

Лотюк Юрій Георгійович*ПВНЗ «Міжнародний економіко-гуманітарний університет імені академіка Степана Дем'янчука», Рівне*

ORCID 0000-0001-6696-5583

Юскович-Жуковська Валентина Іванівна*ПВНЗ «Міжнародний економіко-гуманітарний університет імені академіка Степана Дем'янчука», Рівне*

ORCID 0000-0002-4236-1467

КОМБІНОВАНИЙ АЛГОРИТМ ДЕЙКСТРИ З ГЕНЕТИЧНИМИ АЛГОРИТМАМИ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ТОПОЛОГІЇ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ

Анотація. У динамічній топології мобільних мереж 4G LTE маршрутизація трафіку змінюється у реальному часі. Класичний алгоритм Дейкстри, що є одним із популярних для знаходження оптимальних шляхів у статичних мережах, втрачає ефективність в умовах динамічних змін. У зв'язку з цим, для оптимізації маршрутів передачі даних в мережі 4G доцільно використовувати комбінацію алгоритму Дейкстри з генетичними алгоритмами.

У швидкозмінному цифровому просторі постають задачі, які потребують комфортного та зручного вирішення під зростаючі потреби процесів диджиталізації. Сучасні бездротові технології забезпечують високу швидкість передачі даних та надійність з'єднання. Бездротовими мережами передається істотно великий обсяг даних, мультимедійний контент, доступ до якого користувачі мають з різних пристроїв, таких як смартфони, планшети, ноутбуки та пристрої Розумного будинку. На доступ до контенту можуть впливати різноманітні перешкоди та завади, що пов'язані з роботою мобільних мереж.

Для оптимізації топології мобільних мереж відіграє роль швидкість передачі даних та навантаження на мережу, усунення проблем, пов'язаних із затримкою зв'язку, зменшенням потужності сигналу або перериванням з'єднання. Ці проблеми усуваються в разі знаходження оптимальних маршрутів в мережі для передачі даних, враховуючи всі зовнішні чинники.

У роботі досліджено застосування алгоритму Дейкстри у комбінації з генетичними алгоритмами для забезпечення оптимальної маршрутизації, яка гарантує якісний та безперебійний зв'язок у мобільних мережах 4G LTE.

Ключові слова: алгоритм Дейкстри, мобільні мережі 4G, генетичні алгоритми, маршрутизація, мережеве покриття, оператори мобільного зв'язку

Lotiuk Yuri*PHEE «Academician Stepan Demianchuk International University of Economics and Humanities», Rivne, Ukraine, Rivne*

ORCID 0000-0001-6696-5583

Yuskovych-Zhukovska Valentyna*PHEE «Academician Stepan Demianchuk International University of Economics and Humanities», Rivne, Ukraine, Rivne*

ORCID 0000-0002-4236-1467

COMBINED DEYKSTRA ALGORITHM WITH GENETIC ALGORITHMS FOR OPTIMIZING MOBILE NETWORK TOPOLOGY

Abstract. In the dynamic topology of 4G LTE mobile networks, traffic routing changes in real time. The classic Dijkstra algorithm, which is one of the most popular algorithms for finding optimal paths in static networks, loses its effectiveness in dynamic conditions. In this regard, it is advisable to use a combination of Dijkstra's algorithm and genetic algorithms to optimize data in 4G networks transmission routes.

In the rapidly changing digital space, tasks arise that require comfortable and convenient solutions to meet the growing needs of digitization processes. Modern wireless technologies provide high data transfer speeds and connection reliability. Wireless networks transmit a significant amount of data and multimedia content, which users can access from various devices, such as smartphones, tablets, laptops, and smart home devices. Access to content can be affected by various obstacles and interference associated with the operation of mobile networks.

© Лотюк Ю.Г., Юскович-Жуковська В.І.

2025

Data transfer speed and network load, elimination of problems associated with communication delays, signal strength reduction, or connection interruptions play a role in optimizing the topology of mobile networks. These problems are eliminated by finding optimal routes in the network for data transmission, taking into account all external factors.

The paper investigates the application of Dijkstra's algorithm in combination with genetic algorithms to ensure optimal routing, which guarantees high-quality and uninterrupted communication in 4G LTE mobile networks.

