

УДК 004.056.2:519.686.2:004.056.5:681.327:794.8
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.1/15>

Бишевец Н.Г.

Національний університет фізичного виховання і спорту України

Бишовець Н.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Бойков А.І.

Національний університет фізичного виховання і спорту України

Фуртат С.О.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

ЗАДАЧА КОМІВОЯЖЕРА ЯК УНІВЕРСАЛЬНИЙ ІНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТІВ

Універсальною задачею оптимізації маршрутів є задача комівояжера, яка в силу свого прикладного застосування є однією з найбільш досліджених задач. Проте інтерес вчених до цієї задачі не згасає, а наряду із досягненнями науки і техніки задача модернізується, вводяться додаткові обмеження та розробляються нові, більш удосконалені методи й алгоритми для її розв'язання. **Мета:** узагальнити дані щодо прикладної спрямованості TSP та розглянути перспективи застосування TSP у практиці кіберспорту. **Результати дослідження.** Систематизовано дані щодо спектру застосування TSP, яка успішно використовується в логістиці, виробництві, телекомунікації тощо. Загострено увагу на тому, що TSP є ключовим фактором у плануванні маршрутів БПЛА (безпілотні літаючі апарати), попит на які постійно зростає. Використання TSP дозволяє БПЛА з більшою ефективністю виконувати такі завдання як доставка вантажів, моніторинг інфраструктури, розвідка, спостереження, картографування, обприскування полів та багато інших. Завдяки застосуванню TSP БПЛА знаходять широке застосування в авіації та космонавтиці, військовій справі, геодезії та геоінформації, сільському господарстві, екологічному моніторингу та охороні природи. Установлено, що в сфері фізичного виховання і спорту TSP насамперед використовують з метою удосконалення процесу планування туристичних маршрутів. Запропоновано адаптувати TSP до проблем, які виникають у ході кіберспортивної діяльності. Не зважаючи на існуючі обмеження щодо кількості вузлів, обґрунтовано, що значна кількість проблем, пов'язаних із кіберспортивною практикою, може бути вирішена засобами MS Excel із використанням надбудови Розв'язувач. Наведено приклад розв'язання задачі, спрямованої на мінімізацію довжини дроту, що об'єднує комп'ютери в локальну мережу. Визначено перспективи застосування TSP в практиці кіберспорту. **Висновок.** Існує невикористаний потенціал TSP в практиці кіберспорту. Застосування TSP сприятиме удосконаленню планування тренувального процесу та управління підготовкою кіберспортсменів, виробленні та прийнятті управлінських рішень, оптимального вибору каналу поширення реклами кіберспортивних заходів та розв'язанні інших нагальних питань у практиці кіберспорту.

Ключові слова: задача комівояжера, спрямованість, спектр, застосування, кіберспорт, перспективи, удосконалення.

Постановка проблеми. Значна увага дослідників прикута до задачі комівояжера (TSP), оскільки до такого класу задач формально зводиться значна кількість прикладних задач ефективної маршрутизації потоків, зокрема сировини, інформації, енергоресурсів тощо [3]. У загальному вигляді задача комівояжера полягає в побудові в транспортній мережі найкоротшого замкненого маршруту з обмеженням на однократне відвідування кожного вузла (пункту відвідування) й поверненні в перший вузол [3, 8, 9].

Утім у ході планування маршруту часто доводиться враховувати такі фактори як зміна параметрів у часі: непостійні параметри вартості/часу в дорозі, обмежена доступність вузлів, вимушені послідовності відвідування деяких вузлів, або інші важливі фактори, які слід враховувати при розв'язанні задачі [4, 6, 7]. Тому за останні кілька десятиліть підходи до розв'язання TSP еволюціонували від алгоритмів з точним перебором до евристичних алгоритмів, таких як TSP з табу-кластеризацією (TCTSP),

TSP з множинними депо (MDTSP), TSP з часовими вікнами (TSPTW), TSP з обмеженням на маршрут (CVRP), TSP з несиметричними відстанями (ATSP), TSP з евристичними обмеженнями (E-TSP) та інші. Це дозволило вирішувати більш складні задачі TSP з більшою кількістю вузлів та додатковими обмеженнями [5, 7, 9]. Відповідно й застосування TSP значно розширилося від оптимізації транспортних маршрутів, що було одним із перших та найбільш очевидних застосувань, до таких областей, як управління супутниками, яке включає планування маршрутів для збору даних з супутників і оптимізацію їх траєкторій.

