

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 004.7:[519.876.5:656.212.5]

В. М. ПАХОМОВА<sup>1\*</sup>, Д. І. НАЗАРОВА<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта viknikpakh@gmail.com, ORCID 0000-0002-0022-099X

<sup>2\*</sup>Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта olkdi@outlook.com, ORCID 0000-0002-7134-9416

### ОРГАНІЗАЦІЯ БЕЗДРОТОВОЇ МЕРЕЖІ НА СОРТУВАЛЬНІЙ СТАНЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ БДЖОЛИНОГО МЕТОДУ

**Мета.** Сьогодні бездротові мережі широко використовують в якості альтернативи дротовим, що дозволяє підключити декілька пристроїв як між собою в локальну, так і до глобальної мережі Інтернет. Але на сучасному етапі в Україні немає масового використання бездротової мережі на залізничному транспорті, тому доцільно провести дослідження розгортання такої мережі, зокрема на сортувальній станції. **Методика.** На програмній моделі «LocBS–BeeCol», що створена мовою Python за алгоритмом бджолиної колонії, визначено оптимальну кількість базових станцій (БС) бездротової мережі та їх розташування на сортувальній станції, проведено дослідження параметрів алгоритму. Вхідні дані моделі «LocBS–BeeCol»: параметри сортувальної станції (площа, кількість клієнтів, яких потрібно підключити до базових станцій); параметри бездротової мережі (радіус покриття базової станції, максимальна кількість клієнтів для однієї базової станції); параметри алгоритму бджолиної колонії (кількість бджіл-розвідників, кількість спроб знайти оптимальне рішення одною бджолою). **Результати.** Для сортувальних станцій різної потужності (малої, середньої та великої) отримано оптимальну кількість базових станцій бездротової мережі за обмежень на радіус покриття базової станції та кількість клієнтів, що підключені до неї. Так, наприклад, для підключення 300 клієнтів на сортувальній станції середньої потужності, площа якої 2 500x500 м<sup>2</sup>, необхідно 93 базових станції з радіусом покриття 50 м. **Наукова новизна.** Якість отриманих рішень значною мірою залежить від вибору параметрів алгоритму бджолиної колонії. Проведено дослідження кількості базових станцій бездротової мережі та часу пошуку оптимального рішення за різною кількістю бджіл та кількістю спроб знайти оптимальне рішення бджолою для сортувальних станцій різної потужності. Визначено, що збільшення кількості бджіл (із 10 до 50) та кількості спроб знаходження оптимального рішення бджолою (із 10 до 50) призводить до уточнення оптимального рішення (зменшення числа базових станцій у середньому на 6,5 та 9,3 % відповідно). Крім того, збільшення кількості бджіл (із 10 до 50) призводить до зменшення часу пошуку оптимального рішення бджолами в середньому в 1,8 раза, у той час як збільшення кількості спроб знаходження оптимального рішення бджолою (із 10 до 50) призведе до зростання часу пошуку оптимального рішення в середньому в 2,14 раза. **Практична значимість.** Розроблено алгоритм та його програмну реалізацію, які дозволяють визначити необхідну кількість базових станцій та їх розміщення під час розгортання бездротової мережі на сортувальній станції. Для сортувальної станції великої потужності в разі збільшення радіуса покриття базової станції удвічі (із 50 до 100 м) кількість БС зменшується приблизно в два рази (зі 136 до 64), при цьому час пошуку оптимального рішення бджолами збільшується в 2,5 раза (із 8,4 до 20,6 с).

**Ключові слова:** сортувальна станція; бездротова мережа; базова станція (БС); радіус покриття; бджолиний метод; бджоли; спроби; час пошуку

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

## Вступ

Бездротова мережа – це об'єднання комп'ютерів та інших пристроїв між собою для обміну інформацією без використання дротів, з'єднання виконується за рахунок радіоканалів. Установлення бездротової мережі необхідно тоді, коли розгортання кабельної системи є неможливим або економічно недоцільним. Бездротові мережі мають значні переваги над дротовими [5, 11–12]: вони дозволяють розгорнути мережу в місцях, де неможливе використання дротів і зберігають при цьому достатню швидкість передачі даних. Також бездротові мережі забезпечують легке підключення, мобільність користувачів, швидке виявлення несправностей та доступність мережного обладнання.

За масштабом бездротові мережі поділяють на (рис. 1) [5, 11–12]: бездротові персональні мережі (Wireless Personal Area Networks, WPAN) – до 10 м; бездротові локальні мережі (Wireless Local Area Networks, WLAN) – до 100 м; бездротові мережі масштабу міста (Wireless Metropolitan Area Networks, WMAN) – до 50 км; бездротові глобальні мережі (Wireless Wide Area Network, WWAN).

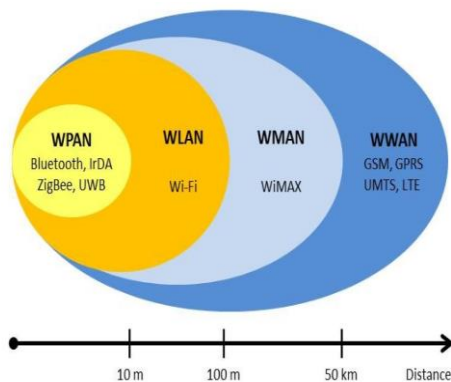


Рис. 1. Класифікація бездротових мереж

За топологією бездротові локальні мережі поділяють на: тимчасові мережі ad-hoc (Independent Basic Service Set, IBSS); залежні мережі (Basic Service Set, BSS); складні мережі (Extended Service Set, ESS). Відомо, що існують дві основні методології розгортання WLAN: бездротові LAN з максимальною зоною обслуговування; бездротові LAN із максимальною пропускну здатністю [5, 11–12].

Такі науковці, як Є. С. Скаков, В. М. Малиш, займалися питаннями планування бездро-

тових мереж [1]. Для розв'язання цієї задачі можливе використання інтелектуальних методів мультиагентної оптимізації, до яких належать: бджолиний, мурашиний, алгоритм рою часток, кажанів, світлячків та інші [1–2, 18]. У роботі [1] визначено, що саме бджолиний метод найбільш придатний для розв'язання задачі розміщення базових станцій бездротової мережі.

Бджолиний метод має деякі модифікації [7–8], однією з яких є BCOi (Bee Colony Optimization based on the improvement concept), її особливість полягає в тому, що розглядається робота з повними рішеннями оптимізаційної задачі, а не з частковими, як у класичному методі BCO [1].

На залізничному транспорті в країнах Європи з 2008 року для забезпечення захищеного бездротового зв'язку між залізничними службами та поїздами почали використовувати стандарт GSM-R (Global System for Mobile communications – Railway) [3, 6, 7, 16]. Мережу GSM-R використовують для забезпечення Європейської системи керування рухом поїзда (European Train Control System, ETCS) [16]. У Великобританії мережа GSM-R повністю функціонує з 2015 року [16]. Сьогодні в Європі вже йде мова про перехід до більш сучасних технологій, таких як 4G/LTE та 5G [19]. У майбутньому на залізничному транспорті очікують такі нові сервіси: бортове та придорожнє HD-відеоспостереження, мультимедійні диспетчерські відеопотоки, сенсорна інформація від залізничної інфраструктури, включаючи мости, віадуки, тунелі, дефекти шляхів тощо. За допомогою інфрачервоних, звукових датчиків та датчиків температури інформацію збирають і відправляють в обчислювальний центр [4].