Keywords: Dijkstra algorithm, 4G mobile networks, genetic algorithms, routing, network coverage, mobile operators

Постановка проблеми.

У сучасному цифровому суспільстві мобільні мережі є ключовою складовою інформаційної інфраструктури, в якій постійно зростає попит на високу швидкість передавання даних, мінімальні затримки та надійне з'єднання. Четверте покоління мобільного зв'язку 4G LTE є зручним практично для всіх користувачів гаджетів. Найбільша мережа 4G LTE в Україні розгорнута операторами: Vodafone, Київстар та Lifecell.

Кожна базова станція операторів має обмежену кількість «каналів» для обслуговування абонентів. Навіть за якісного сигналу, трафік іноді передається повільно, оскільки ресурси розподіляються між усіма активними абонентами.

Крім того, може спостерігатись нестабільна якість зв'язку в результаті слабкого покриття мережі у віддалених районах - так званих «мертвих зонах». У місцях з великою кількістю одночасно підключених абонентів, у години пік мережа перевантажується, знижується швидкість, збільшується затримка, падає якість дзвінків.

Отже, одним із головних показників мобільних мереж - це ефективність маршрутизації даних. Алгоритм Дейкстри у комбінації з генетичними алгоритмами може враховувати динамічність мережі, де топологія постійно змінюється та бути використаний для визначення оптимальних маршрутів для передачі даних між базовими станціями та користувацькими мобільними пристроями.

Особливо актуальним є застосування такої комбінації у самоналаштуваних мережах Self-Organizing Networks (SON), де маршрути формуються у реальному часі з урахуванням змін мережевого середовища, де основним критерієм є швидкість пошуку оптимальних шляхів у змінних умовах мережі. В зв'язку з розвитком та зміною топології сучасних мобільних мереж необхідне вдосконалення алгоритму Дейкстри для адаптації до новітніх технологій. Для мобільних мереж із динамічними змінами в топології важливо мати алгоритми, які можуть адаптуватися до цих змін. Алгоритм Дейкстри та генетичні алгоритми можуть бути адаптовані для роботи в таких умовах, використовуючи методи гнучкої маршрутизації та корекції шляху.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В основі оптимальної структури найкоротшого шляху з єдиного джерела лежить класичний алгоритм Дейкстри, суть якого детально описано в роботі [1].

Пошук оптимальних маршрутів проходження інформації розглянуто у роботі [2], де запропоноване удосконалення полягає у введенні додаткових блоків до стандартного алгоритму Дейкстри з метою попереднього, точнішого обчислення вагових коефіцієнтів ліній зв'язку.

У роботі [3] розглянуто адаптацію алгоритму для ефективної роботи в протоколах внутрішньої маршрутизації, таких як OSPF, з урахуванням специфіки мережевих протоколів

У роботі [4] запропоновано модифікований алгоритм маршрутизації для зменшення перевантажень ресурсів комп'ютерних мереж, зокрема з врахуванням двох класів трафіку.

У протоколах комп'ютерних мереж, таких як OSPF (Open Shortest Path First), класичний алгоритм Дейкстри використовується для побудови дерева найкоротших шляхів (SPF) на основі інформації про стан зв'язку. Це дозволяє маршрутизаторам обчислювати оптимальні маршрути до всіх вузлів мережі.

Задачу пошуку найкоротшого шляху досліджено у статті [5], де проведено порівняльний аналіз алгоритмів: Дейкстри, Беллмана-Форда та Флойда-Уоршелла. Доведено, що у практичному застосуванні необхідна їхня модифікація та оптимізація для підвищення ефективності.

Генетичні ж алгоритми здатні ефективно розв'язувати складні оптимізаційні задачі в динамічних середовищах та здатні швидко адаптуватись до змін умов навколишнього середовища.

Робота [6] присвячена визначенню оптимальних маршрутів збору інформації, що дозволяють БПЛА адаптувати свої траєкторії під поточні умови навколишнього середовища, враховуючи такі фактори, як напрямок і швидкість вітру, рівень забруднення у різних ділянках, наявність природних чи штучних перешкод у міській або сільській місцевості.