Серед використовуваних методів оптимізації розрізняють точні алгоритми, за допомогою яких знаходять точне оптимальне рішення, і алгоритми наближення, де методи апроксимації розподіляють на евристичні та метаевристичні. Евристичні методи дозволяють знайти недалеко від оптимальних рішення, але не гарантують їх оптимальності. Зі свого боку, метаевристика слугує основою для побудови евристики, є підґрунтям створення відповідного евристичного алгоритму [7]. Наряду з науково-технічними досягненнями вчені не лише розробляють дедалі більш удосконалені алгоритми розв'язання TSP, досліджуючи нові методи та підходи, але й здійснюють пошук нових сфер застосування TSP, розширюючи її використання за межі традиційних областей, таких як логістика та виробництво, до таких областей, як спорт, аеронавтика, біоінформатика та інші.

Аналіз останніх досліджень і публікацій демонструє, що наукова спільнота не припиняє обговорювати питання, пов'язані із застосуванням TSP та її удосконаленням [5]. Стейкий інтерес до цієї задачі обумовлений її універсальністю і можливістю прикладного використання в різних областях знань.

Так, проблему ефективного покриття території обмеженою кількістю датчиків або камер М. Сундарраджан (M. Sundarajan) [9] розглянув як задачу TSP та запропонував новий підхід до її розв'язання шляхом включення алгоритмів вибору дерев для підвищення ефективності та точності. Унаслідок дослідження вчений приходить до висновку, що при вирішенні проблем, де ефективно та точно охоплення території має важливе значення (спостереження, моніторинг, інспекція), такий підхід значно покращує якість покриття при одночасному зниженні обчислювальної складності в порівнянні з традиційними алгоритмами TSP.

Стверджуючи, що планування ресурсів відіграє життєво важливу роль в управлінні супутниковою мережею, Т. Чжан (T. Zhang) [10] розглянув інте-

гроване планування наземно-космічних ресурсів супутників середньої навколоземної орбіти у супутниковій навігаційній системі Китаю як кластерну задачу комівояжера з табу-кластеризацією TCTSP, де TCTSP поділяє вузли на два типи підмножин: кластери та набори так званих заборонених вузлів. Автор запропонував для її розв'язання метаевристику, яка поєднує оптимізацію мурашиної колонії з перелінкуванням шляхів, який є ефективним механізмом пошуку з інтенсифікацією [10].

Крім того автори наводять дані, які свідчать про успішне застосування TSP при реалізації з'єднання, яке входить до плати комп'ютера в певній точці, проходить через усі модулі та завершується в певній точці, при вирішенні проблеми комплектування замовлень на складах, плануванні розкладу інтерв'ю між туристичними брокерами та продавцями в індустрії туризм, проектуванні геодезичних мереж глобальної навігаційної супутникової системи та розв'язанні багатьох інших проблем [8], а також інформують про досвід практичного вирішення завдань дистриб'юторської компанії в конкретних умовах та інших вимог транспортного менеджменту в компанії [6].

Крім того, в теперішній час значну увагу науковці приділяють дослідженням, спрямованим на оптимізацію польотів БПЛА. Завдання планування траєкторії для збору даних на основі БПЛА в Інтернеті речей (IoT) З. Ван (Z. Wang) [11] сформулював як окремий випадок задачі комівояжера з околицями (TSP-N) й запропонував підхід до її розв'язання, який забезпечує компроміс між часом виконання та точністю розрахунку. У своїй роботі для планування шляху БПЛА в міських та приміських сценаріях Д. Добрілович (D. Dobrilovic) [4] представив як задачу TSP, де мінімальна кількість БПЛА використовується для моніторингу максимальної кількості локацій, випадково обраних локацій та динамічно розрахованих траєкторій та для її розв'язання скористався підтримкою генетичного алгоритму (GA).

У наших попередніх дослідженнях ми розглядали шляхи впровадження TSP в практику фізичного виховання і спорту [1, 2]. Слід відзначити, що в теперішній час на тлі започаткування й становлення кіберспорту питання, пов'язані із застосуванням TSP в ході кіберспортивної діяльності, є маловивченими. Проте ми вбачаємо значний потенціал у застосуванні TSP в практиці кіберспорту.

Мета дослідження: узагальнити дані щодо прикладної спрямованості TSP та розглянути перспективи застосування TSP у практиці кіберспорту.