На сучасному етапі в Україні проводять дослідження інформаційно-телекомунікаційної системи (ІТС) залізничного транспорту з використанням методів штучного інтелекту [13–15, 20]: нейронних та нейронечітких мереж, мурашиного та генетичного методів. Але поки достатньо не представлені результати впровадження саме бездротових мереж на залізничному транспорті. Автори розглянули можливість використання технології WLAN для реалізації мобільного зв'язку на залізничних станціях, склали діаграму станів базової станції в режимі розподіленої функції координації

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

(Distributed Coordination Function, DCF), який є обов'язковим і ґрунтується на протоколі, що забезпечує множинний доступ із контролем несучої і запобіганням колізії (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA). Тепер доцільно провести дослідження оптимальної кількості базових станцій бездротової мережі, зокрема на сортувальній станції, що надходить до нижнього рівня (лінійних підприємств) ІТС залізничного транспорту України.

**Мета**

У нашій роботі ми передбачаємо дослідити розгортання бездротової мережі та здійснити пошук оптимальної кількості базових станцій за алгоритмом бджолиної колонії для сортувальних станцій різної потужності. Для програмної реалізації обрано мову Python.

**Методика**

*Постановка задачі.* До складу сортувальної станції (рис. 2) належать парк прибуття, сортувальний парк, сортувальна гірка та парк відправлення. Найбільш важливою частиною технологічного процесу є сортувальна гірка, потужність якої (мала, середня, велика та підвищена) залежить від кількості сортувальних пучків (2, 3, 4, 6–8 відповідно). На досліджуваному об'єкті розташовані різні технологічні ділянки (стрілкова, вимірювання швидкості та прискорення відчепів в області 1–2ГП (гальмівна позиція) та 3–4ГП, вимірювання параметрів відчепа, контролю розчеплення, вимірювання маси відчепа) з різноманітним наземним обладнанням: колійні датчики та фотодатчики; рейкові ланцюги; вагоміри; радіолокаційні швидкостеміри та інші.

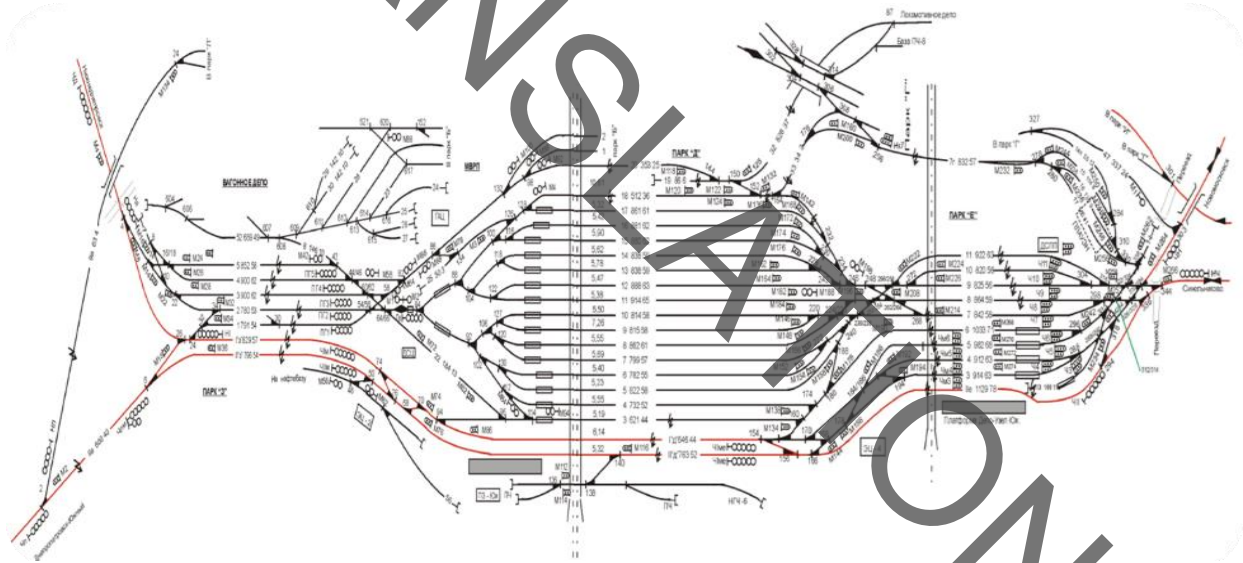


Рис. 2. Схема сортувальної станції

Нехай  $L$  – загальна множина клієнтів, яких потрібно підключити до базової станції бездротової мережі на сортувальній станції. Відомі  $M$  – місця-кандидати, куди можливе встановлення базових станцій WLAN. Окрім того, всі клієнти повинні бути підключені до базових станцій.

Уведемо позначення  $BS_i(r)^k$  –  $i$ -та базова станція бездротової мережі з радіусом покриття  $r$ , до якої підключені  $k$  клієнтів, де  $i \in [1; M]$ ;  $k \in [1; L]$ . Якщо  $BS_i(r)^k = 1$ , то  $i$ -ту базову ста-

нцію з  $k$ -клієнтами підключають до WLAN, в іншому випадку  $BS_i(r)^k = 0$ .

Як цільову розглянемо функцію:

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

причому необхідне виконання обмежень:

$$r \leq r_{\max}, \quad k \leq k_{\max}, \quad (2)$$

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

де  $r_{\max}$  – максимальний радіус покриття базової станції WLAN;  $k_{\max}$  – максимальна кількість клієнтів, яких підключають до базової станції WLAN.

*Розгортання бездротової мережі на сортувальній станції.* За умови врахування особливостей сортувальної станції, в подальшому мова йде про планування WLAN.

За топологією IBSS (рис. 3) [5, 11–12] клієнтські станції взаємодіють безпосередньо одна з одною без точки доступу. Для режиму Ad Hoc потрібно мінімум обладнання – бездротовий адаптер. За такої конфігурації не потрібне створення будь-якої мережної інфраструктури. У цьому режимі кожен вузол бере участь у маршрутизації шляхом пересилання даних для інших вузлів, тому визначення того, які вузли пересилають дані, проводиться динамічно на основі мережного з'єднання і використовуваного алгоритму маршрутизації. Режим Ad-Hoc застосовують в основному для створення тимчасових мереж.

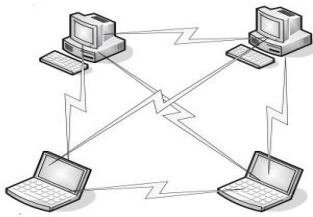


Рис. 3. Топологія IBSS

За топологією BSS (рис. 4) [5, 11–12] вузли мережі взаємодіють один з одним не безпосередньо, а через точку доступу (Access Point, AP), яка може грати роль моста для підключення до зовнішньої кабельної мережі. Усі базові станції мережі пов'язані між собою за допомогою розподіленої системи (Distribution System, DS), якою може бути радіо- або інфрачервоні хвилі.