У роботі [7] розглянуто особливості використання генетичного алгоритму для розв'язання оптимізаційних задач. Застосування алгоритму Дейкстри та генетичних алгоритмів в пошуку найкоротшого шляху в оптимізаційних задачах досліджувалось закордонними науковцями.

Так, у роботах [8, 9] досліджено, що генетичний алгоритм можна використовувати для розв'язання задач оптимізації, наприклад для пошуку найбільш придатних віртуальних машин, підключених до різних центрів обробки даних.

У роботі [10] означене вирішальне значення алгоритмів маршрутизації в мобільних ad hoc мережах MANET, проведено порівняльний аналіз алгоритмів маршрутизації Дейкстри, Белмена-Форда та Генетичного

Науковці у роботі [11] запропонували новий алгоритм, який знаходить найбільш підходящий шлях між джерелом та пунктом призначення D2D, щоб максимізувати пропускну здатність багатострибкового зв'язку; відповідний маршрут знаходиться за допомогою генетичного алгоритму з упорядкованим кросовером

Мета і задачі дослідження.

Метою дослідження є вдосконалення алгоритму Дейкстри та його комбінація з генетичними алгоритмами для оптимізації маршрутизації трафіку у мобільних мережах 4G LTE.

Для досягнення поставленої мети вирішено наступні завдання:

- проаналізовано застосування алгоритму Дейкстри при перебудові маршрутизації в мережі для змінних умов, а саме - рухомих абонентів;
- розроблено комбінований алгоритм на базі алгоритму Дейкстри та генетичних алгоритмів для динамічної зміни маршрутизації у мережах з великою кількістю рухомих абонентів.

Результати дослідження.

Мобільні мережі 4G LTE складаються з великої кількості базових станцій, пристроїв передачі даних та комунікаційних каналів. На рис. 1 відобразимо ділянку 4G мобільної мережі, де B1, B2, B3 (Base Transceiver Station) – базові станції мобільного зв'язку;

U1, U2, U3, U4 (User1, User2, User3, User4) - абоненти мобільного зв'язку;

M1, M2, M3 (Mobile communications tower) – вежі мобільного зв'язку.

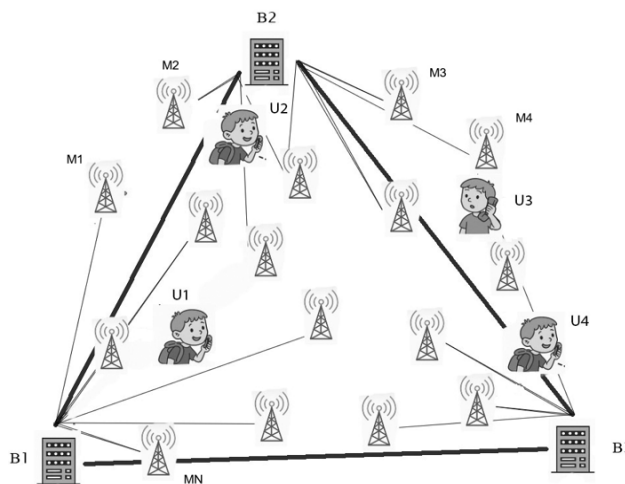


Рис. 1. Схема ділянки 4G мобільної мережі

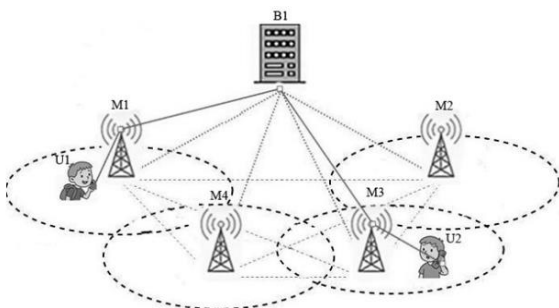


Рис. 2а. Абоненти у віддалених зонах покриття

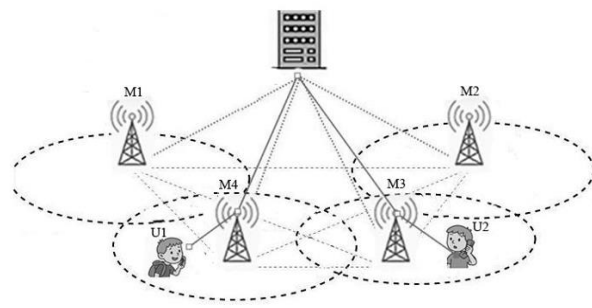


Рис. 2б. Абоненти у сусідніх зонах покриття

Для забезпечення ефективного зв'язку автоматично змінюється таблиця маршрутизації.