Виклад основного матеріалу. TSP являє собою універсальний інструмент, який може використовуватися для різноманітних задач у різних областях. У ході дослідження ми систематизували дані щодо спектру застосування TSP. Дослідження дозволило визначити, що TSP успішно використовується в логістиці, виробництві, телекомунікації, біоінформатиці. І це далеко не повний перелік областей застосування TSP (рис. 1).



Рис. 1. Спектр застосування TSP

Водночас TSP є ключовим фактором у плануванні маршрутів БПЛА (безпілотні літаючі апарати), попит на які постійно зростає. Використання TSP дозволяє БПЛА з більшою ефективністю виконувати такі завдання як доставка вантажів, моніторинг інфраструктури, розвідка, спостереження, картографування, обприскування полів та багато інших. Завдяки застосуванню TSP БПЛА знаходять широке застосування в авіації та космонавтиці, військовій справі, геодезії та геоінформатиці, сільському господарстві, екологічному моніторингу та охороні природи (рис. 2).

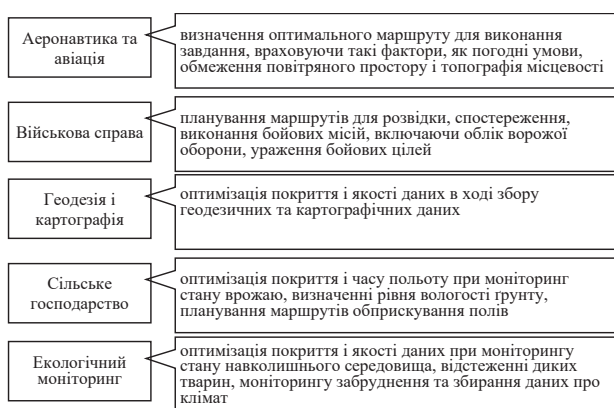


Рис. 2. Напрямки застосування TSP в плануванні польотів БПЛА

Відомо, що на тлі факторіального збільшення кількості можливих маршрутів в TSP, її обчислювальна складність зростає експоненціально, що робить складною для великих наборів даних. Утім, не зважаючи на наявні обмеження на кількість вузлів, за допомогою стандартного програмного забезпечення MS Excel з використанням надбудови Розв'язувач часто можна розв'язати багато проблем, які виникають у практиці фізичного виховання і спорту, на що вказує наш попередній позитивний досвід [1, 2]. Ми вважаємо, що є можливість оптимізувати процес прийняття рішень в кіберспорті завдяки впровадженню TSP. Наведемо приклад застосування TSP в кіберспортивній діяльності.

Постановка завдання. Для ефективного здійснення тренувального процесу кіберспортсменів необхідно об'єднати всі їхні комп'ютери в локальну мережу, починаючи й закінчуючи з комп'ютера тренера таким чином, щоб витрати на дріт були мінімальними, причому кожен комп'ютер під'єднується до мережі один раз. Наведемо вихідні дані за допомогою таблиці (рис. 3).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Початкові дані									
2		Тренер	Капітан команди	Гравець 1	Гравець 2	Гравець 3	Гравець 4	Гравець 5	Гравець 6	Гравець 7
3	Тренер	999	9,1	15,5	10	6	13	16,3	17,5	23,3
4	Капітан команди	9,1	999	6,7	5,1	10,3	11,7	11,2	10	17,5
5	Гравець 1	15,5	6,7	999	7,3	15,1	12,8	18,9	5	13
6	Гравець 2	10	5,1	7,3	999	8	6,7	6,7	7,6	17,8
7	Гравець 3	6	10,3	15,1	8	999	7,8	12,5	15,3	19,4
8	Гравець 4	13	11,7	12,8	6,7	7,8	999	6	30,5	12,1
9	Гравець 5	16,3	11,2	18,9	6,7	12,5	6	999	5	24,7
10	Гравець 6	17,5	10	5	7,6	15,3	30,5	5	999	8,1
11	Гравець 7	23,3	17,5	13	17,8	19,4	12,1	24,7	8,1	999

Рис. 3. Табличне представлення вхідних даних у програмі MS Excel

Аналіз задачі

Константи – вихідна інформація – відстань між комп’ютерами кіберспортсменів.

Змінювані комірки – матриця змінних X. Це таблиця, де на перетині рядків і стовпців отримаємо відповідь на питання, які саме комп’ютери слід з’єднати (1 – Так, 0 – Ні).

Цільова функція (ЦФ) – результуючий показник – довжина дроту.

Напрямок оптимізації – мінімум.