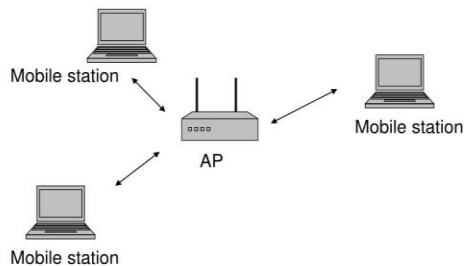


Рис. 4. Топологія BSS

Топологія ESS (рис. 5) [5, 11–12] дозволяє об'єднати кілька точок доступу, тобто об'єднує кілька мереж BSS. У цьому випадку точки доступу можуть взаємодіяти одна з одною. Таку топологію зручно застосовувати тоді, коли необхідно об'єднати в одну мережу кілька користувачів або підключити кілька дротових чи бездротових мереж.

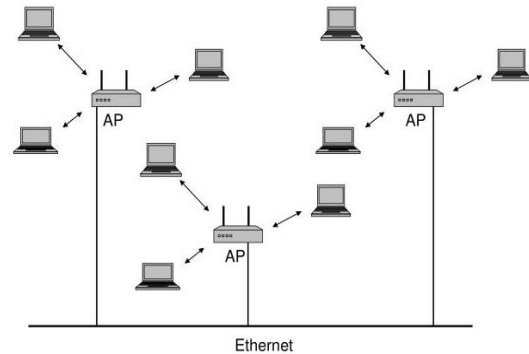


Рис. 5. Топологія ESS

На сортувальній станції доцільно застосувати топологію ESS, оскільки можна використовувати декілька точок доступу, що взаємодіють одна з одною. Окрім того, на сортувальній станції існують дротові мережі, з якими необхідно здійснювати обмін інформацією.

WLAN, що орієнтовані на зону обслуговування, розробляють з урахуванням забезпечення максимального покриття за мінімально можливою кількістю точок доступу, рис. 6. [5, 11–12].

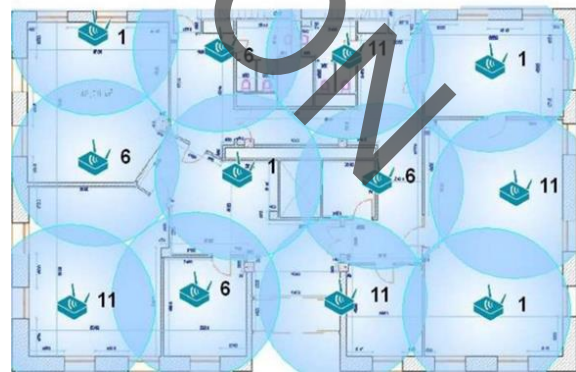


Рис. 6. WLAN, орієнтовані на зону обслуговування

У типовій орієнтованій на зону обслуговування мережі забезпечується співвідношення кількості користувачів до числа точок доступу 25:1. Деякі типові особливості WLAN орієнто-



## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

вані на максимальну зону обслуговування: застосування додатків пульсуючого типу з низькою швидкістю передачі пакетів, наприклад, такі, що формують запити до баз даних; потреби низьких вимог до смуги пропускання, завдяки чому швидкість передачі даних може бути зменшена до мінімальних значень 1 і 2 Мбіт/с; забезпечення легкості супроводу, оскільки персонал обслуговування WLAN невеликий. У мережах, орієнтованих на зону обслуговування, типові програми мають низьку швидкість передачі пакетів і пред'являють низькі вимоги до смуги пропускання. Такий підхід дозволяє відразу багатьом користувачам звертатися до послуг WLAN за збереження останніми достатніх характеристик. Такі варіанти звичні для великих або середніх філій фірм, коли WLAN обирають як альтернативу провідній Ethernet. Прості в розгортанні WLAN забезпечують основні сполучення в локальній мережі, необхідні для спільного використання файлів і принтерів. Кожна точка доступу WLAN обслуговує приблизно 25–30 користувачів [5, 11–12].

Бездротові LAN, що орієнтовані на високу пропускну здатність (рис. 7), повинні забезпечувати максимальну продуктивність і швидкість передачі пакетів для кожного клієнта BSS.

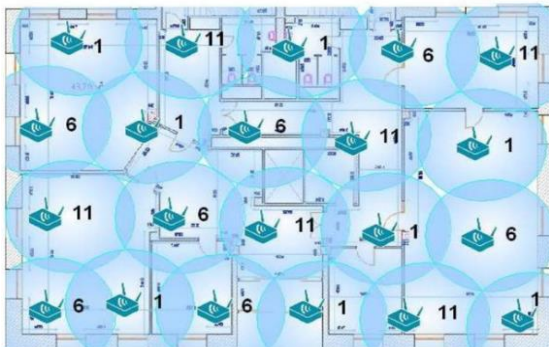


Рис. 7. WLAN, що орієнтовані на максимальну пропускну здатність

Розміри стільників орієнтованої на пропускну здатність WLAN менш, ніж для WLAN, що орієнтовані на максимальну зону обслуговування, відповідно щільність розміщення точок доступу вища. Орієнтовані на високу пропускну здатність WLAN необхідні у випадках, коли використовують додатки, які вимагають високої швидкості передачі пакетів; використовують додатки, чутливі до затримок; розгортають

підмережі менших масштабів (або декілька підмереж в одній зоні обслуговування); спостерігається висока щільність розміщення користувачів. У таких мережах кількість точок доступу в кілька разів перевищує число таких точок для WLAN, що орієнтовані на зону обслуговування. Зона обслуговування кожної точки доступу набагато менш, ніж під час побудови мережі, орієнтованої на максимальну зону обслуговування. Кожна точка доступу обслуговує близько 12 користувачів [5, 11–12]

Для сортувальної станції доцільне використання методології розгортання WLAN, що орієнтовані на максимальну пропускну здатність, бездротові LAN повинні забезпечувати максимальну продуктивність і швидкість передачі пакетів для кожного клієнта.

*Вибір алгоритму для організації бездротової мережі на сортувальній станції.* У наш час існує дуже багато різних ройових алгоритмів, які можна поділити на [2, 18]: ройові алгоритми, засновані на поведінці комах і тварин; ройові алгоритми, засновані на поведінці бактерій і неживій природі. До перших належать такі алгоритми: алгоритм рою часток; мурашиний алгоритм; бджолиний алгоритм; алгоритми, натхненні роєм світлячків; алгоритм зозулиного пошуку; алгоритм кажанів. До других належать: алгоритм гравітаційного пошуку; алгоритм інтелектуальних крапель; стохастичний дифузійний пошук; оптимізація рухом бактерій.

Алгоритм рою часток запропонований для оптимізації неперервних нелінійних функцій. Мурашиний алгоритм – один з ефективних поліноміальних алгоритмів для знаходження наближених рішень задач пошуку маршрутів на графах. Бджолиний алгоритм – це доволі новий алгоритм для знаходження глобальних екстремумів складних багатомірних функцій. За бджолиним алгоритмом бджоли досліджують ділянки, котрі знаходяться в околицях елітних, що дозволяє наблизити рішення до оптимального. Перевагами алгоритму є можливість ефективного поділу на паралельні процеси та висока швидкість роботи [2].

