

**Н.А. Гук, М.К. Гук, І.П. Шаповал**

*Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара*

## **НАЛАШТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧИ ОПТИМІЗАЦІЇ ТОПОЛОГІЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ**

Задача проектування топології бездротової сенсорної мережі оптимальної топології розглядається як задача покриття. Сформульовано цільову функцію, яка враховує додаткові обмеження, що забезпечують стійкість роботи мережі. Для розв'язання задачі проектування топології мережі використано генетичний алгоритм. У результаті обчислювального експерименту встановлено оптимальний розмір популяції, обрано методи виконання генетичних операцій.

**Ключові слова:** моніторинг, бездротова сенсорна мережа, сенсор, роутер, сервер, топологія, задача покриття, генетичний алгоритм.

Задача проектирования топологии беспроводной сенсорной сети оптимальной топологии рассматривается как задача покрытия. Сформулирована целевая функция, которая учитывает дополнительные ограничения, обеспечивающие устойчивость работы сети. Для решения задачи проектирования топологии сети использован генетический алгоритм. В результате вычислительного эксперимента установлен оптимальный размер популяции, выбраны методы выполнения генетических операций.

**Ключевые слова:** мониторинг, беспроводная сенсорная сеть, сенсор, роутер, сервер, топология, задача покрытия, генетический алгоритм.

The paper is devoted to the optimal placement of devices within a wireless sensor network. Modern requirements to ensure public safety in buildings with a complex structure imply the existence of systems that can detect and position emergency situation, inform rescue and tenants about the status and help them to either evacuate or eliminate the danger. Nowadays the main approach to create indoor emergency system is based on wireless sensor network. The network is built with a big number of usually battery-operating devices, each consists of a sensors set for hazard detection, and radio frequency module for communication. To evaluate the state of indoor environment different sensors can be used, such as temperature, humidity, light, flame, smoke, gas, etc. The problem of optimizing the network topology as a covering problem is formulated. A set of points in the area that is not covered by circles, a set of points belonging to the region and the intersection of two or more circles of coverage, set of points that do not belong to the area need to be minimized. To ensure fault tolerance of the wireless sensor network, it is necessary to allow the connection of each sensor with at least two routers, in case one of the routers is accidentally switched off, and also it is necessary to ensure connection of the router with at least one router. To take into account these additional conditions, the method of penalty functions is used. The genetic algorithm for solving the problem is used. The main genetic operators are adapted to the problem of designing the topology of wireless sensor networks. A computational experiment was carried out, during which the optimal population size was established; the procedure of homogeneous crossing, procedure of tournament selection is

**chosen; procedure of homogeneous mutation. As a criterion for stopping the genetic algorithm, the stagnation of the results on the iterations of the algorithm is chosen.**

**Keywords: monitoring, wireless sensor network, sensor, router, server, topology, coverage problem, genetic algorithm.**

**Вступ.** Сучасний підхід до створення внутрішньої аварійної системи у будівлях зі складною структурою базується на побудові бездротової сенсорної мережі (БСМ). БСМ – це розподілена система необслуговуваних мініатюрних електронних пристроїв, які здійснюють збір даних про параметри зовнішнього середовища і передачу їх на сервер за допомогою ретрансляції від вузла до вузла засобами бездротового зв'язку. Автономні пристрої оздоблені датчиками для виявлення небезпеки (задимлення, пожежі). На підставі даних сигналів можливо автоматизувати управління системою протидії небезпеці та системою сповіщення при виникненні вогненебезпечних і інших аварійних ситуацій. Таким чином здійснюється інформування відповідних служб о надзвичайної ситуації для подальшого усунення проблеми. Крім того, такі системи можна використовувати для моніторингу та контролю параметрів повітряного середовища у приміщеннях, організації системи комфортної навігації для відвідувачів будівель.

Тому питання проектування архітектури й топології бездротової сенсорної мережі, що забезпечує оптимальне розташування елементів мережі і гарантує стійку роботу системи, є актуальними.

