE “NSU”. - № a201910384. Publ. 08.09.2021. Bull. Number 36 (2019).

9. A.G.Shubin, A.N.Gostev, R.R. Khamshin, K.E. Odintsov (2015) “System of interstand tension compensation in roughing train of rolling mill research using mathematical modeling method”, *Teoriya i praktika avtomatizirovannogo elektroprivoda*. №4 (29)

10. Modeling multiply connected control system of high-speed rolling mode to continuous light-section mill/ V.B. Zvorykin, A.P. Egorov, A.I. Mikhalyov, M.U. Kuzmenko // System technologies. N 5(106). Dnipro, 2016. P.36 - 44.

11. Dynamic model of two-strand rolling in the roughing train of the light-section mill/ A. Beshta, A. Egorov, V. Kuvaev, O. Potap et al.// Metallurgical and Mining Industry. 2015. №2. P. 119-122.

Received 04.12.2023.

Accepted 08.12.2023.

***Minimization of interstand tension on continuous grade rolling mills
by armature currents of electric drives of roll mill stands***

In the conditions of continuous rolling of graded profiles with no or too little metal deflection between adjacent rolling cages, the most promising is tension regulation based on information about the armature currents of the main electric drives.

The effectiveness of the method of minimizing the tension of graded rolled products based on information about the armature currents of the main electric drives was investigated. The method is based on the hypothesis of the constant ratio of the armature current of the drive of the next cage to the armature current of the drive of the previous cage in the free rolling mode. The method involves predicting the free-rolling current in rolling electric drives based on information about the free-rolling current in the electric drives of previous cages. The study is based on a complex model of the process of continuous bar rolling in four finishing cages of a small-grade mill with individual electric drives equipped with subordinate speed control systems.

Given the fundamental impossibility of approbation of the proposed method by the methods of an industrial experiment, verification of its operability requires computer simulation modeling.

The created computer model allows for adequate simulation of the operation of the control system in the conditions of rolling in a continuous group of cages with an accuracy that is sufficient for conclusions about the effectiveness of its operation.

According to the results of the study of the control system by means of computer simulation, the effectiveness of its work was proven, in particular, the reduction of the specific tension in all intercell spaces of the finishing group of roll stands to an acceptable level of 10 N/mm² and a significant narrowing of the range of changes in the width of the finished rolled product.

Keywords: continuous bar rolling, minimization of rolling tension, prediction of current of the free rolling, current regulation, computer simulation modeling.

Потап Олег Юхимович – к.т.н, професор, кафедри автоматизації виробничих процесів, Український державний університет науки і технологій, УДУНТ.

Куваєв Володимир Миколайович – д.т.н, професор, кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».

Бойко Олег Олександрович – к.т.н, доцент, кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».

Рибальченко Марія Олександрівна – к.т.н., завідувач кафедри автоматизації виробничих процесів, Український державний університет науки і технологій, УДУНТ.

Шибакінський Володимир Іванович – к.т.н., доцент кафедри автоматизації виробничих процесів, Український державний університет науки і технологій, УДУНТ.

Потап Михайло Олегович – магістр, Український державний університет науки і технологій, УДУНТ.

Potap Oleg - professor, department of automation of production processes, Ukrainian State University of Science and Technology, USUST.

Kuvaiev Volodymyr – professor, department of software of computer systems, Dnipro University of Technology.

Boyko Oleg – associate professor, department of cyberphysical and information-measuring systems? Dnipro University of Technology.

Rybalchenko Maria –head of department of automation of production processes, Ukrainian State University of Science and Technology, USUST.

Shybakinskyi Volodymyr – associate professor, department of automation of production processes, Ukrainian State University of Science and Technology, USUST.

Potap Mykhailo – master Ukrainian State University of Science and Technology, USUST.

ВЛАСТИВОСТІ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ТА ОТРИМАННЯ ДАНИХ В ТЕСТ-МЕТОДАХ ХІМІЧНОГО АНАЛІЗУ

Анотація. Сканерна індикація аналітичного сигналу в хімічному аналізі – це об'єктивний, швидкий і автоматизований спосіб оцінки кольорових характеристик забарвлених зразків. Використання сканерної індикації при отриманні АС позбавляє від помилок, пов'язаних із суб'єктивною оцінкою та допомагає людям з вадами кольорового зору, прискорює операції збору та обробки інформації. Врахування та контроль джерела світла в скануючих системах є ключовим для забезпечення стабільності та точності отриманих зображень у різних умовах освітлення. Для отримання аналітичного сигналу першочергово необхідно обробити зображення для отримання області інтересу, який визначається методом сегментації, ручним методом та використовуючи ШІ. Аналіз отриманих значень проводиться шляхом побудови лінійної або нелінійної залежності значення кольору в обраній кольоровій моделі приведений до єдиного значення АС до концентрації.

Ключові слова: обробка результатів, сканер індикація, камера смартфона, експрес аналіз, аналітичний сигнал, точка інтересу, тест методи.

Постановка проблеми

Хімічний аналіз – важливе джерело інформації для оцінки стану навколишнього середовища, оцінки стану організму людини та інструмент діагностування захворювань та ін.

Використання простих, експресних і дешевих методів аналізу без спеціальних лабораторних умов і персоналу спеціальної кваліфікації, якими і є тест-методи, сприяє ефективному впровадженню відомих методик тестового аналізу для контролю хімічного складу об'єктів довкілля та для використанні в галузі охорони здоров'я.

Із поширенням цифрового фотографування, сканування та комп'ютерних технологій зображення з'явився об'єктивніший, швидший і більше автоматизований спосіб оцінки кольорових характеристик забарвлених зразків. Це позбавляє від помилок, пов'язаних із суб'єктивною оцінкою та

допомагає людям з вадами кольорового зору а також прискорює операції збору та обробки інформації.

Мета дослідження. Дослідження властивостей методів обробки та отримання даних в тест-методах хімічного аналізу.

Викладення основного матеріалу дослідження

В колориметричних тест-методах аналітичний сигнал реєструється скануючим пристроєм або оком. Під час отримання зображення потрібно враховувати багато факторів, оскільки існують різні підходи до захоплення зображення в оптичному аналізаторі [1].

Світлопоглинання реєструється при розташуванні джерела світла та скануючого пристрою з протилежних боку від аналізованої речовини. Таким чином фіксується випромінення з довжиною хвиль, що не поглинулось, не розсіялось та не відбилось від зразка. Інтенсивність світла, що проходить, зменшується.

У випадку використання конфігурації вимірювання, коли опора, яка містить чутливі мембрани, є непрозорою його можна реєструвати скануючим пристроєм при відбитті світла від поверхні, на якій відбувається аналітична реакція. В такому випадку вимірюється світло що відбилось від поверхні та потрапило в об'єктив детектора.

Крім того, під час процедури отримання слід враховувати розташування елементів та параметри іміджингового пристрою, що використовується. Зазвичай в цифрових камерах або смартфонах з вбудованими камерами можна налаштувати широкий спектр параметрів, таких як баланс білого, час експозиції, діафрагма, чутливість ISO, серед інших. Щоб уникнути використання автоматичних налаштувань пристроїв, необхідно встановити оптимальну точку роботи параметрів згідно з конкретним застосуванням і налаштувати їх.

Вплив умов освітлення

Скануючі системи вимагають контрольованого джерела світла та еталону для калібрування. Дослідження показали, що джерело світла суттєво впливає на інтенсивність кольору отриманих зображень, і, отже, важливо враховувати умови освітлення або впроваджувати елементи для забезпечення стабільних результатів незалежно від умов освітлення [3].

У процедурах комп'ютерного зору та аналізу кольору використовуються різні типи джерел світла, такі як флуоресцентні лампи, світлодіоди, монітори

CRT та LCD [5]. Світлодіоди, зокрема, є популярними через свою доступність та енергоефективність.

Світлодіоди використовуються як окремі джерела світла або у комбінаціях, зокрема, білі та УФ-світлодіоди [6].

При використанні комерційних камер або телефонних камер важливо стабілізувати їх у стаціонарному положенні в умовах контрольованого освітлення [7]. Вибір кольорових світлодіодів повинен враховувати спектр поглинання чи збудження хімічних елементів для точності вимірювань [6].

Коли використовуються інші пристрої, такі як смартфони, вбудований світлодіодний спалах часто використовується як джерело світла. Важливо забезпечити стабільність світлодіода та налаштувати параметри камери для уникнення варіацій, що можуть впливати на точність вимірювань [2].

Дослідження впливу потужності спалаху, чутливості ISO та часу експозиції на систему показують, що зміни в світлових умовах призводять до варіацій у чутливості системи [11].

У смартфонах із вбудованими камерами деякі параметри не можуть бути налаштовані, тому потрібне постійне джерело світла, яке забезпечить автоматичну конфігурацію параметрів та слугуватиме посиланням для виправлення можливих варіацій. Для цього розробляють модифіковані корпуси, які приєднують до смартфонів [2].

Корпуси можуть бути додані до систем, які використовують екран смартфона як джерело світла, або включати кольорові фільтри для вилучення небажаного фонового освітлення [9]. В якості еталонів для обробки зображень використовують білий колір, кольорові таблиці, сірі картки чи області-посилання, оскільки вони мають відомі хроматичні координати, які дозволяють виправити інформацію відповідно до джерела світла [10].

Ці еталони використовуються для компенсації помилок, зумовлених змінами у світлових умовах, шляхом коригування виміряних хроматичних координат посилання в умовах експерименту зі стандартними відомими значеннями.

Цифрова обробка даних в тест-методах хімічного аналізу. Цифровані зображення перед обробкою зазвичай зберігають у різних форматах, таких як raw, TIFF, BMP та JPEG [1].

Обробка зображень включає операції для поліпшення якості отриманих зображень. У CVAC, коли колориметричний аналіз поєднується з іміджінговими детекторами, обробка виконується на зовнішньому комп'ютері

за допомогою програм обробки, таких як ImageJ, Adobe Photoshop, технічних платформ Matlab, Java, LabVIEW або спеціалізованого програмного забезпечення [1].

Серед технік обробки зображень, найпоширенішою у CVAC є сегментація зображень. Серед технік сегментації, піксельна сегментація, зокрема, техніка порогового відділення, є найбільш поширеною. Ця техніка визначає пікселі з певною інтенсивністю чи відтінком кольору, вищим за певний поріг, для виділення областей інтересу (ROI) [5]. Метод Оцу є одним із підходів до порогового відділення.

Техніки сегментації на основі граней використовують маски для виявлення раптових змін параметрів зображення, таких як границі чи грані, використовуючи градієнти цих параметрів. Різні методи виявлення границь включають диференційне виявлення, оператори Прюїтта та оператори Собеля [7]. Виявлення границь зазвичай проводиться на зображенні сірого відтінку, але може використовуватися координата V у просторі HSV для зменшення обчислювальних витрат.

Найпоширенішою технікою сегментації в CVAC є ручний вибір області визначення. Ручний вибір включає вибір області, яка часто є круглою чи квадратною, з урахуванням уникнення ефекту кільця кави, концентрації реагенту чи витікання. Для ручного вибору використовуються маски, отримані від віднімання тла сенсора чи розчину, і можуть бути використані для всіх зображень однієї серії для заощадження часу [8]. Вибір ROI може також враховувати розподіл кольору та колірну симетрію області визначення.

Деякі роботи використовують вказівки для визначення ROI, включаючи точне положення розміщення області інтересу в пристрої, або використання комбінації фільтрації, сегментації та визначення форми. Зазначені підходи спільно стикаються з викликами уникнення включення країв зразків у зону обробки та нерівномірного розподілу аналіту чи реакційного продукту в області виявлення. Різні рішення цих проблем включають використання полімерів для зменшення рухливості хімічних речовин та використання ліпофільних солей чи заряджених полімерів для утримання заряджених хімічних речовин [13].

Цифровий аналіз зображень

Аналіз зображень використовує цифрові дані, отримані з області інтересу (ROI), для видобуття хімічної інформації: якісної та/або кількісної інформації

щодо одного чи кількох аналітів або класифікації, а також для виділення хімічних особливостей зображень.

Як тільки отримано ROI, потрібно обробити аналіз компонентів кольору ROI. Обробка полягає у видобутті колориметричної інформації для її подальшого відношення до аналіта. Як видно з літератури, для цього можна використовувати кілька аналітичних колориметричних параметрів для встановлення взаємозв'язку між аналітом та кольором.

Оскільки обробка може здійснюватися за допомогою комп'ютера, в якості інструментів можна використовувати власний програмний засіб, такий як Photoshop та Matlab, а також безкоштовне програмне забезпечення, таке як ImageJ та GIMP. Більшість цього програмного забезпечення дозволяє представляти пікселі інтенсивності за допомогою опції «гістограма», яка показує розподіл кольорових пікселів у діапазоні варіації кольорових координат, а також середні інтенсивності аналізованого зображення [1,3]. Таким чином, гістограма дозволяє користувачеві показувати та розраховувати кілька параметрів для отримання калібровочної кривої системи: середню, моду та медіану інтенсивності червоних, зелених та синіх каналів.

Використаний аналітичний параметр може бути просто середньою вартістю каналів R, G або B пікселів, що включені в ROI інформації, або виражений як ефективна поглинаність, також називається ефективною інтенсивністю (рівняння 1), де A_R , A_G та A_B – ефективна поглинання червоного, зеленого та синього, відповідно, або як загальне поглинання A_T ($A_R + A_G + A_B$) [16]. R_S , G_S , B_S та R_B , G_B , B_B – це значення червоного, зеленого та синього кольорів аналізованого та холостого зразків, відповідно [17] або різниця між середніми значеннями каналів R, G або B до та після впливу аналізу [18] або відношення кольорів (CR) (рівняння 2; де нижній індекс r вказує на посилання) [19].

$$\begin{aligned} A_R &= -\log\left(\frac{R_S}{R_B}\right) \\ A_G &= -\log\left(\frac{G_S}{G_B}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} A_B &= -\log\left(\frac{B_S}{B_B}\right) \\ CR &= \frac{\frac{R_S}{R_r} + \frac{G_S}{G_r} + \frac{B_S}{B_r}}{3}, \end{aligned} \quad (2)$$

У іншій роботі хід іон-обмінного процесу обчислюється за допомогою наступного хроматичного параметра з ROI:

$$CPI = \frac{\log(G_s) - \log(G_b)}{\log(G_{max}) - \log(G_b)}, \quad (3)$$

де $\log(G_s)$, $\log(G_b)$, $\log(G_{max})$ відповідають логарифму кольору G аналізованого та холостого зразків, тоді як G_{max} відповідає кольорові G останньої точки калібровочного графіка [43].

Отримане кольорове RGB-зображення іноді може бути оброблене шляхом перетворення інформації у відтінки сірого. Для виконання цього перетворення існує багато різних алгоритмів, хоча найбільш часто використовуються в колориметрії алгоритми світлості $((\max(R, G, B) + \min(R, G, B))/2)$, середнього $((R+G+B)/3)$ та люміності $(0,3R + 0,59G + 0,11B)$. У третьому випадку коефіцієнти, застосовані до кожного каналу простору кольорів RGB, базуються на чутливості людського ока до трьох основних кольорів простору кольорів RGB. Основна мета цього полягає в аналізі зображення піксель за пікселем, враховуючи лише одне значення, а не значення, яке надається трійкою каналів RGB, спрощуючи таким чином аналіз. Зокрема, у Photoshop опція «гістограма» дозволяє представляти інформацію лише про значення відтінків сірого для роботи з єдиним параметром. Використовувалися як самі відтінки сірого, як у [13], так і їхнє обернене значення як аналітичний параметр [12]. У сканометричних аналізах, наприклад в біоаналізах на основі чіпів, звичайною мірою кількості є оптичне співвідношення темряви (ODR), визначене рівнянням 4, де I_b та I_s – це значення відтінків сірого фону та сигналу відповідно [109].

$$ODR = \frac{(I_b - I_s)}{I_b}, \quad (4)$$

Однак Мурдок та інші. показують, що при використанні одного й того ж зображення для обох аналізів (RGB або відтінки сірого) чутливість та роздільна здатність системи з останнім менші [15]. Різницеві карти між кольоровою інформацією до та після впливу аналізу можна використовувати як аналітичний параметр. За допомогою цього методу будь-які відмінності в друку видаляються, оскільки відмінності кольорів є лише слабкою функцією варіації концентрації барвника чи інтенсивності плями від масиву до масиву [20]. Як було вказано раніше, для усереднення інформації про кольори піксель за пікселем використовується лише зменшений відсоток від центру кожної плями. Загальна техніка в більшості робіт, що використовують різницеві карти, полягає в розширенні гістограми різниці від отриманого діапазону до 0-255 для отримання більш ефективної візуалізації [14].

Висновки та перспективи подальших досліджень

Врахування та контроль джерела світла в скануючих системах є ключовим для забезпечення стабільності та точності отриманих зображень у різних умовах освітлення. Для отримання аналітичного сигналу першочергово необхідно обробити зображення для отримання області інтересу, який визначається методом сегментації, ручним методом та використовуючи ШІ. Аналіз отриманих значень проводиться шляхом побудови лінійної або нелінійної залежності значення кольору в обраній кольоровій моделі приведений до єдиного значення АС до концентрації. Більшість існуючих системи для сканерної детекції аналітичного сигналу в тест-методах аналізу вимагають залучення людини до отримання та інтерпретації результату, що обмежує сфери використання цих методів індикації аналітичного сигналу. Подальші дослідження націлене на створення надійного методу отримання АС за допомогою камери смартфона на базі ШІ, що дозволяє автоматизувати отримання, обробку та покращити відтворюваність результатів у хімічних тест-аналізах.

ЛІТЕРАТУРА

1. L.F. Capitán-Vallvey, N. López-Ruiz, A. Martínez-Olmos, M.M. Erenas, A.J. Palma, Recent Developments in Computer Vision-Based Analytical Chemistry: A Tutorial Review, *Analytica Chimica Acta* (2015), doi: 10.1016/j.aca.2015.10.009.
2. V. Oncescu, D. O'Dell, D. Erickson, Smartphone based health accessory for colorimetric detection of biomarkers in sweat and saliva, *Lab Chip* 13 (2013) 3232-38.
3. C.A. Chaplan, H.T. Mitchell, A.W. Martinez, Paper-based standard addition assays, *Anal. Methods* 6 (2014) 1296-300.
4. Z. Iqbal, R.B. Bjorklund, Colorimetric analysis of water and sand samples performed on a mobile phone, *Talanta* 84 (2011) 1118-23.
5. K. Cantrell, M.M. Erenas, I. Orbe-Paya, L.F. Capitan-Vallvey, Use of the Hue Parameter of the Hue, Saturation, Value Color Space as a Quantitative Analytical Parameter for Bitonal Optical Sensors, *Anal. Chem.* 82 (2010) 531-42
6. Q. Wei, R. Nagi, K. Sadeghi, S. Feng, E. Yan, S.J. Ki, R. Caire, D. Tseng, A. Ozcan, Detection and Spatial Mapping of Mercury Contamination in Water Samples Using a Smart-Phone, *ACS Nano* 8 (2014) 1121-29.
7. A. Garcia, M.M. Erenas, E.D. Marinetto, C.A. Abad, I. de Orbe-Paya, A.J. Palma, L.F. Capitan-Vallvey, Mobile phone platform as portable chemical analyzer, *Sens. Actuators B* 156 (2011) 350-59.

8. M. Ariza-Avidad, A. Salinas-Castillo, M.P. Cuellar, M. Agudo-Acemel, M.C. Pegalajar, L.F. Capitan-Vallvey, Printed Disposable Colorimetric Array for Metal Ion Discrimination, *Anal.Chem.* 86 (2014) 8634-41.
9. D. Lee, W.P. Chou, S.H. Yeh, P.J. Chen, P.H. Chen, DNA detection using commercial mobile phones, *Biosens.Bioelectron.* 26 (2011) 4349-54.
10. V.F. Curto, C. Fay, S. Coyle, R. Byrne, M. O'Toole, C. Barry, S. Hughes, N. Moyna, D. Diamond, F. Benito-Lopez, Real-time sweat pH monitoring based on a wearable chemical barcode micro-fluidic platform incorporating ionic liquids, *Sens.Actuators B* 171-172 (2012) 1327-34.
11. V.V. Apyari, S.G. Dmitrienko, Using a digital camera and computer data processing for the determination of organic substances with diazotized polyurethane foams, *J.Anal.Chem.* 63 (2008) 530-37.
12. S.V. Bannur, S.V. Kulgod, S.S. Metkar, S.K. Mahajan, J.K. Sainis, Protein Determination by Ponceau S Using Digital Color Image Analysis of Protein Spots on Nitrocellulose Membranes, *Anal.Biochem.* 267 (1999) 382-89.
13. M.M. Mentele, J. Cunningham, K. Koehler, J. Volckens, C.S. Henry, Microfluidic Paper-Based Analytical Device for Particulate Metals, *Anal.Chem.* 84 (2012) 4474-80.
14. T. Soga, Y. Jimbo, K. Suzuki, D. Citterio, Inkjet-Printed Paper-Based Colorimetric Sensor Array for the Discrimination of Volatile Primary Amines, *Anal.Chem.* 85 (2013) 8973-78.
15. R.C. Murdock, L. Shen, D.K. Griffin, N. Kelley-Loughnane, I. Papautsky, J.A. Hagen, Optimization of a Paper-Based ELISA for a Human Performance Biomarker, *Anal.Chem.* 85 (2013) 11634-42.
16. A. Choodum, N. Nic Daeid, Rapid and semi-quantitative presumptive tests for opiate drugs, *Talanta* 86 (2011) 284-92.
17. A. Abbaspour, A. Khajehzadeh, A. Noori, A simple and selective sensor for the determination of ascorbic acid in vitamin C tablets based on paptode, *Anal.Sci.* 24 (2008) 721-25.
18. F.G. Souza, Jr., G.E. Oliveira, T. Anzai, P. Richa, T. Cosme, M. Nele, C.H.M. Rodrigues, B.G. Soares, J.C. Pinto, A Sensor for Acid Concentration Based on Cellulose Paper Sheets Modified with Polyaniline Nanoparticles, *Macromol.Mater.Eng.* 294 (2009) 739-48.
19. S. Sumriddetchkajorn, K. Chaitavon, Y. Intaravanne, Mobile device based self-referencing colorimeter for monitoring chlorine concentration in water, *Sens.Actuators B* 182 (2013) 592-97.

20. C. Zhang, K.S. Suslick, Colorimetric Sensor Array for Soft Drink Analysis, *J.Agric.Food Chem.* 55 (2007) 237-42.

REFERENCES

1. L.F. Capitán-Vallvey, N. López-Ruiz, A. Martínez-Olmos, M.M. Erenas, A.J. Palma, Recent Developments in Computer Vision-Based Analytical Chemistry: A Tutorial Review, *Analytica Chimica Acta* (2015), doi: 10.1016/j.aca.2015.10.009.
2. V. Oncescu, D. O'Dell, D. Erickson, Smartphone based health accessory for colorimetric detection of biomarkers in sweat and saliva, *Lab Chip* 13 (2013) 3232-38.
3. C.A. Chaplan, H.T. Mitchell, A.W. Martinez, Paper-based standard addition assays, *Anal.Methods* 6 (2014) 1296-300.
4. Z. Iqbal, R.B. Bjorklund, Colorimetric analysis of water and sand samples performed on a mobile phone, *Talanta* 84 (2011) 1118-23.
5. K. Cantrell, M.M. Erenas, I. Orbe-Paya, L.F. Capitan-Vallvey, Use of the Hue Parameter of the Hue, Saturation, Value Color Space as a Quantitative Analytical Parameter for Bitonal Optical Sensors, *Anal.Chem.* 82 (2010) 531-42
6. Q. Wei, R. Nagi, K. Sadeghi, S. Feng, E. Yan, S.J. Ki, R. Caire, D. Tseng, A. Ozcan, Detection and Spatial Mapping of Mercury Contamination in Water Samples Using a Smart-Phone, *ACS Nano* 8 (2014) 1121-29.
7. A. Garcia, M.M. Erenas, E.D. Marinetto, C.A. Abad, I. de Orbe-Paya, A.J. Palma, L.F. Capitan-Vallvey, Mobile phone platform as portable chemical analyzer, *Sens.Actuators B* 156 (2011) 350-59.
8. M. Ariza-Avidad, A. Salinas-Castillo, M.P. Cuellar, M. Agudo-Acemel, M.C. Pegalajar, L.F. Capitan-Vallvey, Printed Disposable Colorimetric Array for Metal Ion Discrimination, *Anal.Chem.* 86 (2014) 8634-41.
9. D. Lee, W.P. Chou, S.H. Yeh, P.J. Chen, P.H. Chen, DNA detection using commercial mobile phones, *Biosens.Bioelectron.* 26 (2011) 4349-54.
10. V.F. Curto, C. Fay, S. Coyle, R. Byrne, M. O'Toole, C. Barry, S. Hughes, N. Moyna, D. Diamond, F. Benito-Lopez, Real-time sweat pH monitoring based on a wearable chemical barcode micro-fluidic platform incorporating ionic liquids, *Sens.Actuators B* 171-172 (2012) 1327-34.
11. V.V. Apyari, S.G. Dmitrienko, Using a digital camera and computer data processing for the determination of organic substances with diazotized polyurethane foams, *J.Anal.Chem.* 63 (2008) 530-37.

12. S.V. Bannur, S.V. Kulgod, S.S. Metkar, S.K. Mahajan, J.K. Sainis, Protein Determination by Ponceau S Using Digital Color Image Analysis of Protein Spots on Nitrocellulose Membranes, *Anal.Biochem.* 267 (1999) 382-89.
13. M.M. Mentele, J. Cunningham, K. Koehler, J. Volckens, C.S. Henry, Microfluidic Paper-Based Analytical Device for Particulate Metals, *Anal.Chem.* 84 (2012) 4474-80.
14. T. Soga, Y. Jimbo, K. Suzuki, D. Citterio, Inkjet-Printed Paper-Based Colorimetric Sensor Array for the Discrimination of Volatile Primary Amines, *Anal.Chem.* 85 (2013) 8973-78.
15. R.C. Murdock, L. Shen, D.K. Griffin, N. Kelley-Loughnane, I. Papautsky, J.A. Hagen, Optimization of a Paper-Based ELISA for a Human Performance Biomarker, *Anal.Chem.* 85 (2013) 11634-42.
16. A. Choodum, N. Nic Daeid, Rapid and semi-quantitative presumptive tests for opiate drugs, *Talanta* 86 (2011) 284-92.
17. A. Abbaspour, A. Khajehzadeh, A. Noori, A simple and selective sensor for the determination of ascorbic acid in vitamin C tablets based on paptode, *Anal.Sci.* 24 (2008) 721-25.
18. F.G. Souza, Jr., G.E. Oliveira, T. Anzai, P. Richa, T. Cosme, M. Nele, C.H.M. Rodrigues, B.G. Soares, J.C. Pinto, A Sensor for Acid Concentration Based on Cellulose Paper Sheets Modified with Polyaniline Nanoparticles, *Macromol.Mater.Eng.* 294 (2009) 739-48.
19. S. Sumriddetchkajorn, K. Chaitavon, Y. Intaravanne, Mobile device based self-referencing colorimeter for monitoring chlorine concentration in water, *Sens.Actuators B* 182 (2013) 592-97.
20. C. Zhang, K.S. Suslick, Colorimetric Sensor Array for Soft Drink Analysis, *J.Agric.Food Chem.* 55 (2007) 237-42.

Received 04.12.2023.

Accepted 08.12.2023.

***Properties of processing and data acquisition methods
in test methods of chemical analysis***

Chemical analysis is a crucial source of information for assessing the state of the environment, evaluating the human body condition, and serving as a diagnostic tool for detecting diseases and more. The use of simple, rapid, and cost-effective analysis methods without the need for specialized laboratory conditions and personnel with specific qualifications, such as test methods, contributes to the effective implementation of well-known techniques for analyzing the chemical composition of environmental objects and for use in the field of healthcare.

Scanner indication of the analytical signal in chemical analysis is an objective, fast, and automated method for assessing the color characteristics of colored samples. The use of scanner indication in obtaining the analytical signal eliminates errors associated with subjective evaluation and assists individuals with color vision impairments, speeding up data collection and processing operations.

Considering and controlling the light source in scanning systems is crucial to ensuring the stability and accuracy of obtained images under different lighting conditions. To obtain the analytical signal, it is primarily necessary to process the image to obtain the region of interest, which is determined by segmentation, manual methods, and using image processing techniques. The analysis of obtained values is carried out by constructing a linear or nonlinear relationship of color values in the selected color model converted to a single value of the analytical signal to concentration.

Most existing systems for scanner detection of the analytical signal in analytical test methods require human involvement in obtaining and interpreting results, limiting the application areas of these methods of analytical signal indication. Further research is focused on creating a reliable method for obtaining the analytical signal using a smartphone camera based on image processing techniques, allowing for the automation of obtaining, processing, and improving the reproducibility of results in chemical test analyses.

Keywords: data processing, scanner indication, smartphone camera, express analysis, analytical signal, point of interest, test methods.

Гуда Антон Ігоревич – д.т.н., професор, каф. «Комп’ютерні інформаційні технології», Український державний університет науки і технологій, УДУНТ.

Березюк Микита Олександрович – аспірант, каф. «Комп’ютерні інформаційні технології», Український державний університет науки і технологій, УДУНТ.

Guda Anton – professor, dep. “Computer and Information Technology”, Ukrainian State University of Science and Technology, USUST.

Bereziuk Mykyta – post-graduate student, dep. “Computer and Information Technology”, Ukrainian State University of Science and Technology, USUST.

В.А. Соломатін, О.Г. Байбуз, А.Є. Сиротенко

ЗАСТОСУВАННЯ ЗГОРТКОВИХ НЕЙОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ ІШЕМІЧНОГО ЗАХВОРЮВАННЯ СЕРЦЯ (ІЗС)

Анотація: розглядається модель нейронної мережі яка застосовується до раннього виявлення ІЗС на основі зображень рентгенівських знімків. Особливістю дослідження є застосування згорткових нейронних мереж (ЗНМ) для автоматизації виявлення захворювань серця. У роботі використовували графічну інформацію, яку містить рентгенівські знімки грудної клітки, анотовані досвідченим кардіологом. Було розроблено та навчено ЗНМ модель, здатну виявляти ознаки ІЗС на основі рентгенівських знімків. Модель була навчена на доступній кількості знімків (700 одиниць) та протестована на наборі знімків різних пацієнтів. Результати дослідження показали, що ЗНМ ефективно розпізнає ознаки ІЗС на рентгенівських знімках. Використання натренованої нейронної мережі підвищує можливість ранньої діагностики ІЗС та допомогти лікарям приймати обґрунтовані рішення щодо лікування пацієнтів.

Висновки цього дослідження підтверджують потенціал застосування ЗНМ у галузі медичної діагностики та вказують на новий крок у розвитку автоматизованого виявлення ІХС на основі рентгенівських знімків. Це відкриває перспективи для поліпшення точності та ефективності діагностики серцево-судинних захворювань та зниження навантаження на медичний персонал.

Ключові слова: Нейронна мережа, штучний інтелект, ішемічна хвороба серця, графік, Google Colab, Tensorflow, ResNet 50, Згорткова нейронна мережа.

Вступ: ІЗС є однією з найпоширеніших серцево-судинних захворювань, яка виникає внаслідок порушення кровопостачання до серцевого м'язу через звуження артерій, що живлять серце. Рання діагностика ІЗС є критично важливою для забезпечення ефективного лікування та запобігання подальшим ускладненням.

За останні роки зростає зацікавленість використанням ЗНМ [1] (Convolutional Neural Networks, CNNs) для виявлення ІЗС серця на ранніх стадіях. ЗНМ є потужними інструментами машинного навчання, які можуть автоматично виявляти складні закономірності та паттерни в медичних зображеннях.

Використання ЗНМ для виявлення ІЗС має декілька переваг. Вони можуть аналізувати великі обсяги даних з високою швидкістю[2], що дозволяє ефективно виявляти аномалії та патологічні зміни на рентгенівських зображеннях серця. Крім того, ЗНМ можуть автоматично вивчати признаки та ознаки, що важко визначити людиною, та використовувати їх для класифікації зображень на здорові та ішемічно уражені серця.