*Біологічні основи бджолиного методу.* Бджоли в природі шукають їжу шляхом вивчення простору в околиці їхнього вулика (рис. 8) [17].

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

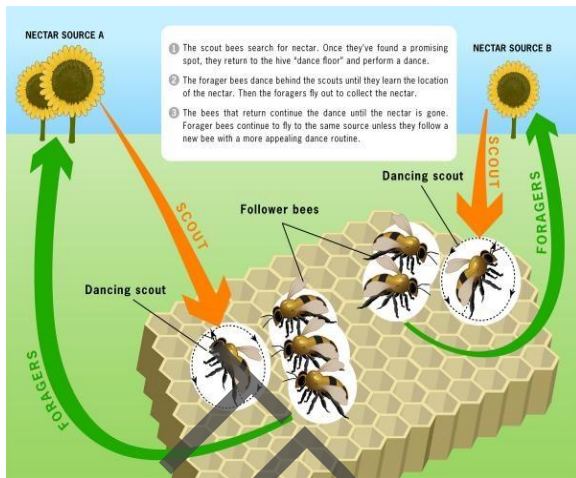


Рис. 8. Природний аналог

Огляд джерел [1–2, 8–10] показав, що, як правило, на початковій стадії декілька бджіло-розвідників досліджують навколишнє середовище. Після завершення пошуку бджіло-розвідники повертаються у вулик та інформують інших членів рою про місце, кількість і якість доступних джерел їжі, які вони знайшли. Обмін інформацією відбувається за допомогою танцю на спеціально відведеному для цього майданчику. Якщо бджола, яка спостерігала танці скаутів, вирішує покинути вулик і збирати нектар, вона буде слідувати за одним із розвідників до одного з раніше виявлених джерел їжі. Така бджола стає зайнятим фуражиром. Вона займається збором нектару, при цьому уточнюючи інформацію про кількість нектару в околиці знайденого джерела. Після збору фуражир повертається у вулик і залишає там зібраний нектар. Потім він може зробити одну з таких дій: стати незайнятим фуражиром, залишивши своє поточне джерело нектару; продовжити здобувати нектар зі свого джерела, не вербуючи незайнятих бджіл за допомогою танцю; продовжити здобувати нектар зі свого джерела, при цьому вербуючи незайнятих бджіл.

Описаний процес триває безперервно, у той час як вулик накопичує нектар і досліджує нові ділянки з потенційними джерелами їжі.

Алгоритм бджілої колонії, збільшена схема якого представлена на рис. 9 [10]. Спочатку проходить ініціалізація колонії, далі йде пошук рішення, після чого бджоли обмінюються інформацією у вулику за допомогою танцю,

далі знову йде ініціалізація колонії до тих пір, доки не буде виявлено критерій зупинки, після чого відбувається пошук оптимального рішення.



Рис. 9. Блок-схема алгоритму бджілої колонії

Програмна реалізація алгоритму бджілої колонії виконана мовою Python з використанням стандартних бібліотек: Os – відповідає за взаємодію з ОС; Sys – відповідає за системні функції; Random – відповідає за генерацію випадкових чисел; Math – відповідає за математичні операції; Datetime – відповідає за конвертацію часу; Matplotlib – відповідає за побудову графіків. До структури програмної моделі «LocBS–BeeCol» надходять такі класи користувача (рис. 10): Log – використовують для налагодження програми та відображення результатів, він є батьківським для всіх класів; Field – це клас для представлення сортувальної станції,

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

де проходить пошук розміщення базових станцій; Hive – це клас вулика, де бджоли-розвідники обмінюються інформацією й обирають оптимальне рішення, батьківським класом є Field; Bee – це клас представлення бджіл-розвідників, котрі шукають координати для розміщення базових станцій, батьківським класом є Hive.

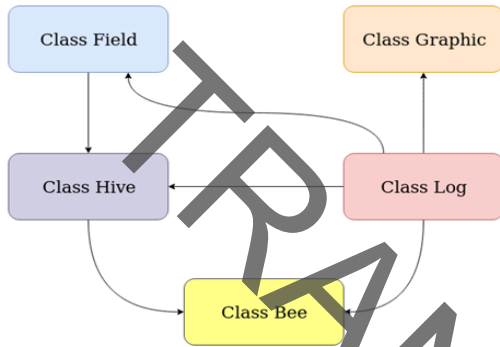


Рис. 10. Взаємодія основних класів «LocBS–BeeCol»

Розміщення базових станцій (БС) на сортувальній станції відбувається на основі алгоритму, який покладений в основу програмної моделі «LocBS–BeeCol» і схема якого наведена на рис. 11. Спочатку проходить ініціалізація всіх класів. Далі йде цикл із передумовою: чи всі клієнти покриті базовими станціями. Якщо ні, тоді відбувається очищення значень екстремумів, визначення координат області пошуку для кожної бджоли, далі йде пошук клієнтів у визначеній області та визначення координат базової станції, наприкінці циклу відбувається видалення знайдених клієнтів зі списку незайнятих клієнтів. Якщо всі клієнти покриті базовими станціями, буде виведено результат у вигляді словника, розмірністю якого є кількість БС (`res[bs_count]`), та складається зі структур, полями яких є розташування БС (`new_bs_location`), кількість клієнтів (`clients_in_area`), яку охоплює ця БС, та номери цих клієнтів із координатами (`clients_in_area_list`) у вигляді словників.

На рис. 12 зображено відповідний фрагмент програми. У циклі For (рядок 28) відбувається створення необхідної кількості бджіл, згідно з початковими умовами. Після створення всього необхідного для роботи програми починається реалізація самого алгоритму. У рядку 30

починається виконання циклу While до тих пір, доки всі клієнти не будуть підключені до базових станцій. Усередині відбувається цикл For (рядок 32), в якому обнуляються екстремуми та позиції для кожної з бджіл (рядки 33–35). Після задання поля для пошуку (рядок 36) кожна бджола робить задану кількість спроб знайти оптимальне рішення розміщення базової станції (рядок 37). У результаті ітерації циклу може бути знайдено глобальний екстремум, де більш доцільно поставити базову станцію, у цьому випадку вона буде встановлена (рядок 40). Далі із загального списку видаляють номери клієнтів, які підключені до БС (рядки 41–42), і цикл повертається на початок.