**Аналіз літературних джерел.** З аналізу літературних джерел з'ясовано, що задачу проектування топології мережі може бути розв'язано як задачу теорії графів [1], як задачу однокритеріальної (багатокритеріальної) оптимізації [2], як задачу теорії алгоритмів – як задачу розміщення [3], або як задачу покриття [4].

З аналізу літературних джерел випливає, що аналітичні моделі й методи розв'язання мають обмежену область застосування та певні недоліки, які не дозволяють використовувати їх для розв'язання практичних задач. Крім того, використання класичних методів оптимізації можливе лише для розрахунків топології мереж малої вимірності через значні труднощі обчислювального характеру. Переважна більшість робіт, що мають відношення до задач кругового покриття, присвячена дослідженню евристичних методів розв'язання таких задач. Сучасні обчислювальні технології, такі як генетичний алгоритм, метод мурашиних колоній, можуть застосовуватися для розв'язання задач оптимального проектування сенсорної мережі. Однак сформульовані в літературі цільові функціонали не враховують усіх вимог, які висуваються до бездротових сенсорних мереж на практиці.

У даній роботі пропонується застосовувати генетичний алгоритм для розв'язання задачі проектування топології бездротової сенсорної мережі, яка здатна забезпечити оптимальне покриття заданої області, при цьому в автоматичному режимі здійснюється розподіл ролей пристроїв (сенсор,

роутер, сервер) між вузлами мережі. Сенсори здійснюють збір даних про параметри зовнішнього середовища (температуру, тиск, задимлення, рівень вологості) та передачу їх на сервер. Роутери здійснюють прийняття інформації від сенсорів мережі з метою її ретрансляції до сервера, а також передачу даних від сервера на сенсори. Керування всіма вузлами мережі, а також прийняття рішень у випадку нестандартної ситуації здійснюється сервером. Побудована конфігурація повинна забезпечувати зв'язаність вузлів мережі та стійкість мережі, тобто можливість передачі інформації навіть у випадку відмови окремих сенсорів та роутерів.

**Математична модель задачі.** У роботі задачу побудови оптимальної топології мережі сформульовано як задачу покриття із застосуванням результатів досліджень О. М. Кісельової та її учнів [5].

Оскільки для визначення зони дії пристроїв мережі використовується логарифмічно-нормальна модель поширення радіосигналу, то область покриття сенсора або роутера можна вважати колом. Тому розглядається задача кругового покриття.

На області  $\Omega$  необхідно розташувати центри кіл так, щоб

$$\text{mes} \left( \Omega \cap \left[ \left( \bigcup_{p=1}^{N_1} B(X_p, r_1^{(p)}) \right) \cup \left( \bigcup_{k=1}^{N_2} B(X_k, r_2^{(k)}) \right) \right] \right) \Rightarrow \max,$$

де  $\{X_k, X_p\}$  – сукупність центрів кіл, які утворюють покриття множини  $\Omega$  колами  $B(X_p, r_1^{(p)})$ ,  $B(X_k, r_2^{(k)})$  радіусів  $r_1^{(p)}$ ,  $r_2^{(k)}$ , де  $r_1^{(p)}$  – радіус покриття  $p$ -ого роутера,  $r_2^{(k)}$  – радіус покриття  $k$ -ого сенсору,  $X_p$  – точки розміщення роутерів, тоді вектор  $X_p = (x_p, y_p)$  – вектор параметрів розміщення кола в покритті, який утворюється  $p$ -им роутером,  $X_k$  – точки розміщення сенсорів, тоді  $X_k = (x_k, y_k)$  – вектор параметрів розміщення кола в покритті, який утворюється  $k$ -им сенсором;  $p = \overline{1, N_1}$ ,  $k = \overline{1, N_2}$ ;  $N_1$  – загальне число роутерів,  $N_2$  – загальне число сенсорів. У якості сервера обирається один з роутерів.

У роботі для визначення відстані між точками області прийнята евклідова метрика.