Проте, розробка ефективних ЗНМ для виявлення ІХС є досить складною задачею. Вимагається детальне дослідження архітектур моделей, методів попередньої обробки даних, технік навчання та оцінки результатів. Також, необхідно мати релевантний обсяг медичних даних з різними класами (умовно здорові та ішемічно уражені серця) для тренування та перевірки моделей.

При дослідженні вищевказаної проблеми пропонується детальний огляд моделей, методів та підходів [3], що використовуються для виявлення ІЗС з використанням ЗНМ. Це дозволить з'ясувати життєздатність таких підходів та визначити найефективніші методи для розв'язання даної проблеми.

Постановка задачі. В межах сформульованої проблеми, постановка задачі пов'язана зі складнощами виявлення ІЗС на ранніх стадіях та необхідністю розробки ефективних методів та моделей для цього. Основні негаразди, які можуть виникати, містять:

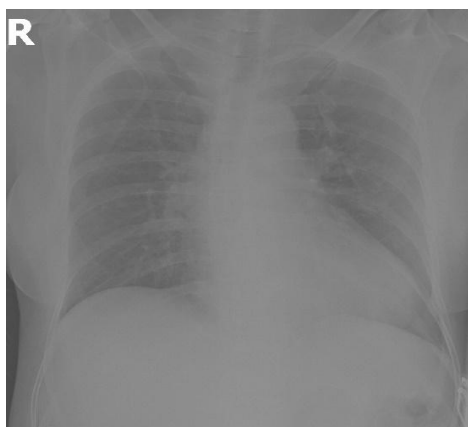
- нерепрезентативна вибірка медичних даних: Недостатня кількість даних або їх недоступність можуть обмежити точність та ефективність моделей;
- неспецифічні симптоми: ІЗС може проявлятися різноманітними симптомами, які можуть бути схожими на інші захворювання; це може призводити до неточності та помилкових результатів при виявленні хвороби;
- складність обробки медичних зображень [4] : медичні зображення, зокрема рентгенівські знімки серця, можуть бути великими за розміром та містити складні структури; обробка та аналіз таких зображень вимагає розробки спеціалізованих методів та архітектур моделей;
- неоднорідність даних: медичні дані можуть бути неоднорідними, як з точки зору якості зображень, так і з точки зору класифікації; наявність шуму, артефактів або інших перешкод може ускладнити точне виявлення ІЗС.
- переносимість моделей: розроблені моделі та методи виявлення ІЗС можуть виявитися непереносними до різних медичних закладів або пацієнтів; необхідно враховувати специфічні особливості медичних протоколів та умов;
- реалізації для успішного впровадження моделей у практику.

Вказані аспекти створюють необхідність для дослідження та розробки нових методів, моделей та підходів, які забезпечать виявлення ІЗС на ранніх стадіях з високою точністю та ефективністю.

Метою даного дослідження є вибір моделей навчання загорткової нейронної мережі для виявлення ІЗС на ранніх стадіях. Для досягнення цієї мети необхідно визначити моделі класифікації, які нададуть кращий результат навчання.

Основний матеріал Розділення медичних даних на два класи – людина зі здоровим серцем та пацієнт з перший етап моделі класифікації виявлення ішемічних захворювань серця на ранніх стадіях. Це дозволить навчати модель розрізняти між здоровими і хворими пацієнтами на основі ознак, що виявлені на рентгенівських знімках серця.

Класифікація [5] медичних даних на два класи спрощує створення навчального набору, на якому модель буде навчатися розпізнавати патологічні зміни, пов'язані з ІЗС. Для цього можуть бути використані методи ручної анотації даних або автоматичного виявлення ознак ішемічних змін на зображеннях. Цей випадок показано на рентгенівських знімках, які зображені на рис. 1



А)



Б)

Рисунок 1 – Рентгенівські знімки : А) здорової людини
Б) людини з ІЗС

Після розділення даних на класи модель може бути навчена за допомогою нейронних мереж, використовуючи різні архітектуру ResNet-50 [6] та згортковим методом навчання та передача навчання (transfer learning). Після навчання модель може бути використана для класифікації нових зображень серця та виявлення ІЗС на ранніх стадіях.

Модель ResNet-50 є ефективним варіантом для навчання на невеликих об'ємах датасету. Одна з головних переваг ResNet-50 полягає в здатності ефективно працювати з глибокими нейронними мережами, навіть при обмеженому обсязі навчальних даних. ResNet-50 використовує концепцію "skip connections" або "residual connections", яка дозволяє легше навчати глибокі моделі і зменшує проблему зникнення градієнта (gradient vanishing). Це дозволяє успішно навчати модель з більшою кількістю шарів навіть при обмеженому обсязі даних. ResNet-50 [7] використовує інноваційний підхід до роботи з глибокими мережами, відомий як "skip connections" або "shortcut connections". Цей метод дозволяє передавати інформацію вздовж шляху з низьким рівнем до високого, уникнувши при цьому втрати важливої інформації під час прокладання глибокого шляху через мережу. Такий механізм є важливим для подолання проблеми зникнення градієнту, що може виникнути при навчанні глибоких мереж. Крім того, модель ResNet-50 використовує передачу навчання (transfer learning), що означає, що вона може використовувати попередньо навчені ваги з великого набору даних (наприклад, ImageNet), і це допомагає моделі швидше збігатися й отримувати кращу точність, навіть при недостатній кількості власних даних.

Основними характеристиками моделі ResNet-50 є:

Глибина: модель має 50 шарів і включає в себе кілька блоків згорток, з'єднаних "skip connections". Архітектура блоку: кожен блок включає послідовність згорток, функції активації і пакування даних, що дозволяє мережі вивчити різні рівні абстракції. Параметризовані згортки: модель використовує 1x1 та 3x3 згортки з різними кількостями фільтрів для виявлення різних шаблонів у зображеннях.

Глобальний середній пулінг:[8] В кінці мережі застосовується глобальний середній пулінг, що дозволяє отримати одновимірний вектор ознак замість матриці.

Повнозв'язний шар: Модель завершується повнозв'язним шаром для класифікації з використанням функції активації Softmax.

На основі графіка що на рис. 2 видно, що тестування моделі дало задовільний результат з точністю приблизно 93%. Це свідчить про ефективність моделі у класифікації даних та роботи з тестовими прикладами. Однак важливо також враховувати інші метрики ефективності, такі як чутливість, специфічність та F1-оцінка, для отримання повної картини про продуктивність моделі.

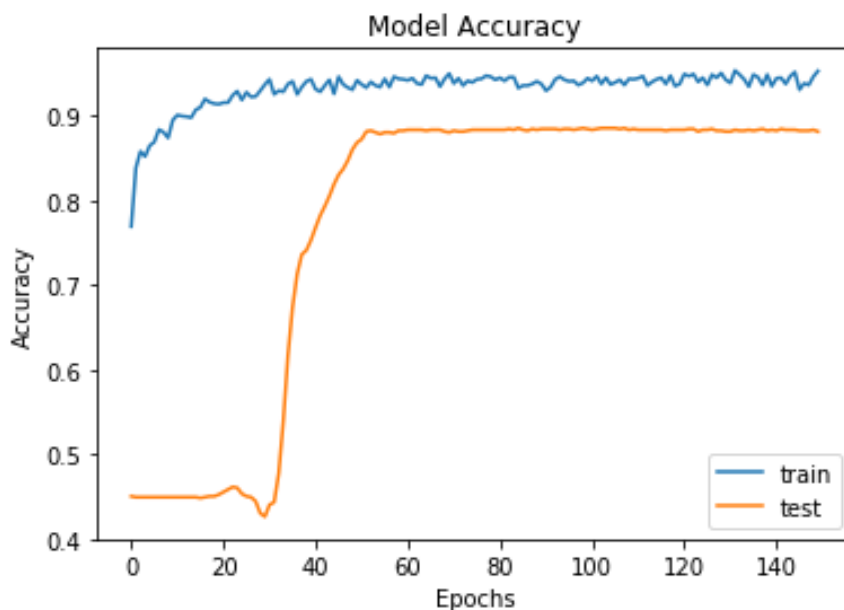


Рисунок 2 - Графік Навчання

Огляд моделі ResNet-50 показав [9], дана модель є потужним і ефективним інструментом для виявлення ішемічних захворювань серця на ранніх стадіях. Її здатність навчатись на невеликих обсягах даних та досягати високої точності робить її привабливим варіантом для застосування в медичній сфері. Результати попередніх досліджень та публікацій підтверджують високу ефективність моделі ResNet-50 при класифікації ішемічних захворювань серця та виявленні їх на ранніх стадіях.

Загалом, модель ResNet-50 є перспективним інструментом для виявлення ішемічних захворювань серця на ранніх стадіях, і вона може бути використана для поліпшення діагностики та лікування пацієнтів з даною хворобою.

Таким чином, модель ResNet-50 є потужним і ефективним інструментом для навчання на невеликих обсягах даних і може допомогти досягти добрих результатів при класифікації ішемічних захворювань серця на ранніх стадіях, навіть якщо доступні обмежені медичні дані.

На рисунку 3 та 4 наведено результати навчання нейронної мережі за допомогою моделі ResNet-50 для класифікації рентгенівських знімків на два класи: наявність ішемічної хвороби серця та здорової людини. Ці результати відображають ефективність моделі у відділенні пацієнтів з ІЗС від здорових осіб.

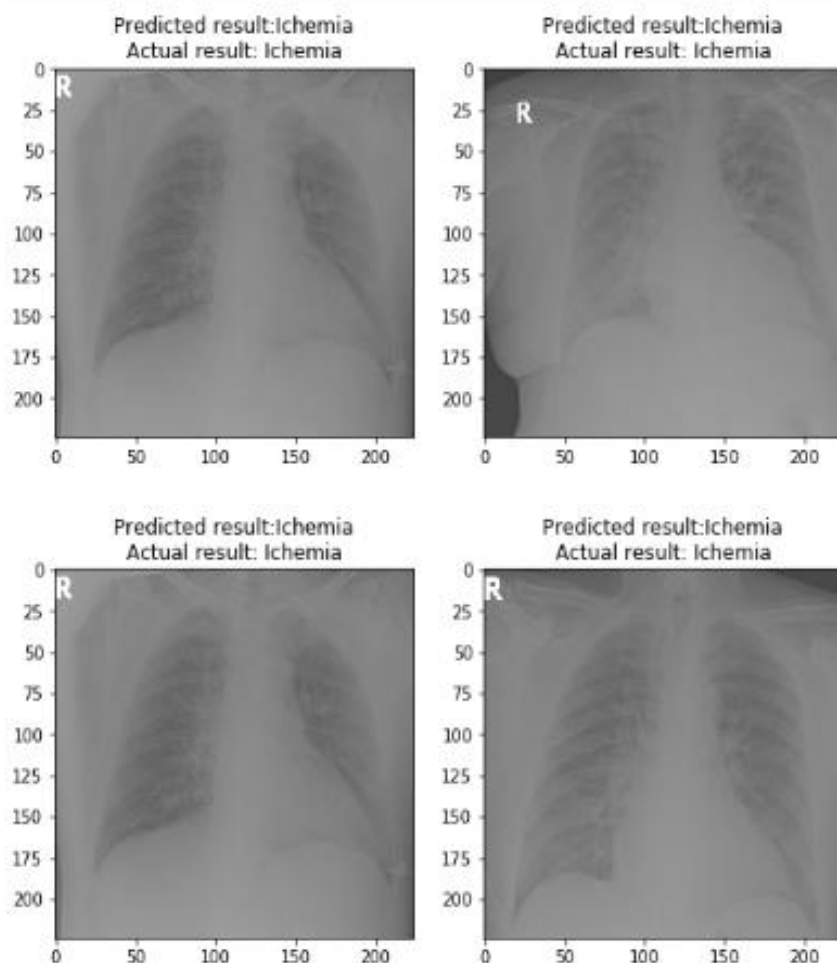


Рисунок 3 - Результати навчання де результат наявності Ішемічного захворювання серця

Додатковою важливою характеристикою моделі може бути її здатність до роботи з різноманітними типами рентгенівських знімків, що робить її універсальним інструментом для широкого спектру клінічних сценаріїв. Враховуючи велику кількість класифікованих рентгенівських знімків (більше 700), модель може виявити ішемічні захворювання серця з високою точністю.

Зазначимо, що існують потенційні можливості для подальшого вдосконалення системи, наприклад, шляхом додавання додаткових шарів безпеки або використання більш високорівневих нейронних мереж. Також можливе розширення датасету для підвищення репрезентативності та загальної ефективності моделі.

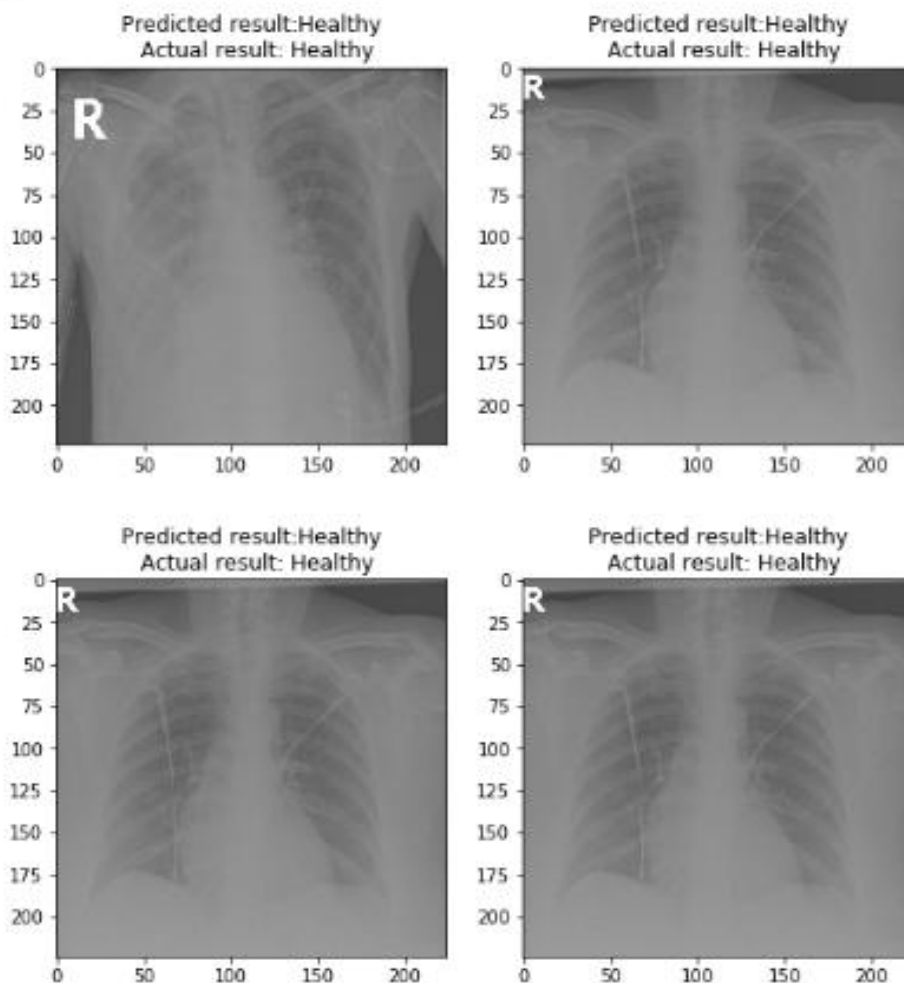


Рисунок 4 - Результати навчання де результат Здорової людини

Висновки У роботі проведено огляд моделі, яка є однією з найпопулярніших архітектур згорткових нейронних мереж. ResNet-50 базується на ідеї "skip connections" або "shortcut connections", що дозволяють зберігати та передавати інформацію безпосередньо вглиб мережі. Це допомагає подолати проблему зникнення градієнту при навчанні глибоких мереж.

Подальші дослідження полягають в удосконаленні методів діагностики та вирішенні медичних проблем, використовуючи сучасні технології машинного навчання.

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Yihui He, Ji Lin, Zhijian Liu, Hanrui Wang, Li-Jia Li, and Song Han. Amc: Automl for model compression and acceleration on mobile devices. In European Conference on Computer Vision, pages 815–832. Springer, 2018.
2. Chenxi Liu, Barret Zoph, Maxim Neumann. Progressive Neural Architecture Search. p.19– 34, 2018.

3. Chieh Chen, George Papandreou Rethinking atrous convolution for semantic image segmentation, 2017.
4. Barret Zoph, Vijay Vasudevan, Jonathon Shlens, Quoc V Le. Learning Transferable Architectures for Scalable Image Recognition. CVPR, 2018.
5. H. Ahonen, O. Heinonen, M. Klemettinen, and A.I. Verkamo, “Applying Data Mining Techniques for Descriptive Phrase Extraction in Digital Document Collections,”, ст. 2-11, 2015.
6. DeVries T., Taylor G. W. Improved Regularization of Convolutional Neural Networks with CutOut, 2017. Available at: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1708.04552>
7. Karen Simonyan, Andrew Zisserman, Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. 2014. arXiv preprint arXiv:1409.1556.
8. Jacot Arthur, Gabriel Franck, Hongler Clément. Neural Tangent Kernel: Convergence and Generalization in Neural Networks. — 2020. — 1806.07572.
9. Huang G., Liu Z., Weinberger K. Q. Densely connected convolutional networks. 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Honolulu, HI, USA, 21–26 July 2017. Honolulu, 2017, pp. 2261–2269. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.243>

Received 06.12.2023.

Accepted 08.12.2023.

The application of coagulatory neon networks in medicine for the detection of ischemic heart diseases and their development prospects

The analysis of recent research and publications is an important component of scientific investigation as it allows evaluating the current state of the scientific field and identifying the latest advancements and research directions. In the context of convolutional neural networks for detecting ischemic heart diseases on X-ray images, the analysis of recent research can help identify relevant techniques, methods, and findings that have already been achieved in this field.

Recent research shows significant progress in the utilization of convolutional neural networks for medical diagnostic tasks. Many studies focus on the development and improvement of network architectures that can detect various pathological conditions of the heart on X-ray images. Additionally, research is being conducted on data processing methods, data augmentation techniques, and model training optimization to achieve better results.

Publications dedicated to this topic provide information about various approaches for detecting ischemic heart diseases, the use of different network architectures, datasets, training methods, and result evaluation. It is important to analyze these publications,

assess their contributions to the field, identify the advantages and limitations of different approaches, and explore possibilities for further improvement.

The gathered information from recent research and publications will serve as a foundation for the development of our article and the selection of an optimal approach towards developing a convolutional neural network for detecting ischemic heart diseases on X-ray images.

Keywords: Neural network, artificial intelligence, coronary heart disease, graph, Google Colab, Tensorflow, ResNet-50.

Соломатін Владислав Андрійович – аспірант кафедри математичного забезпечення ЕОМ, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

Байбуз Олег Григорович – завідувач кафедри математичного забезпечення ЕОМ, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

Сиротенко Андрій Євгенійович – хірург, завідувач Сурсько-Литовської амбулаторії ЗПСМ (КНП "ЦПМСД Сурсько-Литовської СР).

Solomatin Vladyslav – PhD Aspirant, Department of Computer Mathematical Support, Oles Honchar Dnipro National University.

Baibuz Oleh – Head of the Department of Mathematical Computer Support, Oles Honchar Dnipro National University.

Syrotenko Andrii - surgeon, head of the Sursko-Lytovsk Outpatient Clinic of the Sursko-Lytovsk`s VC.

О.В. Гуда, С.О. Кирилов, Л.О. Кирилова

МАТЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ, ОРІЄНТОВАНИХ НА ХМАРОВІ ОБЧИСЛЕННЯ

Анотація. Стаття дає детальний огляд дослідження, що концентрується на штучних нейронних мережах (ШНМ) та їх застосуванні в хмарових обчисленнях. Методи дослідження організаційного розвитку і змін на основі технологій штучного інтелекту і систем інтелектуальної підтримки представлені в площині: інтелектуальних експертних систем; індуктивних систем; семантичних мереж, нейронних мереж, генетичних алгоритмів. Мета дослідження. Дослідження спрямоване на вивчення та аналіз сучасних математичних систем, які використовуються для реалізації штучних нейронних мереж (ШНМ). Основний фокус роботи зосереджений на тому, як кожен штучний нейрон у мережі характеризується своїм поточним станом, що аналогічно до нервових клітин головного мозку, здатних бути збудженими або загальмованими. Подано детальний опис функціонування нейронів, включно з процесами сумування вхідних сигналів і активації за допомогою активаційних функцій. Особлива увага приділяється багатосаровим нейронним мережам та їх здатності формувати складні багатовимірні функції. Визначено методи побудови моделей ухвалення рішень, виходячи з аналізу нечітких ситуацій та еталонних станів, визначених експертами. Розглянуто процес зіставлення реальних станів ситуацій з еталонними для ухвалення оптимальних рішень. Описано важливість нечітких логічних операцій для визначення ступеню близькості різних ситуацій. Запропоновано нечіткі еталонні ситуації для хмарових обчислень та їх вплив на ухвалення рішень у різних сценаріях. Подано приклади реальних та гіпотетичних нечітких ситуацій, а також розглянуто способи визначення нечіткої відповідності між різними еталонними ситуаціями. Заключна частина анотації акцентує на можливостях та перевагах застосування подібних моделей в хмарних обчисленнях, підкреслюючи їх значення для розвитку організацій та систем.

Ключові слова: штучний інтелект, хмарові обчислення, нейронні мережі, нечіткі множини, параметри мережі, вхідні зв'язки, комбінаторна модель, еталонні ситуації.

Постановка проблеми. Актуальність проблеми, висвітленої у статті, полягає у необхідності адаптації та оптимізації штучних нейронних мереж (ШНМ) для ефективної роботи в середовищі хмарних обчислень. Сучасний розвиток технологій хмарних обчислень відкриває широкі можливості для масштабу-

вання та гнучкого управління ресурсами, що є критично важливим для комплексних систем, таких як ШНМ. Основна проблема полягає у створенні ефективних математичних та алгоритмічних рішень, які дозволяють використовувати потенціал хмарних технологій для підвищення швидкості та точності обробки даних за допомогою ШНМ. Враховуючи постійно зростаючий обсяг даних у різних сферах, від науки до бізнесу, важливість таких досліджень стає очевидною. ШНМ у хмарних обчисленнях можуть забезпечити не тільки швидку обробку великих масивів даних, але й пропонують підвищену гнучкість у розгортанні та масштабуванні нейромережових моделей [12]. Це відкриває нові можливості для розвитку штучного інтелекту та його застосування у різноманітних областях, від розпізнавання образів до передбачення трендів.

Таким чином, актуальність дослідження полягає у вирішенні ключових проблем інтеграції ШНМ і хмарних обчислень, які є фундаментальними для подальшого розвитку областей, пов'язаних зі штучним інтелектом та аналізом даних. Результати такого дослідження матимуть значний вплив на ефективність та можливості широкого спектру застосувань штучного інтелекту у майбутньому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Один з підкласів обговорюваної групи методів складають нейронні мережі, що використовують стохастичні алгоритми для прогнозування і управління безпечним розвитком суспільних процесів шляхом самоорганізації. Ці методи не припускають ніяких обмежень на характер вхідної суспільної інформації. Це можуть бути як індикатори цього тимчасового ряду, так і відомості про поведінку інших суспільних об'єктів [2, 4].

В наукових роботах [1, 8] зазначається що істотною перевагою апроксимації нейронною мережею в порівнянні з традиційними методами апроксимації служить незалежність точності апроксимації від розмірності входів. Тим самим усувається проблема максимально допустимої розмірності і найбільшого числа незалежних змінних, що робить непридатними традиційні методи апроксимації. Це робить нейромережовий підхід універсальним і незамінним для представлення складних булевих і інших функцій від великого числа аргументів. У теперішній час розвиваються методи оцінки точності апроксимації залежно від числа нейронів і побудови нейромереж із заданою точністю апроксимації за додаткових умов і обмежень на швидкість навчання нейромережі, структуру і топологію нейромережі, вид функції активації нейронів [11].

Під еволюційним проектуванням штучної (технічної) системи розуміється цілеспрямована розробка процесів її розвитку і зміни на основі аналогій з моделями природної еволюції. Еволюційне проектування лежить на стику теорії і методології автоматизованого проектування, розробки теоретичних основ інформатики і біологічних вчень про еволюцію. Еволюційне проектування припускає використання при рішенні завдань проектування і оптимізації систем сімейства комп'ютерних моделей еволюції (зокрема, генетичні і еволюційні алгоритми) і створення гібридних еволюційних моделей [3, 6].

Мета дослідження. Дослідження спрямоване на вивчення та аналіз сучасних математичних систем, які використовуються для реалізації штучних нейронних мереж (ШНМ). Особлива увага приділяється дослідженню можливостей інтеграції штучних нейронних мереж з хмаровими обчисленнями, оскільки це може забезпечити значні переваги у швидкості обробки даних та масштабованості.

Викладення основного матеріалу дослідження. Кожен штучний нейрон характеризується своїм поточним станом по аналогії з нервовими клітинами головного мозку, які можуть бути збуджені або загальмовані. Він має групу синапсів-однонаправлених вхідних зв'язків, сполучених з виходами інших нейронів, а також має аксон – вихідний зв'язок цього нейрона, з яким сигнал (збудження або гальмування) поступає на синапси наступних нейронів. Загальний вигляд штучного нейрона представлений на рисунку 1.

Оброблювана інформація про дані суспільних процесів має чисельний характер, що дозволяє використати ШНМ, наприклад, в якості моделі систем з абсолютно невідомими характеристиками. ШНМ є сукупністю нейронів, пов'язаних між собою певним чином. Нейрон – це елементарний елемент перетворення, що має непорожню безліч входів, на які поступають сигнали x_1, x_2, \dots, x_n (рис. 1.), підсумовуючий блок, блок перетворення сигналу за допомогою активаційної функції і один вихід – Y .

Кожному входу відповідає своя «вага» w_i що відповідає «силі» синаптичного зв'язку. Функціонує нейрон в два такти. На першому такті у блоці додавання, обчислюється величина збудження, отримані нейроном:

$$S = \sum_{i=1}^n x_i \times w_i = (X, W) \quad (1)$$

яку зручно представляти у вигляді скалярного вектору вхідних сигналів на вектор вагів. На другому такті сумарне збудження пропускається через активацій-

ну (перетворюючу) функцію F внаслідок чого визначається вихідний сигнал $Y=f(S)$.

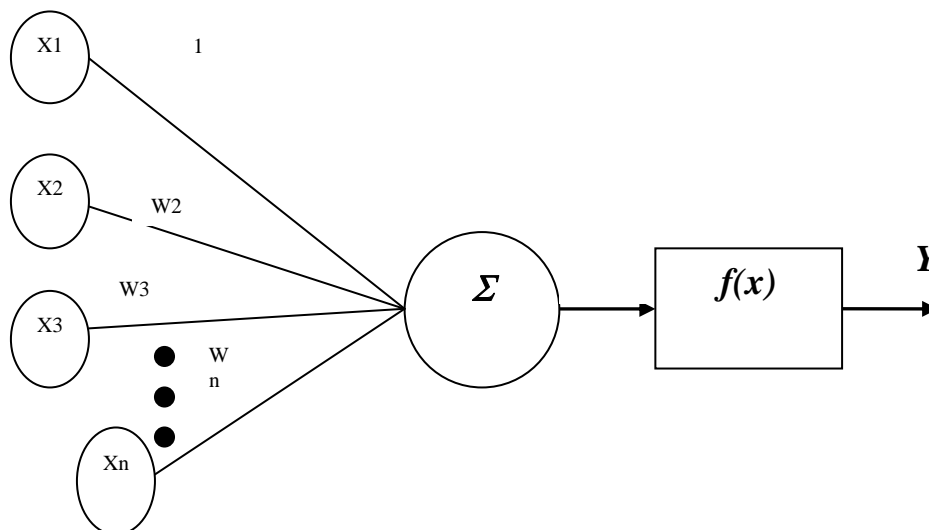


Рисунок 1 – Штучний нейрон для опису моделі орієнтованої на хмарові обчислення [9]

Багатошарова мережа може формувати на виході довільну багатовимірну функцію при відповідному виборі кількості шарів, діапазону зміни сигналів і параметрів нейронів. При цьому нейронна мережа реалізує наступне перетворення початкової функції [10]:

$$y = f(x) = F \left\{ \sum_{iN} w_{iN jN N} \dots \sum_{i2} w_{i2 j2 2} F \left\{ \sum_{i1} w_{i1 j1 1} \times x_{i1 j1 1} - \theta_{j1 1} \right\} - \theta_{j2 2} \dots \theta_{jN N} \right\} \quad (2)$$

де:

i – номер входу;

j – номер нейрона в шарі;

l – номер шару;

N – кількість шарів;

x_{ijl} – i -й вхідний сигнал j -го нейрона в шарі l ;

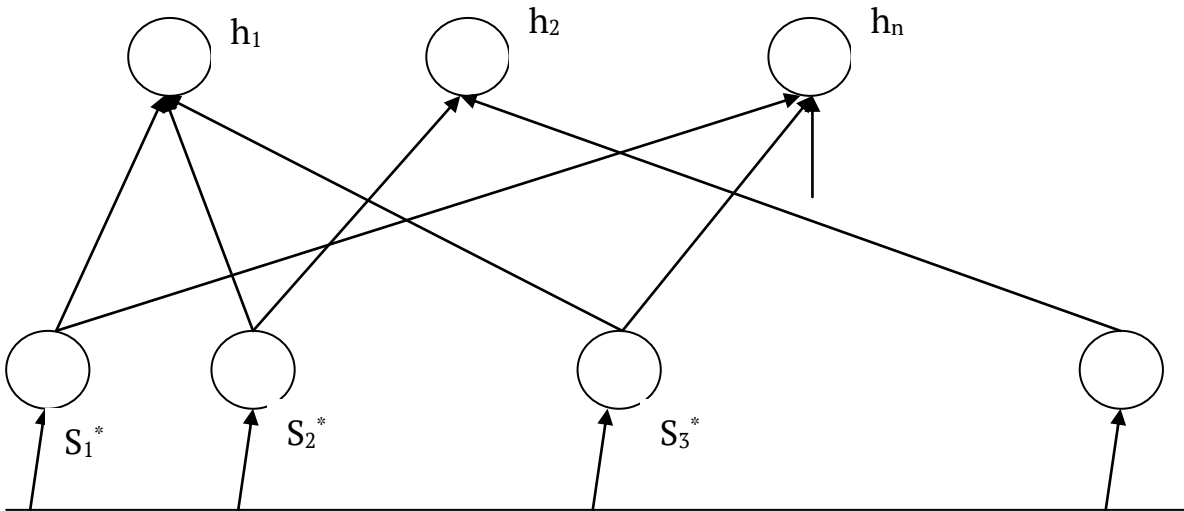
w_{ijl} – ваговий коефіцієнт i -й вхідного сигналу j -го нейрона в шарі l ;

θ_{jl} – пороговий рівень нейрона j в шарі l .

За рахунок почергового розрахунку лінійних комбінацій і нелінійних перетворень досягається апроксимація.

Кожній еталонній нечіткій ситуації експертами зіставлено комбінаторне рішення. Завдання вибору рішення про розвиток зводиться до зіставлення реального стану організації з еталонними станами. Необхідно виявити найбільш

близьку еталонну ситуацію реальної ситуації, а потім, відповідно до цієї нечіткої еталонної ситуації, здійснюється ухвалення комбінаторного рішення про параметри розвитку [13]. Суть роботи комбінаторної моделі штучного інтелекту ухвалення рішень про хмарові обчислення відображена на рисунку 2. Еталонні ситуації про можливі стани організаційного розвитку задаються у вигляді елементів великої множини $S^* = \{S_1^*, S_2^* \dots S_r^*\}$, безліч рішень і параметрах.



Реальні параметри розвитку

Рисунок 2 – Реальні параметри розвитку в моделі штучного інтелекту ухвалення рішень [14]

Розглянемо основні поняття нечіткої логіки, які в застосовані для побудови комбінаторної моделі варіацій забезпечення хмарових обчислень. Нечіткою ситуацією S називається нечітка множина другого рівня:

$$S = \left\{ \left\langle \mu_s \frac{\alpha_i}{\alpha_i} \right\rangle, \alpha_i \in A \right\} \quad (3)$$

де $\{\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_r\}$ – i -а лінгвістична змінна, яка характеризує i -у компоненту нечіткого стану S . Множина A має наступний вигляд:

$$A = \{\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n\} \quad (4)$$

У вигляді прикладу можна привести наступну нечітку ситуацію, яка вказує перспективи хмарових обчислень: {«0,1/»велика«>, <0,8/»середня«>, <0,4/»мала«> /»гарантія сталого розвитку«>, »0, 2/«велика»>, <0,6/«невеликий»>.