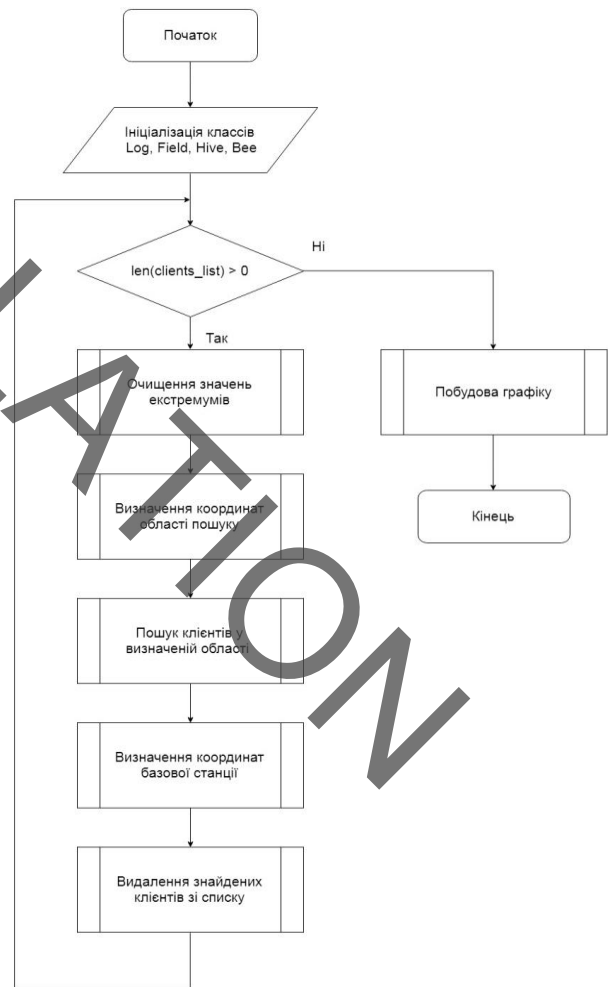


Рис. 11. Схема алгоритму моделі «LocBS–BeeCol»



## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

```

28 bees = [bee(hive, log) for i in range(bees_count)]
29 iter_count = 0
30 while len(hive.clients_list) > 0:
31     log.stat("run".upper(), "### Iteration #"+ str(iter_count) + " started. ##
32     #")
33     for bee in bees:
34         bee.local_extremum = {}
35         bee.location = []
36         hive.global_extremum = {}
37         scouting_area = hive.set_scouting_area(field, bs_area_radius)
38         for _ in range(max_retries_count):
39             for bee in bees:
40                 bee.scout(scouting_area)
41                 bee.set_bs_location(hive.global_extremum)
42             for key, value in hive.global_extremum["clients_in_area_list"].items():
43                 hive.modify_clients_list({key: value})
44             iter_count += 1

```

Рис. 12. Фрагмент програмної моделі «LocBS–BeeCol»

**Результати**

*Визначення кількості БС 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 рис. 13.

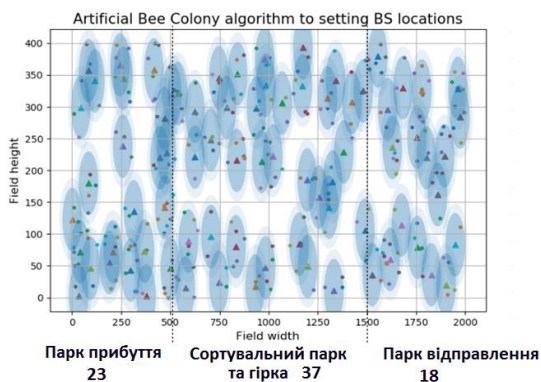


Рис. 13. Розміщення БС на сортувальній станції малої потужності

Отже, рекомендована кількість БС для сортувальної станції малої потужності складає 78, із них 23 знаходяться в парку прибуття, 37 – у сортувальному парку та гірці, 18 – у парку відправлення.

*Визначення кількості БС на сортувальній станції середньої потужності.* Вхідні параметри: кількість бджіл (bees\_count) = 10; максимальна кількість спроб знайти оптимальне рішення (max\_retries\_count) = 10; кількість клієнтів (clients\_count) = 300; максимальна кількість клієнтів, яку охоплює одна базова станція WLAN (bs\_max\_clients\_count) = 12; радіус покриття (bs\_area\_radius) = 50; ширина поля (field\_width) = 2 500; висота поля (field\_height) = 500. Результати роботи моделі наведено на рис. 14.

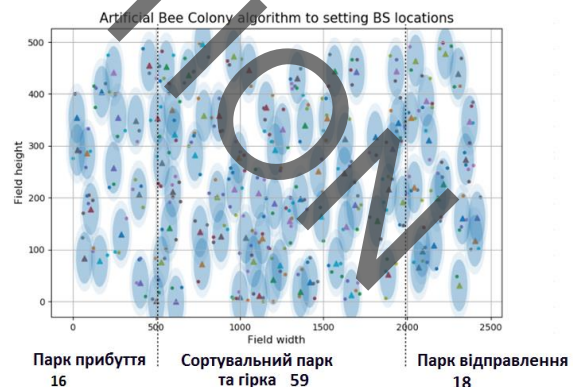


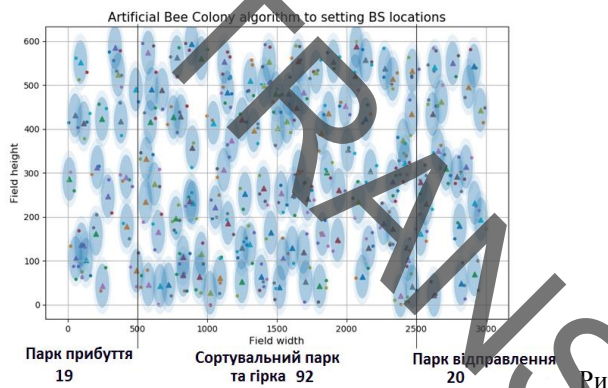
Рис. 14. Розміщення БС на сортувальній станції середньої потужності

Рекомендована кількість БС для сортувальної станції середньої потужності складає 93, із них 16 знаходяться в парку прибуття, 59 – у сортувальному парку та гірці, 18 – у парку відправлення.



## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Визначення кількості БС на сортувальній станції великої потужності. Вхідні параметри: кількість бджіл (bees\_count) = 10; максимальна кількість спроб знайти оптимальне рішення (max\_retries\_count) = 10; кількість клієнтів (clients\_count) = 350; максимальна кількість клієнтів, яку охоплює одна базова станція WLAN (bs\_max\_clients\_count) = 12; радіус покриття (bs\_area\_radius) = 50; ширина поля (field\_width) = 3 000; висота поля (field\_height) = 600. Результати роботи моделі наведено на рис. 15



с. 15. Розміщення БС на сортувальній станції великої потужності

Рекомендована кількість БС для сортувальної станції великої потужності складає 131, із них 19 знаходяться в парку прибуття, 92 – у сортувальному парку та гірці, 20 – у парку відправлення.

### Наукова новизна та практична значимість

*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 БС дротової мережі) та часу пошуку оптимального рішення за різною кількістю бджіл і спроб для сортувальних станцій (СС) різної потужності. Результати наведено на рис. 16–19.

Із рис. 16–17 видно, 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.

