

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет «Комп'ютерні технології та системи»

(назва факультету)

Кафедра «Електронних обчислювальних машин»

(повна назва кафедри)

№ 23.01.2024

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
другий (магістерський)
(ступінь вищої освіти)

на тему: Дослідження оптимальних параметрів WLAN на створеній програмній моделі мурашиного алгоритму

за освітньою програмою Комп'ютерна інженерія
зі спеціальності: 123 Комп'ютерна інженерія
(шифр і назва спеціальності)

Виконав: групи: КС2221
студент

(підпис студента)

Максим САЛОГУБ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник:

(підпис)

доцент, Вікторія ПАХОМОВА

(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтролер:

(підпис)

доцент, Володимир ШАПОВАЛОВ

(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Консультанти:

_____	/	/
(назва розділу)	(підпис)	(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)
_____	/	/
(назва розділу)	(підпис)	(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)
_____	/	/
(назва розділу)	(підпис)	(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)
_____	/	/
(назва розділу)	(підпис)	(посада, Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

(підпис)

Студент

_____ (підпис)

Дніпро – 2024 рік

**Ministry of Education and Science of Ukraine
Ukrainian State University of Science and Technologies**

Faculty Computer technologies and systems

_____ (faculty)

Department Electronic computing machines

_____ (department)

**Explanatory Note
to Master's Thesis
master
(higher education degree)**

on the topic: Investigation of optimal WLAN parameters on the created software model of the ant algorithm

according to educational curriculum Computer engineering

in the Speciality: 123 Computer engineering

_____ (speciality and its code)

Done by the student of the group: KS2221

/ Maksim SALOHUB /

_____ (name, surname)

Scientific Supervisor:

/ associate professor Viktoria
PAKHOMOVA /

_____ (position, name, surname)

Normative controller :

/ associate professor Volodymyr
SHAPOVALOV /

_____ (position, name, surname)

Supervisors

/ /

_____ (Chapter title heading)

_____ (position, name, surname)

/ /

_____ (Chapter title heading)

_____ (position, name, surname)

/ /

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Комп'ютерні технології і системи
Кафедра: Електронні обчислювальні машини
Рівень вищої освіти: другий (магістерський)
Освітня програма: Комп'ютерна інженерія
Спеціальність: 123 Комп'ютерна інженерія

(шифр та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ЕОМ
Ігор ЖУКОВИЦЬКИЙ
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата 16.11.2023

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу другий (магістерський)
(ступінь вищої освіти)

студенту Салогубу Максиму Володимировичу
(Прізвище, Ім'я По батькові)

1. Тема роботи: Дослідження оптимальних параметрів WLAN на створеній програмній моделі мурашиного алгоритму

Керівник роботи: Пахомова Вікторія Миколаївна, к.т.н., доцент кафедри ЕОМ
(Прізвище, Ім'я, По батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом від "21" 04 2023 р. № 333 ст

2. Строк подання студентом роботи: 08.01.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: топология сортувальної станції

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Аналітична частина:
огляд наукових джерел щодо дослідження технологій бездротових мереж.

4.2 Основна частина:
постановка задачі; мурашиний алгоритм як основний метод розв'язання задачі;
створення програми за мурашиним алгоритмом для визначення параметрів WLAN.

4.3 Дослідницька частина:
визначення оптимальних параметрів WLAN на створеній програмі.

2. Строк подання студентом роботи: 08.01.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: топологія сортувальної станції

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Аналітична частина:

огляд наукових джерел щодо дослідження технологій бездротових мереж.

4.2 Основна частина:

постановка задачі; мурашиний алгоритм як основний метод розв'язання задачі;

створення програми за мурашиним алгоритмом для визначення параметрів WLAN.

4.3 Дослідницька частина:

визначення оптимальних параметрів WLAN на створеній програмі.

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)

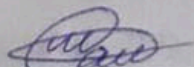
6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

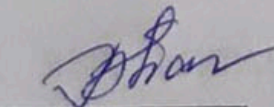
№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ	01.01.2024-07.01.2024	5 %
2	Огляд наукових джерел щодо дослідження технологій бездротових мереж	06.11.2023-26.11.2023	20 %
3	Постановка задачі	27.11.2023-30.11.2023	10 %
4	Мурашиний алгоритм як основний метод розв'язання задачі	01.12.2023-10.12.2023	25 %
5	Створення програми за мурашиним алгоритмом для визначення параметрів WLAN	11.12.2023-17.12.2023	20 %
6	Визначення оптимальних параметрів WLAN на створеній програмі	18.12.2023-29.12.2023	15 %
7	Висновки та рекомендації	01.01.2024-07.01.2024	5 %
8	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	08.01.2024	
9	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії		

Студент


(підпис)

Максим САЛОГУБ
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи


(підпис)

Вікторія ПАХОМОВА
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи магістра: 133 с., 21 рис., 1 таб., 4 додатки, 39 джерел.

Об'єкт дослідження – WLAN сортувальних станцій різної потужності.

Мета роботи – дослідити оптимальні параметри бездротових мереж на створеній програмній моделі мурашиного алгоритму.

Методи дослідження – методика розгортання бездротової мережі, що орієнтована на максимальну пропускну здатність; елітна стратегія мурашиного алгоритму; використання стандартних програмних засобів JavaScript.

Створено програму «MarshYard_Ant» засобами JavaScript для планування бездротових локальних мереж сортувальних станцій різної потужності з використанням елітної стратегії мурашиної системи. На створеній програмі «MarshYard_Ant» проведено дослідження оптимальних параметрів WLAN сортувальних станцій різної потужності. Визначено, що кількість точок доступу WLAN складає: 76 - для сортувальної станції малої потужності; 96 - для сортувальної станції середньої потужності; 127 - для сортувальної станції великої потужності; 155 - для сортувальної станції підвищеної потужності за топологією ESS та методикою розгортання, що орієнтується на максимальну пропускну здатність. Проведено дослідження впливу кількості мурах (агентів багатоагентного методу) на час пошуку кращого рішення та кількість базових станцій WLAN. Збільшення числа мурах з 10 до 50 в середньому зменшує час пошуку кращого рішення в 1.56 раз, а кількість базових станцій WLAN отриманих в результаті роботи програми на 1,2%. Крім того, проведено дослідження впливу радіуса покриття базової станції WLAN для сортувальної станції великої потужності (6 пучків, 350 клієнтів). Визначено, що збільшення радіуса покриття удвічі (з 50 м до 100 м) в середньому зменшує час пошуку кращого рішення в 2,29 раза.

Ключові слова: WLAN, ESS, МУРАШИНИЙ АЛГОРИТМ, ЕЛІТНА СТРАТЕГІЯ, JAVASCRIPT, БАЗОВА СТАНЦІЯ, РАДІУС ПОКРИТТЯ, БАГАТОАГЕНТНИЙ МЕТОД, АГЕНТИ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	9
1.1 Аналіз предмета дослідження	9
1.1.1 Класифікація та стандартизація бездротових мереж	9
1.1.2 Топології WLAN та методики їх розгортання	10
1.1.3 Основні напрямки досліджень бездротових мереж	13
1.1.3.1 Безпека бездротових мереж	13
1.1.3.2 Планування та оптимізація параметрів бездротових мереж	14
1.1.3.3 Взаємодія бездротових мереж різних стандартів, організація гетерогенних мереж	16
1.1.3.4 Бездротові мережі як частина Інтернету речей	18
1.1.3.5 Доступ до спектра та управління трафіком	19
1.2 Аналіз багатоагентних методів інтелектуальної оптимізації	21
1.2.1 Загальна характеристика інтелектуальних методів багатоагентної оптимізації	21
1.2.2 Бджолиний метод	23
1.2.3 Мурашиний метод	26
1.3 Приклад планування WLAN для сортувальних станції з використанням бджолиного алгоритму	31
1.4 Основні висновки	35
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА	36
2.1 Постановка задачі	36
2.2 Мурашиний метод як основний метод розв'язування задачі	39
2.3 Загальна характеристика створеної програми «MarshYard_Ant»	41
2.3.1 Призначення, вхідні дані, формат результатів та обмеження	41
2.3.2 Структура створеної програми та її опис	43
2.4 Тестування програми «MarshYard_Ant»	46
2.5 Основні висновки	48

3 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА	49
3.1 Визначення оптимальних параметрів WLAN для сортувальних станцій різної потужності	49
3.2 Дослідження числа агентів багатоагентних методів для сортувальних станцій різної потужності	51
3.3 Дослідження радіуса покриття базової станції для сортувальної станції великої потужності	53
3.4 Основні висновки	54
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	55
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	57
ДОДАТОК А. Текст створеної програми «MarshYard_Ant»	62
ДОДАТОК Б. Оптимальні параметри мурашиного алгоритму, що отримані на програмі «WLAN_EliteAS»	88
ДОДАТОК В. Отримані результати на створеній програмі «MarshYard_Ant»	90
ДОДАТОК Г. Тези доповідей	132

ВСТУП

Використання бездротових технологій в сучасності набрало високих обертів, кількість персональних та публічних пристроїв що використовують бездротовий канал зв'язку невпинно зростає, це тягне за собою необхідність оптимізації параметрів таких технологій, зокрема і бездротових локальних мереж (англ. Wireless Local Area Network, WLAN), що підтверджує актуальність теми.

Мета кваліфікаційної роботи – дослідити оптимальні параметри WLAN на створеній програмній моделі мурашиного алгоритму. Відповідно до мети роботи поставлено наступні завдання:

1. Виконати огляд наукових джерел щодо розвитку бездротових мереж та їх використання на залізничному транспорті.
2. Провести аналіз багатоагентних методів інтелектуальної оптимізації для дослідження бездротових мереж.
3. Створити програмну модель мурашиного алгоритму для визначення параметрів WLAN сортувальних станцій різної потужності.
4. Провести дослідження оптимальних параметрів WLAN на створеній програмній моделі мурашиного алгоритму.

На сучасному етапі можна виділити наступні основні напрямки досліджень бездротових мереж: планування бездротових мереж; ефективний доступ до спектра та управління трафіком; організація безпеки бездротових мереж; взаємодія мереж різних стандартів та гетерогенні мережі; бездротові мережі як частина інтернету речей та інші. Питанню дослідження бездротових мереж присвячені деякі наукові роботи науковців кафедри ЕОМ (УДУНТ): Жуковицького І. В.; Косолапова А. А.; Пахомової В. М., а також зарубіжних авторів: Golestanian M.; Iosifidis G.; Poellabauer C.; Poularakis K.; Siva J.; Tassiulas L. and other.

На сучасному етапі для розв'язання задач оптимізації використовуються методи, що натхненні живою природою, зокрема багатоагентні методи інтелектуальної оптимізації: мурашиний та бджолиний методи, алгоритми світляків та зозулі, алгоритми сірих вовків і бактерій шлунку та інші. Так, наприклад, сьогодні науковці використовують мурашиний алгоритм для

вирішення різноманітних класичних та нових задач у різних галузях науки та техніки, таких як: біоінформатика, маршрутизація, календарне планування, класифікація та машинний інтелект, наноелектроніка тощо. У своїх роботах використали мурашиний алгоритм або його модифікації такі закордонні вчені: Appleby S., Bachem, A., Brandt A, Bullnheimer B, Di Caro G, Dorigo M., Favaretto D, Glover F., Ibaraki T., Merkle D., Middendorf M., Moretti E, Pellegrini P., Reimann M, Socha K, Strauss C., Tsutsui S., Yagiura M. and others; а також вітчизняні науковці та науковці країн ближнього зарубіжжя: Глушко С. І., Кирсанов В. Н., Павленко А. І., Пахомова В. М, Титов Ю. П., Цветков В. А., Ширяєв П. Р., Штовба С. Д та інші.

Дана кваліфікаційна робота складається з вступу, трьох розділів та висновків. У першому розділі виконаний огляд наукових джерел щодо розвитку бездротових мереж та їх використання на залізничному транспорті, а також проведений аналіз багатоагентних методів інтелектуальної оптимізації для дослідження бездротових мереж. У другому розділі сформульована постановка задачі планування WLAN на сортувальній станції з використанням мурашиного алгоритму, створена засобами мови JavaScript програмна модель «MarshYard_Ant». На створеній програмній моделі визначені параметри WLAN сортувальних станцій різної потужності. Крім того, проведено дослідження впливу кількості ітерацій та кількості агентів мурашиного методу, а також радіуса покриття базової станції на якість рішень та швидкість знаходження оптимального рішення.

Результати кваліфікаційної роботи подавалися у вигляді тез доповіді на: Всеукраїнську науково-технічну конференцію здобувачів вищої освіти та молодих учених «Наука і сталий розвиток транспорту»; XVII Міжнародну науково-практичну конференцію «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті», що відбулися в УДУНТ 27 жовтня 2023 р. та 13-14 грудня 2023 р. відповідно.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз предмета дослідження

1.1.1 Класифікація та стандартизація бездротових мереж

Широке використання комунікаційних мереж — невіддільна частина не тільки армії та бізнесу, але і повсякденного життя. На сучасному етапі розвитку все більше місце посідають бездротові мережі (англ. Wireless network) – мережі які включають до свого складу обладнання, програмне забезпечення та протоколи що використовують бездротову середу для передачі даних, зазвичай оптичну, звукову, електромагнітну (мікрохвилі та радіохвилі) тощо [1-3].

За масштабом сучасні бездротові мережі можна поділити на такі основні категорії [1-3] (рисунок 1.1 [2]):

- Персональна бездротова мережа (Wireless Personal Area Network, WPAN) – мережі призначення котрих об'єднують декількох персональних пристроїв користувача у єдину мережу. Приклади технологій: Bluetooth, Li-Fi, Wireless USB та інші.

- Локальна бездротова мережа (Wireless Local Area Network, WLAN) – мережа що об'єднує пристрої розташовані на обмеженій території: квартира, школа, інститут, офіс тощо. Приклади технологій: Wi-Fi та інші;

- Бездротова мережа масштабу міста (Wireless Metropolitan Area Network, WMAN) – мережа, що об'єднує пристрої у масштабі міста. Приклади технологій: WiMAX, LMDS, MMDS та інші.

- Глобальна бездротова мережа (Wireless Wide Area Network, WWAN) – мережа що об'єднує пристрої у масштабі регіонів та країн, зазвичай використовує технології стільникового зв'язку. Приклади технологій: GSM, 2G, 3G, 4G LTE та 5G та інші.

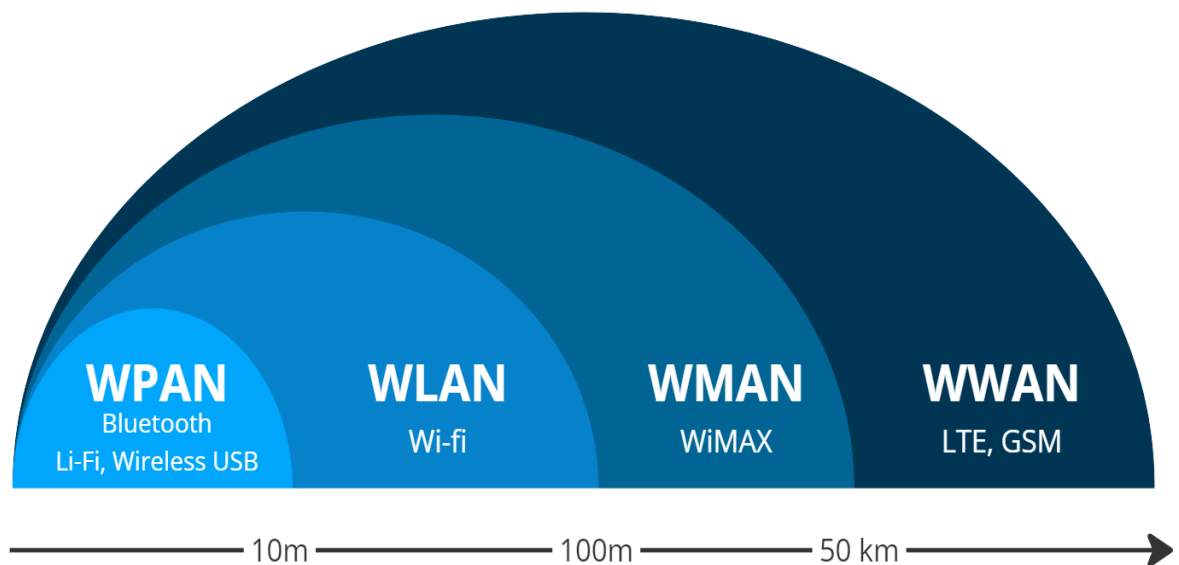


Рисунок 1.1 – Класифікація бездротових мереж за масштабом покриття. [2]

1.1.2 Топології WLAN та методики їх розгортання

Сім'я стандартів IEEE 802 виділяє [1-3]:

- Незалежні базові зони обслуговування (англ. Independent Basic Service Set, IBSS) – це тип з'єднання, коли два або більше пристрої-клієнти з відповідними бездротовими адаптерами самостійно формують бездротову мережу, без використання базових станцій, також відомі як мережі Ad-hoc.
- Базові зони обслуговування (англ. Basic Service Set, BSS) – це закрыта група пристроїв. Її центральним елементом є бездротова базова станція (англ. Base Station), яка обслуговує пристрої-клієнти.
- Розширені зони обслуговування (англ. Extended Service Set, ESS) – це декілька структур BSS, з'єднані через інтерфейси висхідного каналу до розподільної системи (спорідненої технології).