<1,0/«середній»>, <0,6/«малий»> /«рівень річного доходу»>, «0, 3/»велике»>, <0,6/»середнє»>, <0,1/»мале»> /»грошове накопичення »>}.

Стан перспектив хмарових обчислень характеризується деякою реальною нечіткою ситуацією S_i . Експертами для ухвалення рішення задаються еталонні нечіткі ситуації S_j . Для визначення ступеня близькості реальних і нечітких еталонних ситуацій застосуємо з нечіткої логіки такі операції як визначення ступеня включення, визначення ступеня нечіткої рівності, визначення ступеня нечіткої еквівалентності. Ступінь включення $S_i \rightarrow S_j$, $S_i \sqsubseteq S_j^*$, визначиться за формулами:

$$\begin{aligned} v(S_i, S_j^*) &= \&_{y \in Y} v(\mu_{S_i}(y), \mu_{S_j^*}(y)), \\ v(A, B) &= \&_{x \in X} (\mu_A(x) \rightarrow (\mu_B(x))), A \rightarrow B = \max(1 - A, B). \end{aligned} \quad (5)$$

Ступінь нечіткої рівності двох нечіткої безлічі S_i та S_j^* визначиться формулою:

$$\mu(S_i, S_j^*) = \&_{y \in Y} v(\mu_{S_i}(y), \mu_{S_j^*}(y)), \mu(S_i, S_j^*) = v(S_i, S_j^*) \& v(S_i, S_j^*) \quad (6)$$

Ступінь нечіткої рівності $\mu(S_i, S_j^*)$ визначається:

$$\begin{aligned} \mu(S_i, S_j^*) &= \&_{y \in Y} v(\mu_{S_i}(y), \mu_{S_j^*}(y)), \mu(S_i, S_j^*) = v(S_i, S_j^*) \& v(S_i, S_j^*) \\ \mu(S_i, S_j^*) &= \&_{y \in Y} \mu(\mu_{S_i}(y_i), \mu_{S_j^*}(y_i^*)), \\ C(\mu_{\mu_{S_i}(y_i)}(T_k^i), \mu_{\mu_{S_j^*}(y_i)}(T_k^i)) &= (\mu_{\mu_{S_i}(y_i)}(T_k^i) \leftarrow \rightarrow (\mu_{\mu_{S_j^*}(y_i)}(T_k^i)), \\ C(\mu_{\mu_{S_i}(y_1)}(T_k^i), \mu_{\mu_{S_j^*}(y_1)}(T_k^i)) &= (\mu_{\mu_{S_i}(y_1)}(T_k^i) \leftarrow \rightarrow (\mu_{\mu_{S_j^*}(y_1)}(T_k^i)), \\ \text{then } \mu_{\mu_{S_i}(y_i)}(T_k^i) \not\subseteq (1-t, t) \text{ and } \mu_{\mu_{S_j^*}(y_i)}(T_k^i) &\not\subseteq (1-t, t), \\ C(\mu_{\mu_{S_i}(y_i)}(T_k^i), \mu_{\mu_{S_j^*}(y_i)}(T_k^i)) = 1, \text{ then } \mu_{\mu_{S_i}(y_i)}(T_k^i) &\in (1-t, t), \\ \text{or } \mu_{\mu_{S_j^*}(y_i)}(T_k^i) &\in (1-t, t). \end{aligned} \quad (7)$$

Операції нечіткої еквівалентності визначиться формулою:

$$A \rightarrow B = \min \{ [\max(1 - A, B)], [\max(1 - B, A)] \}. \quad (8)$$

Розглянемо опис нечітких ситуацій. Нехай реальні параметри об'єкту будуть задані у вигляді множини $X = [X_1, X_2 \dots X_n]$.

Для кожного параметра X_i , задана область визначення $X^{(I)} = [di_{\min}, di_{\max}]$, де di_{\min} – мінімальна межа області визначення, di_{\max} – максимальна межа області визначення нечітких змінних з терм-множини лінгвістичної змінної, заданої на базовій безлічі X_i . Нечіткі еталонні ситуації S_j відповідно до визначення (11)

задаються таким чином. Нечіткі еталонні ситуації мають в позначенні справа вгорі символ «*», а для позначення реальних нечітких ситуацій цей символ не вживається. Визначається кількість нечітких еталонних ситуацій для забезпечення хмарових обчислень $R = |S^*|$, де $S^* = \{S_1^*, S_2^* \dots S_R^*\}$ – безліч нечітких еталонних ситуацій і для кожної нечіткої ситуації S_k експертами задаються значення ступенів приналежності нечітких великих кількостей $\mu_{S_k(\alpha_i)}$, визначених для відповідних лінгвістичних змінних [7]. В результаті проведених експертних опитувань отримуємо:

а) n – число лінгвістичних змінних, що характеризують напрям організаційного розвитку;

б) безліч лінгвістичних змінних:

$$\{ \prec \alpha_i, T(\alpha_i), XI, G_i, M_i \succ \}, i = \overline{1, n} \quad (9)$$

в) задані нечіткі множини:

$$C(\alpha_j) = \left[\prec \mu_{\alpha_j} \times \frac{x_1}{x_1} \succ \right], x_i \in XI \quad (10)$$

г) задані нечіткі множини другого рівня:

$$S^* = \left\{ S_k^* = \left\{ \prec \mu_{S_k^*} \frac{\alpha_i}{\alpha_i} \succ \right\} \right\}, i = \overline{1, n}, k = \overline{1, R} \quad (11)$$

Розглянемо приклад завдання безлічі S^* нечітких еталонних ситуацій. Нехай експертами визначено, що число $R=3$, тобто $S^* = \{S_1^*, S_2^* \dots S_R^*\}$ а число лінгвістичних змінних $N=5$. Експертами визначаються величини ступенів приналежності:

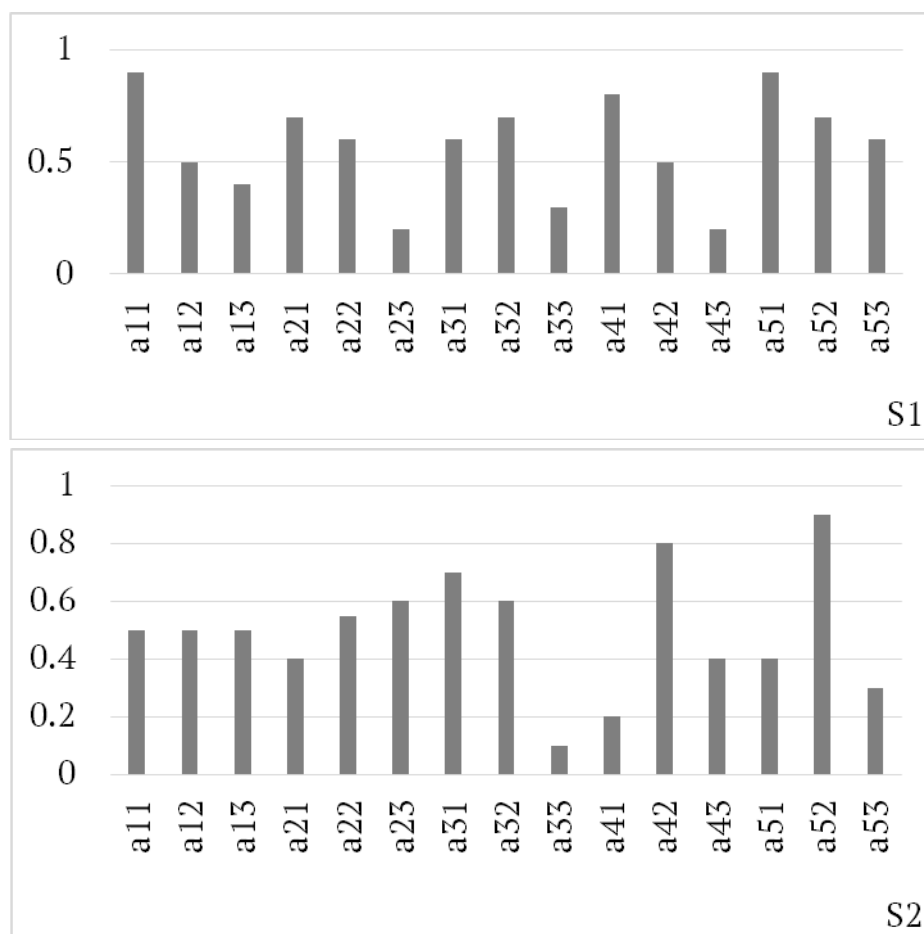
$$\mu_{S_k^*}(\alpha_i), k = \overline{1, 3}; i = \overline{1, 5} \quad (12)$$

Нехай, наприклад, безліч нечітких еталонних ситуацій забезпечення хмарових обчислень має вигляд:

$S^* \{ \{ \langle 0, 9 \rangle \text{«незадовільний»}, \langle 0, 5 \rangle \text{«задовільний»}, \langle 0, 1 \rangle \text{«хороший»} \} \text{«перший параметр стану»}, \{ \langle 0, 7 \rangle \text{«незадовільний»}, \langle 0, 6 \rangle \text{«задовільний»}, \langle 0, 15 \rangle \text{«хороший»} \} \text{«другий параметр стану»}, \{ \langle 0, 6 \rangle \text{«незадовільний»}, \langle 0, 7 \rangle \text{«задовільний»}, \langle 0, 3 \rangle \text{«хороший»} \} \text{«третій параметр стану»}, S \{ \{ \langle 0, 4 \rangle \text{«незадовільний»}, \langle 0, 8 \rangle \text{«задовільний»}, \langle 0, 5 \rangle \text{«хороший»} \} \text{«четвертий параметр стану»}, \{ \langle 0, 2 \rangle \text{«незадовільний»}, \langle 0, 9 \rangle \text{«задовільний»} \}$

$\langle 0,6/\text{«хороший»}/\text{«п'ятий параметр стану»}\rangle$, $\{ \text{«}0,5/\text{«незадовільний»}\rangle$,
 $\langle 0,5/\text{«задовільний»}\rangle$, $\langle 0,5/\text{«хороший»}\rangle/\text{«перший параметр стану»}\rangle$,
 $\langle 0,4/\text{«незадовільний»}\rangle$, $\langle 0,55/\text{«задовільний»}\rangle$ $\langle 0,6/\text{«хороший»}\rangle/\text{«другий пара-}$
 $\text{метр стану»}\rangle$, $\langle 0,7/\text{«незадовільний»}\rangle$, $\langle 0,6/\text{«задовільний»}\rangle$,
 $\langle 0,05/\text{«хороший»}\rangle/\text{«третій параметр стану»}\rangle$, $\text{«}0,2/\text{«незадовільний»}\rangle$,
 $\langle 0,75/\text{«задовільний»}\rangle$, $\langle 0,3/\text{«хороший»}\rangle/\text{«четвертий параметр стану»}\rangle$, $\langle 0,1$
 $/\text{«незадовільний»}\rangle$, $\langle 0,9/\text{«задовільний»}\rangle$, $\langle 0,25/\text{«хороший»}\rangle/\text{«п'ятий параметр}$
 $\text{стану»}\rangle$, $\{ \text{«}0,1/\text{«незадовільний»}\rangle$, $\langle 0,9/\text{«задовільний»}\rangle$,
 $\langle 0,5/\text{«хороший»}\rangle/\text{«перший параметр стану»}\rangle$, $\text{«}0,2/\text{«незадовільний»}\rangle$,
 $\langle 0,85/\text{«задовільний»}\rangle$, $\langle 0,45/\text{«хороший»}\rangle/\text{«другий параметр стану»}\rangle$,
 $\text{«}0,3/\text{«незадовільний»}\rangle$, $\langle 0,8/\text{«задовільний»}\rangle$, $\langle 0,4/\text{«хороший»}\rangle/\text{«третій}$
 $\text{параметр стану»}\rangle$, $\text{«}0,4/\text{«незадовільний»}\rangle$, $\langle 0,7/\text{«задовільний»}\rangle$,
 $\langle 0,35/\text{«хороший»}\rangle/\text{«четвертий параметр стану»}\rangle$, $\text{«}0,5/\text{«незадовільний»}\rangle$,
 $\langle 0,6/\text{«задовільний»}\rangle$, $\langle 0,5/\text{«хороший»}\rangle/\text{«п'ятий параметр стану»}\rangle$ } }.

На рисунку 3 приведений варіант завдання деяких гіпотетичних функцій приналежності в межах визначення параметрів забезпечення хмарових обчислень.



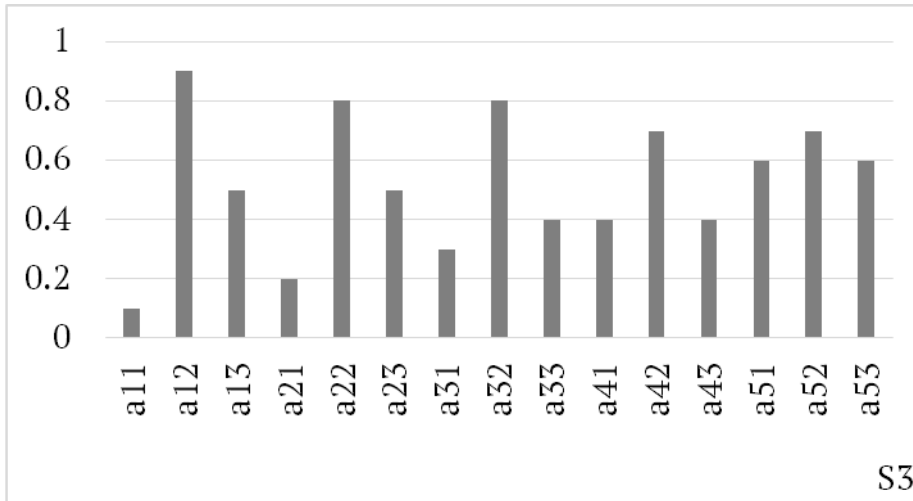


Рисунок 3 – Варіанти гіпотетичних функцій приналежності в межах визначення параметрів забезпечення хмарових обчислень

Помітимо, що в загальному випадку функції приналежності мають безперервний вигляд. На рисунку 3. функції мають дискретне розбиття у зв'язку з тим, що при розробці програми системи ухвалення рішення функції приналежності, що інформаційно-управляє, не можуть бути застосовані в аналоговому виді. Може існувати подія, в якій дана реальна нечітка ситуація S нечітко не дорівнює жодній з еталонних нечітких ситуацій S_i^* . В цьому випадку близькість реальної і нечіткої ситуації визначається із застосуванням поняття нечіткої спільності ситуацій [5].

Нечіткою $(p - q)$ -спільністю ситуацій називається така схожість ситуацій, коли нечіткі значення усіх ознак в ситуаціях нечітко рівні, окрім нечітких значень не більше, ніж q ознак (p – число лінгвістичних змінних).

Ступінь $(p-q)$ - спільності) $\chi_{p-q} = (S_i, S_j)$ ситуацій S_i і S_j визначається вразом:

$$\chi_{p-q} = (S_i, S_j) = \&_{y \in Y/Y_d} \mu(\mu_{s_i}(x), \mu_{s_i^*}(x)), |X_q| \prec q, \quad (13)$$

ознака x_k належить X_q , якщо $\mu(\mu_{s_i}(x), \mu_{s_i^*}(x)) \prec t$.

Нечітка відповідність на елементах безлічі S^* нечітких еталонних ситуацій і елементах множини H ухвалення рішень задається у вигляді трійки великих кількостей, в якій F , – нечітка множина в $S^* \times H$.

Ми вважаємо, що виділення еталонних ситуацій в системі забезпечення сталого забезпечення хмарових обчислень, за яким зіставляються у вигляді нечіткої відповідності рішення, що приймаються. Це є гідністю цієї моделі, оскільки в цьому випадку немає необхідності в завданні правил вибору рішень, що спрощує процедуру наладки системи ухвалення рішень, що інформаційно-управляє, побудованої із застосуванням цієї моделі. Можливі варіанти спрощення цієї моделі, пов'язані, наприклад, із завданням чіткої відповідності між елементами безлічі еталонних ситуацій і елементами безлічі рішень, що приймаються, про параметри розвитку.

Висновки. В статті розглянуті умови використання технологій штучного інтелекту для побудови моделей ухвалення рішень про напрямки та еталонні параметри забезпечення хмарових обчислень. Визначено, що нечіткий вибір визначається нечіткими правилами вибору, в структуру яких входять нечіткі відносини, що беруть участь у виборі і підлягають опрацюванню моделлю штучного інтелекту.

Визначені варіанти моделей нечіткого логічного висновку, які можуть бути застосовані в управляючій інформаційній системі забезпечення хмарових обчислень. Розроблений методичний підхід для суб'єктивного рішення у вигляді багатовимірної моделі на основі комбінаторної моделі штучного інтелекту для ухвалення рішень про хмарові обчислення. Розроблена модель класифікації, модель обчислення ступеня істинності нечітких правил виводу, ситуаційна модель ухвалення рішень, модель нечіткого вибору варіантів ухвалення рішень. Виконано порівняння моделей та показаний прийом формалізації параметрів при управлінні організаційним розвитком.

В статті були розроблені загальні вимоги до методів моделювання і структури системи ухвалення рішень для систем управління розвитком. Модель ухвалення рішення для системи управління розвитком організацій з нечітким описом параметрів будується на основі формалізації суб'єктивних знань фахівців-експертів (керівників організації). Формально визначений метод нечіткого вибору на основі теоретико-множинного підходу, із застосуванням можливостей аналізу нечітких початкових параметрів і нечітким завданням правил ухвалення рішень. Метод нечіткого вибору багато в чому визначається нечітким правилом вибору, логічний сенс, якісні і кількісні характеристики (складові) якого визначаються експертами.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Brynjolfsson E., McAfee A. Race Against the Machine: How the Digital Revolution is Accelerating Innovation, Driving Productivity, and Irreversibly Transforming Employment and the Economy. Lexington, Massachusetts: Digital Frontier Press. 2012. 244 p.
2. Hamill Jasper. Artificial muscle could make robots 15 times stronger than humans. New York Post. Last modified. 2017. September 19. URL: <https://nypost.com/2017/09/19/artificial-muscle-could-make-robots-15-times-stronger-than-humans/> (дата звернення 21.12.2023).
3. Hanelt A., Bohnsack R., Marz D., Antunes Marante C. A systematic review of the literature on digital transformation: Insights and implications for strategy and organizational change. Journal of Management Studies. 2021. Vol. 58. N°5. pp. 1159-1197. URL: <https://www.iglobal.com/pdf.aspx?tid=309395&ptid=277523&ctid=4&oa=true&isxn=9781799893783>. (дата звернення 21.12.2023).
4. Jin K. H., McCann M. T., Froustey E., Unser M. Deep convolutional neural network for inverse problems in imaging. IEEE Transactions on Image Processing. 2017. 26. pp. 4509–4522.
5. Liu S., Yan J., Zhang S., Lin H. Can the digital transformation of enterprise management improve the efficiency of input and output?. Management World. 2021. 37(05). pp. 170-190. DOI: 10.19744/j.cnki.11-1235/f.2021.0072.
6. Makedon V., Dzeveluk A., Khaustova Y., Bieliakova O., Nazarenko I. Enterprise multi-level energy efficiency management system development. International Journal of Energy, Environment, and Economics. 2021. Volume 29. Issue 1. pp. 73-91.
7. Masoud R., Basahel S. The Effects of Digital Transformation on Firm Performance: The Role of Customer Experience and IT Innovation. 2023. 3. pp. 109–126. DOI: <https://doi.org/10.3390/digital3020008>.
8. McAfee A., Brynjolfsson E. Machine, Platform, Crowd: Harnessing Our Digital Future. New York: W.W. Norton & Company, 2017. 340 p.
9. Ran Gilad-Bachrach, Nathan Dowlin, Kim Laine, Kristin Lauter, Michael Naehrig, John Wernsing. CryptoNets: Applying neural networks to encrypted data with high throughput and accuracy”. 2016. International Conference on Machine Learning 48:201-210; URL: <http://proceedings.mlr.press/v48/>. (дата звернення 21.12.2023).
10. Ross P., Maynard K. Towards a 4th industrial revolution. Intelligent Buildings International. 2021. 13(3). pp. 159-161. DOI: 10.1080/17508975.2021.1873625.

11. Selsam D., Lamm M., Bunz B., Liang P., de Moura L., and Dill D. L. Learning a sat solver from singlebit supervision. International Conference on Learning Representations, 2019. 278 p.
12. Shelukhin M., Kupriichuk V., Kyrylko N., Makedon V., Chupryna N. Entrepreneurship Education with the Use of a Cloud-Oriented Educational Environment. International Journal of Entrepreneurship. 2021. Volume 25. Issue 6. URL: <https://www.abacademies.org/articles/entrepreneurship-education-with-the-use-of-a-cloudoriented-educational-environment-11980.html>.
13. Wauters M. Vanhoucke M. A comparative study of Artificial Intelligence methods for project duration forecasting. Expert Systems With Applications. 2015. 46. pp. 249-261.
14. Zhang M. and Chen Y. Link prediction based on graph neural networks. Advances in Neural Information Processing Systems. 32nd Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2018). Montréal, Canada, 2018.

Received 08.12.2023.

Accepted 13.12.2023.

***Mathematical systems for implementation of artificial neural networks
oriented on cloud computing***

The article provides a detailed overview of research focusing on artificial neural networks (ANNs) and their applications in cloud computing. Research methods of organizational development and changes based on artificial intelligence technologies and intellectual support systems are presented in the plane of: intellectual expert systems; inductive systems; semantic networks, neural networks, genetic algorithms. The aim of the study. The research is aimed at the study and analysis of modern mathematical systems used to implement artificial neural networks (ANNs). The main focus of the work is on how each artificial neuron in the network is characterized by its current state, which is similar to nerve cells in the brain that can be excited or inhibited. A detailed description of the functioning of neurons is provided, including the processes of summation of input signals and activation using activation functions. Special attention is paid to multilayer neural networks and their ability to form complex multidimensional functions. The methods of building decision-making models based on the analysis of unclear situations and reference states determined by experts are defined. The process of comparing the real states of organizations with reference ones for making optimal decisions is considered. The importance of fuzzy logical operations for determining the degree of closeness of various situations is described. Fuzzy reference situations for cloud computing and their impact on decision-making in various scenarios are proposed. Examples of real and hypothetical fuzzy situations are given, and methods of determining

the fuzzy correspondence between different reference situations are also considered. The final part of the abstract emphasizes the possibilities and advantages of using such models in cloud computing, emphasizing their importance for the development of organizations and systems.

Keywords: artificial intelligence, cloud computing, neural networks, fuzzy sets, network parameters, input connections, combinatorial model, reference situations.

Гуда Оксана Вікторівна - к.т.н., доцент, доцент кафедри вищої математики Луцького національного технічного університету.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3602-7892>.

Кирилов Сергій Олександрович - кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри математики, фізики та астрономії Одеського національного морського університету. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6328-9361>.

Кирилова Людмила Олександрівна - кандидат фізико-математичних наук, доцент, старший викладач кафедри статистики та математичних методів в економіці Одеського національного економічного університету.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4577-242X>.

Huda Oksana - Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Higher Mathematics Lutsk National Technical University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3602-7892>.

Kyrylov Serhii - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent, Associate Professor of the Mathematics, Physics and Astronomy department Odessa National Maritime University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6328-9361>.

Kyrylova Liudmyla - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Statistics and Mathematical Methods in Economics Odesa National Economic University.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4577-242X>.

В.У. Ігнаткін, Ю.О. Шульжик, В.С. Дудніков, О.П. Юшкевич

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ
В ІЄРАРХІЧНИХ СТРУКТУРАХ ДЕРЖАВНОГО УПРАВЛІННЯ
З НЕЛІНІЙНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

Анотація. Останнє десятиріччя характеризуються великою кількістю досліджень державних і суспільних діячів, яке можна назвати як епоху глибоких (докорінних) і швидких змін. Суспільство переживає якісні зміни і серйозні виклики, тому існує, свого роду парадокс, коли імперативи нової епохи змушують розробляти теоретичний базис в семантичному полі здорового глузду, що асоціюється з постійністю та якісними змінами в політичному, економічному та соціальному житті [1, 2, 3].

У державному управлінні та органах місцевого самоврядування відносини між людьми, швидка непрогнозована зміна ситуації в країні та в регіонах (політична, економічна, соціальна, тощо) є нелінійними системами управління. Більше того, будь яка фізична система при її докладнішому дослідженні завжди є нелінійною. Ефективність управління нелінійною системою з урахуванням збурюючих чинників залежить від точності прогнозування динаміки змін окремих елементів такої системи. Це є багатоаспектна проблема [15].

Характерною особливістю нелінійних ієрархічних структур (НІС) в публічній службі (державному управлінні – ДУ та місцевому самоврядуванні – МС) є безперервно дискретна зміна процесів розвитку подій, що відрізняє їх від інших внутрішніх та зовнішніх впливів, таких як спричиняють перетворення лінійного зв'язку на нелінійний, що в кінцевому результаті призводить до нових змін. Це – по перше.

По друге, відносини «суб'єкт об'єкт» можуть мати неузгоджені дії, викликані реальними обставинами. Такі неузгоджені дії можуть ще більше виникати в перехідних процесах суспільства (наприклад, швидкості їх протікання) внаслідок інерційності окремих елементів чи самої соціальної системи в цілому. Внаслідок цих явищ порушується лінійний зв'язок між дискретними змінами і змінюється попередня ієрархічна структура, що веде до нелінійних інформаційних зв'язків в державному управлінні (ДУ) та органах місцевого самоврядування (МС). Наприклад, Г. Почепцов та інші науковці пов'язують цю нелінійність із хаосом, зростанням складності суспільних процесів, глобалізацією, з загрозою державній безпеці, прояву непередбачуваності та нестабільності [1 5].

Процесу управління в новому стані ДУ та МС ставляться жорсткі вимоги:

- пружність системи управління;*

«Системні технології» 6 (149) 2023 «System technologies»

- система повинна описуватись як безперервно дискретна (її динаміка);
- процес управління повинен забезпечувати необхідну точність співпадання пока зників нового стану системи з попереднім.

У новоутворених нелінійних ієрархічних структурах (НІС) в ДУ та МС з'являється ряд проблем:

- недостатність апріорної інформації щодо процесів з нелінійними зв'язками;
- неточність структурної ідентифікації;
- неточність вибору критеріїв оцінювання ситуації;
- реструктуризаційні процеси;
- неправильність вибору станів природи;
- неправильності визначення вагомості вибраних критеріїв за шкалою важливості;
- невірно вибрана залежність альтернатив від критерію;
- недостатня ступінь усвідомлення складності ситуації.

Вирішення вищевказаних проблем вимагає проведення експериментальних досліджень. Якщо процес стабілізації НІС в ДУ розглядати як об'єкт регулювання, то достатньо встановити залежність цієї стійкості від управляючої дії і основного збурення, а всі інші дії розглядати як збурення на об'єкт дослідження. Такий опис буде відображати основні динамічні характеристики такого процесу і буде достатнім для синтезу та розробки системи оптимального регулювання з метою досягнення стійких (сталих) процесів в таких системах (в т. ч. ДУ та МС).

В подальшому до ДУ будемо підходити як до нелінійної ієрархічної системи (НІС) і зобразимо НІС як багатовимірну безперервну систему, в якій стан природи – є величина регульована, а входом є дія управлінців в ДУ та МС (прийняті ними управлінські рішення – ПУР) щодо регулювання, координації та збурення, що діють на систему.

Ключові слова: державне управління, місцеве самоврядування, нелінійна ієрархічна система, управлінське рішення, математичне моделювання.

Постановка задачі

Розробити ряд математичних моделей процесу зміни віддаленості елементів НІС в ДУ одна від одної стосовно управляючої дії (при умові перетворення лінійних зв'язків – на нелінійні) і оцінити зміни попереднього стану на всіх рівнях ієрархічної структури НІС.

Основна частина

На основі вказаних припущень розроблено ряд математичних моделей процесу зміни віддаленості елементів системи одна від одної (з перетворенням лінійного зв'язку на нелінійний) від управляючої дії.

Блок-схема процесу зміни віддаленості елементів системи одна від одної (з перетворенням лінійного зв'язку на нелінійний) від управляючої дії зображена на рис.1.

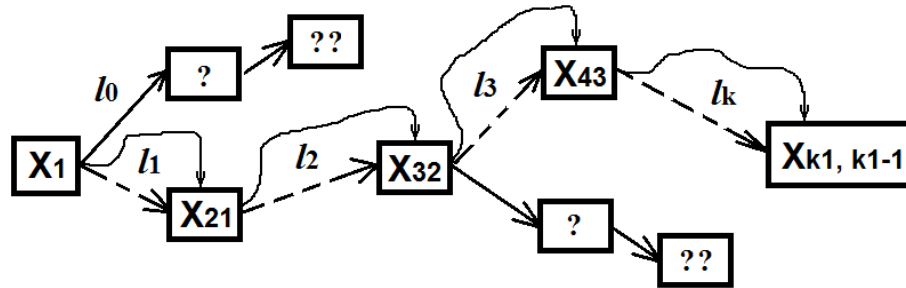


Рисунок 1 – Блок-схема процесу зміни віддаленості елементів системи одна від одної (з перетворенням лінійного зв'язку на нелінійний) від управляючої дії

Розглянемо нашу нелінійну ієрархічну систему в ДУ та МС більш детально. Як обґрунтовано вище, процес зміни віддаленості елементів системи одна від одної (з перетворенням лінійного зв'язку на нелінійний) від управляючої дії вважатимемо неперервним процесом і багатомірним об'єктом управління. Регульованою змінною об'єкта є зміни віддаленості елементів системи одна від одної (з перетворенням лінійного зв'язку на нелінійний) від управляючої дії.

За вхідні змінні об'єкта беремо зовнішні збурення на об'єкт управління на певних стадіях управління і лінійну зміну стану об'єкта внаслідок зміни в середині системи управління, які можуть бути регулюючою дією. Припустимо, що новоутворені нелінійні зв'язки не впливають на внутрішню структуру об'єкта управління.

Запишемо в операторній формі зміну лінійного зв'язку на вході k -ого елемента структури:

$$P_{k\text{ вх}}(S) = \frac{1}{T_{k-1}S+1}P_{k-1}(S) + \frac{T_{k-1}S}{T_{k-1}S+1}\Delta P_{c(k-1)}(S), \quad (1)$$

де P_{k-1} – зміна лінійного зв'язку на попередній ієрархічній сходинці (попередньому ієрархічному рівні);

$\Delta P_{c(k-1)}$ – зміна структури зв'язку (реструктуризація зв'язку).

Підкреслимо, що зміна структури зв'язку

$$\Delta P_{c(k-1)} = P_{c(k-1)} - P_{c(k-2)}, \quad (2)$$

де $P_{c(k-1)}, P_{c(k-2)}$ – зміна події на певній ділянці внаслідок додаткової зміни в середині ієрархічної структури.

Аналогічно можна записати в операторній формі зміну структури зв'язку на вході k -ої ділянки

$$P_{k \text{ вих}}(S) = \frac{1}{T_k S + 1} P_k(S) + \frac{T_k S}{T_k S + 1} \Delta P_{ck}(S). \quad (3)$$

Тут
$$\Delta P_{ck}(S) = P_{ck}(S) - P_{c(k-1)}(S) \quad (4)$$

Зміна структури зв'язку, визначається як інтеграл різниці зміни структури зв'язку на виході і вході відповідної ділянки управління з урахуванням запізнення прийняття управлінського рішення в операторній формі запису

$$X_{k, k-1}(S) = \frac{1}{S} [P_{k \text{ вих}}(S) - e^{-T_k S} P_{k \text{ вх}}(S)]. \quad (5)$$

Зауважимо, що зміна структури зв'язку викликає безпосередню дію на безпосередній елемент ієрархічної структури і додаткову дію на зміну зв'язків на вищих ієрархіях нелінійної ієрархічної структури. Утворення нового нелінійного зв'язку впливає на зміну структури зв'язку на всіх наступних елементах НІС в ДУ та МС.