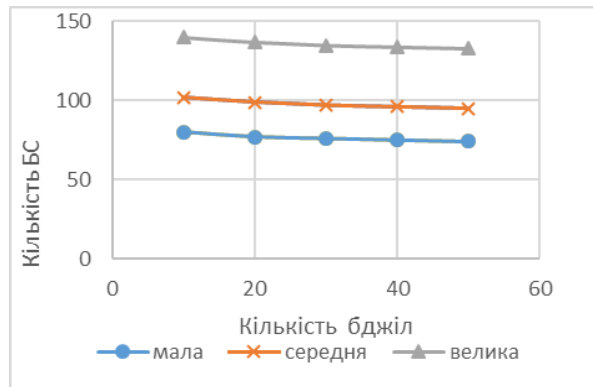


Рис. 16. Залежність результатів оптимізації (кількості БС) за кількістю бджіл для СС різної потужності

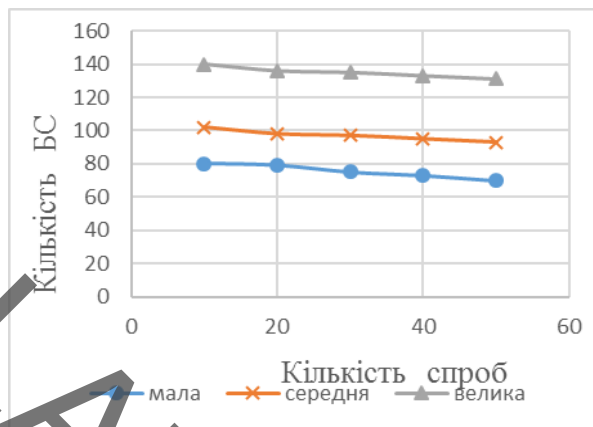


Рис. 17. Залежність результатів оптимізації (кількості БС) за кількістю спроб для СС різної потужності



Рис. 18. Залежність часу пошуку оптимального рішення за кількістю бджіл для СС різної потужності

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

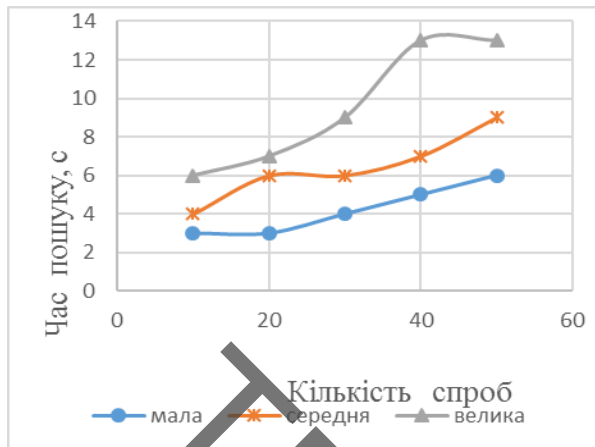


Рис. 19 Залежність часу пошуку оптимального рішення за кількістю спроб для СС різної потужності

Збільшення кількості бджіл (із 10 до 50) призводить до зменшення часу пошуку оптимального рішення бджолами в середньому в 1,8 раза (рис. 18), 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 в 2,14 раза (рис. 19).

Дослідження радіуса покриття базової станції WLAN проведено для сортувальної станції великої потужності. Отримані результати на програмній моделі «LocBS–BeeCol» зведено до табл. 1.

Із таблиці видно, що збільшення в два рази радіуса покриття базової станції (із 50 до 100 м) призводить до зменшення кількості БС приблизно в два рази (зі 136 до 64), при цьому час пошуку рішення бджолами збільшується в 2,5 раза (із 8,4 до 20,6 с). Дослідження проведено за таких параметрів: кількість бджіл (*bees\_count*) = 10; максимальна кількість спроб знайти оптимальне рішення (*max\_retries\_count*) = 10; кількість клієнтів (*clients\_count*) = 350; максимальна кількість клієнтів, яку охоплює одна базова станція (*bs\_max\_clients\_count*) = 12; ширина поля (*field\_width*) = 3 000; висота поля (*field\_height*) = 600.

Таблиця 1

### Результати дослідження для сортувальної станції великої потужності

№ досліджу	Радіус покриття БС, м	Кількість БС	Час пошуку рішення, с
1	50	135	22
2		135	20
3		133	19
4		140	22
5		138	20
	<b>Середнє:</b>	<b>136,2</b>	<b>20,6</b>
1	100	67	8
2		61	7
3		62	9
4		63	9
5		66	9
	<b>Середнє:</b>	<b>63,8</b>	<b>8,4</b>

### Висновки

1. За умови врахування топології сортувальної станції та особливостей відповідного технологічного процесу доцільно використати бездротову локальну мережу топології ESS із методологією розгортання WLAN, що орієнтована на максимальну пропускну здатність.

2. За результатами виконаного огляду наукових джерел для визначення оптимальної кількості базових станцій WLAN та їх розташування на сортувальній станції використано бджолиний метод, до переваг якого належать: можливість ефективного поділу на паралельні процеси; висока швидкість роботи.

3. На основі алгоритму бджолиної колонії мовою Python складено відповідну програмну модель «LocBS–BeeCol», вхідні дані якої: параметри сортувальної станції (площа, кількість клієнтів, яких потрібно підключити до базових станцій); параметри WLAN (радіус покриття базової станції; кількість клієнтів, яких обслуговує базова станція); параметри алгоритму бджолиної колонії (кількість бджіл, кількість спроб знайти оптимальне рішення бджолою). Так, наприклад, для підключення 300 клієнтів

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

на сортувальній станції середньої потужності, площа якої 2 500x500 м<sup>2</sup>, необхідно 93 базових станцій із радіусом покриття 50 м.

4. Якість отриманих рішень значною мірою залежить від вибору параметрів алгоритму бджолоїної колонії. Проведено дослідження кількості базових станцій WLAN (часу пошуку рішення бджолами) за різною кількістю бджіл (спроб знайти оптимальне рішення бджолою) для сортувальних станцій різної потужності. Визначено, що збільшення кількості бджіл та кількості спроб знаходження оптимального рішення бджолою призводить до підвищення

якості оптимального рішення – зменшення числа базових станцій. Крім того, збільшення кількості бджіл призводить до зменшення часу пошуку оптимального рішення а збільшення кількості спроб призведе до зростання часу пошуку оптимального рішення бджолами.