Для побудови оптимального покриття необхідно мінімізувати множину точок області  $\Omega$ , яку не покрито колами; множину точок, що належать області та перетину двох і більше кіл покриття; множину точок, які належать хоча б одному з кіл покриття, але не належать області  $\Omega$ .

Тоді цільовий функціонал задачі може бути сформульований у вигляді:

$$Q(X_p, X_k) = \sum_{i=1}^3 \left[ \sum_{p=1}^{N_1} \int_{\Omega_p^{(i)}} |c(X, X_p) - r_1^{(p)}| d\Omega + \sum_{k=1}^{N_2} \int_{\Omega_k^{(i)}} |c(X, X_k) - r_2^{(k)}| d\Omega \right]. \quad (1)$$

Для забезпечення відмовостійкості бездротової сенсорної мережі необхідно передбачити можливість з'єднання кожного сенсору не менше ніж з двома роутерами, на той випадок, коли один з роутерів буде аварійно вимкнений, а також необхідно забезпечити з'єднання роутера хоча б ще з одним роутером [6]. Для врахування вказаних додаткових умов будемо використовувати метод штрафних функцій. Приєднаємо штрафну функцію до функціоналу (1) у такий спосіб:

$$\bar{Q}(X_p, X_k, \alpha) = Q(X_p, X_k) + \alpha \left( \sum_{k=1}^{N_2} \sum_{j=1}^2 \frac{1}{r_1^{(p)} - c(X_k, X_{pj})} + \sum_{p=1}^{N_1} \frac{1}{r_1^{(p)} - c(X_p, X_{pi})} \right), \quad (2)$$

де  $\alpha$  – додатна величина.

**Метод розв'язання задачі.** У якості методу розв'язання сформульованої задачі оптимізації (2) будемо використовувати генетичний алгоритм. Задачу розв'язано для області  $\Omega$ , яка являє собою план поверху будинку.

Область покривається рівномірною сіткою, яка складається з вузлів  $X_n$ ,  $n = \overline{1, N}$ . Вузли сітки є точками розміщення пристроїв (роутерів, сенсорів). Кодування інформації про розміщення пристрою у вузлі сітки виконується у такий спосіб: 00 – пристрій (роутер або сенсор) у вузлі не розміщено; 01 – у вузлі розміщений сенсор; 10 – у вузлі розміщений сенсор; 11 – у вузлі розміщений роутер. Для генерації популяції будемо використовувати різні варіанти розміщення сенсорів у вузлах сітки. Набір хромосом для популяції генерується випадковим чином.

Згенеровані у такий спосіб хромосоми (варіанти топології мережі) оцінюються з точки зору цільової функції задачі. На кожній ітерації генетичного алгоритму виконуються операції селекції та мутації, кращий розв'язок з поточної популяції використовується для формування нової популяції, після чого цикл (генерація) повторюється. Розв'язком задачі є вектор, який складається з номерів вузлів сітки, у яких розміщуються сенсори та роутери.

Генетичний алгоритм реалізовано у вигляді програми. Також розроблено модуль допоміжних геометричних функцій для визначення геометричного місця точок області й зіставлення їх місцерозташування із границями області.

За допомогою програмного забезпечення обрано методи виконання генетичних операцій та проведено налаштування параметрів алгоритму.

**Характеристика параметрів моделі та параметрів аналізу.** Параметри радіо-моделі обирались такими: площа покриття роутера дорівнювала 450 м<sup>2</sup>, площа покриття сенсора дорівнювала 40 м<sup>2</sup>. Для початкової популяції роутери розташовуються у вузлах сітки з ймовірністю 1,44% , сенсори – з ймовірністю 21,12%, цільові значення цих параметрів для обраних характеристик пристроїв та площі поверху будівлі становлять – 0,38% та 4,9% , відповідно.