Крім того, [2] виділяють наступні методики розгортання бездротових мереж які можна розглянути на прикладі WLAN: мережі орієнтовані на зону обслуговування (англ. coverage oriented) та мережі орієнтовані на максимальну пропускну здатність (англ. capacity or bandwidth oriented). WLAN, що орієнтовані на зону обслуговування, розробляють з урахуванням забезпечення максимального покриття за мінімально можливою кількістю базових станцій

(рисунок 1.2). У типовій орієнтованій на зону обслуговування мережі забезпечується співвідношення кількості користувачів до числа базових станцій 25:1.

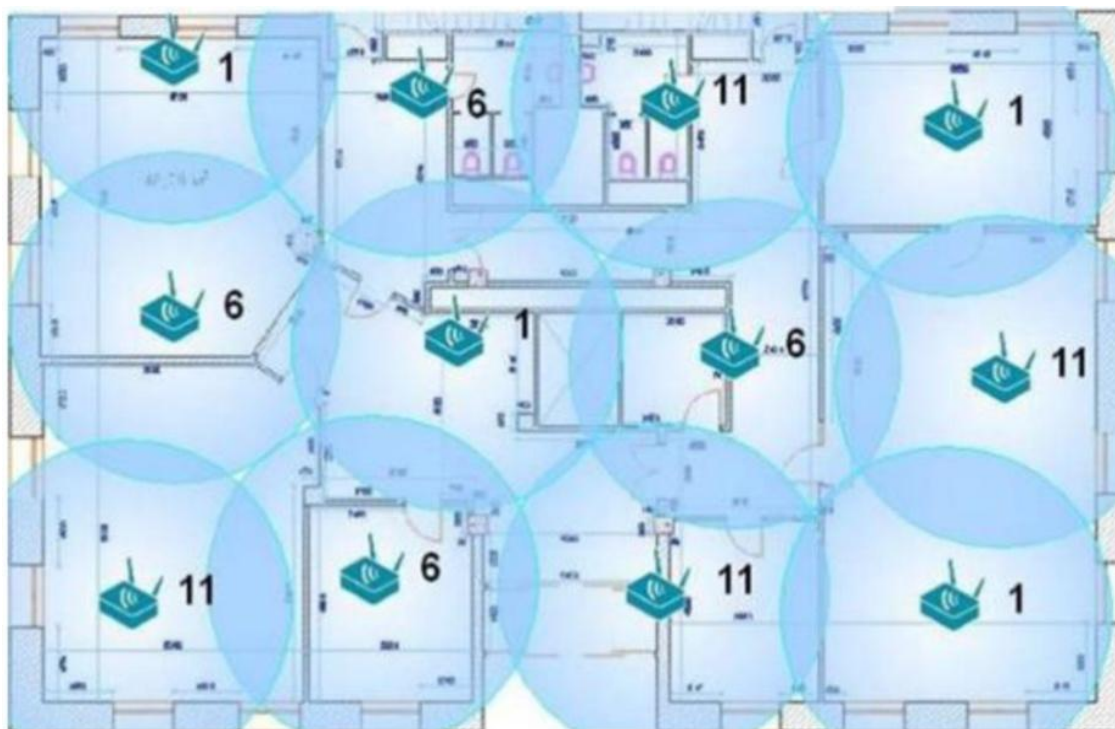


Рисунок 1.2 – WLAN, орієнтовані на зону обслуговування [2]

Типові ознаки мережі для якої буде достатньо методики направленої на максимальне покриття:

- Достатня швидкість передачі пакетів низька, швидкість близька до 1-2 Мбіт/с.
- Порівняно менший штат персоналу для обслуговування мережі, необхідність легкості супроводу мережі.
- Планування мережі проводиться для малого або середнього підприємства, філії тощо.
- Мережу вибирають як альтернативу провідній мережі Ethernet.

WLAN орієнтовані на найбільшу пропускну здатність, повинні забезпечувати максимальну продуктивність і швидкість передачі пакетів для кожного клієнта BSS. Рекомендоване число клієнтів при орієнтуванні на максимальну пропускну здатність – 12. Розміри стільників орієнтованої на пропускну здатність WLAN менша ніж для WLAN, що орієнтовані на максимальну зону обслуговування,

відповідно щільність розміщення базових станцій вища як видно на рисунку 1.3 [2].

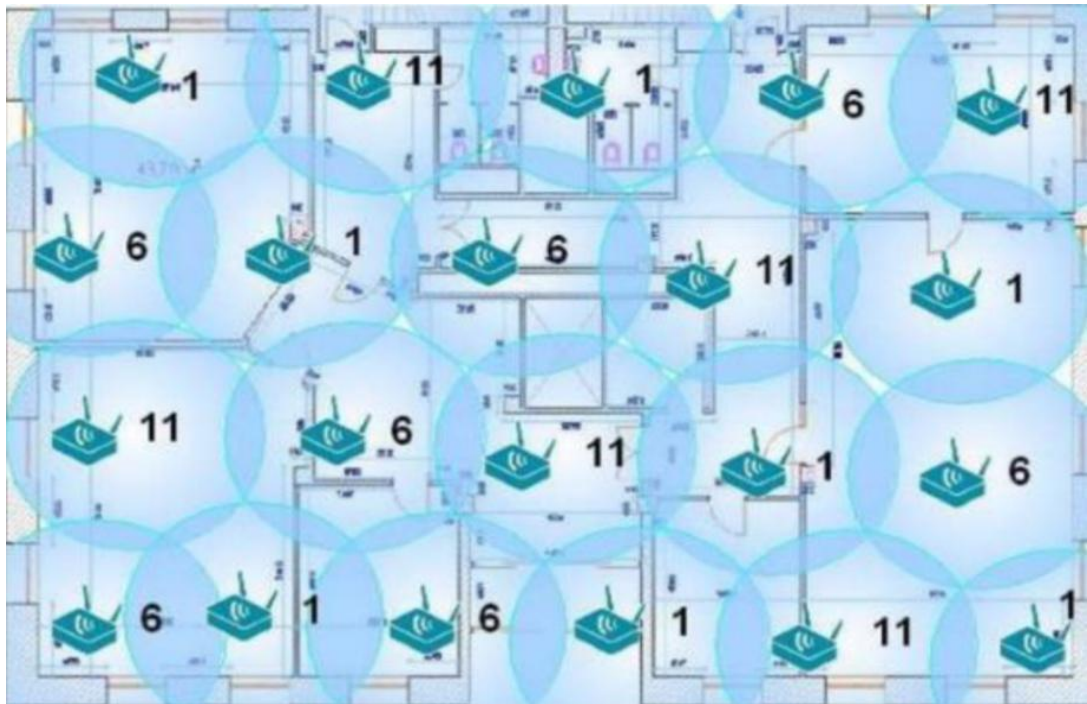


Рисунок 1.3 – WLAN, орієнтована на максимальну пропускну здатність [2]

Типові потреби мережі при розгортанні якої слід орієнтуватися на максимальну пропускну здатність на максимальне покриття:

- Необхідна висока швидкість передачі даних, або використовуються додатки чутливі до затримок.
- Спостерігається висока щільність розміщення клієнтів.
- Одночасно розгортаються декілька підмереж менших масштабів.

У використанні бездротових мереж можна виділити наступні переваги, які в основному пов'язані з особливостями серед передачі сигналу:

1. простота масштабування та підключення нових пристроїв;
2. мобільність пристроїв в межах дії мережі;
3. гнучкість використання у місцях де проведення кабелів утруднено чи неможливе;
4. зменшення витрат на проведення кабелю та конфігурацію, заміну кабелю;

Проте бездротові мережі мають і деякі суттєві недоліки, серед яких можна виділити:

1. ризики безпеки інформації через простоту доступу до опорних частот постає основною проблемою бездротової передачі даних;
2. зниження якості, спотворення або втрата сигналу через особливості розташування мережі (стіни, географічні об'єкти тощо) та умов середовища (погодні умови, електромагнітне забруднення та ін.);
3. обмеження специфічні для технологій пов'язані з дальністю передачі з поступовим послабленням сигналу при віддаленні від пристрою-передавача;
4. особливості взаємодії між пристроями різних технологій можуть потребувати додаткового програмного, або комп'ютерного обладнання;

У сьогоднішні відбувається активний перехід до стільникових технологій п'ятого покоління (5G), розробка і впровадження нових стандартів бездротових мереж. На залізничному транспорті в країнах Європи з 2008 року для забезпечення захищеного бездротового зв'язку між залізничними службами та потягами почали використовувати стандарт GSM-R (Global System for Mobilecommunications — Railway). [2]

1.1.3 Основні напрямки досліджень бездротових мереж

1.1.3.1 Безпека бездротових мереж

Через легкість доступу до опорних частот бездротові мережі мають велику вразливість до різноманітних загроз. У своїй роботі [4] Жуковицький І. В. виділяє наступні групи загроз для WLAN:

- несанкціоноване під'єднання до приладів та мереж;
- перехоплення та розкриття трафіку (прослуховування, злам шифрування);
- модифікація трафіку (підробка повідомлень, ін'єкції в кадри);
- порушення доступності (завади, захоплення ресурсів мережі).

Стандарти різних технологій пропонують механізми захисту для бездротових мереж, щоб розв'язувати ці проблеми. Так група стандартів IEEE 802.11 (Wi-Fi), пропонують наступні протоколи: Wired Equivalent Privacy (WEP), Wi-Fi Protected Access (WPA), WPA2 і WPA3 [1,4].

Група науковців: Wu Yongdong, Ye Dengpan, Wei Zhuo, Wang Qian, Tan William та Deng Robert, представили [5] адаптивну (situation-aware) аутентифіковану схему передачі відеотрафіку у мережі залізничного транспорту.

Мережа у якій працює схема складається з: потягу, бортового сенсора, пристрою GSM-R, базових станцій Wi-Fi та автоматизованого центру управління поїздами. Схема включає 4 елементи: модуль зняття даних з бортових сенсорів потяга; модуль сповіщення замірів у реальному часі до центру управління потягами, де встановлена GSM-R; модуль адаптивного регулювання швидкості та затримки захищеного потоку трафіку базових станцій Wi-Fi; модуль аутентифікації встановлений на потязі. Аналіз продуктивності показав що запропонована схема крім забезпечення автентичності потоку трафіку також забезпечує високу якість обслуговування (англ Quality of service, QoS) у середовищі WiFi з високими втратами.

1.1.3.2 Планування та оптимізація параметрів бездротових мереж

Хоча бездротові мережі і мають свої суттєві переваги у використанні над класичними дротовими мережами ефективність їх роботи у великій мірі залежить від правильності їх розгортання. Вимоги до комп'ютерної мережі можуть відрізнятися в залежності від кількості трафіку, кількості клієнтів тощо, (див. розд. 1.1.1).

К. Poularakis, G. Iosifidis та L. Tassiulas у своїй праці [6] розглядають задачу розгортання базових станцій Wi-Fi – Joint WiFi AP Deployment and Pricing (JWDP) з метою максимізації прибутку оператора. Вони розглядають три альтернативні моделі для захоплення попиту користувачів базових станцій Wi-Fi: максимальний надлишок попиту (Maximum Surplus Demand, MSD), постійний попит на еластичність (Constant Elasticity Demand, CED) і логітний попит (Logit Demand, LD). Для моделі MSD вони виводять алгоритм наближення, використовуючи зв'язок із проблемою типу розташування об'єкта. Для моделі CED вони представляють оптимальне рішення в закритій формі. А для моделі LD вони пропонують рандомізований жадібний алгоритм наближення. Ці рішення враховують ключові системні параметри, такі як витрати на розгортання базових станцій, чистий прибуток оператора, вартість доставлення даних через базові станції Wi-Fi і чутливість користувача до змін ціни.

У роботі [7] командою науковців досліджували деякі техніки оптимізації проєктування WLAN, і було запропоновано алгоритм багатоагентної оптимізації

для вирішення проектування великомасштабних WLAN. Для проблеми проектування великомасштабних WLAN характерна низька густина та нерівномірність розподілу ефективних рішень в просторі рішень, що вимагає від алгоритму високої ефективності оптимізації. Результати експерименту показують, що запропонований алгоритм має вищу ефективність пошуку, ніж Tabu Variable Neighbourhood Search Algorithm (TVNS). Алгоритм розглядає взаємозв'язок каналів та силових полів, що може збільшити різноманітність траєкторій пошуку. Крім того, глобальний контроль зі сторони багатоагентної системи може допомогти виходити за межі локального оптимуму. Однак із збільшенням кількості кандидатських пунктів один агент може мати багато можливостей незначно коригувати своє положення, що послаблює інтегрований зв'язок між частотою та силовим полем. Це може призвести до зайвого пошуку та збільшення часу роботи алгоритму, оскільки немає потреби завжди коригувати частоту після переміщення. Тому, розробка більш раціональних стратегій дій та балансування взаємозв'язків між положенням базових станцій, частотою, азимутом та потужністю випромінювання на різних частинах простору рішень у процесі оптимізації для прискорення швидкості роботи алгоритму, є цілями їх майбутніх робіт.

У статті [8] пропонується алгоритм визначення положення вузла для бездротових мереж датчиків на основі стратегії вибору статичного положення опорних вузлів. Спочатку, шляхом побудови топології випадково розташованих вузлів мережі датчиків визначається зв'язковий відносини між вузлами та зв'язність мережі. Потім місце опорних вузлів визначається за допомогою поєднання мір важливості (центральності), близькості й алгоритму швидкого сортування. Нарешті, алгоритм локалізації використовується для визначення точності та покриття локалізації невідомих вузлів. Результати симуляції показують, що запропонований алгоритм та існуючі типові алгоритми такі як: Multidimensional Scaling (MS), Distance Vector-Hop (DV-HOP), Approximate Point in Triangulation (APIT) піддаються впливу зміни параметрів: кількості вузлів, розподілу вузлів, формі області локалізації та радіусу зв'язку, але запропонований алгоритм піддається впливу менше, і точність локалізації та

покриття кращі, ніж в існуючих типових алгоритмів. У майбутній роботі ставить своєю ціллю звернути увагу на вплив траєкторії руху мобільних опорних вузлів з метою забезпечення оптимального споживання енергії при виконанні вимог до точності локалізації.

Загалом слід зазначити що у процесі планування бездротової існує велика кількість специфічних особливостей на які слід зважати:

- Специфіка місцевості чи середовища для відповідної бездротової технології (сприйнятливність до погодних умов, наявність стін тощо.)
- Потреби у швидкості передачі та широті каналу передачі даних, тип трафіку.
- Кількість та щільність розташування клієнтів.
- Ефективне розподілення опорних частот для уникнення інтерференції та погіршення сигналу.

1.1.3.3 Взаємодія бездротових мереж різних стандартів, організація гетерогенних мереж

На сучасний момент попит на бездротові пристрої росте, зростає кількість нових користувачів телекомунікаційних мереж. Як наслідок стоїть висока необхідність в інфраструктурі що підтримує їх використання та взаємодію. Нерідко стає необхідність організувати мережі для взаємодії клієнтів що використовують різні стандарти чи протоколи зв'язку. Такі мережі називають гетерогенними [9].

Так у роботі [9] описується задача енергоефективного підтримання зв'язку та високої якості обслуговування стільникових клієнтів при поступовому переході мереж beyond 5th generation (Beyond5G, B5G) та 6G які прагнуть значно збільшити пропускну здатність за рахунок встановлення великої кількості малих стільників (англ. Small Cells). Зазначено що формування оптоволоконних каналів зв'язку для малих стільників у мережі потребуватиме великих фінансових вкладень. Натомість для організації цього каналу зв'язку можна використати багатоканальну бездротову транспортну мережу (англ. Backhaul, BH) що діють на частотах mmWave, утворюючи багатоканальні мережі BH. Попри велику гнучкість у розгортанні, невизначеність у попиті, яка змінюється у часі та

просторі, робить планування та управління мережею складним. У цій роботі ми пропонуємо нові алгоритми для розв'язання спільної проблеми енергоефективного асоціювання користувачів, маршрутизації трафіку ВН та перемикання зв'язків BS/ВН. Науковці пропонують новий жадібний стійкий евристичний метод (P-HEUR), який включає крок підвищення стійкості з невизначеністю попиту. Результати дослідів демонструють, що P-HEUR швидко забезпечує стійкі та енергоефективні рішення для різних сценаріїв та рівнів невизначеності попиту, і він значно перевершує сучасні підходи, досягаючи до 83% оптимальної потужності, навіть у найвимогливіших сценаріях з точки зору навантаження на трафік та невизначеності попиту, з до 200 тисяч разів меншою складністю (англ. complexity).

Традиційний метод передачі клієнтів між зонами обслуговування базових станцій (англ. handover) за стандартом IEEE 802.11 спрямований на розв'язання проблем високої затримки передачі клієнта та "пінг-понг" перемикання. У статті [10] досліджено процес передачі клієнта системи управління поїздами CBTC (Communication Based Train Control) за допомогою стратегії перемикання WLAN з використанням DQN (англ. Deep Q-learning Network) у моделі WLAN міського залізничного транспорту. Ця стратегія витягує та вводить інформацію про статус характеристик руху поїзда та виконує передачі клієнта на основі рівня сигналу від поточної базової станції та цільової базової станції. Завдяки тренуванню глибокої нейронної мережі отримуються найкращі точки перемикання при різних швидкостях. Оптимальне значення, отримане алгоритмом DQN, підставляється в модель для верифікації за допомогою симуляції. Результати показують, що порівняно з традиційним методом, пропускна спроможність цієї стратегії збільшується на 36 %, а затримка пакетів зменшується на 55 %. Водночас ця стратегія допомагає отримати оптимальне положення передачі клієнта після тренування при різних швидкостях та різних відстанях між базовими станціями, що робить стратегію пригодною для широкого застосування.