5. Для сортувальної станції великої потужності в разі збільшення радіуса покриття базової станції WLAN удвічі кількість БС зменшується приблизно в два рази, при цьому час пошуку оптимального рішення бджолами збільшується в 2,5 рази.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Скаков Е. С., Малыш В. Н. Пчелиный алгоритм оптимизации для решения задачи планирования беспроводной сети. *Программные продукты и системы*. 2016. № 4 (67). С. 67–73. DOI: <https://doi.org/10.15827/0236-235X.115.067-073>
2. Смирнова О. С., Богорадникова А. В., Блинов М. Ю. Описание роевых алгоритмов, инспирированных неживой природой и бактериями, для использования в онтологической. *International Journal of Open Information Technologies*. 2015. Vol. 3, No. 12. С. 28–37.
3. Ahamed A., Islam N., Soikot M. A. S., Hossen M. S., Ahmed R., Hasan M. A. Train Collision Avoidance Using GPS and GSM Module. *2019 International Conference on Power Electronics, Control and Automation (ICPECA)*. 2019. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/icpeca47973.2019.8975543>
4. Ai B., Guan K., Rupp M., Kurner T., Cheng X., Yin X.-F., ... Ding J.-W. Future railway services-oriented mobile communications network. *IEEE Communications Magazine*. 2015. Vol. 53. Iss. 10. P. 78–85. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7295467>
5. A Brief Overview of the Wireless World. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/basic-service-set>. (дата звернення: 13.12.2019).
6. A Necessary GSM-R Mobile Upgrade. URL: <https://www.railengineer.co.uk/2019/03/13/a-necessary-gsm-r-mobile-upgrade>. (дата звернення: 13.12.2019).
7. Banerjee S., Hempel N., Sharif H. A Survey of Wireless Communication Technologies & Their Performance for High Speed Railways. *Journal of Transportation Technologies*. 2016. Vol. 06. Iss. 01. P. 15–29. DOI: <https://doi.org/10.4236/jtts.2016.61003>
8. Davidovic T., Teodorovic D., Selmic M. Bee Colony Optimization – Part I : The Algorithm Overview : Invited survey. *YJOR*. 2015. Vol. 25. Iss. 1. P. 33–56. DOI: <https://doi.org/10.2298/YJOR131011017D>
9. Hussein W. A., Sahran S., Sheikh Abdullah S. N. H. The variants of the Bees Algorithm (BA) : A survey. *Artificial Intelligence Review*. 2017. Vol. 47. Iss. 1. P. 67–121. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-016-9476-8>
10. Kumar K., Zindani D., Davim J. P. Bees Algorithm. *Optimizing Engineering Problems through Heuristic Techniques*. 2019. P. 43-50. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781351049580-5>
11. Nurmi J., Lohan E.-S., Wymeersch H., Seco-Granados G., Nykänen O. *Multi-Technology Positioning*. Springer International Publishing AG. 2017. 348 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-50427-8>
12. Osterhage W. *Wireless Network Security*. Taylor & Francis Group. 2018. P. 14–77. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315106373-3>
13. Pakhomova V. M., Skaballanovich T. I., Bondareva V. S. Intelligent routing in the network of information and telecommunication system of railway transport. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 2 (80). P. 77–90. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/166092>
14. Pakhomova V. M., Tsykalo I. D. Optimal route definition in the network based on the multilayer neural model. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 6 (78). P. 126–142. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154443>
15. Pakhomova V. M., Mandybura Y. S. Optimal route definition in the railway information network using neural-fuzzy models. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 5 (83). P. 81–98. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/184385>

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

16. Sneps-Snepe M., Namiot D. Digital Railway and How to Move from GSM-R to LTE-R and 5G. *Convergent Cognitive Information Technologies*. 2018. P. 392–402. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37436-5\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37436-5_34)
17. Vaishali S. Nature – All Mathematics. URL: <http://thebridge.psgtech.ac.in/index.php/2014/11/12/nature-all-mathematics>. (дата звернення: 13.12.2019).
18. Ying Tan. Survey of swarm intelligence. *Swarm Intelligence Vol. 1 : Principles, current algorithms and methods*. 2018. P. 1–28. DOI: [https://doi.org/10.1049/pbce119f\\_ch1](https://doi.org/10.1049/pbce119f_ch1)
19. Zhong Z.-D., Ai B., Zhu G., Wu H., Xiong L., Wang F.-G., ... He R.-S. Key Issues for GSM-R and LTE-R. *Dedicated Mobile Communications for High-speed Railway*. 2018. P. 19–55. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-54860-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-54860-8_2)
20. Zhukovyts'kyu I., Pakhomova V. Research of Token Ring network options in automation system of marshaling yard. *Transport Problems*. 2018. Vol. 13. Iss. 2. P. 149–158. DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2018.13.2.14>

В. Н. ПАХОМОВА<sup>1\*</sup>, Д. И. НАЗАРОВА<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup> Каф. «Електронні висчислювальні машини», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта [viknikpakh@gmail.com](mailto:viknikpakh@gmail.com), ORCID 0000-0002-0022-099X

<sup>2\*</sup> Каф. «Електронні висчислювальні машини», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта [olkdi@outlook.com](mailto:olkdi@outlook.com), ORCID 0000-0002-7134-9416

## ОРГАНИЗАЦИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ НА СОРТИРОВОЧНОЙ СТАНЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЧЕЛИНОГО МЕТОДА

**Цель.** Сегодня беспроводные сети широко используют в качестве альтернативы проводным, что позволяет подключить несколько устройств как между собой в локальную, так и к глобальной сети Интернет. Однако на современном этапе в Украине нет массового использования беспроводной сети на железнодорожном транспорте, поэтому целесообразно провести исследование развертывания такой сети, в частности, на сортировочной станции. **Методика.** На программной модели «LocBS–BeeCol», написанной на языке Python по алгоритму пчелиной колонии, определено оптимальное количество базовых станций (БС) беспроводной сети и их расположение на сортировочной станции, проведено исследование параметров алгоритма. Входные данные модели «LocBS–BeeCol»: параметры сортировочной станции (площадь, количество клиентов, которых нужно подключить к базовым станциям); параметры беспроводной сети (радиус покрытия базовой станции, максимальное количество клиентов для одной базовой станции); параметры алгоритма пчелиной колонии (количество пчел-разведчиков, количество попыток найти оптимальное решение одной пчелой). **Результаты.** Для сортировочных станций различной мощности (малой, средней и высокой) получено оптимальное количество базовых станций беспроводной сети при ограничениях на радиус покрытия базовой станции и количество клиентов, подключенных к ней. Так, например, для подключения 300 клиентов на сортировочной станции средней мощности, площадь которой 2 500x500 м<sup>2</sup>, необходимо 93 базовых станции с радиусом покрытия 50 м. **Научная новизна.** Качество полученных решений в значительной мере зависит от выбора параметров алгоритма пчелиной колонии. Проведено исследование количества базовых станций беспроводной сети и времени поиска оптимального решения при различном числе пчел и количестве попыток найти оптимальное решение пчелой для сортировочных станций различной мощности. Определено, что увеличение количества пчел (с 10 до 50) и количества попыток нахождения оптимального решения пчелой (с 10 до 50) приводит к уточнению оптимального решения (уменьшению числа базовых станций в среднем на 6,5 и 9,3 % соответственно). Кроме этого, увеличение количества пчел (с 10 до 50) приводит к уменьшению времени поиска оптимального решения пчелами в среднем в 1,8 раза, в то время как увеличение количества попыток нахождения оптимального решения пчелой (с 10 до 50) приведет к росту времени поиска оптимального решения в среднем в 2,14 раза. **Практическая значимость.** Разработан алгоритм и его программная реализация, позволяющие определить необходимое количество базовых станций и их размещение при развертывании беспроводной сети на сортировочной станции. Для сортировочной станции высокой мощности при увеличении радиуса покрытия базовой станции вдвое (с 50 до 100 м) количество БС умень-



## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

шається приблизно в два рази (со 136 до 64), при цьому время поиска оптимального решения пчелами увеличивается в 2,5 раза (с 8,4 до 20,6 с).