Вважаємо, що $P_{c1} = 0$. Тоді з рівняння (5) з урахуванням (1) – (4) отримаємо залежність зміни структури зв'язку на даному рівні ієрархії відносно попереднього (нижчого) рівня від управляючої стабілізуючої дії

$$\begin{aligned} X_{21}(S) &= \frac{1}{T_1 S + 1} [P_{c2}(S) - P_{c1}(S)] , \\ X_{32}(S) &= \frac{1}{T_2 S + 1} [P_{c3}(S) - P_{c2}(S)] + \frac{T_1}{T_2(T_1 S + 1)} \times \\ &\quad \times \left(\frac{1}{T_2 S + 1} - e^{-T_2 S} \right) [P_{c2}(S) - P_{c1}(S)] , \\ X_{43}(S) &= \frac{1}{T_3 S + 1} [P_{c4}(S) - P_{c3}(S)] + \frac{T_2}{T_3(T_2 S + 1)} \times \\ &\quad \times \left(\frac{1}{T_3 S + 1} - e^{-T_3 S} \right) [P_{c3}(S) - P_{c2}(S)] + \frac{T_1}{T_3(T_1 S + 1)(T_2 S + 1)} \\ &\quad \times \left(\frac{1}{T_3 S + 1} - e^{-T_3 S} \right) [P_{c2}(S) - P_{c1}(S)], \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} X_{k, k-1}(S) &= \frac{1}{T_{(k-1)S+1}} [P_{ck}(S) - P_{c(k-1)}(S)] + \frac{T_{(k-2)}}{T_{(k-1)}(T_{(k-2)S+1}} \times \\ &\quad \times \left(\frac{1}{T_{(k-1)S+1}} - e^{-T_{(k-1)S}} \right) [P_{c(k-1)}(S) - P_{c(k-2)}(S)] + \dots + \\ &+ \frac{T_1}{T_k \prod_{k=0}^{k-1} (T_k S + 1)} \left(\frac{1}{T_k S + 1} - e^{-T_k S} \right) [P_{c2}(S) - P_{c1}(S)] . \end{aligned}$$

Така управляюча дія впливає на зміну структури і на наступних рівнях ієрархії НІС. Встановлено, що чим далі розміщений рівень ієрархії від місця

льшого аналізу і розробки систем підтримки прийняття рішень (СППР) для НІС в ДУ та МС з використанням новітніх інформаційних технологій (НІТ).

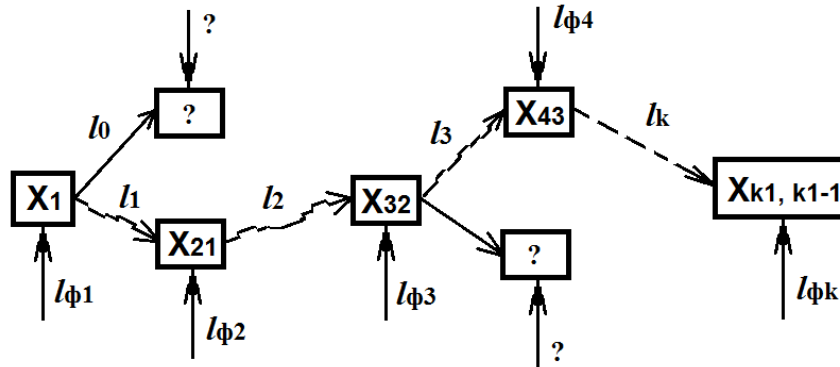


Рисунок 2 – Блок-схема моделі зміни структури НІС в ДУ при збурюючій дії, яка призводить до утворення нелінійного зв’язку

Проведені дослідження [10, 11] підтвердили доцільність використання програмних комплексів «Салют», «Сузір’я», «Консультант» та «Прорив» [9]. Однак для структур з нелінійними зв’язками вони не усувають проблеми прийняття управлінських рішень у вищенаведених ситуаціях (таких, що швидко змінюються, а також при недостатній апріорній інформації). Використання відомих на сьогоднішній день програмних засобів створює певні додаткові труднощі та незручності при прийнятті УР. До того ж необхідний додатковий час, а в досліджуваних нами ситуаціях він повинен бути – мінімальним.

З проведеного аналізу випливає, що для прийняття УР для НІС потрібно розробити інший підхід побудови програмних комплексів, які б мали інші алгоритми роботи.

За структурною схемою рис.3. можна отримати залежності зміни віддаленості елементів системи одна від одної (з перетворенням лінійного зв’язку на нелінійний) від управляючої дії.

Залежність прийнятого управлінського рішення (УР) на власному рівні ієрархії (для довільної ієрархічної сходинки) при умові, що час проходження інформації по нелінійних комунікаційних зв’язках на всіх ієрархіях однаковий ($T_k = T_{k-1} = \dots = T_2 = T_1$)

$$X_{k, k-1}(S) = \frac{1}{T_1 S + 1} P_{ck}(S). \quad (8)$$

Досліджуваний процес є інерційним об’єктом першого порядку. Зміна віддаленості елементів системи одна від одної (з перетворенням лінійного

зв'язку на нелінійний) від управляючої дії залежить від місця прикладання управляючої дії та місця спостереження «суб'єкта».

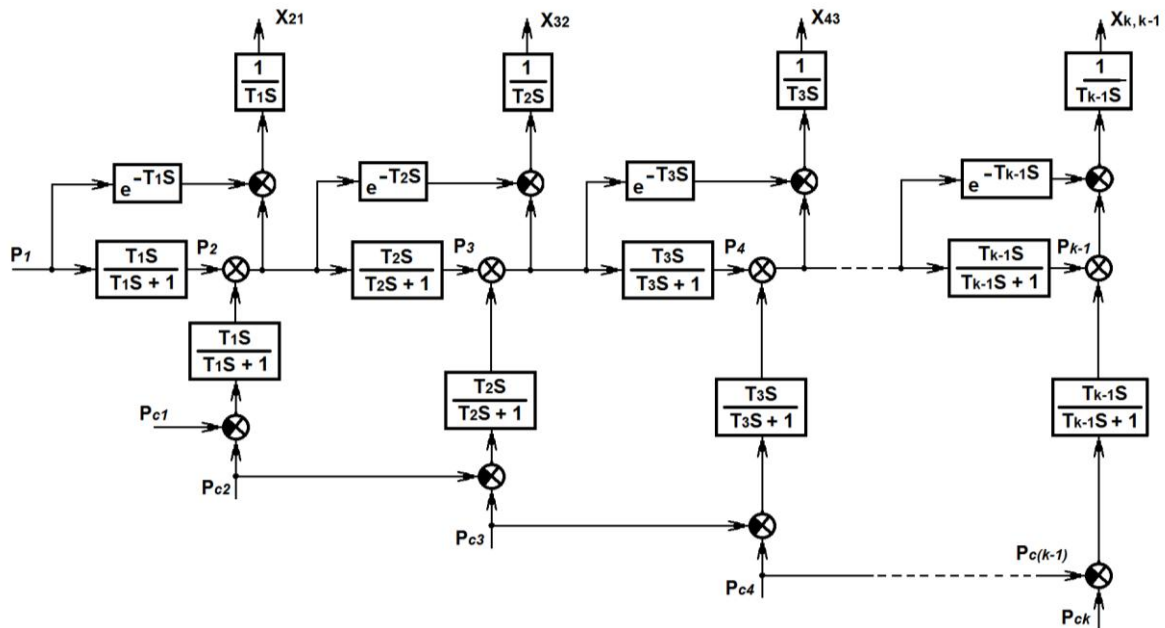


Рисунок 3– Структурна схема моделі НІС при зміні віддаленості елементів системи одна від одної (з перетворенням лінійного зв'язку на нелінійний) від управляючої дії

За структурною схемою рис. 4. запишемо залежність зміни віддаленості елементів системи одна від одної (з перетворенням лінійного зв'язку на нелінійний) від управляючої дії припустивши взаємну впливовість новоутворених підсистем

$$X_{k, k-1}(S) = \left[\frac{1}{T_1 S + 1} \left(\frac{1}{T_1 S + 1} - e^{-T_1 S} \right) - \frac{1}{T_1 S + 1} \right] P_{k-1}(S). \quad (9)$$

Цю залежність можна розділити на дві складові. Перша складова, яка визначається виразом

$$\frac{1}{T_1 S + 1} - e^{-T_1 S}, \quad (10)$$

за наявності ступеневої взаємодії управляючої дії буде мати згасаючий характер. Друга складова, яка визначається виразом

$$- \frac{1}{T_1 S + 1} \quad (11)$$

має кінцеве значення (тільки зворотнього знаку).

Для прикладу, за структурною схемою рис. 2 запишемо залежність зміни віддаленості елементів системи одна від одної (з перетворенням лінійного зв'язку на нелінійний) від управляючої дії на другому рівні ієрархії

$$X_{32}(S) = \left[\frac{1}{T_1 S + 1} \left(\frac{1}{T_1 S + 1} - e^{-T_1 S} - 1 \right) \right] P_{ck2}(S), \quad (12)$$

$$X_{43}(S) = \left[\left(\frac{1}{(T_1 S + 1)^2} - \frac{1}{T_1 S + 1} \right) \left(\frac{1}{T_1 S + 1} - e^{-T_1 S} \right) \right] P_{ck2}(S),$$

$$X_{54}(S) = \left[\left(\frac{1}{(T_1 S + 1)^3} - \frac{1}{(T_1 S + 1)^2} \right) \left(\frac{1}{T_1 S + 1} - e^{-T_1 S} \right) \right] P_{ck2}(S),$$

$$X_{k, k-1}(S) = \left[\left(\frac{1}{(T_1 S + 1)^{k-2}} - \frac{1}{(T_1 S + 1)^{k-3}} \right) \left(\frac{1}{T_1 S + 1} - e^{-T_1 S} \right) \right] P_{ck2}(S). \quad (13)$$

Якщо в отриманих залежностях (12) оператор S вважати рівним нулю, то отримаємо залежність зміни віддаленості елементів системи одна від одної (з перетворенням лінійного зв'язку на нелінійний) від управляючої дії в усталеному режимі $X_{32} = -P_{c2}$, а всі інші зміни віддаленості елементів системи одна від одної (з перетворенням лінійного зв'язку на нелінійний) від управляючої дії $X_{43}, X_{54}, \dots, X_{k, k-1} = 0$.

Таким чином, обґрунтовано, що взаємна впливовість в усталеному режимі не впливає на зміни віддаленості елементів системи одна від одної (з перетворенням лінійного зв'язку на нелінійний) від управляючої дії на наступних рівнях ієрархії НІС, починаючи з третьої. Чим далі розташований ієрархічний рівень від місця прийняття УР, тим менший, відповідно до (13) вплив регіональних елементів НІС один на одного (надалі будемо оперувати терміном «взаємо впливовості» елементів).

Підкреслимо, що найбільший вплив взаємо впливовості елементів НІС (як підсистем чи складних елементів НІС) – на першому (найнижчому) ієрархічному рівні. Це є недоліком при прийнятті оптимального УР.

Безпосередня регулююча дія «суб'єкта» управління на зміну віддаленості елементів системи одна від одної (з перетворення лінійного зв'язку на нелінійний) створюється тому, що зміна і в без того слабо структурованій НІС викликає стрибкоподібну реакцію «об'єкта» управління. Тобто взаємо впливовість губиться і прийняте управляюче рішення має затримку на час T_1 .

Зазначимо, що при цьому повністю зберігається попередня управляюча дія «суб'єкта» на «об'єкт», оскільки змінюється відстань між елементами НІС за рахунок новоутвореного нелінійного зв'язку (в переважній більшості випадків – він є коротшим).

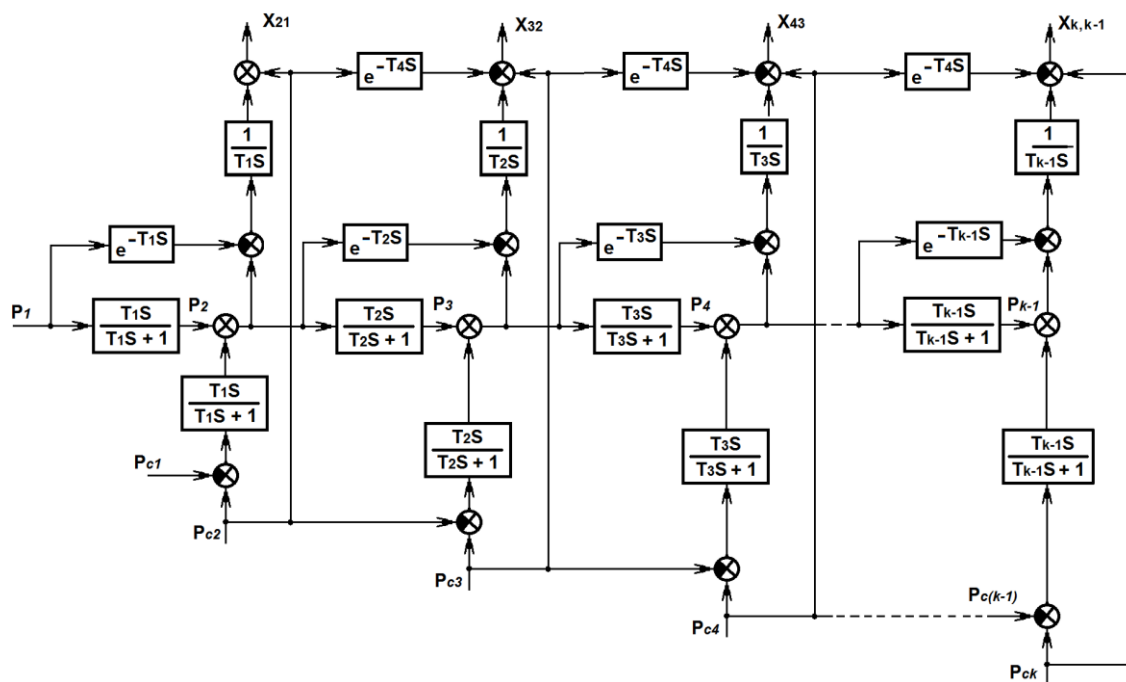


Рисунок 4– Структурна схема моделі НІС при зміні віддаленості елементів системи одна від одної (з перетворенням лінійного зв’язку на нелінійний) від управляючої дії при взаємній впливовості новоутворених підсистем

Враховуючи вищесказане

$$X_{k, k-1}(S) = \left(1 + \frac{1}{T_1 S + 1} \right) P_{ck}(S). \quad (14)$$

Після перетворень

$$X_{k, k-1}(S) = \frac{T_1 S + 2}{T_1 S + 1} P_{ck}(S). \quad (15)$$

Звідси робимо висновок, що процес зміни віддаленості елементів системи одна від одної (з перетворенням лінійного зв’язку на нелінійний) від управляючої дії є своєрідним «форсуючим» об’єктом.

Залежність зміни віддаленості елементів системи одна від одної (з перетворенням лінійного зв’язку на нелінійний) від управляючої дії на довільному рівні ієрархії (ієрархічної структури) НІС, що прикладена до попередньої, отримаємо з рівняння (9), врахувавши вище згадане запізнення

$$X_{k, k-1}(S) = \left[\frac{1}{T_1 S + 1} \left(\frac{1}{T_1 S + 1} - e^{-T_1 S} - 1 \right) + e^{-T_1 S} \right] P_{c(k-1)}(S). \quad (16)$$

Якщо в рівняннях (15) та (16) оператор S прирівняти до нуля, то отримаємо залежність зміни віддаленості елементів системи одна від одної (з перетворенням лінійного зв’язку на нелінійний) від управляючої дії в сталому режимі

$$X_{k, k-1} = 2 P_{ck}, \quad X_{1k, k-1} = 0 P_{c(k-1)}. \quad (17)$$

Таким чином, в сталому режимі взаємо впливовість, не впливає на зміну віддаленості елементів системи одна від одної (з перетворенням лінійного зв'язку на нелінійний) від управляючої дії на наступному (вищому) рівні ієрархії НІС, що є перевагою цього методу для прийняття оптимального УР.

На підставі (14) та (16) побудовано структурну схему моделі зміни віддаленості елементів системи одна від одної. Побудована схема стала базовою для цифрового моделювання процесу самого процесу зміни віддаленості елементів системи одна від одної від управляючої дії та подальшого розрахунку параметрів управління НІС в ДУ та МС.

Запишемо залежність зміни віддаленості елементів системи одна від одної для довільного ієрархічного рівня НІС

$$X_{k, k-1}(S) = P_{Fck}(S), \quad (18)$$

де P_{Fck} – УР, що враховує зміну віддаленості між елементами НІС.

Звідси робимо висновок, що процес зміни віддаленості елементів системи одна від одної (з перетворенням лінійного зв'язку на нелінійний) від управляючої дії на попередньому ієрархічному рівні НІС

$$X_{k, k-1}(S) = e^{-T_k S} P_{Fc(k-1)}(S). \quad (19)$$

Взаємна регулююча управлінська дія ЛПП впливає на зміну часу проходження УР на віддалені елементи НІС, розташування один від одного, від управляючої дії на наступний ієрархічний рівень НІС з часом запізнення T_k . Це запізнення обумовлене часом проходження управлінської інформації до наступного ієрархічного рівня.

Підкреслимо, що взаємо впливовість складних елементів (як підсистем) в НІС діє на зміну їх віддаленості один від одного. На основі (18) та (19) запишемо систему рівнянь, що описує залежність зміни віддаленості елементів НІС від управлінської дії

$$\begin{aligned} X_{21}(S) &= P_{Fc2}(S), \\ X_{32}(S) &= P_{Fc3}(S) + e^{-T_1 S} P_{Fc2}(S), \\ X_{43}(S) &= P_{Fc4}(S) + e^{-T_1 S} P_{Fc3}(S), \\ X_{k, k-1}(S) &= P_{Fck}(S) + e^{-T_1 S} P_{Fc(k-1)}(S). \end{aligned} \quad (20)$$

На підставі системи рівнянь (20) побудовано структурну схему моделі підсистеми НІС (рис. 5), де координуюча дія ЛПП створюється при використанні відомих алгоритмів ПУР. З аналізу (20) випливає, що процес зміни віддаленості

елементів системи один від одного – безінерційний об’єкт, що є перевагою способу прийняття УР для даної НІС. Процес зміни віддаленості елементів системи одна від одної (з перетворенням лінійного зв’язку на нелінійний) від управлінської дії – об’єкт із запізненням, обумовленим часом проходження управлінської інформації, що є недоліком цього способу прийняття оптимальних УР.

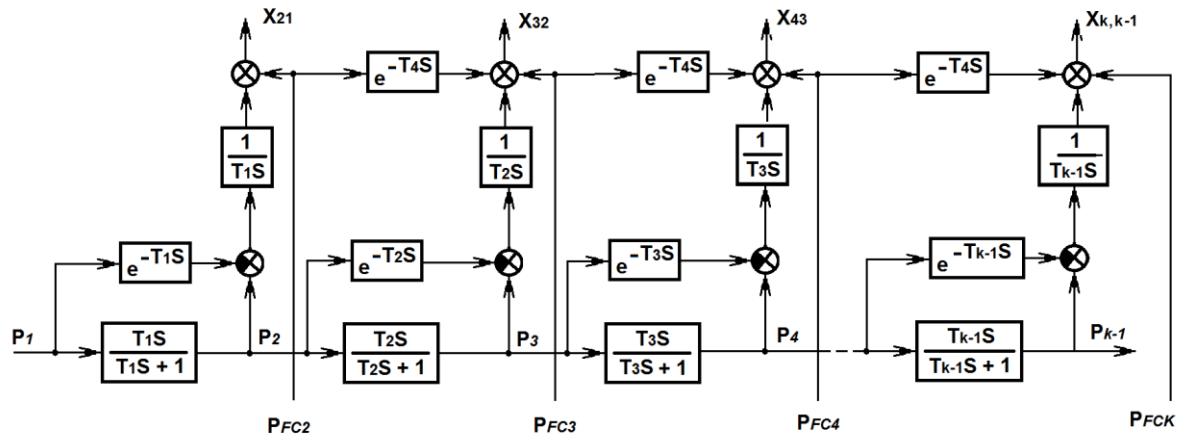


Рисунок 5– Структурна схема моделі підсистеми НІС, де координуюча дія ЛПР створюється при використанні відомих алгоритмів ПУР

Підкреслимо, що взаємо впливовість впливає не тільки на сусідні ієрархічні рівні, що свідчить недолік даного методу прийняття УР. З проведеного аналізу процесу зміни віддаленості елементів системи одна від одної (враховуючи перетворення лінійного зв’язку на нелінійний) від управлінської дії можна зробити наступний висновок – процес зміни є інерційним об’єктом першого порядку. Недоліком цього є значна інерційність і великий взаємний вплив УР при зміні відстані між ієрархічними елементами НІС для проходження інформації на наступних ієрархічних рівнях. Процес зміни є в т. ч. «форсуючим» об’єктом управління. Взаємо впливовість діє на таку зміну у перехідних періодах.

Основною перевагою цього підходу до прийняття УР є достатньо висока швидкодія, незважаючи на наявність запізнення надходження інформації про стан досліджуваних процесів. Ще однією перевагою є простота реалізації.

Підкреслимо, що найбільш універсальним і гнучким способом прийняття УР є комбінований. Зазначимо також, що для поліпшення управлінських процесів в НІС в ДУ потрібно враховувати і компенсувати взаємо впливовість елементів досліджуваної структури.

Оскільки отримання експериментальних даних має ряд об'єктивних причин, то свого часу було вирішено провести моделювання процесів управління НІС в ДУ та в органах місцевого самоврядування на ПК. Цифрове моделювання управлінських процесів в НІС в ДУ та МС, а також програмна реалізація комп'ютерної підтримки прийняття оптимальних управлінських рішень при моделюванні можливих ситуацій в системах з нелінійними зв'язками частково нами апробовано при ПУР в державних структурах та в органах місцевого самоврядування у Львівській та Дніпропетровській областях [14-17] (апробацію підтверджено актами впровадження у 2003-2015рр.).

На даний час побудовано нові математичні моделі, що описують процес зміни віддаленості елементів один від одного в НІС в ДУ від управлінської дії, який є багатомірним взаємозв'язаним об'єктом управління. Регульованою величиною є зміна проходження інформації та зміна віддаленості самих підсистем (як складних елементів) НІС.

Основні завдання моделювання:

- дослідження впливу стрибкоподібних явищ на зміну віддаленості елементів системи один від одного (з перетворенням лінійного зв'язку на нелінійний) від управлінської дії;
- аналіз результатів моделювання.

У статті використано структурний метод цифрового моделювання на ПК з використанням останніх версій програмних комплексів «Салют – 2» та «Прорив – 3» [9, 10], а також програми оцінювання ризику переростання конфліктної ситуації у збройний конфлікт (програмний комплекс М-7) [19], які дозволяють подати процес зміни віддаленості елементів системи один від одного від управляючої дії у природному базисі, а також перевірити результати досліджень на еластичність. Особливість моделювання процесу зміни віддаленості елементів системи один від одного від управлінської дії в тому, що він описується диференціальними рівняннями із зміщеним аргументом, який обумовлений часом розвитку подій.

Перевага структурного методу моделювання полягає в тому, що відповідний апарат здійснює автоматично побудову та розв'язок диференціальних рівнянь і рівнянь із зміщеним аргументом усіх змінних моделі в перехідних процесах (соціальних, політичних, економічних та ін.).

Опис основних елементів структурних моделей НІС і програм виконано на алгоритмічних мовах високого рівня Turbo Pascal, Delphi, C++, Java, JavaScript. Опис має певну точність, де дії ЛПП та операції, що виконуються нею (як опе-

рації чисельного інтегрування) здійснюються з використанням наближених формул [10, 11, 17, 18].

Процедури мов програмування на ПК поділяються на три основні підгрупи:

- I) початкові – встановлюють тривалість nT моделювання, величину кроку H моделювання та початкові значення всіх змінних, коефіцієнтів та сталу часу T_1 ;
- II) представляючі – здійснюють представлення елементів НІС та структурної моделі процесу зміни віддаленості елементів підсистем одна від одної (при перетворенні лінійного зв'язку на нелінійний) від управляючої дії на необхідних мовах програмування;
- III) управляючі – виконують дії в програмі і задають формати вхідних і вихідних даних.

Результати цифрового моделювання на ПК плануємо отримати у вигляді таблиць і графіків. У статті ж подані тільки графіки зміни цих процесів. Стала часу ПУР – T_1 нормована для окремо взятої задачі.

Основними збуреннями є зовнішні чинники. Зміна віддаленості елементів один від одного (при перетворенні лінійного зв'язку у нелінійний) від управлінської дії описується системою рівнянь (7), якій відповідає структурна схема рис. 2. Якщо у цій структурній схемі прийняти, що $P_{ск} = 0$, відповідно $= 0$ або застосувати відповідний вираз

$$\frac{T_1 S}{T_1 S + 1} = 0 \quad (21)$$

то отримаємо блок-схему моделі процесу зміни віддаленості елементів структури нової НІС (при перетворенні лінійного зв'язку у нелінійний) від управляючої дії за наявності основного збурення – стрибкоподібного відхилення, яке описується катастрофою типу «скрутка», викликані збурюючі міччинниками.

Підкреслимо, що для моделювання досліджуваних процесів у структурній схемі (рис.6) введено додаткові компенсуючі ланки затримки e^{-TS} . Крім того, введено додаткові позначення проміжних змінних, які необхідні для складання програми цифрового моделювання.

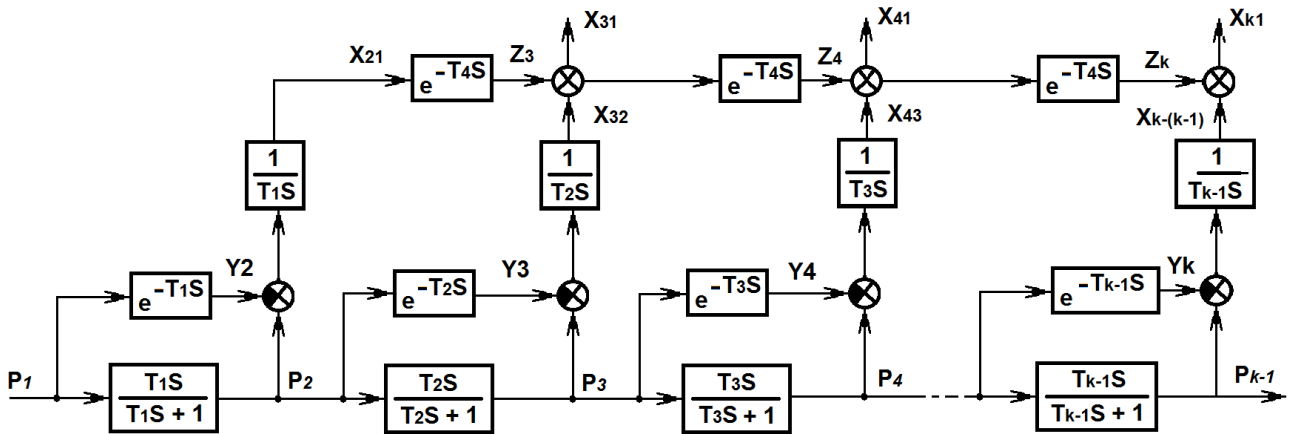


Рисунок 6– Структурна схема моделі підсистеми НІС, при введенні додаткових компенсуючих ланок затримки e^{-TS} .

Відповідно до прийнятих позначень (рис.6) запишемо основні процедури моделювання процесу зміни віддаленості елементів підсистеми одна від одної при перетворенні лінійних зв'язків у нелінійні від управляючої дії:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= 1, \\
 P_2 &= P_2 + (P_1 - P_2) \times H/T_1, \\
 P_3 &= P_3 + (P_2 - P_3) \times H/T_1, \\
 P_4 &= P_4 + (P_3 - P_4) \times H/T_1, \\
 P_5 &= P_5 + (P_4 - P_5) \times H/T_1, \\
 Y_2 &= P_1 \times (t - T_1), \\
 Y_3 &= P_2 \times (t - T_1), \\
 Y_4 &= P_3 \times (t - T_1), \\
 Y_5 &= P_4 \times (t - T_1), \\
 X_2 &= X_2 + (P_2 - Y_2) \times H/T_1, \\
 X_3 &= X_3 + (P_3 - Y_3) \times H/T_1, \\
 X_4 &= X_4 + (P_4 - Y_4) \times H/T_1, \\
 X_5 &= X_5 + (P_5 - Y_5) \times H/T_1, \\
 Z_3 &= X_{21} \times (t - T_1), \\
 X_{31} &= X_3 + Z_3, \\
 Z_4 &= X_{31} \times (t - T_1), \\
 X_{41} &= X_4 + Z_4, \\
 Z_5 &= X_{41} \times (t - T_1), \\
 X_{51} &= X_5 + Z_5,
 \end{aligned}$$

де T_1 – стала часу ПУР (для задачі N);

Н – крок моделювання.

Зазначимо, що відповідні підпрограми $Y_1 = P_i \times (t - T_1)$ та $Z_i = X_i \times (t - T_1)$ записані умовно. Для них складені окремі підпрограми, які організують масиви і затримку проходження інформації на час T_1 і їх наступну видачу (представлення). Ступенева дія L_1 викликає зміну нестабільного (пружного) стану на всіх сходинках ієрархії НІС. Така зміна стану викликає, в свою чергу, зміну комунікативних зв'язків між всіма наступними ієрархічними рівнями.

На рис.7 зображено графіки процесу зміни попереднього стану НІС на всіх рівнях ієрархічної структури НС

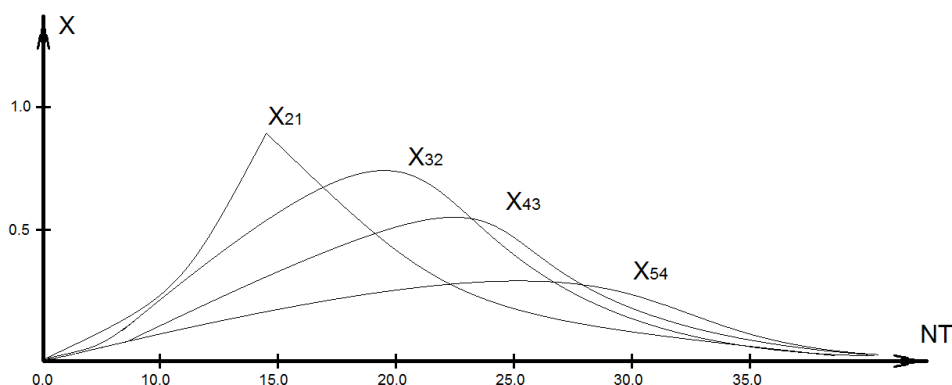


Рисунок 7 – Графіки зміни попереднього стану НІС на всіх рівнях ієрархічної структури НС в ДУ

Ступенева дія Nn викликає зміну попереднього стану на всіх рівнях ієрархічної структури НІС. Зміна такого стану може викликати резонансні явища. НІС в ДУ та МС у такому випадку стане складно управляємою.

З результатів моделювання робимо висновок, що процес зміни зв'язків в структурі (з лінійного на нелінійний) та зміна часу надходження управлінської інформації до об'єкту управління відносно основного збурення – це особливий своєрідний інерційний об'єкт із запізненням і варіативними властивостями, які проявляються в тому, що після закінчення перехідного стану така зміна в структурі прямує до нуля.

Таким чином, для отримання оригінального, оптимального управлінського рішення в ДУ та МС необхідно розробити для особи, що приймає такі рішення новий інструментарій, який використовує сучасні/новітні інформаційні технології.

Висновки

1. Розроблено математичні моделі процесу зміни віддаленості елементів НІС в ДУ та МС, у яких можуть виникати резонансні явища, що робить систему складно управляємою.

2. Процес зміни зв'язків в структурі НІС ДУ/МС та зміна часу надходження управлінської інформації до об'єкту управління відносно основного збурення – це особливий своєрідний інерційний об'єкт із запізненням і варіативними властивостями, що характеризується прямуванням до нуля змін в структурі НІС в ДУ та МС.