Обмеження:

- елементи шуканої матриця X – бінарні (можуть приймати тільки два значення: Так – 1, Ні – 0);
- два комп’ютери можуть бути з’єднаними між собою один і тільки один раз, починаючи і закінчуючи комп’ютером тренера;
- умова зв’язності: необхідність уникати замкнутих шляхів.

Хід роботи

1. Ввести початкові дані.
2. Сформувані матрицю X та підрахувати суми елементів по рядках і стовпцях. Слід звернути увагу, що після автозаповнення в рядку Входить і стовпці Виходить стоятимуть виключно нулі (бо наразі матриця порожня).
3. Сформувані матрицю обмежень.
4. Сформувані діапазон невідомих – ряд Z2.
5. За допомогою функції TRANSPOSE, знайти стовпчик Z1 як матрицю, транспоновану до Z2.
6. Обчислити ЦФ (довжина дроту для локальної мережі).

7. Внести формулу для виконання умови зв’язності, де n – кількість комп’ютерів у локальній мережі (рис. 4).

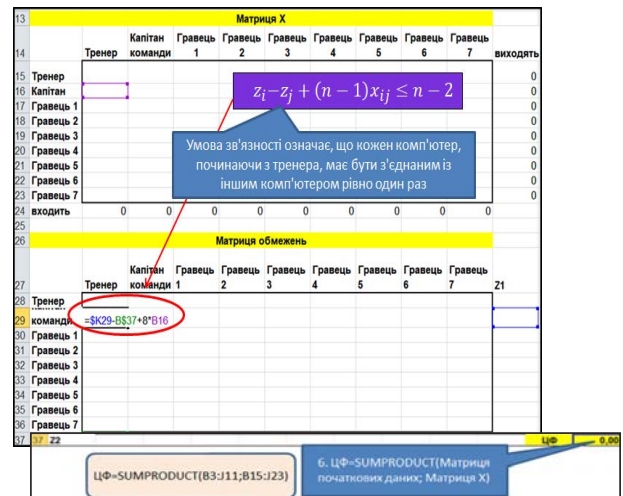


Рис. 4. Підготовка даних до розв’язання задачі

8. Поширити формулу на всю матрицю обмежень.

9. Вибрати закладку Дані на панелі інструментів MS Excel та активізувати надбудову Розв’язувач.

10. У вікні, яке з’явилося, заповнити параметри пошуку рішень (Матриця X – бінарна; Матриця обмежень не перевищує 7; ряд «Входить» рівний 1; стовпець «Виходить» рівний 1).

11. Натиснути кнопку Знайти рішення та отримати олзв’язок (рис. 5).

12. Для визначення порядку з’єднання ПК, аналізуємо матрицю X. Починаємо з рядка Тренер.

Матриця X										
	Тренер команди	Капітан	Гравець 1	Гравець 2	Гравець 3	Гравець 4	Гравець 5	Гравець 6	Гравець 7	виходять
Тренер	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Капітан команди	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Гравець 1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
Гравець 2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Гравець 3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
Гравець 4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Гравець 5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
Гравець 6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Гравець 7	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
входить	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Матриця обмежень										
	Тренер команди	Капітан	Гравець 1	Гравець 2	Гравець 3	Гравець 4	Гравець 5	Гравець 6	Гравець 7	Z1
Тренер	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
Капітан команди	7	0	2	1	7	6	5	4	3	7
Гравець 1	-3	-2	0	7	5	4	3	2	1	5
Гравець 2	-2	7	1	0	6	5	4	3	2	6
Гравець 3	-8	-7	-5	-6	0	7	-2	-3	-4	0
Гравець 4	-7	-6	-4	-5	1	0	7	-2	-3	1
Гравець 5	-6	-5	-3	-4	2	1	0	7	-2	2
Гравець 6	-5	-4	-2	-3	3	2	1	0	7	3
Гравець 7	-4	-3	7	-2	4	3	2	1	0	4
Z2	8	7	5	6	0	1	2	3	4	ЦФ 67,40

Рис. 5. Результат розв’язання

Бачимо, що одиниця перебуває на перетині цього рядка зі стовпцем Гравець 3, тобто комп'ютер тренера з'єднуємо з комп'ютером Гравця 3. Потім переходимо до ряду Гравець 3 і бачимо, що одиниця міститься на перетині зі стовпцем Гравець 4. Отже, прокладаємо дріт до комп'ютера Гравця 4. Продовжуємо міркування аналогічним чином, поки не повернемося до комп'ютера тренера.