1.1.3.4 Бездротові мережі як частина Інтернету речей

Високий ступінь інтеграції сучасних пристроїв у глобальну мережу Internet та можливість використання хмарних обчислень породжує феномен Інтернету

речей (англ. Internet of Things, IoT), це, зокрема стосується і бездротових мереж. Сенсори становлять базові одиниці таких мереж, їх основною задачею є збір інформації на місцях. Після цього інформація передається і обробляється потужностями хмарних або межових серверів.

У статті [11] досліджено бездротову мережу датчиків в підстанції для промислового Інтернету речей (PIoT). Була розроблена асиметрична двошарова схема бездротового покриття, яка містить в такі вузли: датчики, агрегатори і базові станції. Для оцінки цієї схеми покриття використовувався програмний засіб моделювання Winprop для створення сценаріїв підстанції та проведення передбачень поширення хвиль. Було перевірено надійність моделі симуляції, розроблена система вимірювань що надалі була використана для вимірювань поля кімнатної 110 кВ елегазової підстанції, після чого потужність, отримана в точках вимірювань, порівнюється з результатами симуляції в тих же самих місцях, що показує схожий порядок величин та тенденцію зміни. Далі були створені моделі 220 кВ зовнішньої підстанції та 110 кВ кімнатної GIS, і були налаштовані параметри матеріалів та умови вимірювань відповідно до стандартів і фактичних умов. Симуляція передбачає покриття різних вузлів на двох рівнях, включаючи: вузли надмалої потужності та вузли з низьким споживанням енергії на першому рівні; вузли агрегації даних на другому рівні. Проведено аналіз діаграм потужності та прямої видимості для вузлів обох підстанцій. Результати вказують на те, що вузли надмалої потужності мають велику "сліпу" зону. У завершення було запропоновано кілька методів планування для покращення покриття. З результатів дослідження можна побачити, що збільшення кількості вузлів агрегації, а також зменшення частоти комунікації може ефективно покращити покриття. Загалом схема двошарової бездротової мережі датчиків може забезпечити покриття визначеної області. Автор надає корисні вказівки для впровадження PIoT в підстанціях.

1.1.3.5 Доступ до спектра та управління трафіком

Через постійний ріст попиту, популяризацію бездротових мереж та постійного збільшення числа клієнтів при заданих стандартами обмеженнях

спонукає поліпшувати методи розподілення та використання опорних частот, оптимізацію протоколів та обладнання для певних видів трафіку [3].

У роботі [12] автори представили швидке та надійне рішення для вибору ширини каналу та призначення каналу в 802.11 WLAN з використанням зчеплення каналів. Запропоноване рішення може налаштувати два ключові параметри базових станцій, щоб значно покращити спільне використання радіоканалу між базовими станціями WLAN. Налаштування цих параметрів є складною задачею через велику розмірність простору стану та взаємодію між кількома факторами, пов'язаними з внутрішніми механізмами Wi-Fi та аспектами поширення радіохвиль. Для вирішення цього завдання автори сформулювали проблему як проблему вибору з множини, до якої науковці запропонували: цільову функцію, спеціально розроблену для врахування основних параметрів продуктивності у WLAN; байєсівський оптимізатор на основі вибірки Томпсона; оригінальний генератор випадкових чисел, адаптований до особливостей проблеми. Використовуючи симулятор ns-3, який реалізує повний стек мережі з усіма її рівнями, а також вдосконалені механізми Wi-Fi, такі як автоматичний вибір MCS, було проведено симуляції на кількох моделях WLAN (що відрізнялися топологією та трафіком), щоб оцінити ефективність рішення. Результати симуляцій показують, що запропоноване рішення є надійним при різних параметрах трафіку та щільності мережі. Зазвичай воно переважає стратегії, які включають вибір ширини каналу, незалежно від топології WLAN на 20 % за пропускну здатністю.

Постійно зростаюча популярність мереж WLAN призвела до появи численних і дуже різноманітних рішень для збільшення доступних швидкостей передачі даних. Серед цих рішень пропозиція [13] об'єднання каналів можливість використовувати ширші канали та збільшити швидкість передачі даних у два, чотири або вісім разів. Складною проблемою залишається питання правильного вибору каналів і їх ширини. У статті ми представляємо швидку, масштабовану та повністю граф-орієнтовану стратегію вибору ширини каналу та призначення для базових станцій WLAN на основі IEEE 802.11. Зазвичай він

перевершує стратегії, які складаються з вибору ширини каналу незалежно від топології WLAN, на 15% справедливості та 20% пропускну здатності.

У своїй роботі [14] що стосується використання мереж топології Independent Basic Service Set (IBSS), що також відомі як Ad-Нос вчені M. Golestanian, J. Siva та C. Poellabauer представляють основні методи локалізації, обговорюють, як вони реалізуються за допомогою радіочастотних пристроїв, а потім характеризують методи локалізації на основі архітектури мережі, використовуваних технологій і застосування локалізації. Також вони розв'язують задачу локалізації в приміщеннях, де відсутність глобальної системи позиціонування (англ. Global Positioning System, GPS) і наявність унікальних властивостей розповсюдження радіохвиль роблять цю проблему однією з найскладніших тем локалізації в бездротових мережах. Зокрема, вони досліджують локалізацію в приміщенні на основі радіочастотної сигналізації (англ. Radio frequency, RF), щоб проілюструвати проблеми локалізації та те, як деякі з них можна подолати.

IEEE 802.11p доповнює поширений стандарт 802.11 для використання в транспортних середовищах. Розроблений для зв'язку між бездротовими пристроями в середовищах, що швидко змінюються, він справляється з ситуаціями, коли з'єднання та зв'язок мають бути завершені за дуже короткий проміжок часу. Попри те, що це має бути суттєвим обмеженням роботи систем реального часу, затримки рідко досліджувалися в існуючих роботах. Саме таку задачу [15] собі й поставила команда вчених: Daniel Richter, Jossekin Beilharz, Lukas Pirl, Christian Werling та Andreas Polze. На основі практичних експериментів оцінено, наскільки корисними є зміни 802.11p порівняно зі звичайним 802.11n і чи підходить використання IEEE 802.11p у середовищах з обмеженнями реального часу. Порівняно затримки мереж у режимі ОСВ з обома мережами в режимі IBSS та BSS/AP, вимірюючи початкову швидкість з'єднання та час затримки пакетів ICMP у зворотному напрямку. Крім того, була виміряна реакція останнього на збурення. Результати показали, що ОСВ перевершує режими BSS/AP і IBSS за середньою затримкою, максимальною затримкою та стандартним відхиленням за всіх умов тестування.

1.2 Аналіз багатоагентних методів інтелектуальної оптимізації

1.2.1 Загальна характеристика інтелектуальних методів багатоагентної оптимізації

Багатоагентні інтелектуальні методи (англ. Swarm intelligence) – це клас методів штучного інтелекту, натхненний колективною поведінкою зграй соціальних тварин (мурахи, бджоли, вовки тощо) для досягнення спільної мети, чи поведінку часточок. [16]

Системи побудовані на базі багатоагентних методів називають багатоагентними системами. При реалізації у загальному випадку будь-яку (штучну чи природну) мультиагентну систему можна подати у вигляді трьох головних компонент: середовища, агентів та зв'язків між ними [16].

Кожен агент такої системи представляє деяке рішення і має свій стан, способи взаємодії з середовищем (вхід і вихід) і внутрішній процес. Процес самостійно, без зовнішнього керування, змінює стан агента відповідно до входу і формує вихід агента, тобто його вплив на середовище [16].

Середовище має лише стан та процес і є умовно необмеженим. Воно активне саме по собі, адже його внутрішній процес може змінювати стан середовища незалежно від того наявності чи активності агентів у ньому [16].

Багатоагентним системам властива самоорганізація [16]. Вона досягається використанням таких складових:

1. Позитивний та негативний зворотний зв'язок, які забезпечують рівновагу та активність системи у процесі її роботи.
2. Нестійкість позитивного зворотного зв'язку, яка забезпечує дослідження нових, альтернативних рішень.
3. Виконання вимоги множинної взаємодії між агентами для обміну інформацією що дозволяє створювати стійкі рішення, наближені до оптимального.

Нині існує велика кількість мультиагентних методів, серед яких можна виділити:

- Мурашиний алгоритм (англ. Ant Colony Optimization, ACO) – метод заснований на поведінці мурашок у процесі пошуку їжі. Мурахи (агенти)

випадковим чином обирають шляхи на графі в залежності від кількості феромону та довжини ребра(формують рішення). Рішення оцінюються і мурахи залишають на ребрах графа феромон відповідно до оцінки їх рішень, феромон випаровується. У новій ітерації мурахи формують новий набір покращених рішень і відкладають феромон. [16,17]

- Бджолиний алгоритм (англ. Artificial Bee Colony, ABC) – заснований на поведінці робочих бджіл бджолиної сім'ї під час збору нектару. Бджоли (агенти) можуть мати одну з трьох ролей: не зайняті, зайняті або розвідники. Розвідники випадковим чином розвідують територію (формують рішення) і рекрутують не зайнятих бджіл стати за допомогою танцю, довжина якого збільшується для кращого рішення (англ. wiggle dance). Частина незайнятих бджіл з деякою ймовірністю стає зайнятими та підтримує рішення, виконуючи танець і знов може стати не зайнятою, розвідники шукають нові рішення [16,18].
- Алгоритм натхненний поведінкою світляків (англ. Firefly Algorithm, FA) – Світляки (агенти) випадковим чином формують свою початкову позицію (рішення). Відповідно до оцінки рішення кожен світлячок випромінює світло пропорційної сили. Далі світляки рухаються до найяскравішого джерела світла і повторюють оцінку та випромінювання [19].
- Алгоритм кажанів (англ. Bat optimization) – Засновується на груповій поведінці кажанів під час полювання. Кажани (агенти) розміщуються у просторі (формують рішення). Кажан видає сигнал змінюючи його гучність, частоту та довжину хвилі в залежності від успішності рішення. Відповідно до сигналів навколо кажани формують нове рішення [20].
- Алгоритм зграї сірих вовків (англ. Gray Wolf Optimization, GWO) – засновується на поведінці зграї вовків під час полювання. Вовки (агенти) шукають та оточують ціль (формують рішення). Відбуваються процеси оточення, полювання та пошуку здобичі [21].
- Алгоритм зозуль (англ. Cuckoo Algorithm) – натхненний поведінкою зозуль під час розмноження. Зозулі (агенти) відкладають яйця у гнізда (формують

рішення). Найкращі рішення більшу ймовірність виживання. На базі рішень що вижили формуються рішення у новій ітерації [22].

- Алгоритм руху бактерій (англ. Bacterial foraging optimization) – заснований на життєвому циклі бактерії E. coli. Бактерії (агенти) формують рішення на етапі хемотаксису випадковим чином (англ. chemotaxis). Кожна бактерія ділиться рішеннями з іншими, відбувається відбір найкращих рішень, репродукція. Цикл повторюється [23].

Розглянемо два найпопулярніші з представлених вище алгоритмів докладніше: бджолиний та мурашиний.

1.2.2 Бджолиний метод

Як і було вказано раніше бджолиний алгоритм спирається на поведінку бджіл під час пошуку джерел їжі. Алгоритм був запропонований Karaboga D. На рисунку 1.4 [2] представлено природний аналог бджолиного алгоритму.

Ціллю бджіл є пошук найбільш насиченої нектаром ділянки квітів на найменшому віддаленні від вулика, у радіусі польоту. На початковій стадії з усіх робочих бджіл обирається кілька бджіл-розвідників. Вони досліджують середовище навколо вулика у пошуках квітів.

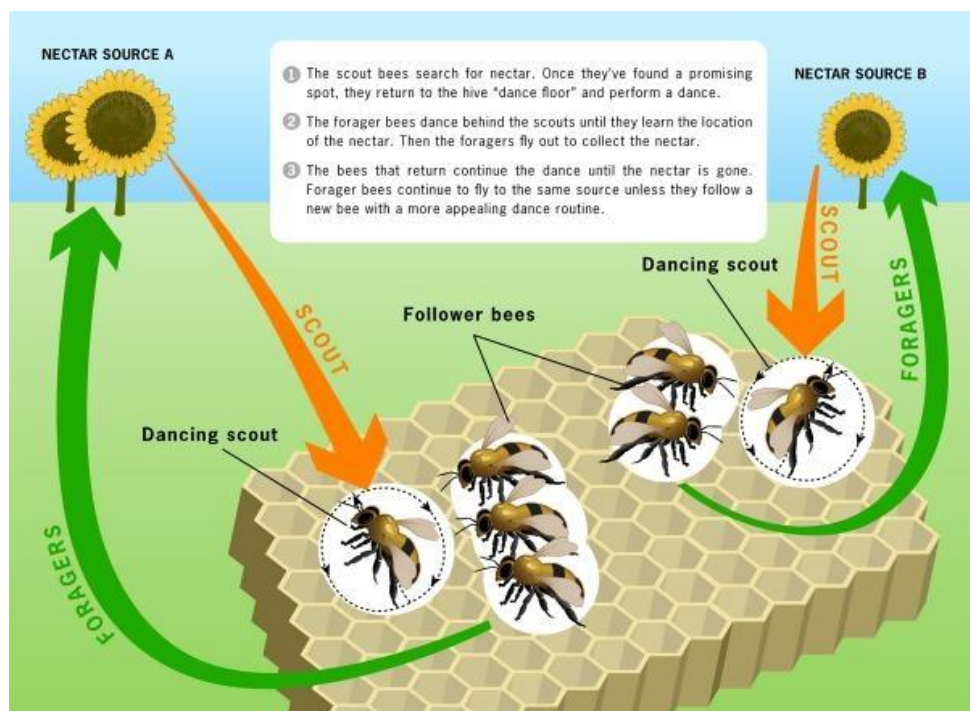


Рисунок 1.4 – Природний аналог бджолиного алгоритму [2].

Повернувшись назад розвідники відкладають знайдений нектар та обмінюються інформацією з робочими бджолами за допомогою так званого “танцю” (англ. wiggle dance) на спеціально відведеному майданчику. Час прямо пропорційно танцю залежить від насиченості ділянки нектаром. Вільні бджоли, що бачать танець розвідника, стають зайнятими та долучаються до збору нектару зі знайденої ділянки. Зайняті бджоли також можуть виконувати танець, долучаючи більше вільних бджіл до збору з обраної ділянки або повернутися до вільного стану у вулику. Поки ділянка виснажується потік бджіл до неї припиняється через те що танець з часом стає все коротшим. Процес продовжується безперервно, бджоли накопичують нектар у вулику та розвідують навколишню територію [2, 16,24-26].

У проведеному дослідженні [24] було порівняно ефективність використання алгоритму штучної бджолиної колонії (англ. Artificial bee colony, ABC) та методології поверхні реакції (англ. Response surface methodology, RSM) на прикладі оптимізації параметрів процесу екстракції ароматичних речовин шафрану за допомогою ультразвуку. Авторами дослідження зазначено що потужність обох методів для обраної задачі можна вважати приблизно однаковою за знайдених оптимальних параметрів (для RSM: концентрація етанолу у розчині 58.58%, час екстрагування 6.85 хвилин, коефіцієнт заповнення (англ. duty cycle) 0.82, амплітуда ультразвуку 91.11%; для ABC становить 53.07%, 7.32 хвилин, 0.93 та 100% відповідно).

Проблема оновлення покриття тротуарів розглянута у статті [25] є складною через потребу враховувати велику кількість економічних факторів, силу пошкодження тротуару тощо. Для оптимізації параметрів частоти оновлення покриття вибрано алгоритм ABC у його багатокolonіальній модифікації. За результатами роботи алгоритму вдалося знизити витрати за найсильнішого зносу покриття до 15% порівняно до попередньо застосованих детерміністських методів та моделей, надають гнучкість розрахунку параметрів процесу оновлення для різних значень вхідних змінних.

Проблема короткострокового гідротермального планування це проблема оптимізації кількості палива при мінімізації його вартості для підтримання ефективної роботи гідроелектростанцій. Вона є життєво важливою проблемою для економіки у гідроенергетиці. Проведені дослідження [26] для резервуарів різної розмірності з використанням ABC дали результати з найменшими витратами .

Виходячи з різних застосувань методу бджолоїної колонії можна виділити такі його переваги [2,16]:

- стохастична (випадкова) природа вибору, внаслідок чого знижується можливість зациклення в локальному оптимумі;
- мультиагентність реалізації;
- пошук кращого рішення ґрунтується на рішеннях агентів всієї колонії бджіл; – може використовуватися в динамічних застосуваннях, оскільки здатен адаптуватися до змін навколишнього середовища;
- може використовуватися як дискретних, так і безперервної оптимізації.

До недоліків методу бджолоїної колонії можна віднести [2,16]:

- труднощі теоретичного аналізу процесу одержання рішень, обумовлені тим, що пошук рішення має стохастичну природу;
- невизначеність часу збіжності, хоча збіжність гарантується;
- залежність методу від вірного налаштування параметрів, які слід підбирати експериментально.

Загалом бджолиний алгоритм є популярним методом багатоагентної інтелектуальної оптимізації у різних технологічних галузях, зокрема для задач знаходження екстремумів складних багатовимірних функцій. Він пропонує меншу кількість параметрів в алгоритмі і порівняно високу швидкість роботи. Алгоритм вже було реалізовано засобами мов програмування (Java, C, Python and other) [2] та середі математичного моделювання Matlab.