На рис.2 відображено зміну маршрутизації трафіку у 4G мережі від абонента U1 до абонента U2. Абоненти перебувають у віддалених зонах покриття (Рис. 2а), у сусідніх зонах покриття (Рис. 2б), у одній зоні покриття (Рис. 2в).

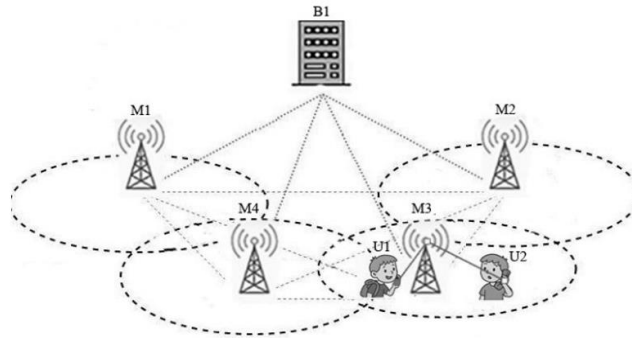


Рис. 2в. Абоненти у одній зоні покриття

Рисунок 2а відображає шлях проходження сигналу через стільникову мережу маршрутом U1-M1-B1-M3-U2; рисунок 2б - шлях маршрутом U1-M4-B1-M3-U2; рисунок 2в - шлях маршрутом U1-M3-U2.

Зобразимо ділянку мобільної мережі у вигляді графа, де вершини представляють базові станції та користувацькі пристрої, а ребра показують можливі шляхи передачі даних. Динамічні елементи візуалізації включають зміни в топології, оновлення структури графа, а перебудова шляхів передачі даних відбувається в реальному часі при зміні місця знаходження абонентів.

Якщо абонент знаходиться у русі, тоді його трафік маршрутизується до найближчої вежі мобільного зв'язку (Mobile communications tower) шляхом з мінімальною затримкою. При цьому алгоритм Дейкстри будує найкоротший шлях з урахуванням змінних метрик (затримка, навантаження, втрати). Алгоритм спочатку розраховує маршрут gNodeB-12 → gNodeB-10 → gNodeB-7 → 5G Core Gateway з найменшою затримкою. Далі, коли абонент переміщується в зону обслуговування іншої базової станції, то рахує маршрут від gNodeB-12 до gNodeB-13. SON фіксує зміну та автоматично тригерить перерахунок маршруту. Новий шлях становить: gNodeB-13 → gNodeB-11 → gNodeB-8 → 5G Core Gateway.

