

УДК 519.7

**Стьопкін А.В., Кіт М.Ю.**<sup>1</sup> кандидат фіз.-мат. н., доцент кафедри математики та інформатики, ДВНЗ «ДДПУ»e-mail: [stepkin.andrey@ukr.net](mailto:stepkin.andrey@ukr.net),

ORCID 0000-0002-6130-9920

<sup>2</sup> здобувач магістерського РВО фізико-математичного факультету, ДВНЗ «ДДПУ»e-mail: [kitm07@meta.ua](mailto:kitm07@meta.ua),

ORCID 0009-0004-8325-3544

## АЛГОРИТМИ РОЗПІЗНАВАННЯ ГРАФІВ КОЛЕКТИВОМ АГЕНТІВ

В роботі проведено огляд та проаналізовано сучасний стан наукових досліджень, пов'язаних з розпізнаванням графів колективом агентів. Також проаналізовано можливість та необхідність ознайомлення учнів старших класів закладів загальної середньої освіти з задачею розпізнавання графів та поглиблення її вивчення до колективного розпізнавання.

**Ключові слова:** розпізнавання графів, алгоритми обходу графа, колектив агентів.

### Вступ

В наш час задача розпізнавання графів використовується в багатьох сферах науки, таких як комп'ютерна наука, машинне навчання, соціологія, біологія та багато інших [1-3].

Тому активно розроблюються нові алгоритми розпізнавання графів [4]. Ця задача полягає у тому, щоб агент, який розпізнає граф побудував карту досліджуваного графу.

Також задача може бути розширена до визначення деяких додаткових характеристик графу, наприклад, таких як розмірність, тип, властивості вершин та ребер і т.д.

Так як в наш час досить популярними є паралельні обчислення, то цей тренд не оминув і задачу розпізнавання графів. Активно розвиваються дослідження щодо розпізнавання графів колективами агентів [5-9].

Застосування алгоритмів розпізнавання графів колективом агентів має великий потенціал розвитку. Наприклад, в машинному навчанні це може оптимізувати процес розпізнавання зображень, зокрема в області розпізнавання облич, об'єктів або символів; в біології розпізнавання графів колективом агентів може прискорити вивчення молекулярних структур та генетичних кодів; в області рекомендаційних систем ці алгоритми можуть допомогти у побудові більш ефективних та точних моделей рекомендацій для користувачів на основі аналізу графів соціальних мереж.

Отже, задача розпізнавання графів колективом агентів є актуальною та має великий потенціал у багатьох сферах науки, тому розв'язання цієї задачі є важливим напрямком дослідження.

### Основна частина

Одним з напрямів науки, де широкого розповсюдження зазнало вивчення проблеми розпізнавання графів є робототехніка. Одним з напрямів

розвитку робототехніки є необхідність заміни людей при виконанні небезпечних робіт, до яких можна віднести наприклад, побудову карти небезпечних чи поганодоступних об'єктів [1]. Звісно, що використання колективів роботів для виконання зазначеної задачі може значно підвищити вірогідність її вирішення, значно спростити процес, а то і зменшити час роботи [4-6].

Розглянемо більш детально дослідження останніх років, які проводилися з даної тематики. Початком наукових досліджень прийнято вважати роботу 1951 року К. Шеннона, в якій розглядалась задача пошуку автоматом цілі в лабіринті [10].

У 2009-2010 роках запропоновано дослідження роботи так званих роїв агентів. Алгоритм роботи такого рою полягає в наступному. Всі агенти, домовившись про час наступної зустрічі, починають роботу з однієї вершини. Розходяться по різних ребрам та обходять деяку частину графу, будуючи його карту. Потім в зазначений час повертаються до початкової вершини для об'єднання побудованих карт. Потім знову домовляються та розходяться. Таким чином відбувається до повного розпізнавання графу. Звісно, що для роботи даного алгоритму необхідно щоб кожен агент мав пам'ять, яка зможе вмістити карту всього графу [11,12].

У 2015 році запропоновано роботу, в якій розглядається задача розпізнавання неорієнтованих графів колективом агентів. В цій роботі використовується всього два типи агентів: агент-дослідник (рухається графом та передає інформацію про вершини та ребра, які він відвідав), агент-експериментатор (по отриманій від агентів-дослідників інформації будує в своїй пам'яті карту графу). Робота відбувається наступним чином: два агента-дослідника одночасно рухаються графом, зчитують та змінюють помітки елементів графа, передають необхідну інформацію агенту-експериментатору, який будує уявлення про досліджуваний граф. Для розпізнавання два агенти, що рухаються графом, використовують по дві різні фарби (усього три фарби). Метод базується на методі обходу графа в глибину. Для роботи алгоритму агент-експериментатор повинен мати пам'ять, яка може вмістити всю карту графу. Агенти-дослідники можуть мати меншу пам'ять, але вона також залежить від розмірності графу.