Генетичний алгоритм виконує певну кількість ітерацій, на кожній ітерації обчислюється значення цільової функції для кожної хромосоми у популяції, якість розрахунку обчислюється за значенням цільової функції для кращої

хромосоми. Аналізується поведінка цільової функції на ітераціях генетичного алгоритму. Для порівняння застосованих у алгоритмі методів мутації, селекції та схрещування крім значень цільової функції, обчислюється також значення похибки за кількістю використаних пристроїв (роутерів, сенсорів). Для цього обчислюється відношення різниці між використаною кількістю пристроїв та заданою цільовою кількістю. Якщо похибка за кількістю використаних пристроїв дорівнює нулю, то в результаті роботи алгоритму обрано достатню кількість пристроїв, якщо похибка від'ємна, то кількість пристроїв недостатня, інакше, використано пристроїв більше, ніж дозволене.

Для оцінювання якості популяції та застосованих у алгоритмі методів мутації та селекції досліджується різниця між значеннями цільової функції для кращої та поганої хромосоми, за допомогою цього параметру відстежується виродження популяції.

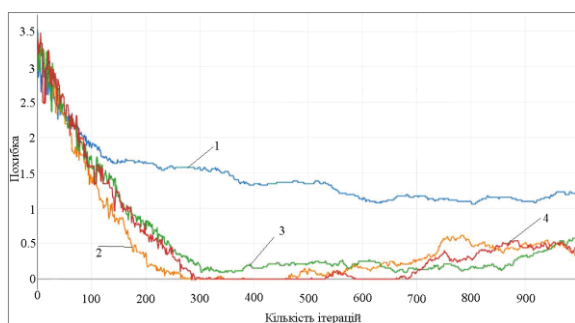
**Аналіз впливу параметрів алгоритму на результати розв'язання задачі.** Відомо, що кількість хромосом у популяції суттєво впливає на якість роботи генетичного алгоритму. Тестування відбувалось для популяцій вимірності яких дорівнювала 50, 100, 200 и 500 хромосомам. Збільшення вимірності популяції до 1000 хромосом не є доцільним, оскільки зі збільшенням вимірності відбувається більш скоріше виродження популяції (хромосоми стають близькими одна до одної), крім того значно збільшується час, необхідний для проведення розрахунків.

На рис. 1 наведено значення похибки за кількістю використаних сенсорів на ітераціях генетичного алгоритму для різних розмірів популяції. З аналізу наведених залежностей видно, що використання 50 хромосом (крива 1) у популяції недостатньо, зі збільшенням розміру популяції функція похибки за кількістю використаних пристроїв зменшує своє значення (криві 2, 3 відповідають результатам, отриманим з використанням 100, 200 хромосом). Встановлено, що для розглянутої задачі існує оптимальний розмір популяції – 500 хромосом (крива 4), для якого при виконанні 300-400 ітерацій генетичного алгоритму досягається мінімум функції похибки за кількістю використаних пристроїв.

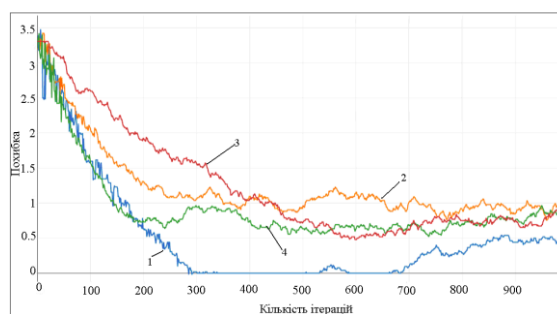
Ефективність роботи будь-якого генетичного алгоритму суттєво залежить від ефективності операції схрещування. У програмі реалізовано одноточкове схрещування; двохточкове схрещування, при якому схрещування відбувається між двома випадково обраними хромосомами популяції; схрещування трьох випадково обраних батьків, при якому біт першого батька порівнюється із відповідним бітом другого батька, якщо вони схожі, то використовуються при формуванні потомка, інакше використовується відповідний біт третього батька; однорідне схрещування, коли значення кожного біта в хромосомі потомка визначається випадковим чином із відповідних бітів батьків.