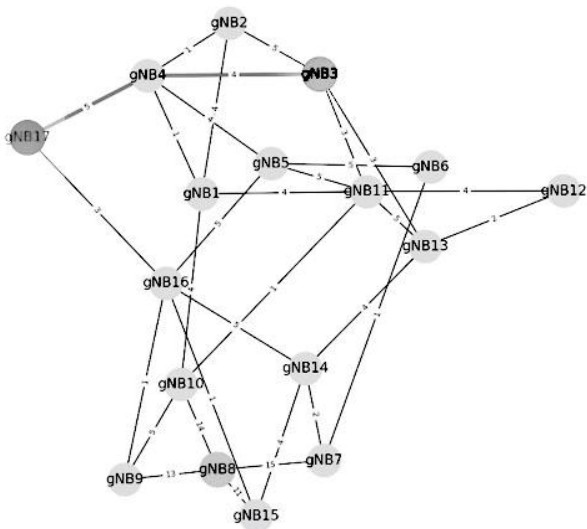


Рис. 3а. Умовна топологія Self-Organizing Network

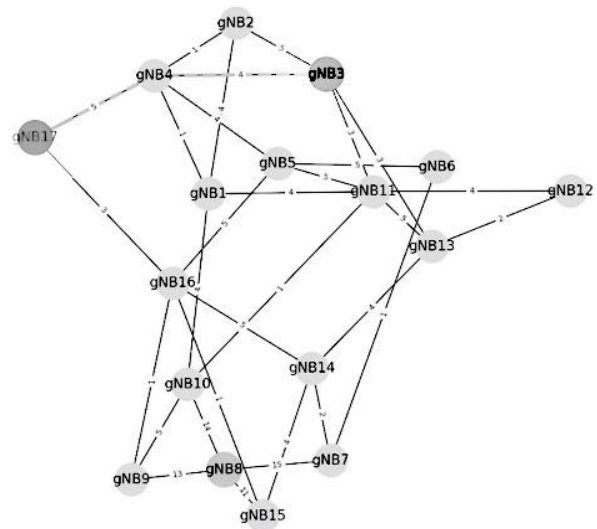


Рис. 3б. Адаптована топологія Self-Organizing Network

Вага вузла в графі враховує затримку сигналу (географічна місцевість, погодні умови, перешкоди на шляху сигналу), навантаження (час пік, обсяг трафіку абонента, пропускна здатність вежі мобільного зв'язку).

Відобразимо результат роботи алгоритму Дейкстри в умовах динамічної маршрутизації в Self-Organizing Network мобільної мережі.

Рис.3а демонструє початковий оптимальний маршрут від абонента (gNB3) до ядра (gNB17). Як видно з рис.3б алгоритм Дейкстри працює коректно, перебудовує маршрут після імітації перевантаження на вузлі gNB8. Self-Organizing Network реагує на зміну стану мережі й перебудовує маршрут в реальному часі, автоматично обходячи вузол, де відбулося перевантаження.

Для даного експерименту алгоритм Дейкстри для динамічної маршрутизації SON має вигляд:

```

23 # Основні вузли
24 start_node = 'gNB3'
25 degraded_node = 'gNB8'
26 core_gateway = 'gNB17'
27
28 # Обчислення початкового маршруту
29 initial_path = nx.dijkstra_path(G, source=start_node, target=core_gateway)
30 initial_weight = sum(G[u][v]['weight'] for u, v in zip(initial_path, initial_path[1:]))
31
32 # Зміна ваг на ребрах, пов'язаних із gNB8 (імітація перевантаження)
33 for neighbor in list(G.neighbors(degraded_node)):
34     G[degraded_node][neighbor]['weight'] += 10
35
36 # Обчислення нового маршруту після зміни
37 new_path = nx.dijkstra_path(G, source=start_node, target=core_gateway)
38 new_weight = sum(G[u][v]['weight'] for u, v in zip(new_path, new_path[1:]))
39
40 # Візуалізація двох маршрутів
41 pos = nx.spring_layout(G, seed=42)
42 plt.figure(figsize=(16, 8))
43

```

При зміні кількості абонентів систематично активізується алгоритм Дейкстри і періодично оновлюється таблиця маршрутизації (Таблиця 1).

Таблиця 1

Зміна маршрутизації в мережі 4G LTE

| Стан мережі | Користувачі | Призначення | Маршрут | Альтернативний маршрут |
|--------------------|-------------|--------------|-----------------------------------|------------------------|
| Нормальний | UE1 (User1) | Core Network | UE1 → gNB5 → gNB8 → gNB11 → Core | - |
| gNB8 перевантажено | UE1 (User1) | Core Network | UE1 → gNB5 → gNB7 → gNB11 → Core | через gNB7 |
| gNB8 перевантажено | UE2 (User2) | Core Network | UE2 → gNB6 → gNB9 → gNB11 → Core | відмова від gNB8 |
| Нормальний | UE3 (User3) | Core Network | UE3 → gNB4 → gNB8 → gNB11 → Core | - |
| gNB8 перевантажено | UE3 (User3) | Core Network | UE3 → gNB4 → gNB10 → gNB11 → Core | через gNB10 |

Алгоритм Дейкстри ефективно працює в умовах статичної топології. Натомість генетичні алгоритми здійснюють пошук у стохастичних умовах, тому є корисними в багатокритеріальних оптимізаційних задачах, якими є оптимізація мобільних мереж.