У 2016 році було запропоновано децентралізований підхід до дослідження графів колективом агентів [5]. Цей алгоритм допомагає уникнути зустрічей агентів у одній вершині. Агенти не мають прямого зв'язку, але можуть спілкуватися за допомогою спеціальних маячків, які вони залишають у вершинах. Агентами ніхто не керує і вони приймають рішення самостійно, без врахування дій інших агентів. Даний алгоритм гарантує побудову карти середовища за скінчену кількість кроків. Звісно, що алгоритм вимагає від агентів кількість пам'яті достатню для збереження всієї карти середовища.

У 2018 році з'являється робота [7], в якій агенти обмінюються інформацією з базовою станцією через спеціальну мережу, яка формується агентами на початку роботи. Тобто для передачі даних в якийсь момент агенти повинні зайняти певні вершини графу, які були визначені при побудові мережі на початку роботи. Особливістю статті є асинхронність комунікації. Тобто реалізовано можливість передачі інструкцій агентам, які в конкретний проміжок часу готові їх сприйняти.

У статті 2020 року [5] зроблено спробу розробити загальні концепції і вимоги до дослідження графів колективами агентів. Робота була направлена на надання загальних умов для оголошення закінчення процесу дослідження графу та завершення такого дослідження за скінчену кількість кроків. В роботі запропоновані модифікації матриці інцидентності для оптимізації процесу обміну інформацією між агентами.

У 2021 році запропоновано роботу [13], в якій запропоновано новий метод і відповідний алгоритм розпізнавання графу колективом агентів, запропонованим у роботі 2015 року. Основною перевагою даного дослідження є оптимізація роботи агентів та процесу обміну інформацією таким чином, що стало можливим використання агентів-дослідників зі скінченою пам'яттю, яка не залежить від розмірності графу, що робить можливим використання одних і тих же агентів дослідників для графів різної розмірності. Звісно, що агент-експериментатор має ту ж пам'ять, що і у роботі 2015 року. Для роботи алгоритму як і раніше необхідно 3 краски.

У 2022 році в роботі [14] автори розробили алгоритм оцінки параметрів декількох агентів зі спільною дослідницькою поведінкою, зберігаючи при цьому простоту декомпозиції. Основна ідея полягає в тому, щоб апроксимувати спільний простір станів графом Кронекера на основі якого можна оцінити вектор Фідлера, використовуючи Лапласівський спектр графів переходів окремих агентів. Окрім того, враховуючи, що пряме обчислення спектра Лапласа неможливе для задач з нескінченими просторами станів, авторами було запропоновано використання апроксимації глибокої нейронної мережі для вивчення цих спектрів. Тим самим їх метод було адаптовано і для задач з нескінченими просторами станів.

На початку 2023 року було запропоновано метод дослідження [15] для багатоагентного навчання з підкріпленням (MARL) з комунікацією між агентами на основі графу. Було зроблено припущення, що індивідуальні винагороди, що отримуються агентами, не залежать від дій інших агентів, а їхні політики пов'язані. В запропонованій структурі сусідні агенти співпрацюють, щоб оцінити невизначеність простору стану-дії, щоб мати більш ефективну дослідницьку поведінку. На відміну від вже існуючих робіт, запропонований алгоритм не потребує механізмів підрахунку та може використовуватись в середовищах з неперервними станами, не потребуючи складних методів перетворення. Також запропонована схема дозволяє агентам спілкуватися повністю децентралізовано з мінімальним обміном

інформацією. Працездатність алгоритму перевірена з теоретичними результатами для дискретних сценаріїв і з експериментами для неперервних.

Як можна бачити, дослідження всякого роду багатоагентних систем досить цікавий та актуальний напрямок у науці.

Аналізуючи програми з інформатики для закладів загальної середньої освіти, можна побачити, що з основними поняттями теорії графів учнів знайомлять тільки в 11 класі і то лише за профільною програмою. В програмі рівня стандарт вивчення теорії графів не передбачено зовсім. Але задачі з теорії графів можна зустріти як в учнівських так і в студентських олімпіадах. Звісно з основами теорії графів учні можуть розібратися самостійно, але алгоритми на графах зовсім нетривіальні і для їх опанування потрібна допомога вчителя. На наш погляд, вивчення алгоритмів розпізнавання краще всього проводити на кружках з інформатики, причому залучати до цієї роботи, можна учнів, починаючи з 9го класу, коли вже було вивчено поняття масиву. Звісно для них необхідно буде провести заняття з основ теорії графів. Але це буде стосуватися і учнів старших класів, які навчаються за стандартною програмою.