Наукова новизна

Запропоновано розробити новий інструментарій для отримання оптимальних управлінських рішень в публічному управлінні / державному управлінні (ДУ) та місцевому самоврядуванні (МС) / з використанням новітніх інформаційних технологій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Арзуманян Р. (2004) Метафора нелинейности в социальных системах. URL: <http://rudocs.exdat.com/docs/index-256425.html?page=3>.
2. Арзуманян Рачья. Сложное мышление и сеть: парадигма нелинейности и среда безопасности 21 века. – Ереван: НОФ «Нораванк». – 2011. – 496 с.
3. Arzumanyan H. (2015) Irregular war strategy: theory and practical application. Theoretic and strategic problems of conceptualization, religious and political-military relations in operational environment of irregular warfare. (ed.A. Mikhailovsky), (Series: New strategy, 4), Moscow: Center for Strategic Assessment and Forecast. (in Russian). Available at: <http://csef.ru/media/articles/6094/6094.pdf> (accessed 21 October 2015).
4. Горбулин В. Как победить Россию в войне будущего. – К: Брайт Букс, 2020. – 256 с.
5. Гунько Л.В. Парадигма нелінійності і агресія російської федерації проти України / Демократичне врядування. Вип. 2 (30). – 2022. – С. 109-119.
6. Загорський В., Синетика і теорія управління соціально-економічними системами [Електрон. ресурс] / Загорський В., Ліпенцев А., Кореновський А. – Режим доступу: // <http://www.lvivacademy.com/visnik8/fail/Zagorskyj.pdf>
7. Карпенко І.В. Особливості застосування критеріїв прийняття рішень в умовах невизначеності [Текст] / І. В. Карпенко, І. В. Павленко // Економічні проблеми сталого розвитку: матеріали Міжнародної науково-практичної конфере-

нції, м. Суми, 27 травня 2015р. / За заг. ред.: О. В. Прокопенко, М. М. Петрушенка. - Суми: СумДУ, 2015. - С. 353-355.

8. Линьов К.О. Централізація, децентралізація та нелінійність у державному управлінні: автореф. дис. ... канд. наук з держ. упр.: 25.00.02 / Линьов Костянтин Олександрович; Нац. акад. держ. упр. при Президентові України. – К., 2004. – 20 с.

9. Тронь В.П. Стратегія прориву: Монографія. – К.: В-во УАДУ при Президентові України. 1995. – 344 с.

10. Тронь В.П. Проблеми моделювання потоків ієрархічних рішень / Управління сучасним містом № 4-6 (2). – 2001. – С. 21-42.

11. Тронь В.П. Теоретичне обґрунтування і програмна реалізація стратегії комп'ютерної підтримки прийняття індивідуумом оптимальних рішень при моделюванні довільних ситуацій. [Текст]: автореф. дис. д-ра держ. управління: 25.00.03 / Тронь Віталій Панасович; Українська академія держ. управління при Президентові України. –К., 1997. - 42 с.

12. Шульжик Ю.О. Управління нелінійними ієрархічними структурами: до постановки проблеми / Соціально-економічна ефективність державного управління: теорія, методологія та практика: Матеріали наук.-практ. конф. – Львів: ЛРІДУ НАДУ, 2003. Ч.1. – С. 330-338.

13. Шульжик Ю.О. Побудова експертних систем прогнозування наслідків при малопрогнозованому розвитку об'єктів управління з нелінійними зв'язками. / Актуальні проблеми державного управління: Збірник наук. праць Дніпропетровського РІДУ НАДУ. – Дніпропетровськ: ДРІДУ НАДУ, 2004. - № 3 (17). – С. 84 – 93.

14. Шульжик Ю.О. Моделі нелінійних ієрархічних структур в державному управлінні та теорія динамічних систем. Актуальні проблеми державного управління Збірник наук. праць Одеського РІДУ НАДУ. – Одеса: ОРІДУ НАДУ, 2004. - № 2 (18). – 301 с. \ - С. 70 - 79.

15. Шульжик Ю. О. Проблема прогнозування динаміки одно- та різнотипних об'єктів з нелінійними зв'язками. / Наукові праці МАУП. Вип 2 (14) – К.: МАУП. – 2006. – С. 69-74.

16. Шульжик Ю.О. Проблемні аспекти підтримання надійних зв'язків в нелінійних ієрархічних структурах. / Ефективність державного управління в контексті Європейської інтеграції: Матеріали наук.-практ. конф. – Львів: ЛРІДУ НАДУ, 2004. – С. 147-152.

17. Шульжик Ю.О. Теорія абстрактних властивостей в системі управління не-лінійними ієрархічними структурами в державному управлінні. Внутрішня політика держави: сутність, принципи, методологія. Матеріали наук.-практ. конф. – Львів: ЛРІДУ НАДУ, 2005. – С. 103 – 105.
18. Ігнаткін В.У. Автоматизація розв'язування задач оптимізації параметрів систем метрологічного обслуговування вимірювальних засобів автоматизованих технологічних процесів та їх безпека. / Регіональний міжвузівський збірник наукових праць «Системні технології». System technologies. – Дніпро: УДУ НіТ, № 6 (137). – 2021. – С. 114-133.
19. Богданович В.Ю. Теоретико-методологічні засади забезпечення національної безпеки держави у її визначальних сферах [Текст] : [монографія] / В. Ю. Богданович [та ін.]. – К.: В-во «Кий», 2007. – 369 с.
20. Половцев О.В. Аналіз, економетричне моделювання та прийняття оптимальних рішень в умовах невизначеності: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 / Половцев Олег Валентинович, Херсонський державний технічний університет. – Херсон, 1999. – 18 с.
21. Акулов С.О. Моніторинг рівня конфліктного потенціалу та управління процесами його деескалації в операції по підтримці миру. автореф. дис. ... канд. військ. наук: 21.02.01 / Акулов Сергій Олександрович; НАВС України. – К., 2004. – 20 с.

REFERENCES

1. Arzumanyan R. (2004) Metaphor of nonlinearity in social systems. URL: <http://rudocs.exdat.com/docs/index-256425.html?page=3>.
2. Arzumanyan Rachya. Complex thinking and the network: the paradigm of non-linearity and the security environment of the 21st century. - Yerevan: NOF "Noravank". - 2011. - 496 p.
3. Arzumanian H. (2015) Irregular war strategy: theory and practical application. Theoretical and strategic problems of conceptualization, religious and political-military relations in the operational environment of irregular warfare. (ed. A. Mikhailovsky), (Series: New strategy, 4), Moscow: Center for Strategic Assessment and Forecast. (in Russian). Available at: <http://csef.ru/media/articles/6094/6094.pdf> (accessed October 21, 2015).
4. Horbulin V. How to defeat Russia in the war of the future. -- K: Bright Books, 2020. - 256 p.
5. Gunko L.V. Paradigm of non-linearity and aggression of the Russian Federation against Ukraine / Democratic governance. Vol. 2 (30). – 2022. – P. 109-119.

6. V. Zahorskyi, Synetics and the theory of management of socio-economic systems [Electron. resource] / Zagorskyi V., Lipentsev A., Korenovskyi A. – Access mode: // <http://www.lvivacademy.com/visnik8/fail/Zagorskyj.pdf>
7. I. V. Karpenko Peculiarities of the application of decision-making criteria in conditions of uncertainty [Text] / I. V. Karpenko, I. V. Pavlenko // Economic problems of sustainable development: materials of the International Scientific and Practical Conference, Sumy, May 27 2015 / In general ed.: O. V. Prokopenko, M. M. Petrushenko. - Sumy: Sumy State University, 2015. - P. 353-355.
8. Lin'ev K. O. Centralization, decentralization and non-linearity in state administration: autoref. thesis ... candidate sciences from state edited: 25.00.02 / Kostyantyn Oleksandrovych Lin'ev; National Acad. state example under the President of Ukraine. - K., 2004. - 20 p.
9. Trony V. P. Breakthrough strategy: Monograph. - K.: Deputy Head of the Ukrainian Academy of Sciences under the President of Ukraine. 1995. – 344 p.
10. Trony V.P. Problems of modeling flows of hierarchical decisions / Management of the modern city No. 4-6 (2). - 2001. - P. 21-42.
11. Trony V. P. Theoretical justification and software implementation of the strategy of computer support for making optimal decisions by an individual in the simulation of arbitrary situations. [Text]: autoref. thesis Dr. State Management: 25.00.03 / Vitaliy Panasovych Throne; State Ukrainian Academy administration under the President of Ukraine. -K., 1997. - 42 p.
12. Shulzhyk Yu.O. Management of non-linear hierarchical structures: before the problem statement / Socio-economic efficiency of state administration: theory, methodology and practice: Scientific-practical materials. conf. - Lviv: LRIDU NADU, 2003. Part 1. - P. 330-338.
13. Shulzhyk Yu.O. Construction of expert systems for forecasting the consequences of poorly predicted development of management objects with non-linear connections. / Actual problems of public administration: Collection of sciences. works of the Dnipropetrovsk RID NADU. – Dnipropetrovsk: DRIDU NADU, 2004. - No. 3 (17). - P. 84 - 93.
14. Shulzhyk Y.O. Models of non-linear hierarchical structures in public administration and the theory of dynamic systems. Actual problems of state administration Collection of sciences. Proceedings of the Odesa Order of NADU. – Odesa: ORIDU NADU, 2004. - No. 2 (18). - 301 p. \ - P. 70 - 79.

15. Shulzhyk Y.O. The problem of forecasting the dynamics of the same and different types of objects with nonlinear connections. / Scientific works of MAUP. Issue 2 (14) - K.: MAUP. - 2006. - P. 69-74.
16. Shulzhyk Yu.O. Problematic aspects of maintaining reliable connections in non-linear hierarchical structures. / Effectiveness of public administration in the context of European integration: Scientific and practical materials. conf. - Lviv: LRIDU NADU, 2004. - P. 147-152.
17. Shulzhyk Yu.O. Theory of abstract properties in the management system of non-linear hierarchical structures in public administration. Internal policy of the state: essence, principles, methodology. Scientific and practical materials. conf. - Lviv: LRIDU NADU, 2005. - P. 103 - 105.
18. Ignatkin V.U. Automation of solving problems of optimizing the parameters of metrological service systems of measuring devices of automated technological processes and their safety. / Regional interuniversity collection of scientific papers "System Technologies". System technologies. - Dnipro: USU NiT, No. 6 (137). - 2021. - P. 114-133.
19. Bogdanovich V.Yu. Theoretical and methodological principles of ensuring national security of the state in its defining spheres [Text]: [monograph] / V.Yu. Bogdanovich [et al.]. - K.: V-vo "Kiy", 2007. - 369 p.
20. Polovtsev O.V. Analysis, econometric modeling and optimal decision-making under conditions of uncertainty: autoref. thesis for obtaining sciences. degree of Candidate of Technical Sciences by specialty 05.13.06 / Oleg Valentinovych Polovtsev, Kherson State Technical University. - Kherson, 1999. - 18 p.
21. Akulov S.O. Monitoring the level of conflict potential and managing its de-escalation processes in peacekeeping operations. autoref. thesis ... candidate troops Sciences: 21.02.01 / Akulov Serhii Oleksandrovych; Naval Forces of Ukraine. - K., 2004. - 20 p.

Received 06.12.2023.

Accepted 13.12.2023.

Mathematical modeling of transient processes in hierarchical structures of public administration with nonlinear characteristics

The last decades are characterized by a large number of studies of state and public figures, which can be called an era of deep (fundamental) and rapid changes. Society is experiencing qualitative changes and serious challenges, therefore there is a kind of paradox when the imperatives of a new era force the development of a theoretical basis in

the semantic field of common sense, which is associated with permanence and qualitative changes in political, economic and social life [1, 2, 3].

In state administration and local self-government bodies, relations between people, rapid unpredictable changes in the situation in the country and in regions (political, economic, social, etc.) are non-linear management systems. Moreover, any physical system when examined in more detail is always nonlinear. The effectiveness of managing a nonlinear system, taking into account disturbing factors, depends on the accuracy of forecasting the dynamics of changes in individual elements of such a system. This is a multifaceted problem [15].

A characteristic feature of non-linear hierarchical structures (NIS) in the public service (state administration - DU and local self-government - MS) is a continuous and discrete change in the processes of development of events, which distinguishes them from other internal and external influences, such as those that cause the transformation of linear communication into non-linear, which ultimately leads to new changes. This is the first thing.

Second, subject-object relationships can have uncoordinated actions caused by real-world circumstances. Such uncoordinated actions can occur even more in transitional processes of society (for example, the speed of their flow) due to the inertia of individual elements or the social system itself as a whole. As a result of these phenomena, the linear relationship between discrete changes is broken and the previous hierarchical structure changes, which leads to non-linear information relationships in the state administration (SU) and local self-government bodies (MS). For example, G. Pocheptsov and other scientists associate this nonlinearity with chaos, the growing complexity of social processes, globalization, with a threat to state security, with the manifestation of unpredictability and instability [1-5].

Strict requirements are imposed on the management process in the new state of DU and MS:

- resilience of the management system;*
- the system should be described as continuous-discrete (its dynamics);*
- the management process must ensure the necessary accuracy of matching the indicators of the new state of the system with the previous one.*

A number of problems appear in newly formed non-linear hierarchical structures (NIS) in DU and MS:

- lack of a priori information about processes with non-linear connections;*
- inaccuracy of structural identification;*
- inaccuracy in the choice of criteria for assessing the situation;*

- *restructuring processes;*
- *wrong choice of states of nature;*
- *incorrect determination of the importance of the selected criteria according to the scale of importance;*
- *incorrectly chosen dependence of alternatives on the criterion;*
- *insufficient degree of awareness of the complexity of the situation.*

Solving the above problems requires experimental research.

If the process of stabilization of the NIS in the DU is considered as an object of regulation, then it is enough to establish the dependence of this stability on the control action and the main disturbance, and all other actions are considered as disturbances on the object of study. Such a description will reflect the main dynamic characteristics of such a process and will be sufficient for the synthesis and development of an optimal regulation system with the aim of achieving stable (stable) processes in such systems (including DU and MS).

In the future, we will approach the DU as a non-linear hierarchical system (NHS) and depict the NIS as a multidimensional continuous system, in which the state of nature is the regulated quantity, and the input is the action of managers in the DU and MS (management decisions made by them - PUR) regarding regulation, coordination and perturbations acting on the system.

Key words: public administration, local self-government, non-linear hierarchical system, management decision, mathematical modeling.

Ігнаткін Валерій Устинович - доктор технічних наук, професор, в.о. зав. кафедри менеджменту організацій, економіки та підприємництва Прикарпатського інституту ім. М. Грушевського ПрАТ «ВНЗ Міжрегіональна Академія управління персоналом», м. Трускавець. <https://orcid.org/0000-0002-3332-1105>.

Шульжик Юрій Олександрович - кандидат технічних наук, професор кафедри менеджменту організацій, економіки та підприємництва Прикарпатського інституту ім. М. Грушевського ПрАТ «ВНЗ Міжрегіональна Академія управління персоналом», м. Трускавець, <https://orcid.org/0000-0003-1699-054X>.

Дудніков Володимир Степанович - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри механотроніки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, <https://orcid.org/0000-0002-7115-7086>; старший науковий співробітник Інституту транспортних систем і технологій НАН України.

Юшкевич Олег Павлович - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри механотроніки Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, <https://orcid.org/0000-0002-7199-8424>.

Ignatkin Valery Ustinovich - doctor of technical sciences, professor, acting chief Department of Management of Organizations, Economics and Entrepreneurship of the Prykarpattia Institute named after M. Hrushevsky PJSC "University Interregional Academy of Personnel Management", Truskavets. <https://orcid.org/0000-0002-3332-1105>.

Shulzhyk Yury Oleksandrovich - candidate of technical sciences, professor of the Department of Organizational Management, Economics and Entrepreneurship of the Prykarpattia Institute named after M. Hrushevsky PJSC "Interregional Academy of Personnel Management University", Truskavets, <https://orcid.org/0000-0003-1699-054X>.

Dudnikov Volodymyr Stepanovych - candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Mechatronics, Dnipro National University named after Oles Honchar, <https://orcid.org/0000-0002-7115-7086>; senior researcher at the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Yushkevych Oleh Pavlovich - candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Mechatronics of Dnipro National University named after Oles Honchar. , <https://orcid.org/0000-0002-7199-8424>.

О.О. Кавац, Ю.В. Кавац, Д.А. Дібрій

АНАЛІЗ МЕТОДИК ОЦІНКИ СТУПЕНЮ ЗАБРУДНЕНOSTІ ВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ

Анотація. В статті розглянуті основні методи моніторингу водних об'єктів їх стану забруднення та оцінка якості води. Загальноприйняті, стандартизовані методи оцінювання якості води в водних об'єктах, включають в себе наземний набір зняття проб, що в певних умовах не відповідає оперативності та є дорогорартісним. Розвиток сучасних інформаційних технологій дозволяє використовувати різноманітні інструменти та набори даних, які застосовуються при проведенні супутникового моніторингу із певною періодичністю. Наявність архівних даних відкриває можливість порівнювати отримані результати та аналізувати чинники впливу на стан водних об'єктів. В роботі описано основні методи та набори даних, які можна використовувати для застосування методів дистанційного моніторингу на основі машинного навчання. Проаналізовано приклади застосування дистанційного підходу щодо оцінки ступеню забрудненості водних об'єктів на великих територіях .

Ключові слова: водні об'єкти, водойми, супутниковий моніторинг, оцінка стану забруднення, екологічне навантаження, методи ДЗЗ, машинне навчання, валідація, Landsat 8.

Постановка проблеми. За даними Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, понад 60% водойм України забруднені, зокрема, це стосується річок. Для України водні ресурси є важливим джерелом питної води та використовуються в багатьох галузях промисловості і агросекторі. Через це забруднення водойм може впливати на здоров'я людей, тварин та шкодить екосистемі країни. Аналіз екологічного стану водойм України дає змогу окреслити основні проблеми з якими стикається навколишнє середовище. Забруднення водних об'єктів внаслідок скидання стічних вод, промислових відходів в прилеглі водойми, зміна русел річок призводить до їх обміління, заболочування і як наслідок цвітіння. Порушення норм розташування у прибережних зонах пахотних сільськогосподарських земель сприяє потраплянню в воду добрив та хімікатів, які використовуються при обробці сільськогосподарських рослин. Окремою проблемою з якою наразі стикається Україна під час повномасштабної війни - це руйнування гідрологічних споруд,

що призводить до забруднення та виснаження водноресурсного потенціалу. Всі ці чинники впливають на якість прісної води.

Сьогодні не існує загальноприйнятого єдиного й універсального методу оцінювання якості води в водних об'єктів, ступеня їх забруднення. Одним з основних методів моніторингу якості води у водоймах є спостереження на місці, що вимагає значних ресурсів через необхідність встановлювати контролююче обладнання у декількох точках водойм та постійного подальшого аналізу зразків у лабораторії. Якість води напряму впливає на флору і фауну, тому якісний та швидкий аналіз якості води у водних об'єктах є важливою складовою екологічної безпеки країни. Саме тому оцінка стану ступеня забрудненості водних об'єктів є актуальною проблемою, яка може знайти вирішення завдяки застосуванню сучасних інформаційних технологій та супутникового моніторингу.

Мета дослідження полягає у виборі методики оцінки ступеня забруднення водних об'єктів України. Для цього необхідно розглянути методики оцінки ступеня забруднення водних об'єктів, якості води, визначити коло доступних даних, на які можна спиратися, а також виконати аналіз підходів до вирішення подібних завдань та проблем, що виникають при їх реалізації.

Основна частина. Прісна вода є життєво важливим ресурсом для навколишнього середовища та людства. Велика кількість прісної води зберігається у внутрішніх водоймах країни. Якість води внутрішніх водойм дуже вразлива до розвитку економіки, зростання населення та землекористуванню. В останні роки у світі спостерігається тенденція дефіциту прісної води, однією із глобальних причин виникнення якої є забруднення. Моніторинг якості води та її параметрів у внутрішніх водоймах є важливим для захисту ресурсів прісної води та управління ними. Відповідно до Водної рамкової директиви Європейського Союзу (ВРД ЄС), екологічний стан водойми оцінюється на основі трьох основних груп параметрів: гідробіологічних, гідрохімічних і гідроморфологічних [3].

У рамках державної системи моніторингу довкілля України оцінювання якості поверхневих вод ведеться окремо за гідрохімічними й гідробіологічними показниками. Основний принцип оцінювання якості водного середовища, що використовується вже тривалий час у водоохоронній практиці нашої країни, полягає в визначенні в окремих точках водного об'єкта хімічного складу, фізичних властивостей і бактеріологічних показників води та

зіставлення результатів з нормативними величинами відповідних показників [1-4].

Однак традиційні методи моніторингу, які в широкому сенсі визначаються як спостереження на місці, вважаються надто дорогими для використання в місцевому середовищі для визначення різноманітних просторово-часових характеристик. Це неминуче створює проблему для оперативного реагування на події пов'язані з водним середовищем і проблемами громадського здоров'я.

Враховуючи дороговартість та складність отримання показників особливо у зонах бойових дій, постає актуальна задача по розробці інформаційної технології із залученням різнорідних даних дистанційного зондування Землі.

На сьогодні численні дослідження показали великий потенціал і корисність методів дистанційного зондування для покращення та оперативного отримання інформації про характеристики навколишнього середовища в різних часових і просторових масштабах. Супутники, обладнані різними оптичними та тепловими датчиками, є перспективними в порівнянні з вимірюванням на місці, оскільки забезпечують постійно зростаючий потік геопросторових даних, що охоплюють великі території з високою роздільною здатністю, а головне більш економічним [5-14]. Гіперспектральні датчики з низькою або середньою роздільною здатністю, такі як MERIS, MODIS і SeaWiFS використовувались дослідниками протягом багатьох років для оцінки якості води та стану забрудненості водних об'єктів. В основному дослідження проводились у великих річках і озерах, лиманах і прибережних районах або в регіональному масштабі. Вищезазначені супутникові дані продемонстрували можливість та достовірність застосування супутникових даних для оцінок якості води [9, 15-19]. Тим не менш, вони не дуже підходять для моніторингу невеликих за розміром озер і річок через обмежену просторову інформацію. Багато досліджень показало ефективність багатоспектральних датчиків Landsat, у тому числі TM (Thematic Mapper), MSS (Multispectral Scanner), ETM (Enhanced Thematic Mapper) і OLI (Operational Land Imager), для пошуку зміни якості води, цей параметри є дуже важливим при оцінці стану забруднення водного об'єкту. Отримання інформації за ним дозволяє оперативно реагувати та визначати чинники впливу на навколишнє середовище. Оскільки супутникові набори даних Landsat доступні та мають відповідну часову частоту та просторову роздільну здатність. Супутникові набори даних Landsat дозволяють здійснювати щомісячний моніторинг на невеликих ділянках внутрішніх водних об'єктів і надають ключову інформацію про стан водного середовища.

Складові води, такі як хлорофіл, глибина диска Секкі (SDD), загальна зависла речовина (TSM), кольорова розчинена органічна речовина (CDOM) та інші, визначені як оптично активні змінні, широко вивчається багатьма дослідниками [20]. Однак кілька інших важливих показників є не оптично активними, наприклад хімічне споживання кисню (COD), біологічне споживання кисню (BOD), загальний азот (TN), перманганат хімічного споживання кисню (CODMn), аміак (NH₃-N) і загальний фосфору (TP), не були добре вивчені та залишаються складним аспектом комплексної оцінки якості води. Крім того, більшість попередніх досліджень, які оцінювали стан якості води в закритих водних об'єктах, рідко зосереджувалися на конкретних сезонах або залежали від балових шкал із обмеженими лабораторними аналітичними даними. Це підкреслює необхідність ефективної оцінки, як оптично активних, так і неактивних змінних і вивчення їх просторово-часових моделей.

У дослідженнях дистанційного зондування оцінки стану забруднення та якості води впроваджуються різні підходи, щоб покращити знання про водну систему. Типова методологія інтерпретації та оцінки концентрацій різних змінних еволюціонувала від методів емпіричної регресії, включаючи просту лінійну регресію та не лінійну множинну регресію, до аналізу головних компонент (PCA) і нейронних мереж [14]. Тим не менш, деякі звичайні регресійні моделі можуть бути не оптимальними, особливо коли існують складні нелінійні зв'язки між поведінкою водної системи та факторами навколишнього середовища. В останні роки, замість того, щоб змінювати класичні підходи, використання інструментів і технологій великих даних у секторі оцінки стану забруднення та якості води, стало основним. Незважаючи на те, що деякі оцінки, засновані на машинному навчанні, показали багатообіцяючі результати у вирішенні проблеми низької точності часових рядів за допомогою простих емпіричних моделей, залишається проблемою глибоке розуміння складних двонаправлених взаємодій між складовими води та сонячним випромінюванням у часовому і просторовому контексті. Технології глибинного машинного навчання дають можливість вивчати більш складні статистичні характеристики, але іноді примусово відокремлюють просторові або часові кореляційні характеристики. Недавні дослідження, присвячені оцінці екологічних факторів на основі даних, таких як вологість ґрунту, виявили, що новий підхід штучного інтелекту (AI) моделі згорткової довготривалої короткочасної пам'яті (ConvLSTM) значно перевершує класичні методи моделювання послідовностей у захопленні просторово-часові кореляції вхідних да-

них супутникових зображень. Однак спроби застосувати алгоритм ConvLSTM для визначення якості води все ще рідкісні, що підкреслює необхідність приділяти особливу увагу складному моделюванню якості води.

Той факт, що проблеми з якістю води пов'язані з багатьма екологічними та антропогенними факторами, особливо ускладнив точне прогнозування складових якості води. Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку та валідацію нової регресійної моделі на основі глибинного навчання для оптично активного та неактивного моделювання якості води. Використання супутникових зображень Landsat 8 OLI дозволить проводити моніторинг з високою частотою, що є потенційно потужніше у відображенні нелінійної просторово-спектральної інформації з відносно високою просторовою роздільною здатністю.

Висновки. Розглянуто основні існуючі підходи до оцінки забрудненості та якості води в закритих прісних водоймах. Найбільш адаптованим для практичного використання на великих територіях є дистанційний підхід, який поєднує наземні та супутникові вимірювання для класифікації змін та виявлення забруднень в водних об'єктах закритого типу.

Описано набори даних з оцінками якості забрудненості води, які можна використовувати для навчання та перевірки методів машинного навчання. Освітлено методи застосування дистанційного підходу до оцінки стану прісних водойм на території України. Вказано перспективні параметри та методи машинного навчання для вирішення прикладної задачі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бреус Д.С., Левченко М.В. Методи оцінювання та нормування якості природних водних ресурсів Таврійський науковий вісник Випуск № 110. Том 2 , 2019 р. Стр.126-131.
2. Berka C. Relationships between agricultural land use and surface water quality using a GIS. Sumas River watershed, Abbotsford, B.C.MSc thesis, Resource Management and Environmental Studies, University of British Columbia, Vancouver, B.C., 1996. 174 p.
3. EPA: 1996, Environmental Indicators of Water Quality in the United States. USEPA Rep. 841-R-96-002. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, D.C.
4. EU Water Framework Directive 2000/60/EC. Official Journal of the European Communities, 22.12 2000. L 327/1. 118 p.

5. Brooks, B.W., Lazorchak, J.M., Howard, M.D., Johnson, M.V.V., Morton, S.L., Perkins, D.A., Reavie, E.D., Scott, G.I., Smith, S.A., Steevens, J.A. Are harmful algal blooms becoming the greatest inland water quality threat to public health and aquatic ecosystems, *Environ. Toxicol. Chem.* 2016, 35, 6–13.
6. Arabi, B., Salama, M.S., Pitarch, J., Verhoef, W. Integration of in-situ and multi-sensor satellite observations for long-term water quality monitoring in coastal areas. *Remote Sens. Environ.* 2020, 239, 111632.
7. Najah Ahmed, A., Binti Othman, F., Abdulmohsin Afan, H., Khaleel Ibrahim, R., Ming Fai, C., Shabbir Hossain, M., Ehteram, M., Elshafie, A. Machine learning methods for better water quality prediction. *J. Hydrol.* 2019, 578, 124084.
8. Wang, P., Yao, J., Wang, G., Hao, F., Shrestha, S., Xue, B., Xie, G., Peng, Y. Exploring the application of artificial intelligence technology for identification of water pollution characteristics and tracing the source of water quality pollutants. *Sci. Total Environ.* 2019, 693, 133440.
9. Sagan, V., Peterson, K.T., Maimaitijiang, M., Sidike, P., Sloan, J., Greeling, B.A., Maalouf, S., Adams, C. Monitoring inland water quality using remote sensing: Potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing. *Earth-Sci. Rev.* 2020, 205, 103187.
10. Peterson, K.T., Sagan, V., Sloan, J.J. Deep learning-based water quality estimation and anomaly detection using Landsat-8/Sentinel-2 virtual constellation and cloud computing. *GIScience Remote Sens.* 2020, 57, 510–525.
11. Wang, J.-H., Li, C., Xu, Y.-P., Li, S.-Y., Du, J.-S., Han, Y.-P., Hu, H.-Y. Identifying major contributors to algal blooms in Lake Dianchi by analyzing river-lake water quality correlations in the watershed. *J. Clean. Prod.* 2021, 315, 128144.
12. Niu, C., Tan, K., Jia, X., Wang, X. Deep learning based regression for optically inactive inland water quality parameter estimation using airborne hyperspectral imagery. *Environ. Pollut.* 2021, 286, 117534.
13. Sun, C., Chen, L., Zhu, H., Xie, H., Qi, S., Shen, Z. New framework for natural-artificial transport paths and hydrological connectivity analysis in an agriculture-intensive catchment. *Water Res.* 2021, 196, 117015.
14. Sun, X., Zhang, Y., Shi, K., Zhang, Y., Li, N., Wang, W., Huang, X., Qin, B. Monitoring water quality using proximal remote sensing technology. *Sci. Total Environ.* 2022, 803, 149805.
15. Becker, R.H., Sultan, M.I., Boyer, G.L., Twiss, M.R., Konopko, E. Mapping cyanobacterial blooms in the Great Lakes using MODIS. *J. Great Lakes Res.* 2009, 35, 447–453.

16. Hansen, C.H., Williams, G.P., Adjei, Z., Barlow, A., Nelson, E.J., Miller, A.W. Reservoir water quality monitoring using remote sensing with seasonal models: Case study of five central-Utah reservoirs. *Lake Reserv. Manag.* 2015, 31, 225–240.
17. Shi, K., Zhang, Y., Qin, B., Zhou, B. Remote sensing of cyanobacterial blooms in inland waters: Present knowledge and future challenges. *Sci. Bull.* 2019, 64, 1540–1556.
18. Ho, J.C., Michalak, A.M., Pahlevan, N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s. *Nature* 2019, 574, 667–670.
19. Woolway, R.I., Kraemer, B.M., Lenters, J.D., Merchant, C.J., O'Reilly, C.M., Sharma, S. Global lake responses to climate change. *Nat. Rev. Earth Environ.* 2020, 1, 388–403.
20. Bonansea, M.; Ledesma, M.; Rodriguez, C.; Pinotti, L. Using new remote sensing satellites for assessing water quality in a reservoir. *Hydrol. Sci. J.* 2019, 64, 34–44

REFERENCES

1. Breus D.S., Levchenko M.V. Metody otsiniuvannia ta normuvannia yakosti pryrodnykh vodnykh resursiv Tavriiskyi naukovyi visnyk Vypusk № 110. Tom 2 , 2019 r. Str.126-131.
2. Berka C. Relationships between agricultural land use and surface water quality using a GIS. Sumas River watershed, Abbotsford, B.C.MSc thesis, Resource Management and Environmental Studies, University of British Columbia, Vancouver, B.C., 1996. 174 p.
3. EPA: 1996, Environmental Indicators of Water Quality in the United States. USEPA Rep. 841-R-96-002. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, D.C.
4. EU Water Framework Directive 2000/60/EC. Official Journal of the European Communities, 22.12 2000. L 327/1. 118 p.
5. Brooks, B.W., Lazorchak, J.M., Howard, M.D., Johnson, M.V.V., Morton, S.L., Perkins, D.A., Reavie, E.D., Scott, G.I., Smith, S.A., Steevens, J.A. Are harmful algal blooms becoming the greatest inland water quality threat to public health and aquatic ecosystems, *Environ. Toxicol. Chem.* 2016, 35, 6–13.
6. Arabi, B., Salama, M.S., Pitarch, J., Verhoef, W. Integration of in-situ and multi-sensor satellite observations for long-term water quality monitoring in coastal areas. *Remote Sens. Environ.* 2020, 239, 111632.
7. Najah Ahmed, A., Binti Othman, F., Abdulmohsin Afan, H., Khaleel Ibrahim, R., Ming Fai, C., Shabbir Hossain, M., Ehteram, M., Elshafie, A. Machine learning methods for better water quality prediction. *J. Hydrol.* 2019, 578, 124084.
8. Wang, P., Yao, J., Wang, G., Hao, F., Shrestha, S., Xue, B., Xie, G., Peng, Y. Exploring the application of artificial intelligence technology for identification of

water pollution characteristics and tracing the source of water quality pollutants. *Sci. Total Environ.* 2019, 693, 133440.