1.2.3 Мурашиний метод

Мурашиний метод бере за основу поведінку колонії мурах у пошуках їжі, розглянемо її докладно. У природі мураха вільно блукає середовищем поки не знайде їжу. На зворотному шляху до мурашника він зрошує свій шлях

феромоном. Мурахи які натикаються на феромонний слід перестають вільно мандрувати та прямують до джерела їжі, обираючи найбільш насичений феромоном шлях (рисунок 1.5) [27]. З часом феромон випаровується і приваблює все менше мурах, якщо його не поновлювати. Чим коротший шлях до джерела їжі, тим швидше мураха по ньому пройде і тим швидше повернеться, зрошуючи його феромоном.

Одним з перших мурашиних методів був AS (англ. Ant System), запропонований Marco Dorigo [28] для розв'язання задачі комівояжера на графі. Кожне ребро графа має дві ознаки на які орієнтується агент: довжину (незмінна) та кількість феромону (змінна). Оптимальна мінімальна кількість мурах визначена Доріго як кількість вершин графа. Кожен мураха починає свій рух на своїй вершині графа і робить рішення з більшою ймовірністю вибору більш насиченого феромоном ребра. Коли усі мурахи ітерації сформують свої рішення вони порівнюються між собою та з найкращим рішенням. Якщо знайдено нове найкраще рішення, то воно замінює попереднє. Відбувається глобальне оновлення (відкладання та випаровування) феромону для всіх обраних шляхів, чим коротший шлях, тим більшу кількість феромону буде відкладено. Ітерації повторюються поки не буде досягнуто умов зупинки. Результатом роботи алгоритму є найкраще знайдене рішення.

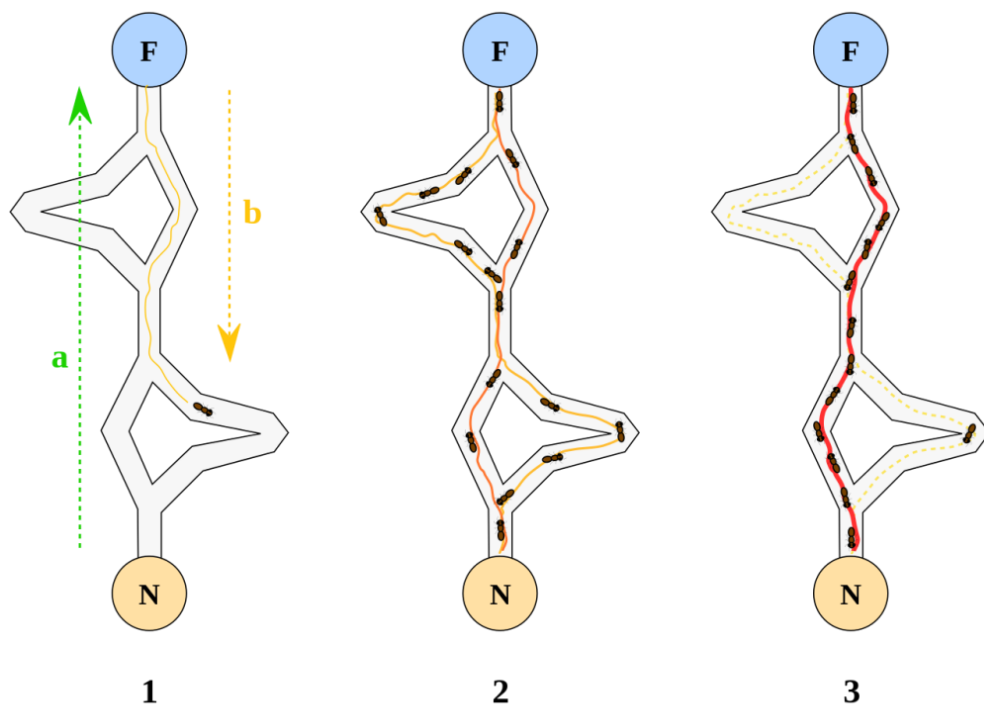


Рисунок 1.5 – Ілюстрація поведінки мурашок з колонії (N) під час пошуку шляху до джерела їжі (F) [27]

З часом він набув розвитку у вигляді багатьох модифікацій [16,29-31], запропонованих самим Dorigo M. та Gambardella M. L. та іншими вченими:

- Elitist Ant System (EliteAS) – феромон відкладається додатково для деякої кількості найкращих рішень за час роботи алгоритму, навіть якщо вони не були відвідані.
- Ant Colony System, (ACS) – На своєму шляху мурахи застосовують локальне правило оновлення феромону. Феромон глобально відкладають не усі мурахи в ітерації, а лише мураха який отримав найкраще рішення за всю історію роботи алгоритму.
- Max-Min Ant System (MMAS) – верхня та нижня границя феромону для цієї модифікації обмежена, що захищає алгоритм від стагнації. Коли феромон на ребрі виявляється нижче чи вище деякого значення він натомість встановлюється у початкове значення.
- Rank-Based Ant System (RankAS) – рішення ранжуються за довжиною всередині кожної ітерації. Тільки мурахи що знайшли деяке число найкращих рішень ітерації можуть відкласти феромон.
- Інші модифікації.

Мурашині алгоритми широко використовують для розв'язання різноманітних задач оптимізації, легко піддаються модифікації під специфічні умови задачі. Загалом мурашиний метод є класичним методом для розв'язання задач на графі або задач що можна звести до таких, наприклад: задачі маршрутизації, оптимізація покриття, задача комівояжера тощо.

Для задачі оптимізації шляху робота-зварювальника [29] пропонує модифікацію Ant Colony Optimization за допомогою додавання індексу Монте-Карло на додачу до феромону (Monte Carlo-based improve ant colony optimization, MC-IACO). Індекс показує як часто певне ребро графа обирається як частина оптимального шляху мурахи та впливає на ймовірність вибору мурахою відповідного ребра. Як і очікувалося – додатковий механізм позитивного зворотного зв'язку підвищує збіжність алгоритму (зменшує кількість ітерацій

потрібних для досягнення субоптимального результату). Метод реалізовано засобами мови Python. Використано такі параметри мурашиного алгоритму: кількість ітерацій – 100, кількість мурашок – 30, жадібність мурах – 0,8, ліність – 2, початкова кількість феромону – 8. Специфічні для MC-IACO: початкове значення індексу Монте-Карло – 0; швидкість зміни індексу – 0,1. За рівних умов у порівнянні з класичним ACS за меншу більш ніж в 4 рази кількість ітерацій MC-IACO збігається до субоптимального шляху рівної довжини (з різницею у менш ніж 1%). Час збіжності для ACS та MC-IACO становить 5,2852 с та 1,3390 с відповідно. Автор зазначає що запропоноване рішення нове і потребуватиме додаткових досліджень впливу параметрів алгоритму на ефективність його застосування для різних задач. Для спрощення було опущено специфічні для процесу зварювання затримки у роботі, а алгоритм не передбачає динамічного додавання задач для зварювання.

Процес створення високоякісного маркованого набору даних (англ. labeled data) має вирішальне значення для тренування моделей у машинному навчанні. У дослідженні [30] пропонують використовувати комбінований метод маркування семантичних ролей (англ. Semantic Role Labeling, SRL) у поєднанні з АСО для створення додаткових тренувальних даних на основі наявних наборів даних (англ. dataset) для моделей обробки природної мови (англ. Natural language processing, NLP). АСО використовується для додаткової генерації семантично схожих на класифіковані дані. Для дослідження використано такі параметри мурашиного алгоритму: кількість ітерацій – 50, кількість мурашок – 10, жадібність мурах – 1, ліність – 1, початкова кількість феромону – 8, випаровування феромону – 0,1. Запропонований алгоритм показав свою ефективність, перевершуючи інші новітні алгоритми, запропоновані для розв'язання цієї задачі (рисунок 1.6) [30]. Крім того використання цього алгоритму може допомогти суттєво збільшити тренувальні дані за потреби аж до 3 разів.

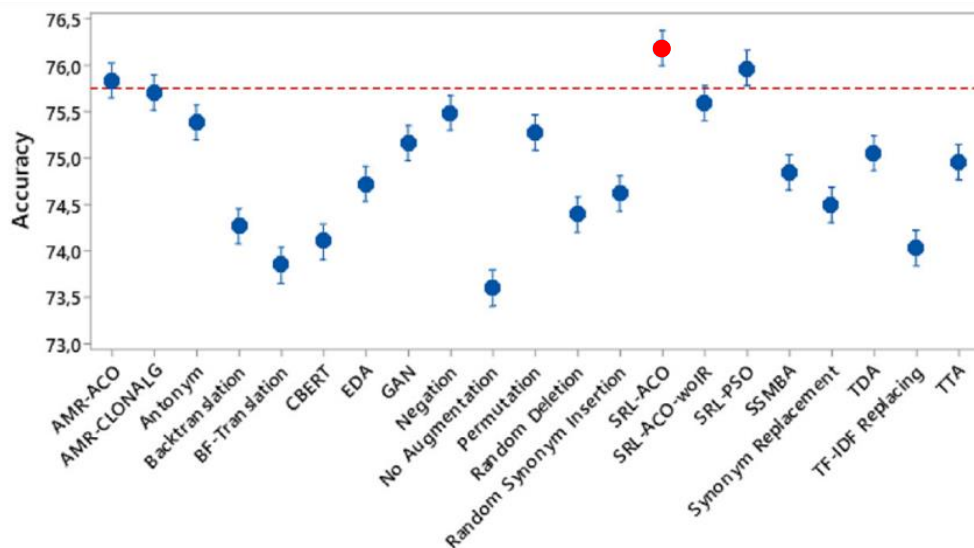


Рисунок 1.6 – Графік порівняльної точності, показник SRL-ACO позначено червоним. [30]

Відновлення транспортної комунікації після стихійного лиха є важливою задачею для функціонування та своєчасного надання допомоги постраждалим. Саме для вирішення цієї задачі [31] запропоновано використовувати АСО. Головним викликом у своїй роботі науковці ставлять знаходження оптимального шляху кожної ремонтної бригади для найшвидшого поєднання роз'єднаних кластерів та вузлів транспортної мережі, що можна звести до пр-стійкої задачі на графі. Обрана модифікація алгоритму MMAS, яка обмежує верхнє та нижнє значення феромону впродовж роботи усього алгоритму. Для дослідження використано різні значення параметри мурашиного алгоритму, проте специфічне для модифікації обмеження значення феромону трималося між 0 та 1 в усіх запропонованих дослідах. За результатами досліджень було визначено що спершу достатньо відновити від 19 до 25 з 46 порушених доріг у першу фазу ремонту аби відновити функціонування транспортної мережі.

До переваг методу мурашиних колоній можна віднести [16]:

- можливість використання методу в динамічних додатках (адаптується до змін навколишнього середовища);
- використання пам'яті всієї колонії, що досягається шляхом моделювання виділення феромонів;
- гарантування збіжності до субоптимального рішення;

- метод є стохастичним тож не є схильним до зациклення на локальних оптимумах; ;

- висока швидкість знаходження субоптимального рішення;

- більша кількість параметрів ніж у ABC, що дозволяє більш гнучке налаштування під реалії конкретної задачі;

Можна виділити такі недоліки методу мурашиних колоній:

- складність теоретичного аналізу, оскільки підсумкове рішення формується в результаті послідовності випадкових рішень;

- дослідження є більш експериментальними, ніж теоретичними;

- як і для ABC існує невизначеність часу збіжності при тому, що збіжність гарантується;

- сильна залежність результатів роботи методу від численних початкових параметрів алгоритму, які підбираються експериментально.

Варто також відзначити, що ефективність методу є більшою у випадках, коли задача характеризується великою розмірністю [16,31], оскільки традиційні методи зазвичай дають гарні результати, якщо розмірність є малою, а от у випадках з великою розмірністю вони можуть або зациклюватися в локальних оптимумах, або занадто довго працювати, що є небажаним. Реалізацію мурашиного алгоритму виконано багатьма мовами програмування (C++, Python, JavaScript) та засобами математичного моделювання [Салогуб].

1.3 Приклад планування WLAN для сортувальних станцій з використанням бджолиного алгоритму

Об'єктом планування бездротових мереж у [2] обрано сортувальну станцію (СС), розглянуто перелік напольного обладнання, основні функціональні зони сортувальної станції. Для неї поставлено наступну задачу. Нехай L буде загальною кількістю клієнтів, які будуть підключені до бездротової базової станції на сортувальній станції. Відомі M – можливі місця, де можна встановити базові станції WLAN. Крім того, всі клієнти повинні бути підключені до базових станцій.

Введемо означення $BS_i(r)^k$ – i -та базова станція бездротової мережі з радіусом покриття r , до якої підключено k клієнтів, де $i \in [1; M]$; $k \in [1; L]$. Якщо $BS_i(r)^k = 1$, то i -та базова станція з k -клієнтами підключена до WLAN, в іншому випадку $BS_i(r)^k = 0$ [2].

В якості цільової розглянемо таку [2] функцію:

$$F = \sum_{i=1}^M BS_i(r)^k \rightarrow \min, \quad (1.1)$$

крім того, необхідно дотримуватися [2] обмежень:

$$r \leq r_{max}, k \leq k_{max}, \quad (1.2)$$

Де r_{max} – максимальний радіус покриття базової станції WLAN;

k_{max} – максимальна кількість клієнтів, підключених до базової станції WLAN.

Після огляду наукових джерел запропоновані наступні рішення щодо планування мережі. На сортувальній станції доцільно застосувати топологію ESS, оскільки можна використовувати декілька базових станцій, що взаємодіють одна з одною. Крім того, на сортувальній станції існують дротові мережі, з якими необхідно здійснювати обмін інформацією. Доцільне використання методології розгортання WLAN, що орієнтовані на максимальну пропускну здатність, бездротові LAN повинні забезпечувати максимальну продуктивність і швидкість передачі пакетів для кожного клієнта. Як метод оптимізації та планування обрано ABC. Реалізацію методу виконано засобами мови програмування Python3 [2].

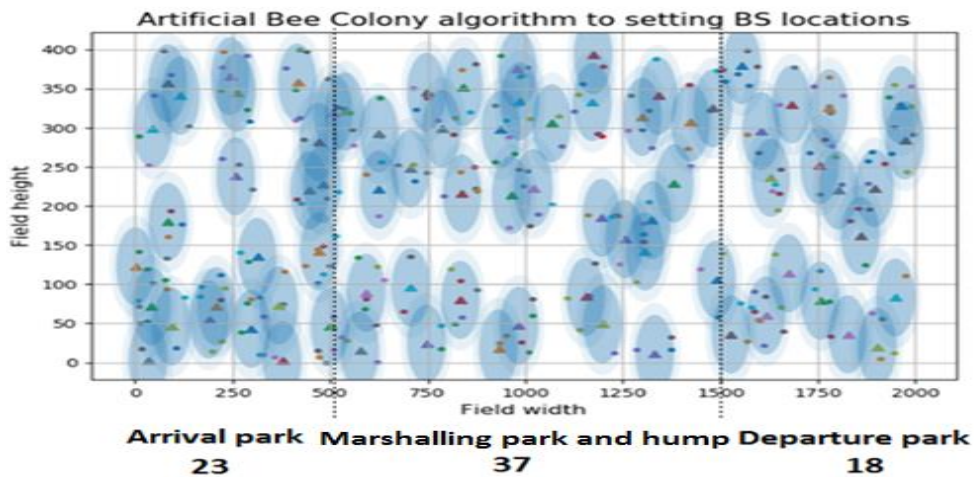


Рисунок 1.8 – Приклад розташування базових станцій на сортувальній станції малої потужності [2]

Було визначено кількість базових станцій на сортувальній станції малої потужності. Вхідні параметри: кількість бджіл (`bees_count`) = 10; максимальна кількість спроб знайти оптимальне рішення (`max_retries_count`) = 10; кількість клієнтів (`clients_count`) = 250; максимальна кількість клієнтів, яку охоплює одна базова станція WLAN (`bs_max_clients_count`) = 12; радіус покриття (`bs_area_radius`) = 50; ширина поля (`field_width`) = 2 000; висота поля (`field_height`) = 400. Результати роботи моделі наведено на рисунку 1.8 (а). Отже, рекомендована кількість базових станцій для сортувальної станції малої потужності складає 78, із них 23 знаходяться в парку прибуття, 37 – у сортувальному парку та гірці, 18 – в парку відправлення (рисунок 1.8) [2].

Для сортувальної станції середньої потужності зроблено. Вхідні параметри: кількість клієнтів (`clients_count`) = 300; ширина поля (`field_width`) = 2 500; висота поля (`field_height`) = 500, інші як у першому досліді. Рекомендована кількість базових станцій для сортувальної станції середньої потужності складає 93, із них 16 знаходяться в парку прибуття, 59 – у сортувальному парку та гірці, 18 – у парку відправлення (рисунок 1.9) [2].