У мережі з нестабільними з'єднаннями генетичний алгоритм може дослідити шляхи з обхідними маршрутами, які Дейкстра самостійно не врахує.

Переваги комбінованого застосування алгоритму Дейкстри з генетичними алгоритмами полягають в наступному:

- пошук альтернативних надійних маршрутів;
- здатність до одночасної оптимізації топології за кількома критеріями;
- адаптація до великих і динамічних мереж, де класичний алгоритм Дейкстри зазнає перевантаження.

Представимо розроблений комбінований алгоритм Дейкстри з генетичними алгоритмами для оптимізації маршрутизації у мобільній мережі 4G у вигляді псевдокоду, в якому позначені основні кроки:

Основними процедурами розробленого алгоритму є:

- GenerateInitialRoutes випадково або евристично формує початковий маршрут;

- EvaluateRoute надає багатокритеріальну оцінку маршруту (затримка, відмовостійкість, енергозатрати);
- DijkstraRefine(route) уточнює частини маршруту на основі алгоритму Дейкстри;
- UpdateQTable здійснює за допомогою генетичних алгоритмів та нейронної мережі навчання агента (reinforcement learning).

```

1  function AdaptiveRoute(src, dst):
2      graph = getCurrentTopology()
3      # 1. Генеруємо початкову популяцію маршрутів
4      population = generateInitialRoutes(src, dst, graph)
5      for generation in 1 to MAX_GENERATIONS:
6          # 2. Оцінка кожного маршруту
7          scores = []
8          for route in population:
9              score = evaluateRoute(route)
10             scores.append(score)
11             # 3. Вибір кращих
12             selected = selection(population, scores)
13             # 4. Кросовер та мутація
14             offspring = []
15             for i in 0 to len(selected) step 2:
16                 r1, r2 = crossover(selected[i], selected[i+1])
17                 mutate(r1)
18                 mutate(r2)
19                 offspring.extend([r1, r2])
20             # 5. Локальна оптимізація Дейкстрою
21             for route in offspring:
22                 route = dijkstraRefine(route, graph)
23             # 6. Об'єднуємо старе покоління з новим
24             population = selectTopN(population + offspring, N)
25             # 7. Вибір найкращого маршруту
26             bestRoute = getBestRoute(population)
27             # 8. Онлайн-навчання на основі результату
28             reward = measurePerformance(bestRoute)
29             updateQTable(src, dst, bestRoute, reward)
30             return bestRoute

```

Висновки та перспективи подальших досліджень.

В результаті теоретичного дослідження та чисельного експерименту було доведено ефективність використання алгоритму Дейкстри у комбінації з генетичними алгоритмами для оптимізації маршрутизації трафіку в мобільних мережах 4G LTE, зокрема в умовах змінної мобільності користувачів та великого навантаження.

Результати експериментів довели, що в разі статичної мобільної мережі 4G ефективним є застосування класичного алгоритму Дейкстри. В разі великої кількості рухомих абонентів ефективним є застосування комбінованого алгоритму Дейкстри з генетичними алгоритмами.

Розроблений комбінований алгоритм дозволяє мінімізувати затримки передачі даних, зменшити кількість мережевих колізій і забезпечити більш ефективне використання ресурсів базових станцій.

Розроблений алгоритм оперативно реагує на перевантаження окремих вузлів, що особливо актуально в умовах Self-Organizing Networks, де автоматична перебудова маршрутів є ключовим компонентом. Побудовані маршрути гарантують найкоротший шлях за вартісними критеріями (затримка, втрата пакетів, пропускна здатність), що забезпечує покращення якості обслуговування (QoS) для кінцевих користувачів.

Подальші дослідження застосування алгоритму Дейкстри для оптимізації топології мобільних мереж спрямовані на комбінацію алгоритму Дейкстри з технологіями штучного інтелекту та розумними речами (розумними мобільними мережами) [12, 13, 14].