9. Sagan, V., Peterson, K.T., Maimaitijiang, M., Sidike, P., Sloan, J., Greeling, B.A., Maalouf, S., Adams, C. Monitoring inland water quality using remote sensing: Potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing. *Earth-Sci. Rev.* 2020, 205, 103187.

10. Peterson, K.T., Sagan, V., Sloan, J.J. Deep learning-based water quality estimation and anomaly detection using Landsat-8/Sentinel-2 virtual constellation and cloud computing. *GIScience Remote Sens.* 2020, 57, 510–525.

11. Wang, J.-H., Li, C., Xu, Y.-P., Li, S.-Y., Du, J.-S., Han, Y.-P., Hu, H.-Y. Identifying major contributors to algal blooms in Lake Dianchi by analyzing river-lake water quality correlations in the watershed. *J. Clean. Prod.* 2021, 315, 128144.

12. Niu, C., Tan, K., Jia, X., Wang, X. Deep learning based regression for optically inactive inland water quality parameter estimation using airborne hyperspectral imagery. *Environ. Pollut.* 2021, 286, 117534.

13. Sun, C., Chen, L., Zhu, H., Xie, H., Qi, S., Shen, Z. New framework for natural-artificial transport paths and hydrological connectivity analysis in an agriculture-intensive catchment. *Water Res.* 2021, 196, 117015.

14. Sun, X., Zhang, Y., Shi, K., Zhang, Y., Li, N., Wang, W., Huang, X., Qin, B. Monitoring water quality using proximal remote sensing technology. *Sci. Total Environ.* 2022, 803, 149805.

15. Becker, R.H., Sultan, M.I., Boyer, G.L., Twiss, M.R., Konopko, E. Mapping cyanobacterial blooms in the Great Lakes using MODIS. *J. Great Lakes Res.* 2009, 35, 447–453.

16. Hansen, C.H., Williams, G.P., Adjei, Z., Barlow, A., Nelson, E.J., Miller, A.W. Reservoir water quality monitoring using remote sensing with seasonal models: Case study of five central-Utah reservoirs. *Lake Reserv. Manag.* 2015, 31, 225–240.

17. Shi, K., Zhang, Y., Qin, B., Zhou, B. Remote sensing of cyanobacterial blooms in inland waters: Present knowledge and future challenges. *Sci. Bull.* 2019, 64, 1540–1556.

18. Ho, J.C., Michalak, A.M., Pahlevan, N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s. *Nature* 2019, 574, 667–670.

19. Woolway, R.I., Kraemer, B.M., Lenters, J.D., Merchant, C.J., O'Reilly, C.M., Sharma, S. Global lake responses to climate change. *Nat. Rev. Earth Environ.* 2020, 1, 388–403.

20. Bonansea, M.; Ledesma, M.; Rodriguez, C.; Pinotti, L. Using new remote sensing satellites for assessing water quality in a reservoir. *Hydrol. Sci. J.* 2019, 64, 34–44

Received 08.12.2023.

Accepted 15.12.2023.

Analysis of methods for assessing the degree of water pollution

The most important modern methods for the monitoring of water bodies, their state of pollution and the assessment of water quality are considered. Commonly accepted, standardized methods for assessing water quality in water bodies include ground-based sampling, which is untimely and expensive under certain conditions. Best suited for practical use in large areas is the remote approach, which combines ground and satellite measurements to classify changes and detect pollution in closed water bodies. Satellite monitoring is a reliable tool for obtaining operational information on the state of water bodies and their changes with a certain periodicity, thanks to the use of a large set of heterogeneous data. And the availability of archived data becomes a significant advantage, opening up the possibility of comparing the results obtained and analyzing the factors influencing the state of water bodies and the environment. The paper describes the main methods and datasets that can be used for the application of remote monitoring methods based on machine learning. The use of Landsat multispectral sensors, including TM (Thematic Mapper), MSS (Multispectral Scanner), ETM (Enhanced Thematic Mapper), and OLI (Operational Land Imager), is proposed as the main data set. Examples of the application of the remote sensing approach to the assessment of water pollution over large areas will be analyzed. Possible machine learning methods for solving an applied problem are presented.

Кавац Олена Олександрівна — к.т.н., доц., доцент кафедри інформаційних технологій і систем, Українського державного університету науки і технологій.

Кавац Юрій Віталійович — к.т.н., доцент кафедри інформаційних технологій і систем, Українського державного університету науки і технологій.

Дібрій Данило Андрійович — аспірант кафедри інформаційних технологій і систем, Українського державного університету науки і технологій.

Kavats Olena Oleksandrivna — Ph.D., Associate Professor of the Department of Information Technology and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology.

Kavats Yurii Vitaliyovych — Ph.D., Associate Professor of the Department of Information Technology and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology.

Dibrii Danylo Andriyovych — graduate student of the Department of Information Technologies and Systems of the Ukrainian State University of Science and Technology.

Л.С. Коряшкіна, С.В. Дзюба

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ РОЗМІЩЕННЯ ОБ'ЄКТІВ І ЗОНУВАННЯ ТЕРИТОРІЙ В СИСТЕМАХ ЕКСТРЕНОЇ ЛОГІСТИКИ

Анотація. Представлені математичні моделі процесів розподілу матеріальних ресурсів, що пов'язано з організацією запобіжних заходів у разі загрози або виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Розглянуто: задачі оптимального зонування територій із закріпленням зон за об'єктами соціального призначення для надання послуг з можливістю перекриття зон на випадок, коли найближчий центр не має можливості у повному обсязі надавати послуги; оптимальне розміщення певної кількості нових центрів систем екстреної логістики з одночасним перерозподілом навантаження на всі їх структурні елементи; вибір місць розташування структурних підрозділів на базі існуючих об'єктів. Критерії оптимальності передбачають мінімізацію або часу надання послуги найвіддаленішому об'єкту на заданій території, або сумарної відстані до найближчих центрів від споживачів, які щільно розподілені на заданій території. Враховані також організаційні витрати, пов'язані із облаштуванням нових центрів. Математичні моделі запропоновано у вигляді неперервних задач оптимального мультиплексного розбиття множин з лінійним або мінімаксним функціоналом якості. Останній забезпечує таке розміщення центрів, що задає оптимальне багатократне покриття території (з мінімальним радіусом кратного покриття). Методи розв'язання сформульованих задач розроблено з використанням ЛП релаксації лінійних задач з булевими змінними, теорії двоїстості для зведення отриманих задач нескінченновимірного програмування до задач умовної оптимізації негладкої функції декількох змінних, сучасних методів недиференційованої оптимізації. Програмний додаток, розроблений для зонування і розміщення об'єктів в системах екстреної логістики на основі моделей та методів розв'язання неперервних задач оптимального мультиплексного розбиття і покриття множин із залученням ГІС технологій, дозволяє планувати завчасні соціально економічні та організаційно технічні заходи, спрямовані на підвищення безпеки у випадках техногенних ситуацій.

Ключові слова: екстрена логістика, мультиплексне розбиття множин, багатократне кульове покриття, моделювання, оптимізація.

Постановка проблеми. Підвищення рівня техногенної безпеки, зокрема на підприємствах гірничо-металургійної галузі, потребує розвитку

фундаментальної та прикладної науки, техніки і технологій, розвитку наукових основ забезпечення захищеності критичної інфраструктури; розробки комплексу організаційних та технічних рішень щодо своєчасних превентивних дій, спрямованих на уникнення надзвичайних ситуацій (НС).

Математичні постановки та методи розв'язання задач оптимізації гуманітарної логістики дозволяють відповідальним особам, які приймають рішення щодо визначення необхідного часу для проведення першочергових кроків та оцінювання кількості і розподілу матеріальних ресурсів за різних сценаріїв НС. У матеріально-технічному забезпеченні гуманітарної допомоги важливими питаннями є визначення раціональної кількості територіально розподілених структур, забезпечення їх підготовленими фахівцями, спеціальною технікою та обладнанням, запасами медикаментів, засобами забезпечення життєдіяльності тощо. Розробка і формування теоретичних і методологічних основ створення і використання інформаційних технологій раціонального територіального розподілу елементів систем гуманітарної логістики є актуальною науково-прикладною проблемою, яка має важливе значення для підвищення техногенної безпеки підприємств гірничо-металургійного комплексу та критичної інфраструктури при НС, для забезпечення сталого розвитку промислових регіонів України.

Дана робота присвячена математичному моделюванню процесів розподілу матеріальних потоків в системах екстреної логістики задля раціональної організації заходів щодо запобігання та усунення наслідків надзвичайних ситуацій на основі системного та оптимізаційного підходу.

Об'єкт дослідження – процеси екстреної логістики в умовах надзвичайних ситуацій техногенного характеру.

Предмет дослідження – моделі та методи оптимального розміщення структурних підрозділів систем екстреної логістики з визначенням зон їх обслуговування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основними завданнями гуманітарної логістики є аналіз проблем, які пов'язані з можливими катастрофами або надзвичайними ситуаціями, розробка операцій щодо усунення наслідків і управління ситуацією. Характерною особливістю гуманітарної логістики є, перш за все, орієнтація на людину не тільки як на суб'єкта логістичних процесів (кінцевого споживача товарів та послуг або агента, котрий приймає участь у проміжних логістичних процесах), але й як на об'єкта, що

накладає додаткові вимоги до рівня безпеки, комфорту і швидкості логістичних операцій.

Питання, які пов'язані із раціональною організацією евакуаційних процесів, дій і заходів щодо запобігання НС, плануванням руху матеріальних і людських потоків під час НС, мають екстрений характер, і тому вони складають в гуманітарній логістиці свою систему досліджень і знань, а саме екстрену логістику [1]. Вона прагне вирішувати логістичні задачі в умовах НС на базі системного підходу, приймати рішення на основі часових і економічних компромісів; відстежувати матеріальні та часові витрати протягом усього логістичного ланцюга.

Сукупність форм, методів і правил організації та управління матеріальними або людськими потоками під час надзвичайних ситуацій складають **систему екстреної логістики (СЕЛ)**. Дана система включає підсистеми трьох рівнів: елементного – які забезпечують узгоджене та ефективне функціонування основних ланок логістичного ланцюга (первинні пункти збору, склади, аварійні служби та транспорт); функціонального – що відповідають за організацію матеріальних або людських потоків, управління заготівками, організація правового та інформаційного забезпечення логістичних рішень; інтеграційного – котрі об'єднують усі групи операцій у єдиний процес. Оптимальність і ефективність прийнятих рішень в умовах екстреної ситуації визначається повнотою виявлених обмежень в рамках логістичної системи і економічними компромісами, затвердженими з урахуванням цих обмежень. Аспекти наукового напрямку екстреної логістики відображені на рис.1.

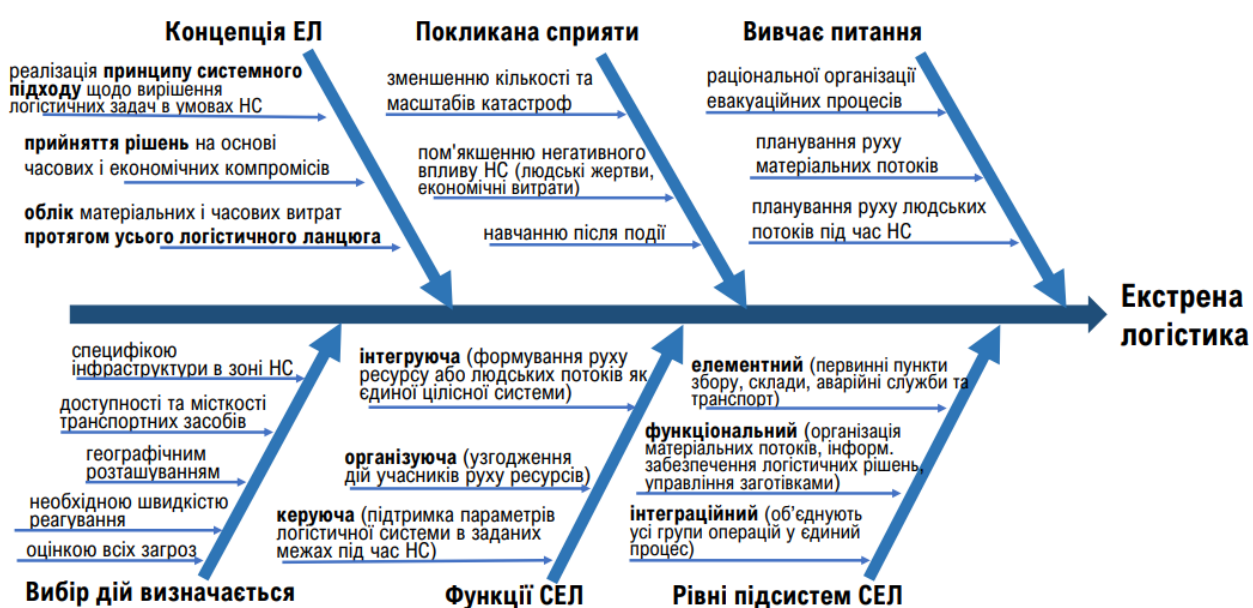


Рисунок 1 - Екстрена логістика як напрям наукових досліджень

Планування екстреної допомоги й евакуації є важливим і складним елементом управління надзвичайними ситуаціями. Для обґрунтування управлінських рішень, що враховують багато факторів, а під час, і суперечливі цілі, широкого застосування набуло математичне моделювання. В роботі [2] представлений широкий огляд наукових публікацій, які пов'язані з розробкою математичних моделей і методів розв'язання оптимізаційних задач, що виникають під час розробки комплексу запобіжних заходів щодо евакуації населення та надання екстреної допомоги у разі надзвичайних ситуацій.

В [3] розглянуто задачу одночасної оптимізації розташування аварійних укриттів (та/або складів) і координації руху транспортних засобів допомоги між місцем катастрофи та аварійними укриттями. Зосереджуючись на оптимальному розподілі матеріальних ресурсів серед сервісних центрів у процесі подолання наслідків надзвичайних ситуацій, критерієм запропонованої моделі є мінімізація не лише експлуатаційних витрат, але урахування людського чиннику під час надання послуги.

Модель розподілу рятувальних матеріалів для надзвичайних ситуацій у сфері охорони здоров'я в межах мультимодальної транспортної мережі з визначенням найкращого маршруту доставки розроблено в [4]. У цій моделі встановлені пріоритети попиту відповідно до ступенів надзвичайної ситуації для визначення послідовності транспортування. Крім того, автори вводять до розгляду вартість психологічного болю, спричинену дефіцитом рятувальних матеріалів, для компромісу між пріоритетом і задовільнення попиту.

Багатоцільові моделі транспортування і розподілу ресурсів під час надзвичайних ситуацій запропоновано в дослідженнях [5, 6]. Існує певна кількість наукових досліджень, в яких розробляються багатоетапні моделі розподільчих процесів [7, 8]. В роботі [7] запропоновано нову модель розташування-розподілу-інвентаризації, яка зосереджена на запобіганні спалахів інфекційних захворювань за допомогою технології на основі Інтернету речей на етапі реагування на катастрофи. Представлена модель складається з двох етапів; перший – це виявлення випадків інфікування, оперативне переведення хворих у тимчасові госпіталі та розміщення людей в пунктах евакуації. Далі на другому етапі розташовуються розподільчі центри, а предмети допомоги передаються в тимчасові госпіталі та пункти евакуації порівну з метою мінімізації нестачі. В роботах [8, 9] представлено математичні моделі оптимізаційних задач двоетапної та частково-двоетапної евакуації населення із зонуванням постраждалої території. Дворівневий підхід до проблеми розміщення-

розподілу об'єктів з розмірами розглянуто в роботі [10]. Оптимізаційну модель розташування укриттів, центрів розподілу допомоги та телекомунікаційних веж на основі нечітких сценаріїв представлено в роботі [11].

Мета дослідження. Підвищення ефективності запобіжних заходів щодо техногенних надзвичайних ситуацій шляхом розробки моделей і методів оптимізаційних задач, які дозволять завчасно визначати зони екстреної допомоги, проводити організацію логістичних процесів, раціонально розподіляючи транспортні та матеріальні ресурси.

Викладення основного матеріалу. Представимо декілька моделей і методів розв'язання задач оптимального розміщення сервісних центрів або об'єктів соціально-економічного призначення із закріпленням за ними зон для надання послуг, пов'язаних з організацією аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт у разі реальної загрози виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Такими центрами можуть бути служби соціального захисту, склади аварійного постачання й розподілу предметів першої необхідності та ін. Передбачено: 1) побудова мультиплексного розбиття території, тобто перекриття зон на той випадок, коли найближчий центр не зможе надати послугу; 2) оптимальне розміщення певної кількості нових центрів СЕЛ, коли можливості функціонуючих не задовольняють потреби всього регіону.

Постановка задачі. Нехай Ω – обмежена територія, $\tau_i \in \Omega$, $i = 1, 2, \dots, N$, – деякі точки, які називаються центрами (можуть бути фіксованими або їх потрібно визначити), $\rho(x)$ – невід'ємна функція, яка описує попит на послугу (вважатимемо, що в кожній точці x області Ω за допомогою соціологічних досліджень або сучасних геоінформаційних технологій його можна оцінити); $c(x, \tau_i)/w_i$ – вартість надання послуги клієнту $x \in \Omega$ центром τ_i (вважається пропорційною відстані $c(x, \tau_i)$ між точками); a_i – вартість облаштування нового чи модернізації існуючого центру τ_i або його фіксовані організаційні витрати, розраховані на одну умовну одиницю попиту, $i = \overline{1, N}$; b_1, b_2, \dots, b_N – потужності центрів, що визначають максимальний об'єм послуг, який можуть запропонувати відповідні центри. Потрібно здійснити розбиття заданого регіону на області Ω_{σ_l} , $l = \overline{1, L}$, які охоплюють споживачів, що мають одні й ті самі k найближчі сусідні сервісні центри $\{\tau_{j_1^l}, \tau_{j_2^l}, \dots, \tau_{j_k^l}\}$ з N існуючих (можливих). Тут $\sigma_l = \{j_1^l, j_2^l, \dots, j_k^l\}$ – набір індексів центрів, котрі асоціюються з підмножиною Ω_{σ_l} . Розбиття області Ω потрібно здійснити з урахуванням

потужності кожного j -го центру та частки γ_j^l ринку послуг, яку воно займає на території Ω_{σ_l} , серед об'єктів $\{\tau_{j_1^l}, \tau_{j_2^l}, \dots, \tau_{j_k^l}\}$, що обслуговують дану територію.

Для математичного опису задачі введемо наступні позначення:

$N = \{1, 2, \dots, N\}$ – множина всіх індексів центрів;

$M(N, k)$ – множина всіх k -елементних підмножин множини N , $|M(N, k)| = C_N^k = L$; $\sigma_l = \{j_1^l, j_2^l, \dots, j_k^l\}, l = \overline{1, L}$, – елементи множини $M(N, k)$.

Сукупність підмножин $\{\Omega_{\sigma_1}, \Omega_{\sigma_2}, \dots, \Omega_{\sigma_L}\}$ з $\Omega \subset E^2$ називається розбиттям k -го порядку множини Ω на її підмножини $\Omega_{\sigma_1}, \Omega_{\sigma_2}, \dots, \Omega_{\sigma_L}$, якщо

$$\bigcup_{l=1}^L \Omega_{\sigma_l} = \Omega, \text{mes}(\Omega_{\sigma_i} \cap \Omega_{\sigma_j}) = 0; \sigma_i, \sigma_j \in M(N, k), i \neq j, i, j = \overline{1, L},$$

де $\text{mes}(\cdot)$ – міра множини. Ω_{σ_j} є підмножинами k -го порядку множини Ω .

Нехай $\Sigma_{\Omega}^{N, k}$ – клас всіх можливих розбиттів k -го порядку множини Ω на її підмножини $\Omega_{\sigma_1}, \dots, \Omega_{\sigma_L}$:

$$\Sigma_{\Omega}^{N, k} = \left\{ \bar{\omega} = \{\Omega_{\sigma_1}, \dots, \Omega_{\sigma_L}\}: \bigcup_{l=1}^L \Omega_{\sigma_l} = \Omega, \text{mes}(\Omega_{\sigma_i} \cap \Omega_{\sigma_j}) = 0, \sigma_i, \sigma_j \in M(N, k), i \neq j, i, j = \overline{1, L} \right\}$$

Задача 1. Неперервна задача оптимального розбиття k -го порядку множини Ω при обмеженнях із розміщенням центрів. Потрібно

$$F(\bar{\omega}, \tau^N) \rightarrow \min_{\bar{\omega} \in \Sigma_{\Omega}^{N, k}; \tau^N \in \Omega^N}$$

$$F(\bar{\omega}, \tau^N) = \sum_{l=1}^L \int_{\Omega_{\sigma_l}} \sum_{i \in \sigma_l} (c(x, \tau_i) / w_i + a_i) \rho(x) dx,$$

$$\sum_{l: i \in \sigma_l}^L \int_{\Omega_{\sigma_l}} \gamma_i^l \rho(x) dx = b_i, \quad i = \overline{1, p}, \quad (1)$$

$$\sum_{l: i \in \sigma_l}^L \int_{\Omega_{\sigma_l}} \gamma_i^l \rho(x) dx \leq b_i, \quad i = \overline{p+1, N}. \quad (2)$$

Тут $x = (x^{(1)}, x^{(2)}) \in \Omega$; $c(x, \tau_i), i = \overline{1, N}$ – обмежені, визначені на $\Omega \times \Omega$ функції. Функція $\rho(x)$ – обмежена, невід'ємна на Ω ; $w_i > 0, a_i \geq 0, b_i \geq 0, i = \overline{1, N}$, – задані числа; коефіцієнти γ_j^l такі, що для всіх $j = \overline{1, N}, l = \overline{1, L}$

$$0 \leq \gamma_i^l \leq 1, \gamma_{j_1^l}^l + \gamma_{j_2^l}^l + \dots + \gamma_{j_k^l}^l = 1. \quad (3)$$

Для коректності задачі 1 мають виконуватися наступні умови:

$$0 \leq b_i \leq S, i = \overline{1, N}; \sum_{i=1}^p b_i \leq S \leq \sum_{i=1}^N b_i; \text{де } \int_{\Omega} \rho(x) dx = S;$$

Характеристичною вектор-функцією підмножини Ω_{σ_l} , що включена до розбиття k -го порядку множини Ω , називається вектор-функція

$\lambda^l(x) = (\lambda_1^l(x), \dots, \lambda_N^l(x))$, визначена на множині Ω , з наступними координатами:

$$\lambda_i^l(x) = \begin{cases} 1, & x \in \Omega_{\sigma_l}, \quad i \in \sigma_l, \\ 0 & \text{у протилежному випадку,} \end{cases} \quad i = \overline{1, N},$$

Взагалі до задач оптимального мультиплексного розбиття використовується єдиний підхід: здійснюється ЛП-релаксації задачі, коли невідомим $\hat{\lambda}_i^l$ дозволяється приймати значення на відрізьку від 0 до 1, отримана задача зводиться через функціонал Лагранжа до допоміжної скінченновимірної негладкої оптимізаційної задачі, для чисельного розв'язання якої застосовуються сучасні методи недиференційованої оптимізації.

Оптимальний розв'язок задачі 1, сформульованої в еквівалентній формі у термінах характеристичних функцій підмножин k -го порядку, що складають мультиплексне розбиття Ω , отримано у такому вигляді: для $i = \overline{1, N}$, $l = \overline{1, L}$ і майже всіх $x \in \Omega$:

$$\hat{\lambda}_i^l(x) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } c(x, \hat{\tau}_i)/w_i + a_i + \gamma_i^l \hat{\psi}_i \leq c(x, \hat{\tau}_j)/w_j + a_j + \gamma_j^l \hat{\psi}_j, \\ & \forall i \in \sigma_l, j \in N \setminus \sigma_l, \\ 0 & \text{в протилежному випадку,} \end{cases} \quad (4)$$

де $\hat{\tau}_1, \dots, \hat{\tau}_N, \hat{\psi}_1, \dots, \hat{\psi}_N$ є оптимальним розв'язком задачі

$$G(\psi) = \min_{\tau^N \in \Omega^N} G_1(\tau, \psi) \rightarrow \max, \quad (5)$$

за умов

$$\begin{aligned} \psi_i &\geq 0, \quad i = \overline{p+1, N}, \\ G_1(\tau^N, \psi) &= \int_{\Omega} \min_{\substack{\sigma_l \in \mathcal{M}(N, k) \\ l = \overline{1, L}}} \sum_{i \in \sigma_l} [c(x, \tau_i)/w_i + a_i + \gamma_i^l \psi_i] \rho(x) dx - \sum_{i=1}^N \psi_i b_i. \end{aligned} \quad (6)$$

Для чисельної реалізації методу від (5), (6) здійснюється перехід до задачі: $\max_{\psi \in E^N} \min_{\tau^N \in \Omega^N} U(\tau^N, \psi)$, де $U(\tau^N, \psi) = G_1(\tau^N, \psi) - Q \sum_{i=p+1}^N \max(0, -\psi_i)$, Q – додатне число (більше за множники Лагранжа).

Узагальнимо задачу 1 [12]. Розглянемо математичну модель задачі розміщення нових підрозділів діючої СЕЛ, тобто будемо вважати, що $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$ ($m < N$) є заданими, а координати решти центрів $\tau_{m+1}, \tau_{m+2}, \dots, \tau_N$ потрібно визначити, $\tau^{N-m} = (\tau_{m+1}, \tau_{m+2}, \dots, \tau_N) \in \underbrace{\hat{\Omega} \times \dots \times \hat{\Omega}}_{N-m} = \hat{\Omega}^{N-m}$. Тоді задача має наступний вигляд:

Задача 2. $F(\bar{\omega}, \tau^{N-m}) \rightarrow \min_{\bar{\omega} \in \Sigma_{\Omega}^{N,k}; \tau^{N-m} \in \hat{\Omega}^{N-m}}$ за умов (1), (2).

Вочевидь, задача 1 є окремим випадком задачі 2, коли $m = 0$, а, отже, метод розв'язання останньої такий самий, як і для 1, з тією різницею, що мінімізація цільового функціоналу відбувається поряд з розбиттям і за вектором $\tau^{N-m} = (\tau_{m+1}, \tau_{m+2}, \dots, \tau_N) \in \hat{\Omega}^{N-m}$, а також компоненти вектору узагальненого градієнту функції $U(\tau^{N-m}, \psi)$ за першою змінною обчислюються за допомогою скінченних різниць, позаяк зміна цих координат викликає перерозподіл зон відповідальності усіх центрів, і розміщуваних, і діючих. На рис. 2 подано результати розв'язання модельної задачі оптимального розміщення 3-х нових об'єктів (7-го, 8-го та 9-го) мережі з $m = 6$ центрів аварійного постачання з перерозподілом зон їх відповідальності в регіоні $\Omega = \{x \in R^2: 0 \leq x^{(i)} \leq 10, i = 1,2\}$ за таких даних: $k = 1, N = 9, w_i = 1 \forall i = \overline{1,9}; a = (1; 1.5; 2.7; 1; 1.1; 1.5; 2.2; 1.9; 2), \rho(x) = 1, \forall x \in \Omega$; метрика – евклідова. Табл. 1 демонструє перерозподіл (майже рівномірний) зон відповідальності і зменшення навантаження на об'єкти мережі. Значення функціоналу зменшилось майже на 10% з 349.54 до 314.345 одиниць.

Таблиця 1

Навантаження

№ центру	Навантаження на центр	
	до	після
перерозподілу		
1	17.499	13.215
2	13.727	10.775
3	19.432	9.215
4	17.033	11.707
5	14.038	10.117
6	18.267	11.034
7	0	9.125
8	0	11.105
9	0	13.705

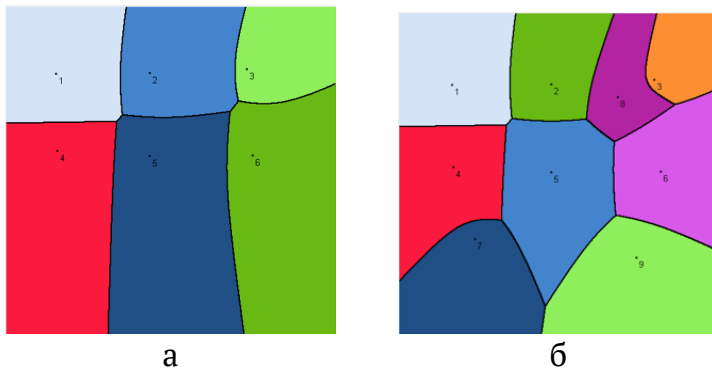


Рисунок 2 - Монопольні зони обслуговування для центрів: а – шести фіксованих, б – шести фіксованих і трьох оптимально розміщених

Як поширюється зона обслуговування певного центру із збільшенням кратності розбиття, можна простежити в першому рядку табл. 2, де представлено зона відповідальності 3-го центру у випадку розбиття на монополії, дуп-

лексного та триплексного розбиття. У другому рядку таблиці наведено оптимальні розбиття і сфера обслуговування для того самого 3-го центру, але у випадку обмежених потужностей 1-го, 3, і 4-го центрів за тих самих інших вихідних даних, що і для задач з першого рядка таблиці. Із зменшенням потужностей центрів зменшуються і зони їх відповідальності.

Далі розглянемо задачу оптимального розміщення підрозділів систем екстреної логістики з метою мінімізації часу надання послуги навіть найвіддаленішому об'єкту на заданій території, причому для центрів потрібно визначити сервісні зони з урахуванням можливості їх перекриття.

Таблиця 2

Обмежені потужності центрів та границі між підмножинами

№	Вихідні дані: N, b, a, w	Оптимальне розбиття k -го порядку. Зона обслуговування для першого центру		
		$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$
1	$N = 10,$ $a = (1,2,1,2,1,2,1,2,1,2),$ $b_i = 100, \forall i = \overline{1, N},$ $w_i = 1, \forall i = \overline{1, N}$			
2	$N = 10,$ $a = (1,2,1,2,1,2,1,2,1,2),$ $b_{1,4} = 10;$ $b_3 = 3;$ $b_{2,5,6,7,8,9,10} = 100;$ $w_i = 1, \forall i = \overline{1, N}$			

Математична модель задачі є задачею про мінімальне k -кратне s -кульове покриття, яка записується у такий спосіб: знайти величину

$$\bar{R}(\lambda^*(\cdot), \tau_*^N) = \inf_{(\tau_1, \dots, \tau_N) \in \Omega^N} \sup_{x \in \Omega} \min_{\lambda(x) \in \Lambda_N^k} \max_{i=1, \dots, N} c(x, \tau_i) \lambda_i(x), \quad (7)$$

де $\Lambda_N^k = \{\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_N): \lambda_i = 0 \vee 1, i = \overline{1, N}; \sum_{i=1}^N \lambda_i = k\}$, а також вектор-функцію $\lambda^*(\cdot): \forall x \in \Omega \lambda^*(x) \in \Lambda_N^k$, та вектор $\tau_*^N = (\tau_1^*, \dots, \tau_N^*) \in \Omega^N \subset E_2^N$, за яких у виразі (7) досягається нижня грань.

Вектор-функція $\lambda(\cdot)$ використовується для конструктивного запису математичної моделі задачі та є проміжним результатом, оскільки містить

інформацію про те, які саме k центрів є найближчими до кожної точки з Ω .