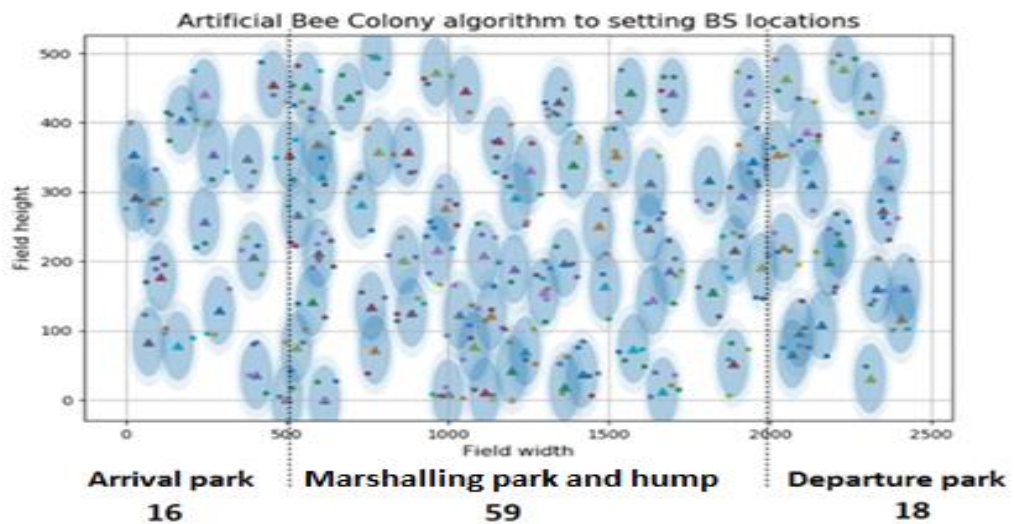


Рисунок 1.9 – Приклад розташування базових станцій на сортувальній станції середньої потужності [2]

Вхідні параметри для СС великої потужності: кількість клієнтів (clients_count) = 350; максимальна кількість клієнтів, яку охоплює одна базова станція WLAN(bs_max_clients_count) = 12; ширина поля (field_width) = 3 000; висота поля (field_height) = 600. Рекомендована кількість базових станцій для сортувальної станції великої потужності складає 131, із них 19 знаходяться в парку прибуття, 92–у сортувальному парку та гірці, 20 – у парку відправлення (рисунок 1.10) [2].

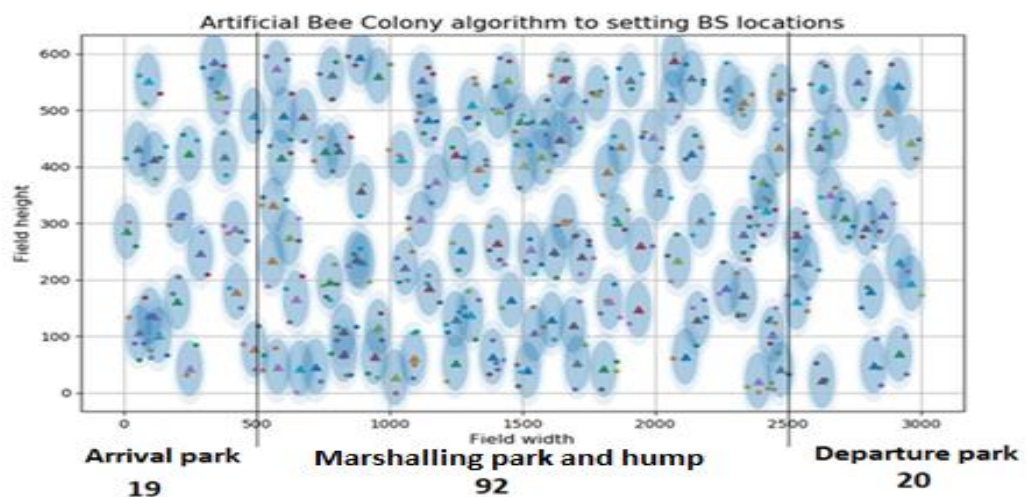


Рисунок 1.10 – Приклад розташування базових станцій на сортувальній станції малої потужності [2]

Також було проведено дослідження параметрів алгоритму. Якість отриманих рішень значною мірою залежить від вибору параметрів алгоритму. Крім того, від цього вибору залежить швидкість роботи алгоритму. Тому проведено дослідження з метою виявлення залежностей результатів оптимізації (кількості базових станцій бездротової мережі) та часу пошуку оптимального рішення за різною кількістю бджіл і спроб для сортувальних станцій (СС) різної потужності. Дослідження показали, що збільшення кількості бджіл (із 10 до 50) та кількості спроб знаходження оптимального рішення однією бджолою (із 10 до 50) призводить до зменшення числа базових станцій WLAN у середньому на 6,5 та 9,3 % відповідно. [2].

Збільшення кількості бджіл (із 10 до 50) призводить до зменшення часу пошуку оптимального рішення бджолами в середньому в 1,8 раза (рисунок 10), у той час, як збільшення кількості спроб знаходження оптимального рішення для однієї бджоли (із 10 до 50) призведе до зростання часу пошуку оптимального рішення в середньому у 2,14 раза [2].

Також було проведено дослідження радіуса покриття базових станцій WLAN проведено для сортувальної станції великої потужності. З отриманих результатів видно, що збільшення у два рази радіуса покриття базової станції (із 50 до 100 м) призводить до зменшення кількості базових станцій приблизно у два рази (зі 136 до 64), при цьому час пошуку рішення бджолами збільшується у 2,5 рази (із 8,4 до 20,6 с). Дослідження проведено за таких параметрів: кількість клієнтів (`clients_count`) = 350; ширина поля (`field_width`) = 3000; висота поля (`field_height`) = 600, інші як у першому дослідженні [2].

1.4 Основні висновки

1. Огляд наукових робіт та стандартів бездротових мереж показав, що на сучасному етапі дослідження ведуться у наступних напрямках: безпека бездротових мереж, планування бездротових мереж, гетерогенні бездротові мережі, бездротові мережі як частина IoT, оптимізація доступу до несучих частот та управління трафіком.

2. Проведено аналіз існуючих багатоагентних методів інтелектуальної оптимізації та їх модифікацій, зокрема: мурашиного методу, бджолиного методу,

методу світляків, методу кажанів, методу зозулі, методу руху бактерій. Докладно розглянуто приклади використання бджолиного і мурашиного методів для розв'язання різноманітних проблем, їх модифікацій, переваг та недоліків.

3. Задачу планування бездротової мережі можна звести до задачі на графі, тож для подальшого виконання кваліфікаційної роботи і планування бездротових локальних мереж сортувальних станцій різної потужності обрано елітну стратегію мурашиного алгоритму (EliteAS), адже вона дає порівняно вищу збіжність за інші модифікації. Загалом мурашиний метод має більшу, у порівнянні з бджолиним методом, кількість параметрів самого алгоритму. Це надає можливість точного налаштування під конкретні умови задачі, проте знаходження оптимального значення параметрів є експериментальною задачею, яку буде вирішено у третьому розділі цієї роботи.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Постановка задачі

Згідно з пунктом 10 загального положення про залізничну станцію [33] станції залізничного транспорту класифікуються за призначенням: пасажирські, вантажні, сортувальні, дільничні, проміжні (у т.ч. роз'їзди та обгінні пункти). На сортувальних станціях виконуються процеси розформування-формування, сортування та технічного обслуговування вагонів. Існують сортувальні станції з гіркою та плоскі сортувальні станції, на яких вагони перетягують лише за допомогою локомотиву. У подальшій роботі при згадці сортувальних станцій мова йтиме про станції з сортувальною гіркою.

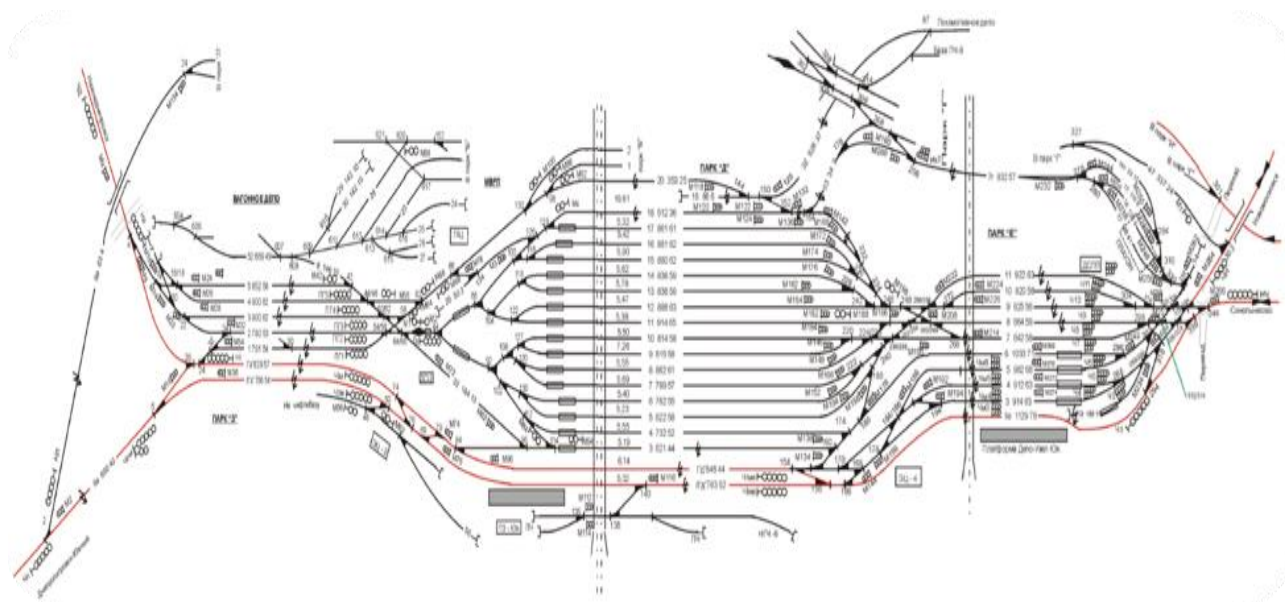


Рисунок 2.1 – План сортувальної станції [2]

До складу сортувальної станції (рисунок 2.1) [2] входять: парк прибуття, сортувальна гірка, сортувальний парк, парк відправлення. Найважливішою структурною частиною сортувальної станції є сортувальна гірка, потужність котрої залежить від кількості сортувальних пучків (Таблиця 2.1) [2,34,35].

На сортувальній станції присутні наступні технологічні зони: стрілкова, вимірювання швидкості та прискорення відчепів в області 1–2ГП (гальмівна позиція) та 3–4ГП, вимірювання параметрів відчепа, контролю розщеплення, вимірювання маси відчепа та інші (рисунок 2.1-2.2) [2,36]

Таблиця 2.1 - Класифікація сортувальних гірок

Властивість	Потужність сортувальної гірки			
	Підвищена	Велика	Середня	Мала
Добова переробка вагонів/добу	6500-10000	5000-6500	2000-5000	250-1500
Кількість пучків	6-8	4-6	3-4	1-3
Кількість колій сортувального парку	>40	30-40	17-29	4-16
Кількість гальмівних позицій	3	3	2-3	1-3
Висота гірки, м	≤ 5	$\leq 4,5$	$\leq 3,5$	≤ 3
Кількість гірок на території України	1	11	13	>13
Приклад гірок	Куп'янськ - сортувальний	Червоний Лиман, Ясинувата	Одеса, Дарниця, Джанкой, Волноваха	Червоноармійськ, Лозова

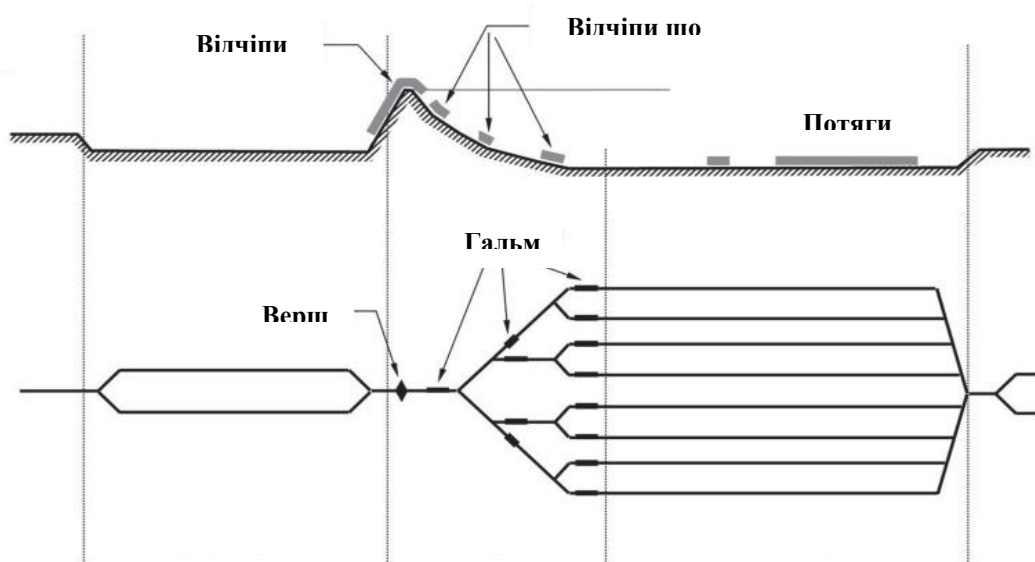


Рисунок 2.2 – План та профіль сортувальної гірки. [36]

В залежності від ступеня автоматизації сортувальної станції на її технологічних ділянках може бути встановлено наступне автоматизоване обладнання [1,34,37]:

- Стрілочні переведення (Р-50, Р-65 та ін.) - розташовуються при вході в парки прибуття, відправлення, та на схилі сортувальної гірки.
- Вагонні сповільнювачі або прискорювачі-сповільнювачі (вагові (КВ-3), натискні (Т-50, КНП-5, ВЗПГ, НК-114, РНЗ-2, УВСК тощо). Перші сповільнювачі встановлюють перед першою позицією стрілки, останні – на виході з пучків (на вході до колій сортувального парку).
- Вагоміри (MULTIRAIL LegalWeight, MULTIRAIL MultiBridge та ін.) – розташовуються після горбу гірки, перед першим сповільнювачем.
- Швидкостеміри (РИС-В2, РИС-В3М тощо) – розташовуються безпосередньо перед та по усій довжині гальмівних позицій з певним інтервалом.
- Сенсори підрахунку кількості осей (натискні, на базі оптичних сенсорів, рейкових кіл чи комбіновані.)
- Пристрої контролю заповнення колій – зазвичай представлені рейковими колами що розташовані кожні 25 метрів або системами або колійними імпульсними датчиками що охоплюють до 260 м.
- Вагоноосаджувачі можуть бути встановлені у сортувальному парку для механічного підтягування вагонів що зупинилися.
- Сигналізація (світлофори, табло тощо) розташовуються на при в'їзді та виїзді зі станції зі станції, щонайменше за 50 м перед стрілковими переведеннями.

Через закритість інформації про фактичні креслення та стан сортувальних станцій планування WLAN буде проводитися для гіпотетичних сортувальних станцій різної потужності (див. таблицю 2.1). Розташування парків цих станцій – послідовне. Сортування проходитиме в одному напрямі. Кількість колій одного сортувального пучка – 8. Розташування пучків – симетричне. Кількість гальмівних позицій – 3. За пристрої клієнти приймемо: обладнання переведення

стрілок, уповільнювачі, швидкостеміри, вагоміри. Вихідні дані: потужність сортувальної станції, координати пристроїв-клієнтів.

Нехай L буде загальною кількістю клієнтів, які будуть підключені до бездротової базової станції на сортувальній станції. Відомі M – можливі місця, де можна встановити базові станції WLAN. Крім того, всі клієнти повинні бути підключені до базових станцій.

Введемо означення $BS_i(r, k)$ – i -та базова станція бездротової мережі з радіусом покриття r , до якої підключено k клієнтів, де $i \in [1; M], k \in [1; L]$. Якщо $BS_i(r, k) = 1$, то i -та базова станція з k -клієнтами підключена до WLAN, в іншому випадку $BS_i(r, k) = 0$ [2].

В якості цільової розглянемо таку [2] функцію:

$$F = \sum_{i=1}^M BS_i(r, k) \rightarrow \min, \quad (2.1)$$

крім того, необхідно дотримуватися [2] обмежень:

$$r \leq r_{max}, k \leq k_{max}, \quad (2.2)$$

Де r_{max} – максимальний радіус покриття базової станції WLAN;

k_{max} – максимальна кількість клієнтів, підключених до базової станції WLAN.

2.2 Мурашиний метод як основний метод розв'язування задачі

Розглянемо суть елітної стратегії модифікованої для оптимізації кількості базових станції на сортувальних станціях.

Нехай маємо деякий граф $G(V, E)$, де V – множина вершин графу, а E – множина ребер графу. Також для кожної точки v_i визначається множина сусідів наступним чином:

$$Neigh(v_i) = \{n_{i,1}, n_{i,2} \dots n_{i,m}\}, \forall n \in V, v_i \in Neig(v_i)$$

$$len(v_i, n_{i,j}) \leq len(v_i, n_{i,j+1}) \leq r_{max}$$

На початку роботи алгоритму кожне ребро зрошується початковою кількістю феромону f_0 . Після цього перший агент ($K=1$), мураха, поміщається на одну з вершин графу і випадковим чином обирає наступну вершину. Ймовірність такого вибору залежить від параметрів алгоритму та довжини і кількості феромону на ребрі що веде до вершини. У загальному випадку для k -го мурашки

що знаходиться на вершині $i \in V(G)$ ймовірність переходу $P_{i,j}$ до вершини $j \in V(G)$ можна знайти за наступними формулами [13,30-32]:

$$P_{i,j,k} = \frac{f_{i,j}^\alpha l_{i,j}^\beta}{\sum_{n \in Taboo_K} (f_{i,n}^\alpha l_{i,n}^\beta)}, \text{ якщо } j \notin Taboo_K \quad (2.3)$$

$$P_{i,j,k} = 0, \text{ якщо } j \in Taboo_K \quad (2.4)$$

де $f_{i,j}$ – кількість феромону на ребрі між вершинами i та j ;

α – коефіцієнт жадібності алгоритму до феромону;

$l_{i,j}$ – величина зворотна довжині ребра між вершинами i та j ;

β – коефіцієнт ліності алгоритму (сприйнятливості до величини l);

Обрана вершина додається до пройденого шляху агенту W . До списку $Taboo_K$ додається $m \leq client_{max}$ елементів $Neigh(v_i), n \notin Taboo_K$ для запобігання повторного відвідування вже покритих клієнтів. m Агент завершує свою подорож коли $Taboo_K = V(G)$.