Список використаної літератури

1. Кормен, Томас Г. Вступ до алгоритмів: Переклад з англійської третього видання: [укр.] = Introduction to Algorithms : Third Edition : [пер. з англ.] / Томас Г. Кормен, Чарлз Е. Лейзерсон, Роналд Л. Рівест, Кліффорд Стайн. - К.: К.І.С., 2019. - 1288 с.
2. Слюсар В.І. Удосконалений метод Дейкстри для визначення найкоротших маршрутів між вузлами зв'язку у системі військового зв'язку Слюсар В.І., Громяк К.А. / Military cybernetics and system and system analysis - Київ, 46(1), <https://sit.nuou.org.ua/article/view/279538/274696>
3. Мартинова О. П., Рябенко Б. Ю. Модифікація алгоритма Дейкстри для визначення оптимальних маршрутів у протоколах внутрішньої маршрутизації // Матеріали науково-практичної конференції. – Київ: НТУУ «КПІ», 2023. – С. 45–49.
4. Обельовська К., Русаков А. Модифікований алгоритм маршрутизації для зменшення переважань ресурсів комп'ютерних мереж. Вісник НУ «Львівська політехніка» «Комп'ютерні науки та інформаційні технології». Вип.719 <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2024/feb/33386/vis663komp-nauky-223-228.pdf>
5. Бабич, В., Задача пошуку найкоротшого шляху: порівняльний аналіз основних алгоритмів. Бабич, В., Костенко, А., Плеша, В., Плеша М., Хмільчук, Л. Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security, №2, 2023, <https://journals.politehnica.dp.ua/index.php/it/article/view/306>
6. Кулик Я. А. Адаптація генетичних алгоритмів до задачі оптимізації руху наземних роботів для керування групою безпілотних літальних апаратів / Кулик Я. А., Барановська А. Ю., Барабан М. В. - Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2024, № 6, с.103-111.
7. Пиріг Я. Генетичний алгоритм як засіб розв'язання оптимізаційних задач. / Пиріг Я., Климаш М., Пиріг, Ю. Лаврів О. Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія, 2023. - Вип. 3, № 2. https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2023/oct/31568/paper10_0.pdf
8. Liu, R. and Wang, Y. (2019), "Research on TSP Solution Based on Genetic Algorithm", IEEE ACIS 18th International Conference on Computer and Information Science (ICIS), Beijing, China, pp. 230–23. DOI: 10.1109/ICIS46139.2019.8940186
9. Swarnakar, S., Kumar, N., Kumar, A. and Banerjee, C. (2020), "Modified Genetic Based Algorithm for Load Balancing in Cloud Computing", IEEE 1st International Conference for Convergence in Engineering (ICCE), Kolkata, India, pp. 255–259. DOI: 10.1109/ICCE50343.2020.9290563 <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9290563>.
10. Kumar, R., & Sharma, A. (2023). A comparative analysis of optimized routing protocols for high-performance mobile ad hoc networks. In Proceedings of ICCCN 2023 (pp. 69–82). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-97-0892-5_7
11. Nugraha, I. G. P., & Zemen, T. (2019). Relay selection exploiting genetic algorithms for multi-hop device-to-device communication. In Proceedings of WiCON 2019. https://6gmobile.fel.cvut.cz/publication/nugrahaWiCON2019_D2D.pdf
12. Ананченко В. Концепція next generation network (ngn) для побудови мереж спільного використання між різними операторами зв'язку / В. Ананченко, Ю. Лотюк // V Міжнародна студентська наукова конференція «Концепт науки ххі: стратегії, методи та наукові інструменти», 29 березня 2024 р., м. Кривий Ріг. — 2024. — С. 69–72. — Режим доступу: <https://archive.liga.science/index.php/conference-proceedings/article/view/859>.
13. Yuskovych-Zhukovska, V., Bogut, O., Lotyuk, Y., Kravchuck, O., Rudenko, O., & Vasylenko, H. (2022). E-Learning in a Postmodern Society. *Postmodern Openings*, 13(1 Sup1), 447-464. <https://doi.org/10.18662/po/13.1Sup1/435>
14. Valentyna Yuskovych-Zhukovska. Тенденції розвитку цифрових технологій від Інтернету людей до Інтернету речей. // Digitalization and information society. selected issues. Monograph. University of Technology, Katowice. Publishing House of University of Technology, Katowice, Poland, 2022, P. 6-12. <http://www.wydawnictwo.wst.pl/uploads/files/8b03138919e2513e3eb7df528f532ecc.pdf>