Математичну формалізацію задачі можна здійснити і за допомогою моделей неперервних задач мультиплексного розбиття множин:

Задача 3. Потрібно за умов (1), (2) забезпечити

$$F_R(\bar{\omega}, \tau^N) = \max_{l=1, L} \sup_{x \in \Omega_{\sigma_l}} \max_{i \in \sigma_l} (c(x, \tau_i)/w_i + a_i) \rho(x) \rightarrow \min_{\substack{\bar{\omega} \in \Sigma_{\Omega}^{N, k} \\ \tau^N \in \Omega^N}} \quad (8)$$

Задача 3 є задачею оптимального багатократного покриття множини при обмеженнях з оглядом на те, що за певних вихідних даних цільовий функціонал визначає величину радіуса оптимального покриття $R(\tau_*^N) = \inf_{\tau^N} \sup_{x \in \Omega} \min_{i=1, \dots, N} c(x, \tau_i)$.

Методи багатократного кульового покриття розроблені з використанням елементів теорії неперервних задач оптимального розбиття множин і передбачають редукцію до задач умовної оптимізації недиференційованих функцій, для розв'язування яких залучається апарат штрафних функцій та субградієнтні методи. Крім того, методи розв'язання задач оптимального багатократного кульового покриття з розміщенням центрів куль використовують так звану «регуляризацію» цільового функціоналу задачі задля забезпечення уникнення розташування центрів куль занадто близько один від одного.

Припустимо тепер, що центри можуть розташовуватися лише на певних об'єктах або місцях $v_m \in T$, $m = 1, \dots, M$, $T \subseteq \Omega$, які визначені координатами й вартістю організації в них логістичних хабів. Кількість потенційних місць є більшою за кількість центрів, які потрібно розмістити. У такому випадку задача носить частково комбінаторний характер, адже з усіх можливих місць розташування потрібно виділити такі N , $N < M$, за яких функціонал (8) набуває найменшого значення [13].

Задача оптимального вибору центрів τ_i з множини T і визначення зон їх обслуговування в регіоні Ω з метою мінімізації максимально можливого часу надання послуги будь-яким з k найближчих до споживача центрів математично записується у такий спосіб: знайти вектор $y^* = \{y_m^*\}_{m=1, M}$, і відповідну вектор-функцію $\lambda^*(\cdot)$, за яких

$$\bar{R}(y, \lambda(\cdot)) = \sup_{x \in \Omega} \min_{\lambda(x) \in \Lambda_M^k} \max_{m=1, M} c(x, v_m) \lambda_m(x) \rightarrow \min \quad (9)$$

і виконуються умови:

$$\sum_{m=1}^M y_m = N, \quad (10)$$

$$\sum_{m=1}^M \lambda_m(x) = k \quad \forall x \in \Omega. \quad (11)$$

$$\lambda_m(x) \leq y_m \quad \forall m = \overline{1, M}, \forall x \in \Omega; \quad (12)$$

$$\lambda_m(x) = 0 \vee 1, \quad m = \overline{1, M}; \forall x \in \Omega; \quad (13)$$

$$y_m = 0 \vee 1, \quad m = \overline{1, M}, \quad (14)$$

$$v_m \in T, \quad m = 1, \dots, M. \quad (15)$$

Тут змінні y_m і $\lambda_m(x) \quad \forall x \in \Omega$, є бінарними, для яких $y_m = 1$, якщо центр розміщений в точці $v_m \in T$, і $y_m = 0$, якщо v_m залишилася незадіяною, $m = 1, \dots, M$; а

$$\lambda_m(x) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } x - \text{у зоні відповідальності центру } v_m, \\ 0 & \text{у протидільному випадку, } m = \overline{1, M}, \end{cases}$$

В задачі (9) – (15) служби, що розміщуються, вважаються однаковими об'єктами. Якщо кожен з $\tau_i, i = \overline{1, N}$, характеризується певними параметрами, що відрізняють їх один від одного, так само, як і місця можливого розміщення цих об'єктів можуть мати різні властивості, то формою представлення змінних в задачі має бути матриця з елементами $\beta_{im}, i = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}$, такими що

$$\beta_{im} = \begin{cases} 1, & \text{якщо центр } \tau_i \text{ розміщується в точці } v_m, \\ 0, & \text{в протидільному випадку,} \end{cases}$$

$$\sum_{i=1}^N \beta_{im} \leq 1 \quad \forall m = \overline{1, M}, \quad \sum_{m=1}^M \beta_{im} = 1 \quad \forall i = \overline{1, N}.$$

$$\text{Тоді має місце представлення } \tau_i = \sum_{m=1}^M \beta_{im} v_m, \quad i = \overline{1, N}.$$

Припустимо, що для функціонування нових центрів потрібно ресурсів у розмірі A ум. од., а організація центру в точці $v_m - a_m, m = \overline{1, M}$. Тоді має бути враховано наступне обмеження:

$$\sum_{m=1}^M a_m y_m \leq A, \quad (16)$$

і ставиться задача: знайти такі $y^* = \{y_m^*\}_{m=\overline{1, M}}$, і $\lambda^*(x), x \in \Omega$, що задовольняють умови (10) – (16) і мінімізують функціонал (9).

Рис. 3 демонструє результати 3-кратного покриття заданої області, утвореного 11-ма центрами, вибраними з 17 заданих. Праворуч від охопленої та розділеної області вказано відповідність кольору зони та номерів ([i,j] або [i,j,k]) центрів, що її обслуговують. Покриття здійснено на основі евклідової метрики, що доцільно, наприклад, коли розміщені центри доставляють матеріальні ресурси засобами транспортної авіації. Відстань між центрами в межах міста краще описувати l_1 -метрикою. На рис. 4 подано 2-кратне покриття області, згенероване 10-тю центрами, розташованими на наборі з 15 точок, з використанням l_1 -метрики. В усіх наведених прикладах a_i згенеровані випадково з множини $\{1,2,3,4\}$ для кожного $i = \overline{1, N}$; $A = 2N$.

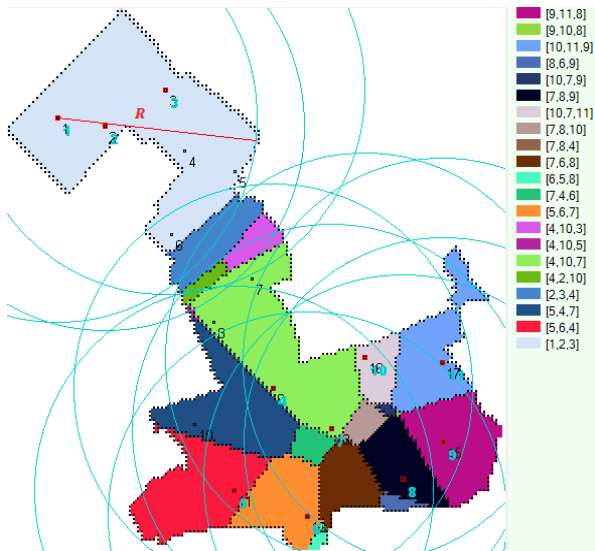


Рисунок 3 - Мінімальне 3-кратне покриття території зонами обслуговування 11 центрів, вибраних з 17 потенційних

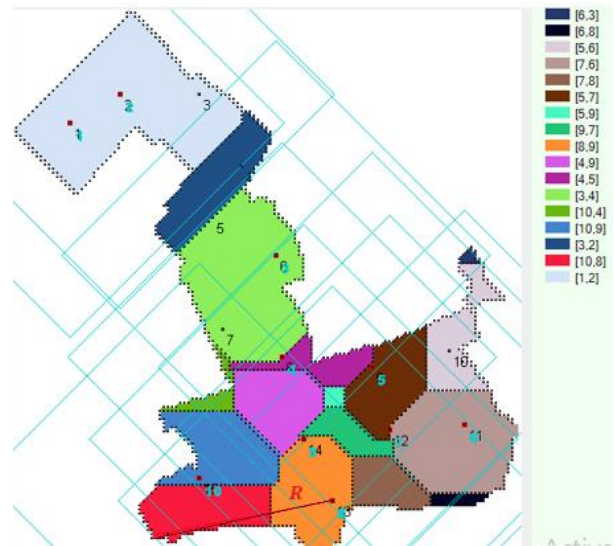


Рисунок 4 - Мінімальне 2-кратне покриття зонами обслуговування 10-ти центрів, вибраних з 15 заданих, 11-метрика

Висновки та перспективи подальших досліджень. Представлені математичні моделі та методи сегментації території щодо зон обслуговування центрів у вигляді неперервних задач оптимального мультиплексного розбиття множин, які на відміну від відомих моделей та методів, дозволяють розподіляти споживачів послуг за критеріями мінімізації відстані до декількох найближчих сервісних пунктів із врахуванням їх можливостей, відображаючи спільне обслуговування мережею центрів споживачів, неперервно розподілених на певній території. Обґрунтовано використання моделей неперервних задач оптимального розбиття континуальної множини з розміщенням центрів підмножин та додатковими зв'язками для математичного опису розподілення матеріальних потоків в ієрархічних системах екстреної логістики. Розроблено модель частково-двоетапного евакуаційного процесу, яка є узагальненням неперервної задачі оптимального розбиття множин, позаяк однією із складових оптимального розв'язку її є дворівневе зонування території. Моделі узагальнено на випадок реструктуризації діючих елементів систем, коли певна кількість їх реформується.

Розроблені моделі та методи розв'язання неперервних задач оптимального мультиплексного розбиття множин використано у програмному додатку для зонування і розміщення об'єктів в системах екстреної логістики, що дозволяє планувати завчасні соціально-економічні та організаційні заходи, спрямовані

на підвищення техногенної безпеки, зокрема на підприємствах гірничо-металургійної галузі.

Роботу виконано у рамках державної бюджетної тематики за номером 0123U100011.

ЛІТЕРАТУРА

1. Коряшкіна Л.С., Дзюба С.В. (2023). Перерозподіл навантаження в системі екстреної логістики за рахунок оптимального розміщення її нових підрозділів. *International scientific-practical conference “Modern trends and prospects for the development of science, education and society”*: conference proceedings (Aarhus, Denmark, August 10, 2023). Aarhus, Denmark: Scholarly Publisher ICSSH, 2023. – С. 42 – 43.
2. Hezam, I.M., Nayeem, M., Lee, G.M. (2021). A Systematic Literature Review on Mathematical Models of Humanitarian Logistics. *Symmetry*, 13(1):11. <https://doi.org/10.3390/sym13010011>
3. Seraji H., Tavakkoli-Moghaddam R., Asian S., Kaur H. (2022). An integrative location-allocation model for humanitarian logistics with distributive injustice and dissatisfaction under uncertainty. *Annals of Operations Research*, Springer, vol. 319(1), p. 211-257, December. DOI: 10.1007/s10479-021-04003-5
4. Weng X, Duan S, Zhang J, Fan H. (2024). A Material Allocation Model for Public Health Emergency under a Multimodal Transportation Network by Considering the Demand Priority and Psychological Pain. *Mathematics*, 12(3):489. <https://doi.org/10.3390/math12030489>
5. Tlili, T., Abidi, S., & Krichen, S. (2018). A mathematical model for efficient emergency transportation in a disaster situation. *American Journal of Emergency Medicine*, 36, 1585–1590. DOI:10.1016/j.ajem.2018.01.039
6. Safaei, A.S., Farsad, S., Paydar, M.M. (2018). Emergency logistics planning under supply risk and demand uncertainty. *Oper Res Int J*. <https://doi.org/10.1007/s12351-018-0376-3>
7. Ehsani, B., Karimi, H., Bakhshi, A., Aghsami, A., Rabbani, M. (2023). Designing humanitarian logistics network for managing epidemic outbreaks in disasters using Internet-of-Things. A case study. *Computers and Industrial Engineering*. 175:C. Online publication date: 1-Jan-2023. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108821>
8. Koriashkina, L., Us, S., Odnovol, M., Stanina, O., Dziuba, S.(2024). Two-stage problems of optimal location and distribution of the humanitarian logistics system’s structural subdivisions. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, 1.

9. Дзюба, С., Коряшкіна, Л., Станіна, О., Лубенець, Д. (2023). Математичні моделі оптимізаційних задач частково-двоетапної евакуації населення із зонуванням постраждалої території. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 3, С. 12 – 16. doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-2>
10. Mallozzi, L., Puerto, J., Rodríguez-Madrena, M. (2019). On Location-Allocation Problems for Dimensional Facilities. *Journal of Optimization Theory and Applications*, Springer, vol. 182(2): 730-767, August. DOI: 10.1007/s10957-018-01470-y
11. Mohamadi, A., Yaghoubi, S., Pishvae, M.S. (2019). Fuzzy multi-objective stochastic programming model for disaster relief logistics considering telecommunication infrastructures: a case study. *Oper Res Int J*, 19(1):59-99
12. Коряшкіна, Л., Сазонова, М., Одновол, М. (2023). Алгоритми територіальної сегментації для мережі сервісних центрів із перекриттям зон обслуговування. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 12–25. doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2023-2-2>
13. Dziuba, S., Bulat, A., Koriashkina, L., Blyuss, B. (2023). Discrete-Continuous Model of the Optimal Location Problem for the Emergency Logistics System. Available at SSRN: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4401341>

REFERENCES

1. Koriashkina, L.S., Dziuba, S.V. (2023). Pererozpodil navantazhennia v systemi ekstrenoi lohistyky za rakhunok optimalnoho rozmishchennia yii novykh pidrozdiliv. *International scientific-practical conference “Modern trends and prospects for the development of science, education and society”*: conference proceedings (Aarhus, Denmark, August 10, 2023). Aarhus, Denmark: Scholarly Publisher ICSSH, 2023. – С. 42 – 43.
2. Hezam, I.M., Nayeem, Mk., Lee, G.M. (2021). A Systematic Literature Review on Mathematical Models of Humanitarian Logistics. *Symmetry*; 13(1):11. <https://doi.org/10.3390/sym13010011>
3. Seraji H., Tavakkoli-Moghaddam R., Asian S., Kaur H. (2022). An integrative location-allocation model for humanitarian logistics with distributive injustice and dissatisfaction under uncertainty. *Annals of Operations Research*, Springer, vol. 319(1), p. 211-257, December. DOI: 10.1007/s10479-021-04003-5
4. Weng, X., Duan, S., Zhang, J., Fan, H. (2024). A Material Allocation Model for Public Health Emergency under a Multimodal Transportation Network by Considering the Demand Priority and Psychological Pain. *Mathematics*, 12(3):489. <https://doi.org/10.3390/math12030489>

5. Tlili, T., Abidi, S., Krichen, S. (2018). A mathematical model for efficient emergency transportation in a disaster situation. *American Journal of Emergency Medicine*, 36, 1585–1590. DOI:10.1016/j.ajem.2018.01.039
6. Safaei, A.S., Farsad, S., Paydar, M.M. (2018). Emergency logistics planning under supply risk and demand uncertainty. *Oper Res Int J*. <https://doi.org/10.1007/s12351-018-0376-3>
7. Ehsani, B., Karimi, H., Bakhshi, A., Aghsami, A., Rabbani, M. (2023). Designing humanitarian logistics network for managing epidemic outbreaks in disasters using Internet-of-Things. A case study. *Computers and Industrial Engineering*. 175:C. Online publication date: 1-Jan-2023. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108821>
8. Koriashkina, L., Us, S., Odnovol, M., Stanina, O., Dziuba, S.(2024). Two-stage problems of optimal location and distribution of the humanitarian logistics system's structural subdivisions. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, 1.
9. Dziuba S., Koriashkina, L., Stanina, O., Lubenets, D. (2023). Mathematical models of optimization problems of partially two-stage population evacuation with territory segmentation. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 3, 13–21, doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-2>
10. Mallozzi, L., Puerto, J., Rodríguez-Madrena, M. (2019). On Location-Allocation Problems for Dimensional Facilities. *Journal of Optimization Theory and Applications*, Springer, vol. 182(2): 730-767, August. DOI: 10.1007/s10957-018-01470-y
11. Mohamadi, A., Yaghoubi, S., Pishvae, M.S. (2019) Fuzzy multi-objective stochastic programming model for disaster relief logistics considering telecommunication infrastructures: a case study. *Oper Res Int J*, 19(1): 59-99
12. Koriashkina, L., Sazonova, M., Odnovol, M. (2023). Algorithms of territorial segmentation for a facility network with overlapping service zones. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 2, 12–25. doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2023-2-2>
13. Dziuba, S., Bulat, A., Koriashkina, L., Blyuss, B. (2023). Discrete-Continuous Model of the Optimal Location Problem for the Emergency Logistics System. Available at SSRN: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4401341>

Received 15.12.2023.
Accepted 19.12.2023.

***Mathematical models and methods of objects' location with area zoning
in emergency logistics***

The mathematical models for distribution processes related to organizing precautionary measures in the event of threats or occurrences of man-made emergencies are presented. The tasks include optimal zoning of territories with the fixing of zones by ob-

jects of social purpose for service provision. Provision is made for: the possibility of overlapping zones in case the nearest center cannot provide the service; optimal placement of a certain number of new centers of emergency logistics systems with simultaneous redistribution of the load on all their structural elements; the selection of locations of structural subdivisions based on existing facilities. The optimality criteria involve minimizing either the time to provide the service even to the most remote object in the given territory, or the total distance to the nearest centers from consumers that are densely distributed in the given territory, and/or the organizational costs associated with the arrangement of new centers. Mathematical models are proposed in the form of continuous problems of optimal multiplex partitioning of sets with a linear or minimax functional of quality. The latter provides such placement of centers that provides optimal multiple coverage of the territory (with a minimum radius of multiple coverage). Methods for solving the formulated problems were developed using LP-relaxation of linear problems with Boolean variables, duality theory to reduce the initial problems of infinite-dimensional programming to problems of conditional optimization of a non-smooth function of several variables, and modern methods of non-differentiated optimization.

Key words: emergency logistics, multiplex partitioning of sets, multiple circle coverage, modeling, optimization

Коряшкіна Лариса Сергіївна – канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри системного аналізу і управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна.

Дзюба Сергій Володимирович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, учений секретар, Придніпровський науковий центр НАН України та МОН України, Україна.

Koriashkina Larysa Sergiyivna – Candidate of Physics and Mathematics Science, Associate Professor of the Department of System Analysis and Control, Dnipro University of Technology, Ukraine.

Dziuba Serhii Volodymyrovych – Doct. Sc. (Tech.), Associate Professor, scientist secretary Pridniprovsky Scientific Center of the National Academy of Sciences of Ukraine and of Ministry of Education and Science of Ukraine, Ukraine.

Р. Котенко, Л. Божуха

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУР ДАНИХ ДЛЯ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ ПОШУКУ ПЕРЕТИНУ ТРИВИМІРНИХ ОБ'ЄКТІВ

Анотація. У роботі досліджуються підходи та алгоритми вирішення задачі оптимізації пошуку перетину з тривимірними об'єктами. Приділена увага вибору структури даних. Розроблено програмне забезпечення з набором структур даних (дерево октантів, kd дерева, ієрархія обмежувальних об'ємів, регулярна сітка) для оптимізації пошуку перетину. Одержані результати аналізу роботи оптимізаційних структур даних задачі пошуку перетину тривимірних об'єктів. Проведено порівняльний аналіз швидкості побудови та пошуку перетину між тривимірними об'єктами. Програмне забезпечення написано на мові JavaScript у середовищі Visual Studio Code. Результати дослідження можуть бути використані при роботі з тривимірною графікою, моделюванням, 3D інженерією, обчислювальною геометрією та у вебдодатках з необхідністю реалізації модуля взаємодії з тривимірними об'єктами.

Ключові слова: структури даних, дерево октантів, kd дерево, ієрархія обмежувальних об'ємів, регулярна сітка, тривимірна графіка, полігональна сітка, пошук перетину між мешами, оптимізація.

Постановка проблеми

Обробка великих обсягів тривимірних даних вимагає точних та ефективних методів пошуку перетину об'єктів у тривимірному просторі. Ця задача є особливо специфічною для сфери 3D інженерії, оскільки точність та швидкість пошуку перетину об'єктів мають критичне значення в процесах моделювання, проектування та аналізу складних тривимірних систем.

У контексті оптимізації пошуку перетину в тривимірному просторі використовуються різні структури даних, наприклад Octree, KD-Tree, BVH (Bounding Volume Hierarchy) та Regular Grid. Кожна з цих структур має свої унікальні характеристики, які впливають на швидкість та ефективність пошуку перетину об'єктів у тривимірному просторі. Ці структури відіграють ключову роль у покращенні продуктивності алгоритмів пошуку та дозволяють забезпечити швидкий доступ до тривимірних даних безпосередньо пов'язаних з пошуком перетину.

© Котенко Р., Божуха Л., 2023

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Пошук перетину полігональних сіток (мешів) є завданням знаходження перетину областей у тривимірному просторі, які представляють ці полігональні представлення об'єкта [1]. Підходи до пошуку перетину можуть бути різними залежно від складності мешів та вимог до точності результатів. У загальному вигляді, завдання виявлення перетину між мешами полягає у визначенні всіх трикутників одного мешу, які перетинають трикутники іншого мешу [2].

Інший підхід до пошуку перетину полягає в застосуванні алгоритмів променевого трасування (ray tracing), обходу граней мешу, алгоритми перетину для геометричних об'єктів тощо. Для складних мешів (велика кількість граней і вершин) можуть застосовуватися методи побудови обмежувальних об'ємів (bounding volumes), що дозволяють швидше відфільтрувати області, які точно не перетинаються, зменшуючи обчислювальну складність. Саме цей підхід буде використаний у цій роботі. Важливо враховувати, що пошук перетину може бути витратним за ресурсами обчисленням, особливо для складних моделей, тому ефективність та швидкодія цих алгоритмів важлива для реального часу в графіці, симуляціях чи програмах моделювання.

Мета дослідження

Метою роботи є розроблення програмного забезпечення з різними структурами даних. Трикутник вважається базовою складовою мешу, тому пошук перетину між трикутниками - це ключова операція для визначення перетину між мешами. Складніші геометричні структури складаються з великої кількості трикутників. Виявлення перетину трикутників є основою для визначення можливих зон перетину між складними тривимірними об'єктами, що представлені у вигляді мешів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Алгоритм пошуку перетину між двома трикутниками у тривимірному просторі є процесом визначення існування хоча б однієї спільної точки (перетин трикутників). Основна ідея полягає в обчисленні перетину площин трикутників та подальшому визначенні областей перетину [3].

Першим кроком є первинна перевірка можливого перетину шляхом визначення методами побудови обмежуючих об'ємів для кожного трикутника та подальшої перевірки цих просторових фігур на перетин. Такий підхід дозволяє швидко відфільтрувати трикутники, які точно не перетинаються.

Стратегія розділення тривимірного простору на менші області для полегшення оброблення та швидкого доступу до об'єктів у цьому просторі. Вибір

стратегії допомагає оптимізувати пошук, взаємодію та візуалізацію об'єктів у тривимірному середовищі [4]. У роботі проаналізовані підходи розбиття простору:

1) ієрархічна структура дерева (Octree) з різними типами вузлів (листові, внутрішні) використовується для швидкого пошуку та оброблення інформації (роботи з даними) об'єктів у тривимірному просторі, швидкої локалізації області простору з визначеними об'єктами;

2) бінарне дерево (K-dimensional tree) використовує розділення простору за різними вимірами та ефективно використовується для пошуку точок;

3) ієрархічна структура (Bounding Volume Hierarchy, BVH) з групуванням об'єктів в обмежувальні об'єми (паралелепіпеди, сфери) та використовується для організації та прискорення пошуку перетинів між об'єктами у тривимірному просторі [5].

4) структура сітки (Regular Grid) використовує розділення простору на рівні області та дозволяє ефективно здійснювати пошук перетину лише в необхідних областях (наявна велика ймовірність перетину мешів).

Процес побудови таких структур даних включає в себе вибір площини розділення для розбиття даних на дві півплощини. Вибір цієї площини використовує методи центру (вибір точки посередині діапазону значень), медіани (вибір медіани діапазону значень) та Surface Area Heuristic (SAH, евристична оптимізація).

Для розроблення програмного забезпечення обрано TypeScript як мову програмування з урахуванням її переваг у відношенні до статичної типізації, що сприяє виявленню помилок на етапі розроблення та полегшує обслуговування програми в подальшому. Node.js був обраний як середовище виконання для забезпечення можливості запуску програми на сервері, що дозволяє використовувати його потужності для обробки тривимірних даних. Бібліотека THREE.js визначена для реалізації графічної частини програмного продукту для забезпечення потужних можливостей візуалізації тривимірних об'єктів та легкого інтегрування з TypeScript. У якості середовища розроблення програмного забезпечення обрано Visual Studio Code.

Для перевірки роботи програмного забезпечення були обрані тривимірні об'єкти (рис. 1).



Рисунок 1 – Тривимірні об’єкти:

(а) Stanford Bunny (~70 000 примітивів), (б) Stanford Dragon (~870 000 примітивів), (с) Stanford XYZRGB Dragon (~7 200 000 примітивів)

Заміри швидкості побудови структур за різних параметрів

Для обраних фігур була виконана побудова структур за різних параметрів глибини, та типів розподілу.

Таблиця

Середній час побудови **octree** (у мс)

Макс. глибина	Bunny	Dragon	XYZRGB Dragon
1	80	1050	13700
2	180	2100	24300
3	280	3300	32300
4	340	4500	45100
5	500	5800	55800
6	850	7600	67700

Таблиця 2

Середній час побудови **kd-дерева** (центр/медіана/ SAH) (у мс)

Макс. глибина	Bunny	Dragon	XYZRGB Dragon
2	70/80/700	1100/1010/10100	12300/8800/95300
4	150/170/1400	2040/2100/20500	21000/22000/223400
6	230/250/2200	3250/3200/31000	30900/30500/302400
8	310/330/3100	4210/4300/40000	43200/41400/395600
10	400/440/4000	5350/5500/52000	48000/51200/480300
12	480/480/4800	6400/6200/61000	59700/62200/547200
14	540/480/4900	7600/8700/76200	67800/73200/725600

Для вісімкового дерева здійснювалась побудова за різних значень максимальної глибини, а для kd-дерева та BVH – за різних значень глибини та типу розподілу вузла (по центру, по медіані, з використанням SAH) (табл. 1-3).

Таблиця 3

Середній час побудови **BVH** (центр/медіана/ SAH) (у мс)

Макс. глибина	Bunny	Dragon	XYZRGB Dragon
2	120/100/720	1300/1400/10700	7500/8400/87200
4	160/160/1490	2200/2400/20600	14700/16200/165300
6	230/260/2200	3400/3500/31700	22300/24600/261500
8	310/330/3000	4300/4700/42300	31400/30900/312400
10	400/420/3900	5100/5900/54400	39100/39930/386500
12	460/470/4200	6400/7100/64700	48100/47200/457800
14	450/460/4300	7600/8300/76500	56200/58800/564300

Заміри швидкості пошуку перетину за різних параметрів

Використовуючи побудовані структури були здійснені заміри швидкості пошуку перетину (табл. 4-6).

Таблиця 4

Середній час пошуку перетину **octree** (у мс)

Макс. глибина	Bunny	Dragon	XYZRGB Dragon
1	1,5	14	170
2	0,7	5	70
3	0,4	1,5	24
4	0,15	0,7	15
5	0,1	0,4	3
6	0,1	0,3	1,5

Таблиця 5

Середній час пошуку перетину **kd-дерева** (центр/медіана/ SAH)(у мс)

Макс. глибина	Bunny	Dragon	XYZRGB Dragon
2	1,8/1,5/1,5	25/15/15	320/280/290
4	1,6/1,3/1,3	14/9/9	90/110/109
6	1/0,8/0,7	8/5/4	50/70/80
8	0,5/0,4/0,4	3/2,4/2,5	30/28/31
10	0,3/0,3/0,2	1,7/1,3/1,1	18/18/17
12	0,2/0,2/0,15	0,8/0,8/0,5	8/2,7/4
14	0,15/0,18/0,15	0,5/0,3/0,3	3,2/1,9/1,3

Таблиця 6

Середній час пошуку перетину **BVH** (центр/медіана/ SAH)(у мс)

Макс. глибина	Bunny	Dragon	XYZRGB Dragon
2	1,9/1,8/1,9	24/25/24	230/200/210
4	1,5/1,4/1,5	17/16/15	140/120/115
6	0,9/0,9/0,9	7/5/5	35/25/31
8	0,6/0,6/0,6	1,8/2,1/2,2	19/12/13
10	0,3/0,25/0,3	1,4/0,9/0,8	7/5/5
12	0,15/0,2/0,2	0,6/0,35/0,4	2,8/2,5/2,4
14	0,15/0,15/0,15	0,2/0,2/0,15	1,4/1,1/1,1

Отже, середня швидкість пошуку перетину для одного й того ж об'єкту при використанні різних методів є приблизно однаковою. Проте можна бачити деяке збільшення швидкості якщо порівняти kd-дерево з розподілом по центру та BVH з використанням SAH. Але таке збільшення є важливим у випадках, коли перетин з об'єктом потрібно шукати велику кількість разів протягом певного часу. Такий приріст швидкості можна отримати лише витративши набагато більше часу на первинну побудову, що скоріш за все не буде мати сенсу для вебдодатків, але буде важливим для отримання більшої швидкості пошуку перетину для інших цілей.

Тому оптимальними рішеннями, що не потребують багато часу для побудови та мають достатню швидкість пошуку перетину є структура даних , яка

представлена вісімковим деревом, kd-деревом (розділення по центру та за медіаною) та ієрархією обмежувальних об'ємів (розділення по центру та за медіаною).

У випадку якщо все ж таки необхідна максимальна швидкість пошуку перетину, то оптимальними рішеннями є структура даних, яка представлена kd-деревом (розділення з використанням SAH) або ієрархією обмежувальних об'ємів (розділення з використанням SAH).

Заміри швидкості побудови структур в залежності від розміру мешу

Для оцінки і порівняння швидкості побудови структур було обрано три варіанти мешу з різною кількістю полігонів: ~ 16 тис. трикутників - малий меш; ~ 260 тис. трикутників - середній меш; ~ 1 млн. трикутників - великий меш.

При використанні визначених полігональних сіток проведено певну кількість запусків алгоритму побудови дерева октантів, kd-дерева, ієрархії обмежувальних об'ємів та сітки для з'ясування середньої швидкості побудови структур.

Побудова деревоподібних структур виконувалася на таких параметрах: максимальна глибина: для octree - 10, для kd-дерев - 30; кількість трикутників на вузол - 20. Дані параметри побудови дерев забезпечують максимальну швидкість пошуку перетину (табл. 7). Для побудови сітки параметр розміру був встановлений на - 20 комірок.

Результати спостережень показують, що деревоподібні структури мають більшу ефективність у порівнянні з сіткою. Серед усіх структур kd-дерево - найшвидша структура при побудові. При опрацюванні великих тривимірних об'єктів ієрархія має дещо більший час побудови у порівнянні з kd-деревом, це може бути спричинено тим, що при кожному розподілу вузла виконується перерахування обмежувального об'єму. Структура сітки у свою чергу є найповільнішою структурою для яких проводились заміри.

Таблиця 7

Середній час побудови структур (у мс)

Структура	Малий меш	Середній меш	Великий меш
Octree	70	1260	5750
KD-Tree	54	1030	5550
BVH	54	1090	7880
Grid	1010	24110	101000

Для більш точної перевірки сітки були проведені додаткові заміри швидкості на різних значеннях розміру сітки для малого мешу.

Структура сітки є більш чутливою до параметрів побудови і при належному їх встановленні можна досягти непоганих результатів, при цьому не втрачаючи у ефективності.

Заміри швидкості пошуку перетину об'єктів в залежності від розміру мешу

Для замірів використовувались деревоподібні структури з оптимальними параметрами побудови - 20 трикутників на вузол і максимальна глибина 30 та 10 для бінарних дерев та октодерева відповідно (табл.8).