Звісно, що знайомство з алгоритмами розпізнавання графів краще починати з роботи одного агента з нескінченною пам'яттю, що рухається графом. Це найпростіший випадок, але він дозволяє зрозуміти особливості обходу графа та побудову його карти у пам'яті агента, не навантажуючи задачу необхідністю обміну інформацією між агентами. Наступним етапом краще розглянути задачі з двома агентами, що рухаються графом та одним, який будує карту графу. І вже після опанування цього матеріалу буде можливим розгляд задач з різноманітними типами колективів.

## **Висновки**

В роботі детально розглянуто сучасні дослідження щодо розпізнавання графів колективом агентів. Проаналізовано програми вивчення інформатики в закладах загальної середньої освіти та можливість ознайомлення учнів з задачею розпізнавання графів. А також більш складного варіанту цієї задачі з використанням колективів агентів.

## **Література**

1. Albers S., Henzinger M.R. Exploring unknown environments // SIAM Journal on Computing. – 2000. – №29(4). – P. 1164-1188.
2. R. Fleischer, G. Trippen Exploring an unknown graph efficiently G.S. Brodal, S. Leonardi (Eds.), Proceedings of the 13th Annual European Symposium on Algorithms, Lecture Notes in Computer Science, vol. 3669, ESA 2005, Palma de Mallorca, Spain, October 3–6, 2005, Springer (2005), pp. 11-22
3. Thrun S., et al., Robotic mapping: a survey. – 2003. – pp. 1–35.
4. Zhang C. Parallelizing Depth-First Search for Robotic Graph Exploration // Harvard College, Cambridge, Massachusetts. – 2010.

5. Nagavarapu S.C., Vachhani L., Sinha A. et al. Generalizing Multi-agent Graph Exploration Techniques // International Journal of Control, Automation and Systems (2020). <https://doi.org/10.1007/s12555-019-0067-8>
6. Stepkin A. Using a Collective of Agents for Exploration of Undirected Graphs / A. Stepkin // Cybernetics and Systems Analysis. – 2015. – V.51, №2. – PP. 223-233.
7. Banfi J., Quattrini Li.A., Rekleitis I. et al. Strategies for coordinated multirobot exploration with recurrent connectivity constraints. // Autonomous Robots 42, 875-894 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10514-017-9652-y>
8. Стёпкин А.В. Возможность и сложность распознавания графов тремя агентами / А.В. Стёпкин // Таврический вестник информатики и математики. – 2012. – №1 (20). – С. 88-98.
9. Стёпкин А.В. Распознавание конечных графов тремя агентами / А.В. Стёпкин // Искусственный интеллект. – 2011. – №2. – С. 84-93.
10. Shannon C.E. Presentation of a maze-solving machine // Cybernetics Trans, of the 8 th Conf. of the JosiahMacy Jr. Found / Editor: H. Foerster. – 1951. – P. 173-180.
11. Wang H., Jenkin M., Dymond P. It can be beneficial to be 'lazy' when exploring graph-like worlds with multiple robots // In Proceedings of the IASTED International Conference on Advances in Computer Science and Engineering (ACSE). – 2009. – P. 55-60.
12. Zhang C. Parallelizing Depth-First Search for Robotic Graph Exploration // Harvard College, Cambridge, Massachusetts. – 2010.
13. Стёпкин А.В., Стёпкина А.С. Алгоритм распознавания простых графов коллективом агентов. Компьютерные исследования и моделирование. 2021. Т.13, №1. С. 33-45.
14. Jiayu Chen, Jingdi Chen, Tian Lan, Vaneet Aggarwal. Scalable Multi-agent Covering Option Discovery based on Kronecker Graphs / Jiayu Chen, Jingdi Chen, Tian Lan, Vaneet Aggarwal // Advances in Neural Information Processing Systems, 2022.
15. Ainur Zhaikhan, Ali H. Sayed. Graph Exploration for Effective Multi-agent Q-Learning. arXiv:2304.09547, 2023.

---

**A. V. Stepkin, M. Yu. Kit**

Donbas State Pedagogical University, Sloviansk, Ukraine;

**Algorithms of graph exploration by a collective of agents**

In this paper reviews and analyzes the current state of scientific research related to graph exploration by a collective of agents. The possibility and necessity of familiarizing students of senior classes of general secondary education institutions with the task of graph exploration and deepening its study to exploration graph by a collective of agents is also analyzed.

**Keywords:** *graph exploration, graph traversal, collective of agents.*

---