Після цього виконується оновлення феромону, яке можна розділити на випаровування феромону та зрошення пройдених шляхів феромоном. На цьому етапі алгоритму т.зв. елітні мурахи, які додатково зрошують найкращий знайдений шлях.

В загальній формі правило оновлення феромону на ребрі між точками i та j на ітерації $t + 1$ $f_{i,j}$ для елітної стратегії буде подано у вигляді формул [13,30-32]:

$$f_{i,j}(t + 1) = (1 - \rho) f_{i,j}(t) + \sum \Delta f_{i,j}^k + \Delta f_{i,j}^*, \quad (2.5)$$

де ρ – параметр випаровування від 0 до 1;

$f_{i,j}(t)$ – кількість феромону на ребрі між вершинами i та j на ітерації t ;

$\sum \Delta f_{i,j}^k$ – додатковий феромону мурах що обрали ребро між вершинами i та j як частину свого шляху. Метод розрахунку поданий у формулах 2.6-2.7;

$\Delta f_{i,j}^*$, – додатковий феромон елітних мурах. Метод розрахунку поданий у формулі (2.4);

$$\Delta f_{i,j}^k = \frac{Q}{L(W)_k}, \text{ якщо } (i,j) \text{ був у шляху } k \text{ – го мурахи} \quad (2.6)$$

$$\Delta f_{i,j}^k = 0, \text{ якщо } (i,j) \text{ не був у шляху } k \text{ – го мурахи} \quad (2.7)$$

де Q – константа, параметр оновлення феромону;

L_k – кількість точок шляху k -го мурахи;

$$\Delta f_{i,j}^* = \left\{ \frac{eQ}{L(BEST)_k}, \text{ якщо } (i,j) \text{ належить до найкращого шляху} \right. \quad (2.8)$$

$$\Delta f_{i,j}^* = 0, \text{ якщо } (i,j) \text{ не належить до найкращого шляху} \quad (2.9)$$

де e – кількість елітних мурах;

$L(BEST)_k$ – кількість базових станцій найкращого глобального рішення.

Після закінчення оновлення феромону процес повторюється поки не буде досягнуто умови завершення, наприклад досягнення певної кількості ітерацій.

2.3 Загальна характеристика створеної програми «MarshYard_Ant»

2.3.1 Призначення, вхідні дані, формат результатів та обмеження

Засобами мови JavaScript створено програму для визначення оптимальних параметрів WLAN сортувальних станцій «MarshYard_Ant» для заданої користувачем множини клієнтів.

Вихідні дані що подаються на вхід програми поділено на 3 групи:

1. «Параметри об'єкта планування»: потужність сортувальної станції, координати пристроїв-клієнтів.
2. «Параметри бездротової мережі»: максимальна кількість клієнтів базової станції, максимальний радіус покриття базової станції.
3. «Параметри мурашиного алгоритму»: жадібність, ліність, зрошення, випаровування, кількість мурах (агентів), кількість елітних мурах, кількість ітерацій алгоритму.

Результати роботи програми «MarshYard_Ant» представлено користувачеві у наступному форматі:

1. Візуальне представлення розміщення базових станцій, їх зони покриття.
2. Загальна найкраща знайдена кількість базових станцій, кількість клієнтів та базових станцій окремо для кожного парку сортувальної станції.

3. Загальний час роботи сеансу мурашиного алгоритму за заданих параметрів у мілісекундах.

4. Найкращі рішення окремо для кожної ітерації алгоритму.

Створена програма працює за наступних обмежень:

1. Обчислення ведуться для пласкої поверхні без урахування висот.

2. Обмежений простір відтворення та вводу координат для сортувальних станцій різної потужності: мала (500 м на 2100 м), середня (600 м на 2600 м), велика (700 м на 3100 м) та підвищена (800 м на 3600 м).

3. Об'єкт планування – сортувальної станція однонапрямна з послідовним розташуванням парків. Парк прибуття у ліві частині, парк відправлення у правій. територіями парків вважаються перші та останні 500 м довжини станції, простір між ними – територія сортувальної гірки та сортувального парку.

4. Фіксована кількість сортувальних пучків що автоматично генеруються програмою: 1 пучок для гірки малої потужності, 3 пучки для гірки середньої потужності, 4 пучки для гірки високої потужності та 8 пучків для гірки підвищеної потужності. Усі сортувальні пучки складаються з 8 колій.

5. Структура автоматично згенерованого розташування клієнтів фіксована та залежить від заданої потужності гірки та простору. Автоматично розміщується тільки наступне обладнання: уповільнювачі, швидкостеміри, вагоміри, обладнання переведення стрілок.

6. Для коректної роботи створеної програми необхідний новітній веб браузер (н.п. Google Chrome, Opera, Microsoft Edge, Firefox тощо).

2.3.2 Структура створеної програми та її опис

За основу для розробки «MarshYard_Ant» взято раніше створену автором програму «WLAN_EliteAS» [32] з введенням ряду модифікацій, серед яких можна виділити:

1. Відмову від зовнішньої бібліотеки chance.js, заміна на функцію weighted створену власноруч.

2. Створення функцій для автоматичної генерації розташування клієнтів на гіпотетичних сортувальних станціях різної потужності зі збереженням можливості вводу координат додаткових клієнтів вручну;
3. Модифікація серії функцій введення та виведення;
4. Введення нових параметрів програми (потужність станції), оптимізація та впорядкування параметрів;
5. Створення функцій для автоматичної генерації координат клієнтів бездротової мережі в залежності від обраної потужності сортувальної станції;

Загальна структура створеної програми «MarshYard_Ant» представлена на рисунку 2.3.

Короткий опис функцій що залишилися без змін:

- main – головна функція програми, що запускає мурашиний алгоритм та виводить результати роботи;
- EliteAS – функція що реалізує задану кількість ітерацій мурашиного алгоритму;
- Colony – функція однієї ітерації мурашиного алгоритму що реалізує ітерації виклику агентів, функцій оновлення феромону;
- addPheromone, eliteAddPheromone, evaporate – функції організації правил оновлення феромону з формули 2.5;

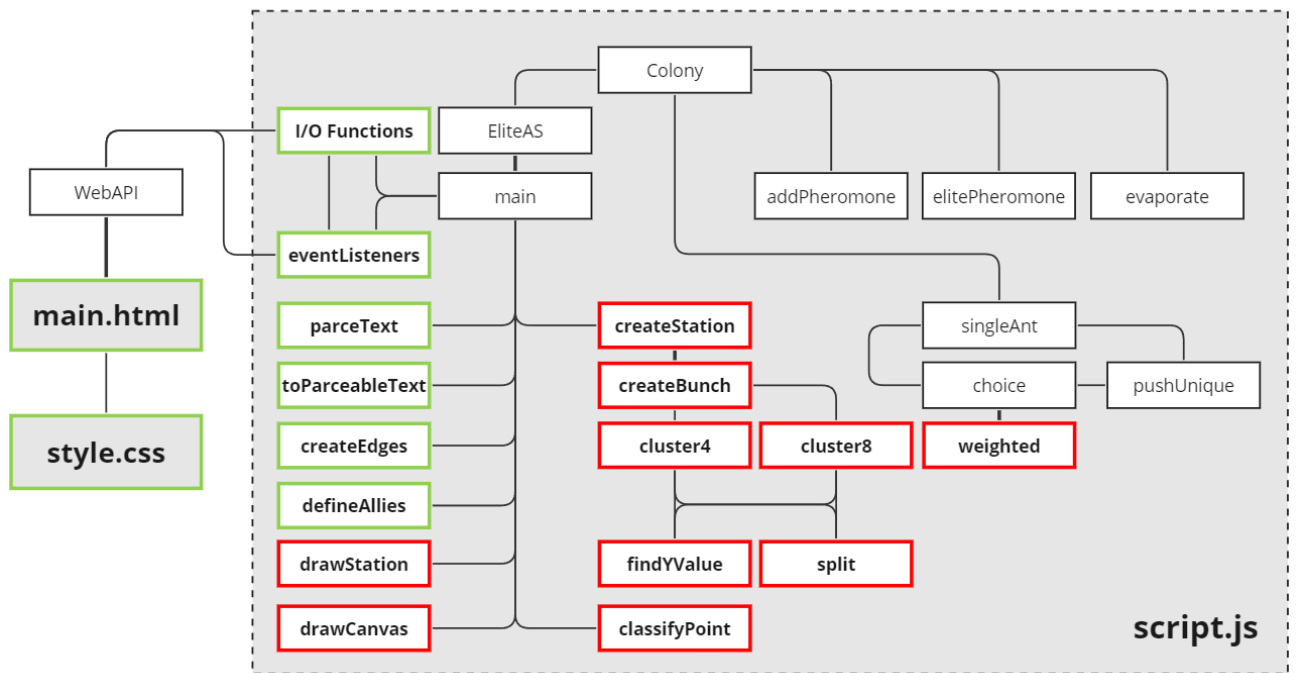


Рисунок 2.3 – Загальна структура програми «MarshYard_Ant»:

- введення нового структурного елементу;
- модифікація елемента «WLAN_EliteAS».

- singleAnt – функція що реалізує повну послідовність виборів одного агента-мурахи;
- choice – функція одного єдиного вибору агенту описаного у функціях вибору (2.3) - (2.4);
- pushUnique – функція що додає у даний масив певну кількість унікальних елементів з другого даного масиву.

Модифіковано наступні структурні елементи:

- структуру html файлу та функції обробників подій відповідних елементів – функції що оновлюють значення змінних при взаємодії з такими елементами як поля вводу, інтерактивні елементи input, ввід координат через візуальний елемент canvas тощо;
- оптимізовано та модифіковано спеціалізовані функції виводу та обробники подій;
- parseText, toParseableText – функції для обробки вводу та виводу масивів у вигляді тексту та перетворення введеного тексту на масив.

Розглянемо детальніше нововведені функції:

- createStation (station, clients, numSort) – функція генерації станції. Аргументи функції: об'єкт станції, об'єкт клієнтів та кількість сортувальних пучків у сортувальному парку. Повертає об'єкт station з координатами вузлів дерев рейок та масив розташування усіх клієнтів clients;
- createBunch (railnum, startpoint, endpoint, displacement, interwidth, betweenlinewidth) – функція генерації рейкового пучка з кількістю рейок railnum. Аргументи: startpoint, endpoint – координати вхідної та вихідної точки пучка; displacement – зміщення колій пучка по осі у відносно середнього у точок startpoint, endpoint; interwidth – ширина прямої ділянки рейок у пучку; betweenlinewidth – відстань між коліями. Повертає масив clus1,clus2 з координатами вузлів дерев стрілкових переведень;
- cluster8, cluster4 – функції генерації дерев рейкових переведень відповідно 8 та 4 рейками, повертають масив точок;
- findYValue (x, x1, y1, x2, y2) – функція що для координати x на промені що проходить через дві точки задані координатами x1, y1 та x2, y2. Повертає координату y;
- split(x1, y1, x2, y2, angle) – функція що за променем на якій лежить бісектриса кута заданого у angle градусах за вершиною у x1, y1. Повертає координати двох точок які описують два кінці ліній що утворюють кут;
- drawCanvas(AP, clients) – згідно з заданими множинами координат відображає розташування клієнтів та базових станцій на елементі canvas;
- drawStation(cluster1,cluster2,cluster3,cluster4,cluster5,cluster6) – відображає структуру колій сортувальної станції за заданими координатами вузлів дерев стрілкових переведень cluster1, cluster2, cluster3, cluster4, cluster5, cluster6 на елементі canvas;
- classifyPoints(input) – класифікує парк розташування поданих координат на сортувальній станції. Повертає масив з трьох елементів: кількість координат з набору input у парку прибуття, сортувальному парку та парку відправлення;

- `weighted (choose, weights)`. Аргументами функції мають бути два рівні за довжиною масиви, інакше у консоль буде виведено повідомлення про різну розмірність. За різної розмірності аргументів елементи масиву `weights` буде використано як ваги для зваженого вибору елемента з масиву `choose`. Повертає функція обраний, елемент масиву `choose`. Фрагмент коду функції `weighted` можна побачити на рисунку 2.4.

Також було виконано численні модифікації `html` файлу для структуризації додавання нових полів вводу. Докладно код програми можна побачити у Додатку А.

```
function weighted(choose, weights) {
  if (choose.length !== weights.length) {
    console.log(`Масиви ${choose} та ${weights} мають різну розмірність`);
    return;
  } else {
    let acc = 0;
    let rnd = Math.random();
    //console.log (rnd)
    let sum = weights.reduce(
      (accumulator, currentValue) => accumulator + currentValue,
      0
    );
    let chs = "";
    //console.log(sum);
    for (let i = 0; i < weights.length; i++) {
      acc += weights[i] / sum;
      if (acc > rnd) {
        chs = choose[i];
        break;
      }
    }
    return chs;
  }
}
```

Рисунок 2.4 – Фрагмент коду «MarshYard_Ant» з функцією `weighted`

2.4 Тестування програми «MarshYard_Ant»

Обмін інформацією з користувачем відбувається у єдиному вікні інтерфейсу який. Як видно з рисунка 2.5 – чотири з п'яти зон вікна відповідають за введення початкових даних: “параметри сортувальної станції”, “параметри бездротової мережі”, “параметри мурашиного алгоритму” та елемент `canvas` для встановлення додаткових точок-клієнтів за потреби користувача. Результати

роботи виводяться на елемент canvas та у зоні вікна “Результати роботи програми”.

Ввід координат клієнтів відбувається через як за допомогою елементів <textfield> так і різноманіття елементів <input> типів: button, radio, slider, number.

Порівняємо результати роботи програми із результатами, отриманими у роботі [2] для сортувальної станції малої потужності з використанням бджолиного методу.

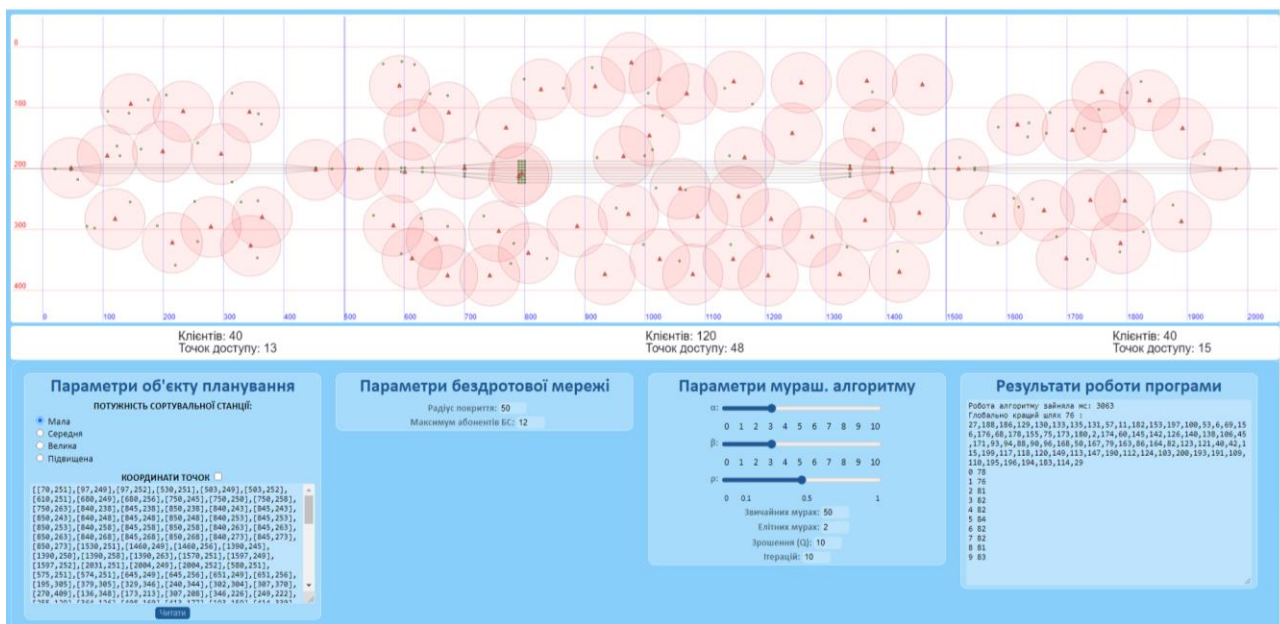


Рисунок 2.5 – Результати роботи програми «MarshYard_Ant» для сортувальної станції малої потужності

Параметри об'єкта планування: потужність сортувальної гірки – мала (1 сортувальний пучок), 250 клієнтів. Параметри мережі відповідно до обраної методики розгортання: максимальний радіус базової станції - 50 м ; Максимальна кількість клієнтів – 12. Параметри мурашиного алгоритму: жадібність, ліність – 0,3, випаровування – 0,5, зрощення – 10, кількість звичайних мурах – 50, ітерацій – 10, елітних мурах – 2 (додаток В).

За результатом роботи програми за мурашиним методом запропоновано 76 базових станцій, з них: 13 – у парку прибуття, 48 – на гірці та у сортувальному парку, 15 – у парку відправлення. Результат на 2 базові станції менший за запропонований за бджолиним методом у [2] при рівних інших параметрах, що доводить вірну роботу програми.