Якщо з'єднати комп'ютери в локальну мережу у запропонований спосіб, то довжина дроту буде мінімальною і складе 67,4 ум.од. (рис. 6).

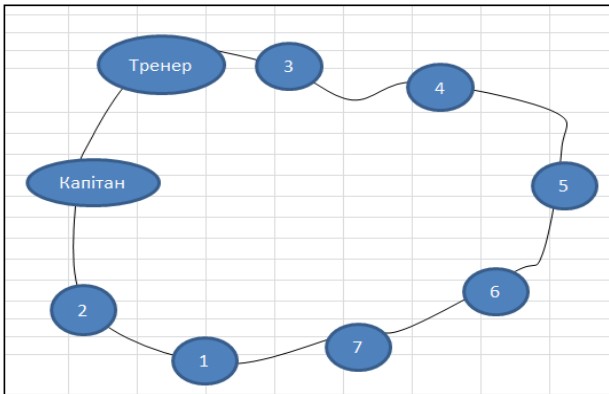


Рис. 6. Схематичне представлення порядку з'єднання комп'ютерів

Зауважимо, що в практиці кіберспорту може виникнути багато інших сценаріїв, які формально зводяться до TSP. Прикладом може слугувати необхідність оптимізувати порядок, в якому гравці підключаються до сервера, щоб мінімізувати затримку або навантаження на нього. Або ж, якщо гравці беруть участь у різних онлайн-турнірах, виникає потреба оптимізувати порядок, у якому вони беруть участь у матчах, щоб мінімізувати час очікування між іграми. Ще один варіант – це оптимізація розкладу тренувань, де тренер проводить індивідуальні онлайн-тренування

з кожним гравцем і потрібно мінімізувати перерви між тренуваннями. Ще один варіант постановки завдання може бути пов'язаний із організацією турніру з кіберспорту. Так само, у ході організації кіберспортивних змагань виникає проблема планування маршруту для транспорту, який перевозитиме обладнання або гравців з міста до міста. Вочевидь, можуть виникати й інші різноманітні проблеми, коли застосування TSP дозволить прийняти виважене й науково-обґрунтоване рішення.

Висновки. Універсальність та можливість прикладного використання у різних областях знань робить TSP однією з найбільш вивчених і застосовуваних задач у галузі оптимізації та штучного інтелекту.

На тепер підходи до розв'язання TSP еволюціонували від алгоритмів з точним перебором, які є обчислювально складними і можуть бути застосовані лише до невеликих наборів даних до ефективніших евристичних алгоритмів, які дозволяють вирішувати складніші та реалістичніші варіанти завдання TSP для великих наборів даних, що виникають у реальних сценаріях та забезпечують прийнятні рішення за розумний час.

У практиці кіберспорту може виникнути багато сценаріїв, які формально зводяться до TSP. При цьому попри існуючі обмеження на кількість вузлів, надбудова Розв'язувач MS Excel дозволяє знайти розв'язок TSP, яка містить до 9 вузлів включно, що буває достатнім для вирішення значної кількості проблем, з якими стикаються тренери та управлінці в кіберспорті.

Існує невикористаний потенціал TSP в практиці кіберспорту. Застосування TSP сприятиме удосконаленню планування тренувального процесу та управління підготовкою кіберспортсменів, виробленні та прийнятті управлінських рішень, оптимального вибору каналу поширення реклами кіберспортивних заходів та розв'язанні інших нагальних питань у практиці кіберспорту

Список літератури:

1. Бишевец Н. Г., Гончарова Н. М., Гончарук А. І. Формування навичок застосування інформаційних технологій у майбутніх фахівців із фізичної культури та спорту. *Вісник Національного університету «Чернігівський колегіум» імені Т.Г. Шевченка*. 2020. № 10 (166). С. 126–133. DOI: 10.5281/zenodo.4506637.
2. Бишевец Н., Гончарова Н., Яковенко О., Родіоненко М. Оптимізаційні задачі в структурі освітнього процесу закладів вищої освіти з фізичної культури і спорту. *Фізичне виховання, спорт і культура здоров'я у сучасному суспільстві*. 2020. № 2 (50). С. 3–12. DOI: 10.29038/2220-7481-2020-02-03-12.
3. Кузьмичов А.І. Оптимізаційні методи і моделі. Моделювання засобами MS Excel: навчальний посібник. К.: Видавництво Ліра-К, 2017. 215 с.
4. Dobrilovic D. UAV Route Planning in Urban and Suburban Surveillance Scenarios. In: Kovács, T.A., Nyikes, Z., Fürstner, I. Security-Related Advanced Technologies in Critical Infrastructure Protection. *NATO Science for Peace and Security*. 2022. Series C: Environmental Security, Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-024-2174-3_19.