На рис. 2 наведено залежність значення похибки за кількістю використаних сенсорів, відповідно, на ітераціях генетичного алгоритму для

різних типів схрещування (крива 1 відповідає однорідному схрещуванню, 2 – односточковому схрещуванню, 3 – схрещуванню трьох випадково обраних батьків, 4 – двохточковому схрещуванню.)



**Рис. 1. – Похибка за кількістю використаних сенсорів для різних розмірів популяції**



**Рис.2 – Похибка за кількістю використаних сенсорів для різних методів схрещування**

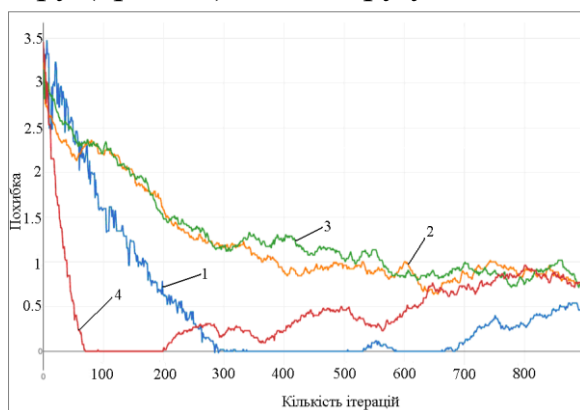
З аналізу наведених залежностей видно, що лише із використанням однорідного схрещування вдається досягти нульових значень похибки за кількістю використаних пристроїв. З використанням такого типу схрещування потомки у популяції отримують найбільшу кількість функціональних ознак, які були присутні у наборах батьків.

Процедура селекції дозволяє відібрати хромосоми у популяції, які будуть приймати участь у схрещуванні. Процедури відбору надають перевагу хромосомам, для яких цільова функція набуває найбільших значень. З аналізу наведених залежностей рис. 3 можна бачити, що використання рулеточного відбору (для обох його модифікацій) (криві 2, 3) недоцільно при розв'язанні сформульованої задачі. Значення цільової функції на ітераціях генетичного алгоритму, отримані при використанні рулеточного відбору, не наближаються до нульового значення протягом виконання ітерацій генетичного алгоритму. В той час, як використання турнірного відбору (крива 1) та відбору усіканням (крива 4) дозволяє отримати нульові значення зазначеної функції.

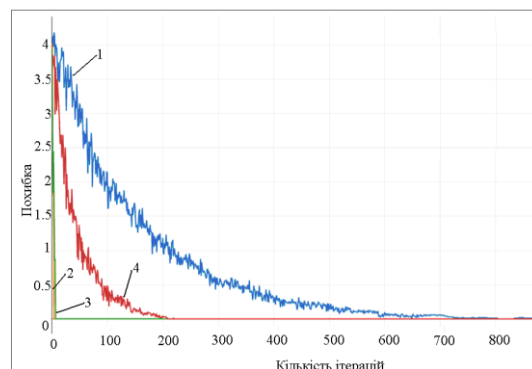
При використанні відбору усіканням спостерігається виродження популяції приблизно на 150-200 ітерації генетичного алгоритму, в той час, як розв'язок задачі ще не отримано. При використанні турнірного відбору виродження спостерігається приблизно при виконанні 550-600 ітерацій генетичного алгоритму.

На рис. 4 наведено залежність різниці між значеннями цільової функції для кращої та гіршої хромосоми на ітераціях генетичного алгоритму, отриманих з використанням різних методів селекції. Наближення значень різниці до нуля свідчить про те, що хромосоми стають ближчими одна до одної, та популяція вироджується до моменту отримання оптимального розв'язку задачі покриття. З аналізу залежностей, зображених на рис. 4, можна бачити, що найбільш швидко відбувається виродження популяції при використанні обох модифікацій рулеточного відбору (криві 2 та 3 ). Більш

повільне відновлення популяцій досягається при використанні турнірного відбору (крива 1) та відбору усіканням (крива 4).