2.5 Основні висновки

1. Для визначення оптимальних параметрів WLAN для сортувальних станцій різної потужності за мурашиним алгоритмом засобами мови JavaScript створено програму «MarshYard_Ant» на основі «WLAN_EliteAS» з введенням ряду модифікацій. На вхід модифікованої програми «MarshYard_Ant» подаються: параметри об'єкта планування (потужність сортувальної станції та точки координати пристроїв-клієнтів), параметри WLAN (радіус покриття, максимальна кількість клієнтів базової станції) та параметри мурашиного алгоритму (кількість звичайних та елітних мурах, зрошення, випаровування, жадібність та ліність, кількість ітерацій); як результат – графічне подання розташування базових станцій WLAN на об'єкті, їх координати, час роботи алгоритму.
2. Створену програму «MarshYard_Ant» за мурашиним методом протестовано для сортувальної станції малої потужності (1 сортувальний пучок, 250 клієнтів), на якій отриманий результат - 76 базових станцій WLAN, що достатньо близький до результату (78 базових станцій WLAN), отриманий на програмі «LocBS_BeeCol» за бджолиним методом в [2].

3 ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА

3.1 Визначення оптимальних параметрів WLAN для сортувальних станцій різної потужності

На створеній програмі «MarshYard_Ant» проведено дослідження оптимальної кількості базових станцій для сортувальних станцій різної потужності. Оптимальні параметри мурашиного алгоритму (жадібність, ліність – 0.3, випаровування – 0.5, зрошення – 10,) отриманих автором раніше у [32], результати досліджень можна побачити у Додатку Г. Для сортувальної станції малої потужності результати подані у розділі 2 у підрозділі 2.4 (див. рис. 2.5). Скриншоти роботи програми подані у Додатку Б, а відповідні зведені таблиці у Додатку В.

Параметри об'єкта планування: потужність сортувальної гірки – середня (3 сортувальні пучки), 300 клієнтів. Параметри бездротової мережі: максимальний радіус базової станції – 50 м; максимальна кількість клієнтів базової станції – 12. Параметри мурашиного алгоритму: жадібність, ліність – 0.3, випаровування – 0.5, зрошення – 10, кількість звичайних мурах – 50, ітерацій – 10, елітних мурах – 2.

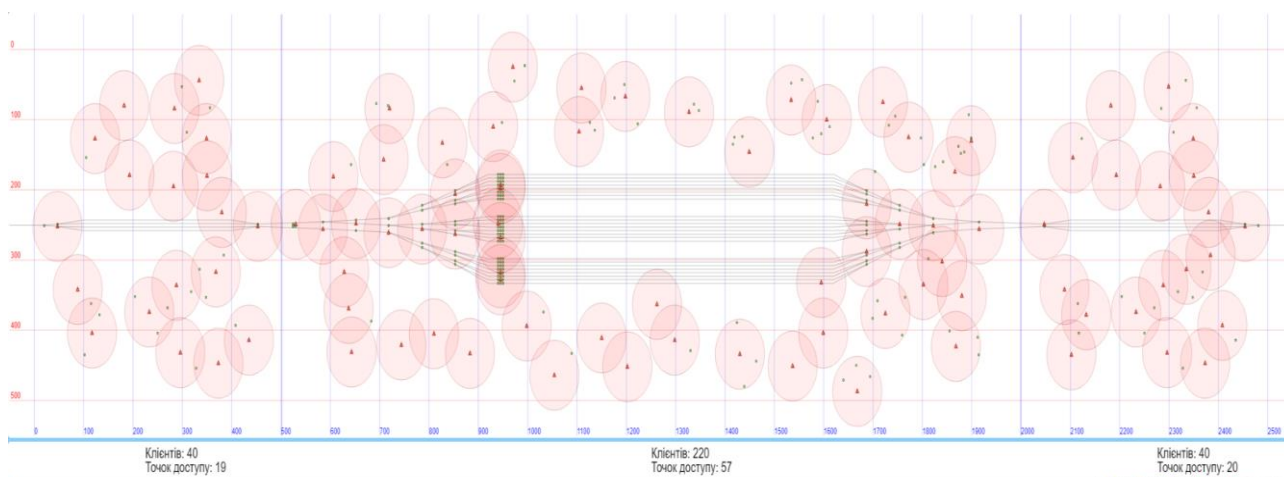


Рисунок 3.1 – Результати роботи програми «MarshYard_Ant» для сортувальної станції середньої потужності

За результатом роботи програми за мурашиним методом запропоновано 96 базових станцій WLAN, з них: 19 – у парку прибуття, 57 – на гірці та у сортувальному парку, 20 – у парку відправлення (рисунок 3.1). Результат

знайдений за мурашиним методом на 3 базові станції більший ніж запропонований за бджолиним методом у [2].

Параметри об'єкта планування: потужність сортувальної гірки – велика (4 сортувальні пучки), 350 клієнтів. Параметри бездротової мережі: максимальний радіус базової станції – 50 м; максимальна кількість клієнтів базової станції – 12. Параметри мурашиного алгоритму: жадібність, ліність – 0.3, випаровування – 0.5, зрошення – 10, кількість звичайних мурах – 50, ітерацій – 10, елітних мурах – 2.

За результатом роботи програми за мурашиним методом запропоновано 127 базових станцій WLAN, з них: 22 – у парку прибуття, 86 – на гірці та у сортувальному парку, 19 – у парку відправлення. Результат на 4 базові станції менший ніж запропонований за бджолиним методом у [2].

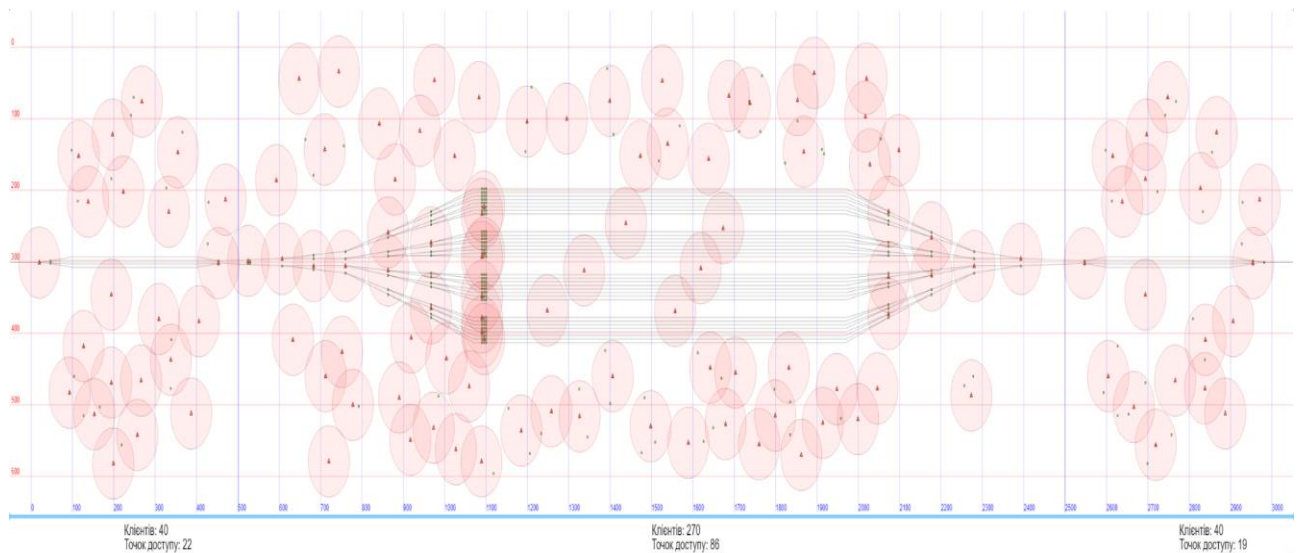


Рисунок 3.2 – Результати роботи програми «MarshYard_Ant» для сортувальної станції великої потужності

Параметри об'єкта планування: потужність сортувальної гірки – підвищена (8 сортувальних пучків), 500 клієнтів. Параметри бездротової мережі: максимальний радіус базової станції – 50 м; максимальна кількість клієнтів базової станції – 12. Параметри мурашиного алгоритму: жадібність, ліність – 0.3, випаровування – 0.5, зрошення – 10, кількість звичайних мурах – 50, ітерацій – 10, елітних мурах – 2.

За результатом роботи програми (див Додаток В, рисунок В.4) за мурашиним методом запропоновано 155 базових станцій WLAN, з них: 22 – у парку прибуття, 107 – на гірці та у сортувальному парку, 26 – у парку відправлення.

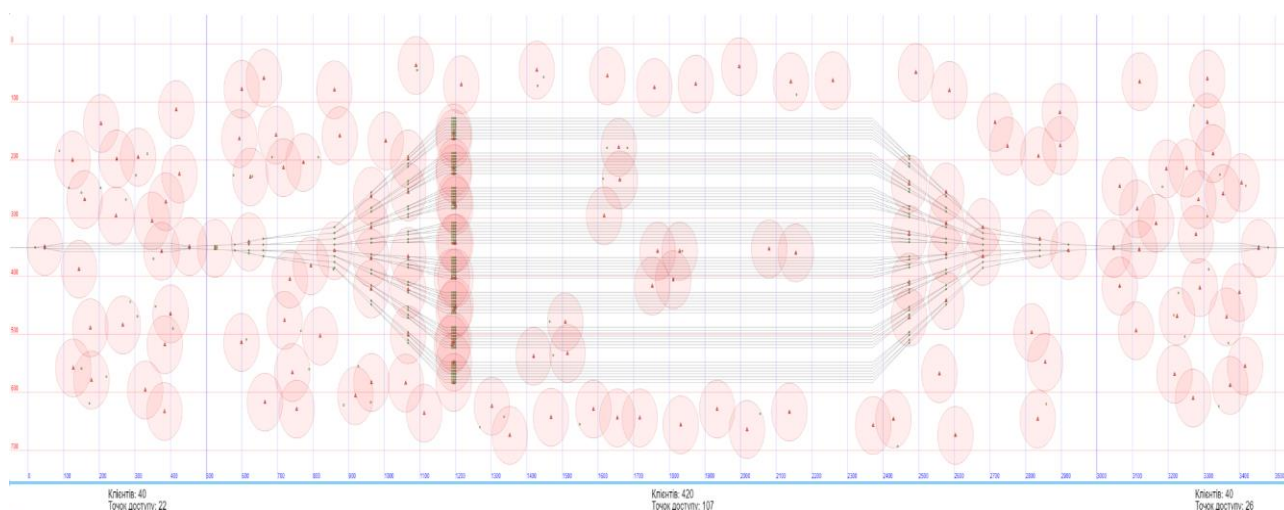


Рисунок 3.3 – Результати роботи програми «MarshYard_Ant» для сортувальної станції підвищеної потужності

3.2 Дослідження числа агентів багатоагентних методів для сортувальних станцій різної потужності

Проведемо дослідження впливу кількості звичайних мурах на час роботи алгоритму та мінімальну кількість базових станцій WLAN. Параметри мережі, алгоритму, кількість клієнтів приймемо як у дослідженні 3.1, кількість ітерацій - 10. Отримані результати на створеній програмі «MarshYard_Ant» за мурашиним методом, що представлені в Додатку В (див. рис.В.1 - рис.В.75; табл. В.1-В2). За результатами мурашиного та бджолиного методу [2] проведений відповідний аналіз (рис. 3.4 - 3.5).

Збільшення кількості агентів (з 10 до 50 мурах чи бджіл; рис. 3.4) приводить до зменшення кількості базових станцій WLAN на сортувальних станціях різної потужності в середньому на 1,2% проти відповідного зменшення на 6,5% за бджолиним методом. При збільшенні кількості агентів (з 10 до 50 мурах чи бджіл; рис. 3.5) час пошуку оптимального рішення зменшується в середньому в 1,8 раза за бджолиним методом, але за мурашиним методом зменшується в середньому в 1,56 раза.

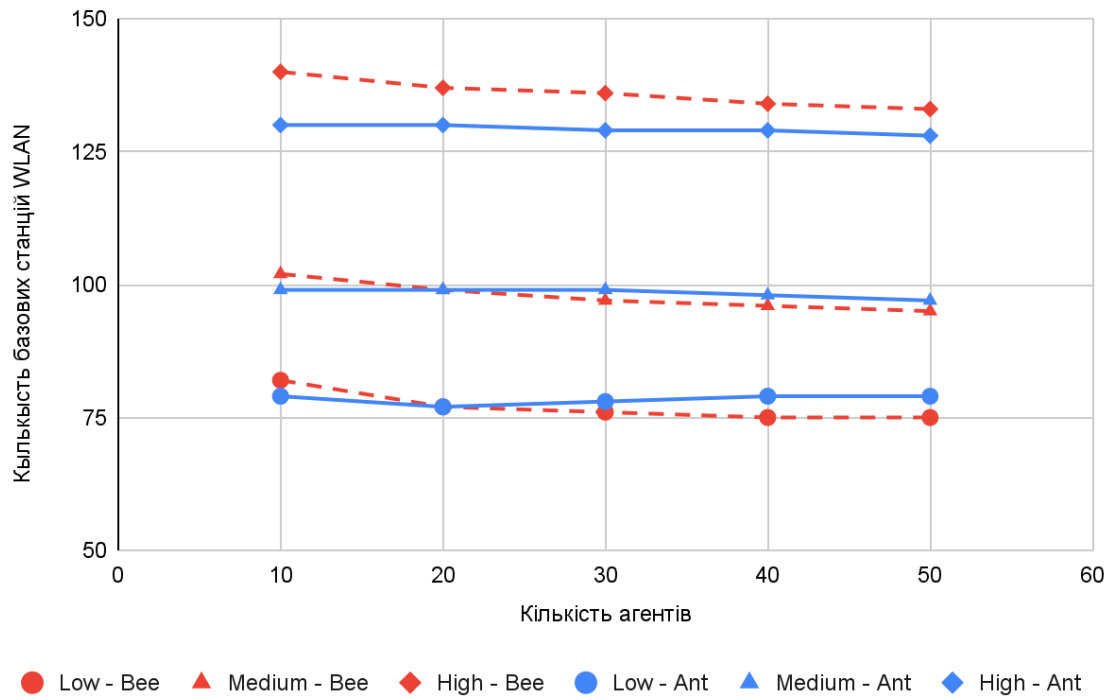


Рисунок 3.4 – Кількість базових станцій WLAN за кількістю агентів різних методів

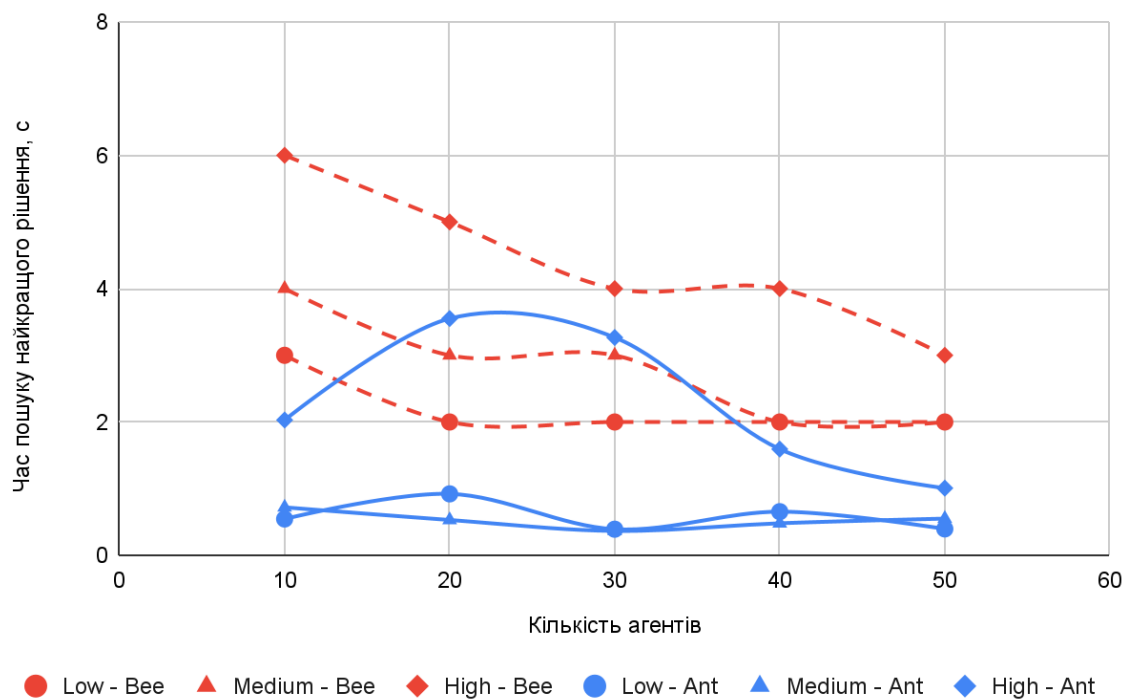


Рисунок 3.5 – Час пошуку найкращого рішення за кількістю агентів різних методів

3.3 Дослідження радіуса покриття базової станції для сортувальної станції великої потужності

Для сортувальної станції великої потужності (6 сортувальних пучків, 350 клієнтів) проведено дослідження впливу радіуса покриття базової станції WLAN на їх кількість та час роботи алгоритму. Отримані результати на створеній програмі «MarshYard_Ant» за мурашиним методом, що представлені в Додатку В (див. рис.В.70 - рис.В.80; табл. В.3) та на програмі «LocBS_BeeCol» за бджолиним методом в [2] представлені на рисунку 3.6.