**Ключевые слова:** сортировочная станция; беспроводная сеть; базовая станция (БС); радиус покрытия; пчелиный метод, пчелы; попытки; время поиска

V. M. PAKHOMOVA<sup>1\*</sup>, D. I. NAZAROVA<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Electronic Computing Machines», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail viknikpakh@gmail.com, ORCID 0000-0002-0022-099X

<sup>2\*</sup>Dep. «Electronic Computing Machines», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail olkdi@outlook.com, ORCID 0000-0002-7134-9416

## ORGANIZING WIRELESS NETWORK AT MARSHALLING YARDS USING THE BEE METHOD

**Purpose.** In general, today wireless networks are widely used as an alternative to wired, allowing you to connect multiple devices, both among themselves in the local and global Internet. However, at the present stage in Ukraine there is no widespread use of a wireless network at rail transport, therefore it is advisable to conduct research on the deployment of such a network, in particular, at a marshalling yard. **Methodology.** Using LocBS-BeeCol program model written in Python according to the bee colony algorithm the optimal number of base stations (BS) of the wireless network and their location at the marshalling yards was determined, as well as research on the bee algorithm parameters was conducted. Input data of the LocBS-BeeCol model are as follows: marshalling yard parameters (area, number of clients that need to be connected to base stations); wireless network parameters (base station coverage radius, maximum number of clients for one base station); parameters of the bee colony algorithm (number of scout bees, number of attempts to find the optimal solution using one bee). **Findings.** For marshalling yards of various capacities (small, medium and high), the optimal number of base stations of the wireless network was obtained with restrictions on the coverage radius of the base station and the number of clients connected to it. Thus, for example, to connect 300 clients at medium-sized marshalling yards with an area of 2500x500 m<sup>2</sup>, 93 base stations with a coverage radius of 50 m are needed. **Originality.** The quality of the obtained solutions significantly depends on the choice of the bee colony algorithm parameters. A study of the base stations number of the wireless network and search time for finding the optimal solution for different number of bees and the number of attempts to find the optimal solution using the bee for marshalling yards of various capacities was carried out. It was determined that an increase in the number of bees (from 10 to 50) and the number of attempts to find the optimal solution by a bee (from 10 to 50) improves the quality of the optimal solution (decrease in the number of base stations by an average of 6.5% and 9.3%), respectively. In addition, increase in the bee number (from 10 to 50) reduces the search time for the optimal solution by bees by an average of 1.8 times, while increase in the number of attempts to find the optimal solution by a bee (from 10 to 50) will increase search time for the optimal solution on average 2.14 times. **Practical value.** An algorithm and its software implementation have been developed, which make it possible to determine the required number of base stations and their location when deploying a wireless network at a marshalling yards. For marshalling yards with high capacity, when the coverage radius of the base station is doubled (from 50 to 100 m), their number decreases by about half (from 136 to 64), while the time for finding the optimal solution by bees increases by 2.5 times (from 8.4 to 20.6 s).

**Keywords:** marshalling yard; wireless network; base station (BS); coverage radius; bee method; bees; attempts; search time

### REFERENCES

1. Skakov, E., & Malysh, V. (2016). Bee optimization algorithm for solving wireless network planning problem. *Software products and systems.*, 4(67), 67-73. DOI: <https://doi.org/10.15827/0236-235X.115.067-073> (in Russian)
2. Smirnova, O., Bogoradnikova, A. & Blinov, M. (2015). Description of swarm algorithms inspired by inanimate nature and bacteria for use in the ontological model. *International Journal of Open Information Technologies*, 3(12), 28-37. (in Russian)

## ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

3. Ahamed, A., Islam, N., Soikot, M. A. S., Hossen, M. S., Ahmed, R., & Hasan, M. A. (2019). Train Collision Avoidance Using GPS and GSM Module. *2019 International Conference on Power Electronics, Control and Automation (ICPECA)*, 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/icpeca47973.2019.8975543> (in English)
4. Ai, B., Guan, K., Rupp, M., Kurner, T., Cheng, X., Yin, X.-F., ... & Ding, J.-W. (2015). Future railway services-oriented mobile communications network. *IEEE Communications Magazine*, 53(10), 78-85. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7295467> (in English)
5. A Brief Overview of the Wireless World. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/basic-service-set>
6. A Necessary GSM-R Mobile Upgrade. Retrieved from <https://www.railengineer.co.uk/2019/03/13/a-necessary-gsm-r-mobile-upgrade>
7. Banerjee, S., Hempel, M., & Sharif, H. (2016). A Survey of Wireless Communication Technologies & Their Performance for High Speed Railways. *Journal of Transportation Technologies*, 06(01), 15-29. DOI: <https://doi.org/10.4236/jtts.2016.61003> (in English)
8. Davidovic, T., Teodorovic, D. & Selmic, M. (2015). Bee Colony Optimization – Part I: The Algorithm Overview. Invited survey. *Yugoslav Journal of Operations Research*, 25(1), 33-56. DOI: <https://doi.org/10.2298/YJOR131011017D> (in English)
9. Hussein, W. A., Sahran, S., & Sheikh Abdullah, S. N. H. (2017). The variants of the Bees Algorithm (BA): a survey. *Artificial Intelligence Review*, 47(1), 67-121. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-016-9476-8> (in English)
10. Kumar, K., Zindani, D., & Davim, J. P. (2019). *Bees Algorithm*. Optimizing Engineering Problems through Heuristic Techniques. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781351049580-5> (in English)
11. Nurmi, J., Lohan, E.-S., Wymeersch, H., Seco-Granados, G., & Nykänen, O. (2017). *Multi-Technology Positioning*. Springer International Publishing AG. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-50427-8> (in English)
12. Osterhage, W. (2018). *Wireless Network Security*. Taylor & Francis Group, 14-77. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315106373-3> (in English)
13. Pakhomova, V. M., Skaballanovich, T. I., & Bondareva, V. S. (2019). Intelligent routing in the network of information and telecommunication system of railway transport. *Science and Transport Progress*, 2(80), 77-90. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/166092> (in English)
14. Pakhomova, V. M., & Tsykalo, I. D. (2018). Optimal route definition in the network based on the multilayer neural model. *Science and Transport Progress*, 6(78), 126-142. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154443> (in English)
15. Pakhomova, V. M., & Mandybura, Y. S. (2019). Optimal route definition in the railway information network using neural-fuzzy models. *Science and Transport Progress*, 5(83), 81-98. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/184385> (in English)
16. Sneps-Sneppé, M., & Namiot, D. (2020). *Digital Railway and How to Move from GSM-R to LTE-R and 5G*. Convergent Cognitive Information Technologies, 392-402. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37436-5\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37436-5_34) (in English)
17. Vaishali, S. Nature-All-Mathematics. Retrieved from <http://thebridge.psgtech.ac.in/index.php/2014/11/12/nature-all-mathematics>
18. Ying, Tan. (2018). Survey of swarm intelligence. *Swarm Intelligence-Vol. 1: Principles, current algorithms and methods*, 1-28. DOI: [https://doi.org/10.1049/pbce119f\\_ch1](https://doi.org/10.1049/pbce119f_ch1) (in English)
19. Zhong, Z.-D., Ai, B., Zhu, G., Wu, H., Xiong, L., Wang, F.-G., ... & He, R.-S. (2017). *Key Issues for GSM-R and LTE-R*. Dedicated Mobile Communications for High-Speed Railway, 19-55. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-662-54860-8\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-54860-8_2) (in English)
20. Zhukovyts'kyi, I., & Pakhomova, V. (2018). Research of Token Ring network options in automation system of marshalling yard. *Transport Problems*, 13(2), 149-158. DOI: <https://doi.org/10.20858/tp.2018.13.2.1> (in English)

Надійшла до редколегії: 19.11.2019

Прийнята до друку: 17.03.2020