5. Eneko Osaba, Xin-She Yang, Javier Del Ser. Chapter 9 – Traveling salesman problem: a perspective review of recent research and new results with bio-inspired metaheuristics, *Nature-Inspired Computation and Swarm Intelligence Algorithms, Theory and Applications*. 2020. P. 135–164. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819714-1.00020-8>.
6. Filip E., Otakar M. The travelling salesman problem and its application in logistic practice. *Business, Engineering*. 2011. URL: <https://api.semanticscholar.-org/CorpusID:11025633/>.
7. Kowalik P., Sobecki G., Bawoł P., Muzolf, P. (2023). A Flow-Based Formulation of the Travelling Salesman Problem with Penalties on Nodes. *Sustainability*. 2023. № 15 (5). P. 4330. <https://doi.org/10.3390/su15054330>.
8. Matai R., Surya, P., Murari S., Mittal, L. (2010). Traveling Salesman Problem: An Overview of Applications, Formulations, and Solution Approaches. *Traveling Salesman Problem / Edited by Donald Davendra*. InTech., 2010. doi.org/10.5772/12909.
9. Sundarrajan M., Jothi A., Prabakar D., Kadry S. (2023). The Smart Coverage Path Planner for Autonomous Drones Using TSP and Tree Selection / Kadry S., Prasath R. *Mining Intelligence and Knowledge Exploration. MIKE 2023. Lecture Notes in Computer Science()*. 2023, Springer, Cham. vol. 13924, https://doi.org/10.1007/978-3-031-44084-7_16.
10. Zhang T., Ke L., Li J., Li J., Huang J., Li, Z. Metaheuristics for the tabu clustered traveling salesman problem. *Computers & Operations Research*. 2018. № 89. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.07.008>.
11. Wang Z., Tao J., Gao Y. et al. A precision adjustable trajectory planning scheme for UAV-based data collection in IoTs. *Peer-to-Peer Netw*. 2021. № 14. P. 655–671. <https://doi.org/10.1007/s12083-020-01006-0>.

Byshevets N.H., Byshovets N.M., Boikov A.I., Furtat S.O. THE TRAVELER'S PROBLEM AS A UNIVERSAL TOOL FOR ROUTE OPTIMIZATION

The universal problem of route optimization is the traveling salesman problem, which is one of the most studied problems due to its practical application. However, the interest of scientists in this problem does not fade, and along with the achievements of science and technology, the problem is modernized, additional restrictions are introduced, and new, more advanced methods and algorithms are developed for its solution.

Purpose: to summarize the data on the applied orientation of TSP and to consider the prospects of using TSP in the practice of eSports. **Research results.** Systematized data on the range of applications of TSP, which is successfully used in logistics, production, telecommunications, etc. Attention has been drawn to the fact that TSP is a key factor in planning the routes of UAVs (unmanned aerial vehicles), the demand for which is constantly growing. The use of TSP allows UAVs to more efficiently perform tasks such as cargo delivery, infrastructure monitoring, reconnaissance, surveillance, mapping, field spraying, and many others. Thanks to the application of TSP, UAVs are widely used in aviation and aerospace, military affairs, geodesy and geoinformatics, agriculture, environmental monitoring and nature protection. It was established that in the field of physical education and sports, TSP is primarily used to improve the process of planning tourist routes. It is proposed to adapt the TSP to the problems that arise in the course of eSports activities. Despite the existing limitations on the number of nodes, it is reasonable that a significant number of problems related to the practice of eSports can be solved by means of MS Excel using the Solver add-in. An example of solving a problem aimed at minimizing the length of a wire connecting computers in a local network is given. Prospects for the use of TSP in the practice of eSports are determined. **Conclusion.** There is an untapped potential of TSP in eSports practice. The use of TSP will contribute to the improvement of the planning of the training process and the management of the training of e-athletes, the development and adoption of management decisions, the optimal choice of the distribution channel of advertising of e-sports events and the resolution of other urgent issues in the practice of e-sports.

Key words: the task of the traveling salesman, orientation, spectrum, application, eSports, prospects, improvement.