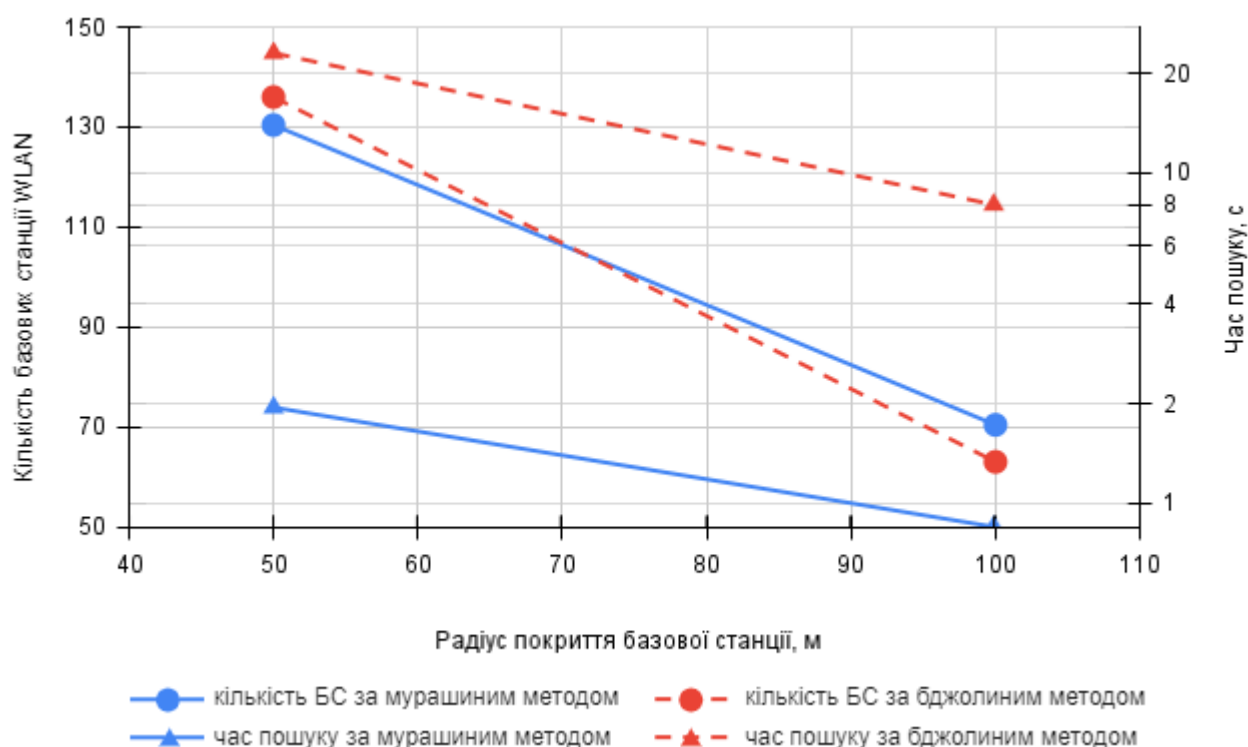


Рисунок 3.6 – Вплив радіуса покриття базової станції WLAN за різними методами: сортувальна станція великої потужності

З рисунка видно, що при збільшенні радіуса покриття базової станції WLAN удвічі (з 50 м до 100 м) їх оптимальна кількість (з 131 до 70) у середньому зменшується в 1,85 раза за мурашиним методом проти відповідної кількості (з 136 до 64) за бджолиним методом в 2,15 раза, але при цьому час пошуку оптимального рішення (з 1,94 с до 0,84 с) також зменшується у середньому в 2,29 раза за мурашиним методом проти відповідного часу (з 20,6 с до 8,4 с) за бджолиним методом в 2,85 раза.

3.4 Основні висновки

1. На створеній програмі «MarshYard_Ant» при: 1) параметрах WLAN (максимальний радіус базової станції - 50 м; максимальна кількість клієнтів базової станції – 12); 2) параметрах мурашиного алгоритму (жадібність, ліність – 0,3; випаровування – 0,5; зрошення – 10; кількість звичайних мурах – 50; кількість ітерацій – 10; кількість елітних мурах - 2) проведено визначення кількості базових станцій WLAN: 97 — для сортувальної станції середньої потужності (3 пучки, 300 клієнтів); 127 - для сортувальної станції великої потужності (4 пучки, 350 клієнтів); 155 - для сортувальної станції підвищеної потужності (8 пучків, 500 клієнтів). Отримані результати дуже близькі до відповідних результатів, що визначені раніше на програмі «LocBS_VeeCol» за бджолиним методом в [2].
2. На створеній програмі «MarshYard_Ant» проведено дослідження впливу кількості мурах на кількість базових станцій WLAN на сортувальних станціях різної потужності та відповідний час пошуку оптимального рішення. Визначено, що підвищення кількості мурах (з 10 до 50) призводить до зменшення кількості базових станцій WLAN в середньому на 1,2 % проти відповідного зменшення на 6,5 % за бджолиним методом, при цьому час пошуку оптимального рішення зменшується в середньому в 1,56 рази проти відповідного часу за бджолиним методом в 1,8 рази.
3. На створеній програмі «MarshYard_Ant» проведено дослідження впливу радіуса покриття базової станції WLAN для сортувальної станції великої потужності (6 пучків, 350 клієнтів). Визначено, що при збільшенні радіуса покриття базової станції WLAN удвічі (з 50 м до 100 м) їх оптимальна кількість (з 131 до 70) у середньому зменшується в 1,85 рази за мурашиним методом проти відповідної кількості (з 131 до 64) за бджолиним методом в 2,15 рази, але при цьому час пошуку оптимального рішення (з 1,94 с до 0,84 с) також зменшується у середньому в 2,29 за мурашиним методом проти відповідного часу (з 20,6 с до 8,4 с) за бджолиним методом в 2,85 рази.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Огляд наукових робіт та стандартів бездротових мереж показав, що на сучасному етапі дослідження бездротових мереж ведуться у наступних напрямках: безпека бездротових мереж, планування бездротових мереж, гетерогенні бездротові мережі, бездротові мережі як частина IoT, оптимізація доступу до опорних частот та управління трафіком. Для планування бездротових мереж сортувальних станцій різної потужності обрано топологію ESS та методику розгортання, направлену на максимальну пропускну здатність.

2. Проведено аналіз багатоагентних методів інтелектуальної оптимізації та їх модифікацій. Докладно розглянуто приклади використання бджолиного і мурашиного методів для розв'язання різноманітних проблем, їх модифікацій, переваг та недоліків. Для планування бездротових мереж сортувальних станцій різної потужності обрано елітну стратегію мурашиного алгоритму.

3. Для визначення оптимальних параметрів WLAN для сортувальних станцій різної потужності за мурашиним алгоритмом засобами мови JavaScript створено програму «MarshYard_Ant» на основі «WLAN_EliteAS» з введенням ряду модифікацій. На вхід модифікованої програми «MarshYard_Ant» подаються: параметри об'єкта планування (потужність сортувальної станції та точки координати пристроїв-клієнтів), параметри WLAN (радіус покриття максимальна кількість клієнтів) та параметри мурашиного алгоритму (кількість звичайних та елітних мурах, зрошення, випаровування, жадібність та ліність, кількість ітерацій); як результат – графічне подання розташування базових WLAN на об'єкті, їх координати, час роботи алгоритму.

4. На створеній програмі «MarshYard_Ant» за мурашиним алгоритмом проведено дослідження оптимальної кількості базових станцій для сортувальної станції різної потужності. Для сортувальної станції малої потужності визначено 76 базових станцій, середньої – 96 базових станцій, великої – 127 базових станцій, підвищеної - 155 базових станцій. Отримані результати близькі до знайдених за бджолиним алгоритмом.

5. На створеній програмі «MarshYard_Ant» за мурашиним методом проведено дослідження впливу кількості мурах на оптимальну кількість базових

станцій WLAN на сортувальних станціях різної потужності та відповідний час пошуку. Досліджено що збільшення кількості агентів (з 10 до 50 мурах) приводить до зменшення оптимальної кількості базових станцій WLAN на сортувальних станціях різної потужності в середньому на 1,2% за мурашиним методом при зменшенні на 6,5% за бджолиним методом, при цьому час пошуку оптимального рішення зменшується в середньому в 1,56 раза проти відповідного зменшення часу за бджолиним методом в 1,8 раза.

6. На створеній програмі «MarshYard_Ant» за мурашиним методом проведено дослідження впливу радіуса покриття базової станції WLAN для сортувальної станції великої потужності (6 пучків, 350 клієнтів). Досліджено, що при збільшенні радіуса покриття базової станції WLAN удвічі (з 50 м до 100 м) їх оптимальна кількість (з 131 до 70) у середньому зменшується в 1,85 рази за мурашиним методом проти відповідної кількості (з 136 до 64) за бджолиним методом в 2,15 рази, але при цьому час пошуку оптимального рішення (з 1,94 с до 0,84 с) також зменшується у середньому в 2,29 разів за мурашиним методом проти відповідного зменшення часу (з 20,6 с до 8,4 с) за бджолиним методом в 2,85 рази.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Local and metropolitan area networks-specific requirements-part 11: wireless LAN medium access control (mac) and physical layer (phy) specifications:. Institute of Electrical & Electronics Enginee, 2000.
2. Pakhomova V. M., Nazarova D. I. Organizing wireless network at marshalling yards using the bee method. Science and transport progress. Bulletin of Dnipropetrovsk national university of railway transport. 2020. № 2(86). С. 60–73. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2020/204005>.
3. Яцишин О. В. Дослідження і побудова безпроводової мультисервісної мережі на основі технологій IEEE 802.11 : магістерська дисертація: спец 172 телекомунікації та радіотехніка / наук. керівник Осипчук С. О.; КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2020. 104 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/41155>
4. Zhukovskyi I. V., Pedenko I. A. Аналіз безпеки бездротових мереж wi-fi в автоматизованих системах залізничного транспорту. Наука та прогрес транспорту. 2020. С. 7–21. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2020/213042>
5. Situation-Aware authenticated video broadcasting over train-trackside wifi networks / Y. Wu et al. IEEE Internet of Things Journal. 2019. Vol. 6, no. 2. P. 1617–1627. URL: <https://doi.org/10.1109/jiot.2018.2859185>
6. Poularakis K., Iosifidis G., Tassiulas L. Joint deployment and pricing of next-generation wifi networks. IEEE Transactions on Communications. 2019. Vol. 67, no. 9. P. 6193–6205. URL: <https://doi.org/10.1109/tcomm.2019.2919590>
7. Research on WLAN planning problem based on optimization models and multi-agent algorithm / Y. Zheng et al. 2017 IEEE international conference on cybernetics and intelligent systems (CIS) and IEEE conference on robotics, automation, and mechatronics (RAM), Ningbo, 19–21 November 2017. 2017. URL: <https://doi.org/10.1109/iccis.2017.8274782>
8. Research on wireless sensor network node localization algorithm / X. Liu et al. 2017 2nd international conference on frontiers of sensors technologies (ICFST), Shenzhen. URL: <https://doi.org/10.1109/ICFST.2017.8210496>

9. Mesodiakaki A., Zola E., Kassler A. Robust and energy-efficient user association and traffic routing in B5G HetNets. *Computer networks*. 2022. P. 109305. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109305>
10. ChengLong W., YeLi W., XinJi W. Research and optimization of urban rail transit handover based on WLAN. 2021 9th international conference on traffic and logistic engineering (ICTLE), Macau, China, 9–11 August 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/ictle53360.2021.9525657>
11. Lin Y., Zhou T., Wang Z. A high-reliable wireless sensor network coverage scheme in substations for the power internet of things. *Symmetry*. 2023. Vol. 15, no. 5. P. 1020. URL: <https://doi.org/10.3390/sym15051020>
12. Bardou A., Begin T., Busson A. Mitigating starvation in dense WLANs: A multi-armed Bandit solution. *Ad hoc networks*. 2022. P. 103015. URL: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2022.103015>
13. Assigning channels in WLANs with channel bonding: a fair and robust strategy / A. Chadda et al. *Computer networks*. 2021. Vol. 196. P. 108200. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108200>
14. Golestanian M., Siva J., Poellabauer C. Radio frequency-based indoor localization in ad-hoc networks. *Ad hoc networks*. 2017. URL: <https://doi.org/10.5772/66523>.
15. Performance of real-time wireless communication for railway environments with IEEE 802.11p / D. Richter et al. *Hawaii international conference on system sciences*. 2019. URL: <https://doi.org/10.24251/hicss.2019.907>
16. Олійник А. О., Субботін С. О., Олійник О. О. Інтелектуальні методи мультиагентної оптимізації. *Інтелектуальний аналіз даних : навч. посіб. Запоріжжя*, 2012. С. 236–245.
17. Corominas G. R., Blesa M. J., Blum C. AntNetAlign: Ant colony optimization for Network Alignment. *Applied soft computing*. 2022. P. 109832. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109832>
18. Ismail N. H. A., Hassan R. 6LoWPAN local repair using bio inspired artificial bee colony routing protocol. *Procedia technology*. 2013. Vol. 11. P. 281–287. URL: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.192>

19. Robot manipulator visual servoing based on image moments and improved firefly optimization algorithm-based extreme learning machine / Z. Zhou et al. ISA transactions. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2023.10.010>
20. Multi-objective bat optimization for a biomass gasifier integrated energy system based on 4E analyses / Y. Cao et al. Applied thermal engineering. 2021. Vol. 196. P. 117339. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117339>
21. Low light image enhancement algorithm based on improved multi-objective grey wolf optimization with detail feature enhancement / Y. Hui et al. Journal of king saud university - computer and information sciences. 2023. P. 101666. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.101666>
22. Mellal M. A., Al-Dahidi S., Williams E. J. System reliability optimization with heterogeneous components using hosted cuckoo optimization algorithm. Reliability engineering & system safety. 2020. Vol. 203. P. 107110. URL: <https://doi.org/10.1016/j.res.2020.107110>
23. A survey of bacterial foraging optimization / C. Guo et al. Neurocomputing. 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.06.142>
24. Ultrasound-assisted extraction of saffron bioactive compounds; separation of crocins, picrocrocin, and safranal optimized by artificial bee colony / M. Sarfarazi et al. Ultrasonics sonochemistry. 2022. Vol. 86. P. 105971. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105971>
25. Panda T. R., Swamy A. K. An improved artificial bee colony algorithm for pavement resurfacing problem. International journal of pavement research and technology. 2018. Vol. 11, no. 5. P. 509–516. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2018.04.001>
26. Short-term optimal scheduling of hydro-thermal power plants using artificial bee colony algorithm / Tehzeeb-ul-Hassan et al. Energy reports. 2020. Vol. 6. P. 984–992. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.04.003>
27. Dréo J. Файл:aco branches.svg – вікіпедія, 2006. Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Файл:Aco_branches.svg.
28. Dorigo M. Ottimizzazione, apprendimento automatico, ed algoritmi basati su metafora naturale : Ph. D. dissertation. Milan, 1992. 145 p.

29. Lin Y., Zhou T., Wang Z. A high-reliable wireless sensor network coverage scheme in substations for the power internet of things. *Symmetry*. 2023. Vol. 15, no. 5. P. 1020. URL: <https://doi.org/10.3390/sym15051020>
30. Onan A. SRL-ACO: a text augmentation framework based on semantic role labeling and ant colony optimization. *Journal of king saud university - computer and information sciences*. 2023. P. 101611. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2023.101611>
31. Vodák R., Bíl M., Křivánková Z. A modified ant colony optimization algorithm to increase the speed of the road network recovery process after disasters. *International journal of disaster risk reduction*. 2018. Vol. 31. P. 1092–1106. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.04.004>
32. Салогуб М. В. Планування бездротової мережі з використанням мурашиного алгоритму : дипломна робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавра: спец. 123 – комп'ютерна інженерія / наук. керівник В. М. Пахомова ; Укр. держ. ун-т науки і техн. Дніпро, 2022. 69 с.
33. Про затвердження та введення в дію Загального положення про залізничну станцію : Наказ від 30.12.2004 р. № 1041-ЦЗ. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1041328-04>.
34. Косолапов А. А. Системні характеристики автоматизованих сортувальних станцій. Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті. 2015. № 10. С. 96–100. URL: <https://doi.org/10.15802/ecstr2015/73862>.
35. Совершенствование конструкции и технологии работы сортировочных комплексов железнодорожных станций : монографія / В. И. Бобровский та ін. Днепропетровск : Днепропетр. нац. ун-т ж.-д. тр-та им. акад. В. Лазаряна., 2012. 136 с. URL: <http://eadnurt.diit.edu.ua/jspui/handle/123456789/3429>.
36. Кучинська Ю. С. 5.10 Пристрої механізації і автоматизації сорту вальних гірок. Головна. URL: <https://www.kuchinska.com/пте-і-бр/в-споруди-та-пристрої-сигналізації-зв'язку-та-обчислювальної-техніки/5-10-пристрої-механізації-і-автоматизації-сорту-вальних-гірок>

37. Жуковицький І. В. Цифровые системы управления скоростью скатывания отцепов на сортировочных горках : монографія. Днепропетровск : Маковец. Ю.В, 2012. 203 с.

38. Салогуб М. В., наук. керівник доц. Пахомова В. М. Планування бездротової мережі на залізничному транспорті з використанням мурашиного алгоритму. Всеукраїнська науково-технічна конференція здобувачів вищої освіти та молодих учених «Наука і сталий розвиток транспорту» (27 жовтня 2023 р.; УДУНТ). Збірник тез. Том 2. Дніпро: УДУНТ, 2023. С. 11.

39. Пахомова В. М., Салогуб М. В. Дослідження можливості мурашиного методу для визначення топології бездротової локальної мережі на сортувальній станції. XVII Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті» (13-14 грудня 2023 р.; УДУНТ). Збірник тез. Дніпро: УДУНТ, 2023. С. 85.