Таблиця 8

Середній час пошуку перетину (у мс)

Структура	Малий меш	Середній меш	Великий меш
Octree	60	110	281
KD-Tree	25	69	190
BVH	29	92	268

Отже, структура даних Octree у порівнянні з другими структурами має більший час пошуку. При чому kd-дерево найшвидше серед усіх структур з великий відривом. У свою чергу ієрархія обмежувальних об'ємів хоч і є швидшою за дерево октантів, але не має таких результатів як і KD-Tree. Причиною такої швидкості пошуку перетину може бути те, що BVH часто має перетин вузлів і так, як вузли перетинаються під час пошуку додатковий час витрачається на обхід одних і тих самих полігонів.

Результати проведених експериментів показують, що швидкість пошуку перетину між мешами з використанням сітки менша, ніж октодерева, kd-дерева та BVH. Але при цьому швидкість менша не надто сильно (у випадку великого мешу у два рази).

Висновки

Досліджено технології пошуку перетину із тривимірними об'єктами та сформовані проблеми, які можуть виникати під час виконання цієї операції за певних умов. Однією з таких складностей є швидкість пошуку перетину при великих наборах примітивів, з яких складаються об'єкти.

Досліджено результати використання складних структур даних. Реалізовано вище зазначені структури з можливістю їх налаштування різними входними параметрами (максимальна глибина, мінімальна кількість трикутників у листовому вузлі та тип розподілу). Проведено заміри швидкості роботи реалізованих структур для різних за розміром об'єктів та за різних параметрів побудови структур.

Найшвидшою при побудові та при пошуку перетину є kd-дерево. Ця структура мала найкращі результати як на малих так і на великих об'ємах даних.

Другою по ефективності є ієрархія обмежувальних об'ємів. Дана структура схожа на KD-Tree, але через особливість у вигляді перерахування об'ємів для кожного вузла потребує більше часу при побудові. Також під часу перевірки швидкості пошуку перетину дана структура показала гірші результати, ніж kd-дерево, незважаючи на те, що меш був розподілений на більш щільні підпростори, що у свою чергу мало б збільшити ефективність.

На третьому місці посідає дерево октантів. Ця структура досить за алгоритмом побудови тому, що розділ вузлів завжди відбувається у середині об'єму розділяючи вузол на вісім дочірніх вузлів. Через таку структуру, розподіл відбувається не рівномірно, що впливає на швидкість пошуку.

Підхід з розділенням простору з використанням сітки посідає четверте місце, але під час проведення замірів було з'ясовано, що недостатньо обрати максимальні значення параметрів, щоб досягти максимальної ефективності, як у випадку деревоподібних структур. Дана структура потребує більш точного використання параметрів побудови, що в результаті приведе до збільшення ефективності.

Створено додаток для відображення вхідних тривимірних об'єктів з візуалізацією обраних структур даних.

ЛІТЕРАТУРА

1. Introduction to Polygon Meshes. URL: <https://www.scratchapixel.com/lessons/3d-basic-rendering/introduction-polygon-mesh> (дата звернення 23.05.2022).
2. Brian Curless. Ray-triangle intersection. URL: https://courses.cs.washington.edu/courses/csep557/10au/lectures/triangle_intersection.pdf (дата звернення 23.05.2022).
3. Hamzah Asyrani Sulaiman, Abdullah Bade. Bounding Volume Hierarchies for Collision Detection. URL: https://www.researchgate.net/publication/224829148_Bounding_Volume_Hierarchies_for_Collision_Detection (дата звернення 23.05.2022).
4. what-when-how — In Depth Tutorials and Information. URL: <http://what-when-how.com/advanced-methods-in-computer-graphics/collision-detection-advanced-methods-in-computer-graphics-part-6/> (дата звернення 23.05.2022).

5. Ingo Wald. On fast Construction of SAH-based Bounding Volume Hierarchies.

URL: <https://www.sci.utah.edu/~wald/Publications/2007/ParallelBVHBuild/fastbuild.pdf> (дата звернення 23.05.2022).

6. Полігональна сітка в комп'ютерній графіці.

URL: <https://termin.in.ua/polihonal-na-sitka/> (дата звернення 09.01.2024).

7. Finding Intersecting Mesh. URL: https://www.sandia.gov/files/cubit/15.5/help_manual/WebHelp/mesh_generation/mesh_quality_assessment/find_intersecting_mesh.htm (дата звернення 09.01.2024).

8. A Fast Triangle-Triangle Intersection Test.

URL: https://fileadmin.cs.lth.se/cs/Personal/Tomas_Akenine-Moller/pubs/tritri.pdf (дата звернення 09.01.2024).

9. Spatial Partition. URL: <https://gameprogrammingpatterns.com/spatial-partition.html> (дата звернення 09.01.2024).

10. How octree work. URL: https://castle-engine.io/vrml_engine_doc/output/xsl/html/section.how_octree_works.html (дата звернення 09.01.2024).

11. Fast kd-Tree Construction for 3D-Rendering Algorithms Like Ray Tracing. URL: https://www.researchgate.net/publication/228573134_Fast_kd_Tree_Construction_for_3D-Rendering_Algorithms_Like_Ray_Tracing (дата звернення 09.12.2024).

12. Spatial Splits in Bounding Volume Hierarchies.

URL: <https://www.nvidia.in/docs/IO/77714/sbvh.pdf> (дата звернення 09.12.2024).

REFERENCES

1. Introduction to Polygon Meshes. URL: <https://www.scratchapixel.com/lessons/3d-basic-rendering/introduction-polygon-mesh> (date of application 23.05.2022).

2. Brian Curless. Ray-triangle intersection. URL: https://courses.cs.washington.edu/courses/csep557/10au/lectures/triangle_intersection.pdf (date of application 23.05.2022).

3. Hamzah Asyrani Sulaiman, Abdullah Bade. Bounding Volume Hierarchies for Collision Detection. URL: https://www.researchgate.net/publication/224829148_Bounding_Volume_Hierarchies_for_Collision_Detection (date of application 23.05.2022).

4. what-when-how — In Depth Tutorials and Information.

URL: <http://what-when-how.com/advanced-methods-in-computer-graphics/collision-detection-advanced-methods-in-computer-graphics-part-6/> (date of application 23.05.2022).

5. Ingo Wald. On fast Construction of SAH-based Bounding Volume Hierarchies. URL: <https://www.sci.utah.edu/~wald/Publications/2007/ParallelBVHBuild/fastbuild.pdf> (date of application 23.05.2022).
6. Polygonal grid in computer graphics. URL: <https://termin.in.ua/polihonal-na-sitka/> (date of application 09.12.2024).
7. Finding Intersecting Mesh. URL: https://www.sandia.gov/files/cubit/15.5/help_manual/WebHelp/mesh_generation/mesh_quality_assessment/find_intersecting_mesh.htm (date of application 09.12.2024).
8. A Fast Triangle-Triangle Intersection Test. URL: https://fileadmin.cs.lth.se/cs/Personal/Tomas_Akenine-Moller/pubs/tritri.pdf (date of application 09.01.2024).
9. Spatial Partition. URL: <https://gameprogrammingpatterns.com/spatial-partition.html> (дата звернення 09.12.2024).
10. How octree work. URL: https://castle-engine.io/vrml_engine_doc/output/xsl/html/section.how_octree_works.html (date of application 09.01.2024).
11. Fast kd-Tree Construction for 3D-Rendering Algorithms Like Ray Tracing. URL: https://www.researchgate.net/publication/228573134_Fast_kd_Tree_Construction_for_3D-Rendering_Algorithms_Like_Ray_Tracing (date of application 09.12.2024).
12. Spatial Splits in Bounding Volume Hierarchies. URL: <https://www.nvidia.in/docs/IO/77714/sbvh.pdf> (date of application 09.12.2024).

Received 19.12.2023.
Accepted 21.12.2023.

Study of data structures for the optimization problem of searching the intersection of three-dimensional objects

In the context of optimizing intersection search in three-dimensional space, various data structures are used, such as Octree, KD-Tree, BVH (Bounding Volume Hierarchy), and Regular Grid.

Approaches to finding the intersection may be different depending on the complexity of the meshes and the requirements for the accuracy of the results.

For complex meshes (a large number of faces and vertices), the methods of building bounding volumes can be used, which allow you to quickly filter out areas that do not exactly intersect, reducing the computational complexity. It is this approach that will be used in this work.

The purpose of the work is to develop software with various data structures.

Three-dimensional objects were selected to test the software: Stanford Bunny (~70,000 primitives), Stanford Dragon (~870,000 primitives), Stanford XYZRGB Dragon

ISSN 1562-9945 (Print) 133
ISSN 2707-7977 (Online)

(~7,200,000 primitives). For the selected shapes, the construction of structures was performed with different parameters of depth and types of distribution.

To evaluate and compare the speed of construction of structures, three versions of the mesh with different number of polygons were chosen: ~ 16 thousand triangles - small mesh; ~ 260 thousand triangles - average mesh; ~ 1 million triangles - a large mesh.

Construction of tree-like structures was performed with the following parameters: maximum depth: for octree - 10, for kd-trees - 30; the number of triangles per node is 20. These tree construction parameters ensure the maximum speed of intersection search. To build the grid, the size parameter was set to - 20 cells.

For a more accurate check of the grid, additional velocity measurements were made at different values of the grid size for a small mesh.

Technologies for searching for intersections with three-dimensional objects have been studied and problems that may arise during this operation under certain conditions have been identified. One of these difficulties is the speed of finding an intersection with large sets of primitives that make up objects.

Keywords: data structures, octant tree, kd-tree, bounding volume hierarchy, regular mesh, 3D graphics, polygonal mesh, mesh intersection search, optimization.

Котенко Роман Вікторович – магістр, спеціальність "Інженерія програмного забезпечення", кафедра математичного забезпечення ЕОМ, факультет прикладної математики, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

Божуха Лілія Миколаївна – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри математичного забезпечення ЕОМ, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

Kotenko Roman - master, speciality "Software Engineering", department of Mathematical Support of Calculating Machines, Faculty of Applied Mathematics, Oles Honchar Dnipro National University.

Bozhukha Liliia - candidate of physico-mathematical sciences, associate professor, Department of Mathematical Support of Calculating Machines, Oles Honchar Dnipro National University.

ЗМІСТ

CONTENTS

Песчанський В.Ю., Сулема Є.С. Пошук ключових точок на зображеннях для створення цифрових двійників медико-біологічних об'єктів	3	Peschanskii V., Sulema Y. Detection of key points on images for creating digital twins of medical and biological objects	3
Пеня О.Р., Сулема Є.С. Застосування глибоких штучних нейронних мереж для класифікації мультимодальних даних	11	Penia O., Sulema Y. Using deep artificial neural networks for multimodal data classification	11
Потап О.Ю., Куваєв В.М., Бойко О.О., Рибальченко М.О., Шибакінський В.І., Потап М.О. Мінімізація міжкільцевого натягу на безперервних станах за якірними струмами електроприводів прокатних клітей	23	Potap O., Kuvaiev V., Boyko O., Rybalchenko M., Shybakinskyi V., Potap M. Minimization of interstand tension on continuous grade rolling mills by armature currents of electric drives of roll mill stands	23
Гуда А.І., Березюк М.О. Властивості методів обробки та отримання даних в тест-методах хімічного аналізу	42	Guda A., Bereziuk M. Properties of processing and data acquisition methods in test methods of chemical analysis	42
Соломатін В.А., Байбуз О.Г., Сиротенко А.Є. Застосування згорткових нейонних мереж для діагностування ішемічного захво- рювання серця (ІЗС)	53	Solomatin V., Baibuz O., Syrotenko A. The application of coagulatory neon networks in medicine for the detection of ischemic heart diseases and their development prospects	53

Гуда О.В., Кирилов С.О., Кирилова Л.О. Математичні системи для реалізації штучних нейронних мереж, орієнтованих на хмарові обчислення	62	Huda O., Kyrylov S., Kyrylova L. Mathematical systems for the implementation of artificial neural networks focused on cloud computing	62
Ігнаткін В.У., Шульжик Ю.О., Дудніков В.С., Юшкевич О.П. Математичне моделювання перехідних процесів в ієрархічних структурах державного управління з нелінійними характеристиками	75	Ignatkin V.U., Shulzhyk Yu., Dudnikov V., Yushkevych O. Mathematical modeling of transient processes in hierarchical structures of public administration with nonlinear characteristics	75
Кавац О.О., Кавац Ю.В., Дібрій Д.А. Аналіз методик оцінки ступеню забрудненості водних об'єктів	98	Kavats O.O., Kavats Y.V., Dibrii D.A. Analysis of methods for assessing the degree of water pollution	98
Коряшкіна Л.С., Дзюба С.В. Математичні моделі та методи розміщення об'єктів із зонуванням території в системах екстреної логістики	107	Koriashkina L.S., Dziuba S.V. Mathematical models and methods of objects' location with area zoning in emergency logistics	107
Котенко Р., Божуха Л. Дослідження структур даних для задачі оптимізації пошуку перетину тривимірних об'єктів	123	Kotenko R., Bozhukha L. Study of data structures for the optimization problem of searching the intersection of three-dimensional objects	123

РЕФЕРАТИ

УДК 004.4 : 004.94

Песчанський В.Ю., Сулема Є.С. **Пошук ключових точок на зображеннях для створення цифрових двійників медико біологічних об'єктів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 6(149). – Дніпро, 2023. – С.3 – 10.

Анотація: У статті представлений аналіз оптимальних інструментів для створення цифрового двійника внутрішніх органів людини (на прикладі отоларингології) на основі поточних відеоданих, що надходять у реальному часі з камери медичного приладу. Досліджено два основних методи: алгоритмічна реконструкція та використання нейронної мережі. Порівняння методів виконано за критеріями: ефективність, точність, швидкість реакції та практичність застосування в медичному середовищі. Особлива увага приділена підходам на основі нейронних мереж через їх високу адаптивність, точність і здатність ефективно обробляти зашумлені та неповні дані. Визначено основні переваги та особливості цього методу у контексті медичного застосування. Результати дослідження підтверджують високий потенціал нейронних мереж у створенні точних цифрових моделей внутрішніх органів, що відкриває нові перспективи для розроблення програмного забезпечення процесів створення цифрових двійників медико біологічних об'єктів.

Бібл. 7, іл. 3.

УДК 004.93'11

Пеня О.Р., Сулема Є.С. **Застосування глибоких штучних нейронних мереж для класифікації мультимодальних даних** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 6(149). – Дніпро, 2023. – С.11 – 22.

Розглядається застосування штучних нейронних мереж для класифікації мультимодальних даних. Пропонується спосіб організації паралельної обробки даних, який адаптується до доступних обчислювальних можливостей для використання класифікації мультимодальних даних в системі цифрових двійників в режимі реального часу або близькому до нього.

Бібл. 9, іл. 6, табл. 4.

УДК 621.771.25:681.5

Потап О.Ю., Куваєв В.М., Бойко О.О., Рибальченко М.О., Шибакінський В.І., Потап М.О. **Мінімізація міжклітьового натягу на безперервних станах за якірними струмами електроприводів прокатних клітей** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 6(149). – Дніпро, 2023. – С.23 – 41.

Досліджено дієвість методу мінімізації натягу сортового прокату за інформацією про якірні струми головних електроприводів, який базується на гіпотезі про незмінність відношення якірного струму приводу наступної кліті до якірного струму приводу попередньої кліті в режимі вільної прокатки та передбачає прогнозування струму вільної прокатки в прокатних електроприводах за інформацією про струм вільної прокатки в електроприводах попередніх клітей. Дослідження базувалось на комплексній моделі процесу безперервної сортової прокатки у чотирьох чистових клітях дрібносортового стана з індивідуальними електроприводами, оснащеними системами підлеглого керування швидкості.

«Системні технології» 6 (149) 2023 «System technologies»

Шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання доведено, що застосування під час прокатки оперативного переходу від регулювання натягу шляхом коригування завданої частоти обертання електроприводу наступної кліті до безпосереднього регулювання якісного струму у ній в режимі стеження запобігає виникненню динамічних струмів і їхньому впливу на якість регулювання натягу.

Бібл. 11, іл. 8.

УДК 543.08

Гуда А.І., Березюк М.О. **Властивості методів обробки та отримання даних в тест методах хімічного аналізу** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 6(149). – Дніпро, 2023. – С.42 – 52.

Розглядаються властивості методів обробки та отримання аналітичного сигналу в тест методах хімічного аналізу: вплив умов освітлення, отримання точки інтересу на зображенні, цифровий аналіз зображення аналітичного сигналу.

Бібл. 20.

УДК 004.932.72'1:519.688

Соломатін В.А., Байбуз О.Г., Сиротенко А.Є. **Застосування згорткових нейонних мереж для діагностування ішемічного захворювання серця (ІЗС)** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 6(149). – Дніпро, 2023. – С.53 – 61.

Розглядається модель нейронної мережі яка застосовується до раннього виявлення ІЗС на основі зображень рентгенівських знімків. Особливістю дослідження є застосуванню згорткових нейонних мереж (ЗНМ) для автоматизації виявлення захворювань серця.

Бібл. 9.

УДК 519.7:004.8

Гуда О.В., Кирилов С.О., Кирилова Л.О. **Математичні системи для реалізації штучних нейонних мереж, орієнтованих на хмарові обчислення** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 6(149). – Дніпро, 2023. – С.62 – 74.

Наведено детальний опис функціонування нейонів, включаючи процеси підсумовування вхідних сигналів та активації за допомогою функцій активації. Визначено методи побудови моделей прийняття рішень на основі аналізу незрозумілих ситуацій і контрольних станів, визначених експертами. Запропоновано нечіткі еталонні ситуації для хмарних обчислень та їх вплив на прийняття рішень у різних сценаріях.

Бібл. 14, іл. 3.

УДК 351 354 + 519.816 + 681.511.4 + 681.513.52

Ігнаткін В.У., Шульжик Ю.О., Дудніков В.С., Юшкевич О.П. **Математичне моделювання перехідних процесів в ієрархічних структурах державного управління з нелінійними характеристиками** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 6(149). – Дніпро, 2023. – С.75 – 97.

У статті розглянуто багатоаспектна проблема відносин між людьми у державному управлінні (ДУ) та органах місцевого самоврядування (МС) в умовах швидкої непрогнозованої зміни ситуації в країні та в регіонах (політична, економічна, соціальна, тощо). Запропоновано розробити новий інструментарій для отримання оптимальних управлінських рішень в публічному управлінні з використанням новітніх інформаційних технологій. Розроблено математичні моделі процесу зміни віддаленості елементів нелінійних ієрархічних структур в ДУ та МС, у яких можуть виникати резонансні явища, що робить систему складно управляємою.

Бібл.21, іл.7.

УДК 528.88:630

Кавац О.О., Кавац Ю.В., Дібрій Д.А. **Аналіз методик оцінки ступеню забрудненості водних об'єктів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 6(149). – Дніпро, 2023. – С.98 – 106.

Розглянуто основні сучасні методи моніторингу водних об'єктів їх стан забруднення та оцінка якості води. Загальноприйняті, стандартизовані методи оцінювання якості води в водних об'єктах, включають в себе наземний набір зняття проб, що в певних умовах не відповідає оперативності та є дороговартісним. Найбільш адаптованим для практичного використання на великих територіях є дистанційний підхід, який поєднує наземні та супутникові вимірювання для класифікації змін та виявлення забруднень в водних об'єктах закритого типу. Супутниковий моніторинг є надійним інструментом отримання оперативної інформації про стан водних об'єктів та зміни в ньому із певною періодичністю, завдяки застосуванню широкого набору різномірних даних. А наявність архівних даних стає вагомою перевагою та відкриває можливість порівнювати отримані результати і аналізувати чинники впливу на стан водних об'єктів та навколишнє середовище. В роботі описано основні методи та набори даних, які можна використовувати для застосування методів дистанційного моніторингу на основі машинного навчання. В якості основного набору даних пропонується використання багатоспектральних датчиків Landsat, у тому числі TM (Thematic Mapper), MSS (Multispectral Scanner), ETM (Enhanced Thematic Mapper) і OLI (Operational Land Imager). Проаналізовано приклади застосування дистанційного підходу щодо оцінки ступеню забрудненості водойм на великих площах. Вказано перспективні методи машинного навчання для вирішення прикладної задачі.

Бібл. 20.

УДК 519.8

Коряшкіна Л.С., Дзюба С.В. **Математичні моделі та методи розміщення об'єктів із зониванням території в системах екстреної логістики** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 6(149). – Дніпро, 2023. – С.107 – 122.

Представлено математичні моделі та методи розміщення логістичних центрів та сегментації території на їх сервісні зони у вигляді неперервних задач оптимального мультиплексного розбиття і мінімального багатократного покриття множин, що відображає спільне обслуговування мережею центрів споживачів, неперервно розподілених на певній території. Використання розробленого математичного апарату дозволяє отримувати розподіл

споживачів послуг за критеріями мінімізації відстані до декількох найближчих центрів із врахуванням їх можливостей, проводити реструктуризацію діючих сервісних мереж, коли певна кількість їх об'єктів реформується, планувати завчасні соціально економічні та організаційно технічні заходи, спрямовані на підвищення техногенної безпеки, зокрема на підприємствах гірничо-металургійної галузі.

Бібл. 13, іл. 4, табл. 2.

УДК 004.043, 004.021, 004.921

Котенко Р., Божуха Л. **Дослідження структур даних для задачі оптимізації пошуку перетину тривимірних об'єктів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. Випуск 6(149). – Дніпро, 2023. – С.123 – 134.

У роботі досліджуються підходи та алгоритми вирішення задачі оптимізації пошуку перетину з тривимірними об'єктами. Приділена увага вибору структури даних. Розроблено програмне забезпечення з набором структур даних (дерево октантів, kd дерева, ієрархія обмежувальних об'ємів, регулярна сітка) для оптимізації пошуку перетину. Одержані результати аналізу роботи оптимізаційних структур даних задачі пошуку перетину тривимірних об'єктів. Проведено порівняльний аналіз швидкості побудови та пошуку перетину між тривимірними об'єктами. Програмне забезпечення написано на мові JavaScript у середовищі Visual Studio Code. Результати дослідження можуть бути використані при роботі з тривимірною графікою, моделюванням, 3D інженерією, обчислювальною геометрією та у вебдодатках з необхідністю реалізації модуля взаємодії з тривимірними об'єктами.

Бібл. 12, іл. 1, табл. 8.

UDC 004.4 : 004.94

Peschanskii Vladyslav, Sulema Yevgeniya **Detection of key points on images for creating digital twins of medical and biological objects** // System technologies. N 6(149) Dnipro, 2023. P.3 – 10.

The paper presents an analysis of optimal tools for creating a digital twin of human organs (on the example of otolaryngology) based on streaming video data received in real time from the camera of a medical device. Two main methods were studied: algorithmic reconstruction and the use of a neural network. The comparison of methods was performed according to the following criteria: efficiency, accuracy, speed of reaction and practicality of application in the medical environment. Special attention is paid to approaches based on neural networks due to their high adaptability, accuracy and ability to efficiently process noisy and incomplete data. The main advantages and features of this method in the context of medical application are determined. The results of the study confirm the high potential of neural networks in creating accurate digital models of internal organs, which opens up new perspectives for the development of software for the creation of digital twins of medical and biological objects.

Bibl. 7, ill. 3.

UDC 004.93`11

Penia O., Sulema Y. **Using deep artificial neural networks for multimodal data classification** // System technologies. N 6(149) Dnipro, 2023. P.11 – 22.

The work is devoted to using artificial neural networks for multimodal data classification. An approach is proposed to conduct parallel data processing that adapts to available computing resources to perform multimodal data classification in digital twin systems in (near) real time.

Ref. 9, fig. 6, tables 4.

UDC 621.771.25:681.5

Potap O., Kuvaiev V., Boyko O., Rybalchenko M., Shybakynskyi V., Potap M. **Minimization of interstand tension on continuous grade rolling mills by armature currents of electric drives of roll mill stands** // System technologies. N 6(149) Dnipro, 2023. P.23 – 41.

The effectiveness of the method of minimizing the tension of graded rolled products based on information about the armature currents of the main electric drives was investigated. The method is based on the hypothesis of the constant ratio of the armature current of the drive of the next cage to the armature current of the drive of the previous cage in the free rolling mode. The method involves predicting the free rolling current in rolling electric drives based on information about the free rolling current in the electric drives of previous cages. The study is based on a complex model of the process of continuous bar rolling in four finishing cages of a small grade mill with individual electric drives equipped with subordinate speed control systems.

By means of computer simulation, it has been proven that the application during rolling of the transition from tension regulation by changing the rotation frequency to direct regula

tion of the armature current of the electric drive of the next cage prevents the appearance of dynamic currents and improves the quality of tension regulation.

Bibl. 11, ill. 8.

UDC 543.08

Guda A., Bereziuk M. **Properties of processing and data acquisition methods in test methods of chemical analysis** // System technologies. N 6(149) Dnipro, 2023. P.42 – 52.

The properties of processing and obtaining of analytical signal methods in test methods of chemical analysis are considered: the influence of lighting conditions, obtaining the point of interest on the image, digital analysis of the image of the analytical signal.

Bibl. 20.

UDC 004.932.72'1:519.688

Solomatin V., Baibuz O., Syrotenko A. **The application of coagulatory neon networks in medicine for the detection of ischemic heart diseases and their development prospects** // System technologies. N 6(149) Dnipro, 2023. P.53 – 61.

The analysis of recent research and publications is an important component of scientific investigation as it allows evaluating the current state of the scientific field and identifying the latest advancements and research directions. In the context of convolutional neural networks for detecting ischemic heart diseases on X ray images, the analysis of recent research can help identify relevant techniques, methods, and findings that have already been achieved in this field.

Bibl. 9.

UDC 519.7:004.8

Huda O., Kyrylov S., Kyrylova L. **Mathematical systems for the implementation of artificial neural networks focused on cloud computing** // System technologies. N 6(149) Dnipro, 2023. P.62 – 74.

A detailed description of the functioning of neurons is given, including the processes of summation of input signals and activation with the help of activation functions. The methods of building decision making models based on the analysis of unclear situations and control states determined by experts are defined. Fuzzy reference situations for cloud computing and their impact on decision making in various scenarios are proposed.

Bible 14, fig. 3.

UDC 351 354 + 519.816 + 681.511.4 + 681.513.52

Ignatkin V.U., Shulzhyk Yu., Dudnikov V., Yushkevych O. **Mathematical modeling of transient processes in hierarchical structures of public administration with nonlinear characteristics** // System technologies. N 6(149) Dnipro, 2023. P.75 – 97.

The article examines the multifaceted problem of relations between people in the state administration (SU) and local self government bodies (LS) in the conditions of rapid, unpredictable changes in the situation in the country and in the regions (political, economic, social, etc.). It is proposed to develop a new toolkit for obtaining optimal management decisions in public administration using the latest information technologies. Mathematical mod

els of the process of changing the distance of elements of nonlinear hierarchical structures in DU and MS have been developed, in which resonance phenomena can occur, which makes the system difficult to control.

Bibl. 21, fig. 7.

UDK 528.88:630*162.5

Kavats O.O., Kavats Y.V., Dibrii D.A. **Analysis of methods for assessing the degree of water pollution** // System technologies. N 6(149) Dnipro, 2023. P.98 – 106.

The most important modern methods for the monitoring of water bodies, their state of pollution and the assessment of water quality are considered. Commonly accepted, standardized methods for assessing water quality in water bodies include ground based sampling, which is untimely and expensive under certain conditions. Best suited for practical use in large areas is the remote approach, which combines ground and satellite measurements to classify changes and detect pollution in closed water bodies. Satellite monitoring is a reliable tool for obtaining operational information on the state of water bodies and their changes with a certain periodicity, thanks to the use of a large set of heterogeneous data. And the availability of archived data becomes a significant advantage, opening up the possibility of comparing the results obtained and analyzing the factors influencing the state of water bodies and the environment. The paper describes the main methods and datasets that can be used for the application of remote monitoring methods based on machine learning. The use of Landsat multispectral sensors, including TM (Thematic Mapper), MSS (Multispectral Scanner), ETM (Enhanced Thematic Mapper), and OLI (Operational Land Imager), is proposed as the main data set. Examples of the application of the remote sensing approach to the assessment of water pollution over large areas will be analyzed. Possible machine learning methods for solving an applied problem are presented.

Bibl. 20.

UDC 519.8

Koriashkina L.S., Dziuba S.V. **Mathematical models and methods of objects' location with area zoning in emergency logistics** // System technologies. N 6(149) Dnipro, 2023. P.107 – 122.

We present mathematical models and methods for locating logistic centers and segmenting territories into their service zones as continuous problems of optimal multiplex partitioning and minimal multiple covering of sets that reflect the common servicing of a network of consumer centers continuously distributed over a certain territory. The use of the developed mathematical apparatus allows for obtaining the distribution of service consumers based on criteria of minimizing the distance to several nearest centers, taking into account their capabilities, restructuring existing service networks when a certain number of their objects are reformed, planning timely socio economic and organizational technical measures aimed at increasing technogenic safety, particularly in enterprises of the mining and metallurgical industry.

Bibl. 13, ill. 4, table 2.

UDC 004.043, 004.021, 004.921

Kotenko R., Bozhukha L. **Study of data structures for the optimization problem of searching the intersection of three dimensional objects** // System technologies. N 6(149) Dnipro, 2023. P.123 – 134.

The paper examines approaches and algorithms for solving optimization tasks of intersection search with three dimensional objects. Attention is paid to the choice of data structure. Developed software with a set of data structures (octant tree, kd tree, bounding volume hierarchy, regular grid) to optimize intersection search. The obtained results of the analysis of the work of the optimization structures of the data of the task of finding the intersection of three dimensional objects. A comparative analysis of the speed of construction and the search for the intersection between three dimensional objects was carried out. The software is written in JavaScript in the Visual Studio Code environment. The results of the research can be used when working with three dimensional graphics, modeling, 3D engineering, computational geometry and in web based implementation applications to ensure the interaction of the module with three dimensional objects.

Bibl. 12, ill. 1, table 8.

Системні технології
ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

Випуск 6 (149)

Головний редактор: к.т.н., доц. Т.В. Селівьорстова

Технічний редактор та секретар збірки: к.т.н., доц. К.Ю. Островська

Здано до набору 22.12.2023. Підписано до друку 27.12.2023.

Формат 60x84 1/16. Друк - різнограф. Папір типограф.

Умов. друк арк. – 10,286. Обл.–видавн. арк. – 09.

Тираж 300 прим. Замовл. – 06/23

Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій»,
кафедра Інформаційних технологій та систем: ІВК «Системні технології»
49600, Дніпро, а/с 493

<http://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st>

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації:

Серія КВ № 8684 від 23 квітня 2004 рік

Редакційна колегія

Селівьорстова Тетяна Віталіївна
(*головний редактор*)

доцент, кандидат технічних наук

Алпатов Анатолій Петрович

Член-кореспондент НАН України,
професор, доктор технічних наук

Архипов Олександр Євгенійович

професор, доктор технічних наук

Бабічев Сергій Анатолійович

доцент, доктор технічних наук

Білозьоров Василь Євгенович

професор,

доктор фізико-математичних наук

Гече Федір Елемирович

професор, доктор технічних наук

Гуда Антон Ігорович

(*заст. головного редактора*)

професор, доктор технічних наук

Гнатюшенко Вікторія Володимирівна

(*вчений секретар*)

професор, доктор технічних наук

Гнатюшенко Володимир Володимирович

професор, доктор технічних наук

Гожий Олександр Петрович

професор, доктор технічних наук

Єрьомін Олександр Олегович

професор, доктор технічних наук

Кіріченко Людмила Олегівна

професор, доктор технічних наук

Світличний Дмитро Святозарович

професор, доктор технічних наук

Скалозуб Владислав Васильович

професор, доктор технічних наук

Хандецький Володимир Сергійович

професор, доктор технічних наук

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Інститут технічної механіки

НАНУ і ДКАУ, Україна

Національний технічний університет

України «Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського», Україна

Jan Evangelista Purkyně University
in Ústí nad Labem

Університет імені Яна Євангеліста Пуркіне,
Усті над Лабем, Чеська Республіка

Дніпровський національний університет
імені Олеся Гончара, Україна

Ужгородський національний університет,
Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка», Україна

Чорноморський національний університет
імені П.Могили, Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Харківський національний університет
радіоелектроніки, Україна

Akademia Górniczo-Hutnicza

Краківська гірничо-металургійна академія
ім. С. Сташці, Польща

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту»Україна

Дніпровський національний університет
імені Олеся Гончара, Україна