**Рис. 3 – Похибка за кількістю використаних сенсорів для різних методів селекції**



**Рис. 4 – Різниця між значеннями цільової функції для кращої та гіршої хромосоми на ітераціях генетичного алгоритму**

Для визначення оптимальної кількості ітерацій, за яку буде отримано розв'язок задачі покриття, було проаналізовано залежності, зображені на рис. 1-4. Слід відзначити, що на всіх наведених графіках зі збільшенням кількості ітерацій генетичного алгоритму похибка суттєво змінюється до певного моменту, при подальшому збільшенні кількості ітерацій генетичного алгоритму у поведінці зазначених функцій не відбувається значного покращення, при цьому час виконання розрахунків з генетичним алгоритмом значно зростає. Тому при відсутності суттєвих змін у поведінці розв'язку задачі роботу генетичного алгоритму можна припинити.

За допомогою операції мутації створюються такі ланцюжки генів, які не входили в попереднє покоління. У той же час ця процедура може створювати даремні та «шкідливі» особи, наявність яких ускладнює пошук розв'язку. Тому вибір методу мутації та налаштування параметрів процедури, необхідно зробити так, щоб вона сприяла пошуку розв'язку.

У роботі ймовірність мутації у хромосомі популяції визначає інтенсивність мутацій та становить 1%. Оператор мутації, виконаний для хромосоми, може змінювати від 0 до 3 генів в хромосомі. Якщо відсоток ймовірності мутацій прийматиме велике значення, то хромосоми – потомки у популяції не успадковують ознаки батьків, а алгоритм не матиме змогу навчатися на основі спадкових ознак.

У роботі досліджується три види алгоритмів мутацій: інверсія гена (крива 3); інсерційна мутація (крива 2), при якій у послідовність бітів хромосоми відбувається вставка іншої послідовності; однорідна мутація (крива 1).

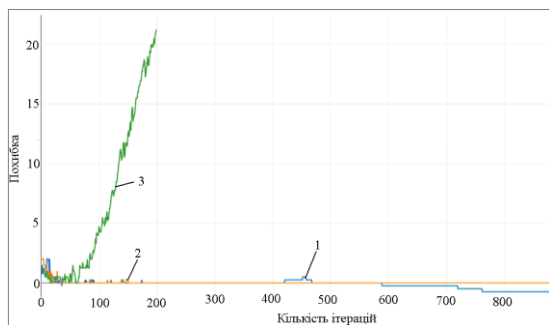
На рис. 5 та 6 наведено порівняння результатів, отриманих з використанням трьох різних методів мутації. З аналізу рисунків можна помітити, що інверсія гена (крива 3) не є корисною для розв'язання задачі при обраному способі кодування хромосоми у вигляді послідовності бітів.

Ідея інверсії гену спирається на перемиканні бітів. У початкової популяції ми маємо близько 90% порожніх пунктів, які кодовані послідовностями,

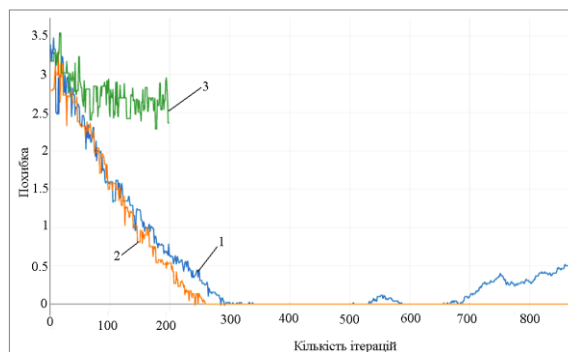


складеними з двох нулів (00). Метод інверсії гену змінює їх на послідовності з двох одиниць (11), які визначають розташування роутеру з великою ймовірністю. За результатами виконання такої мутації кількість роутерів значно зростає (рис. 5, крива 3). Також цей вид мутації не змінює кількість пристроїв, які закодовані як 01 або 10 та визначають розташування сенсорів.

На рис. 6 значення похибки за кількістю використаних сенсорів на ітераціях генетичного алгоритму для інверсії гену не зменшується (крива 3).

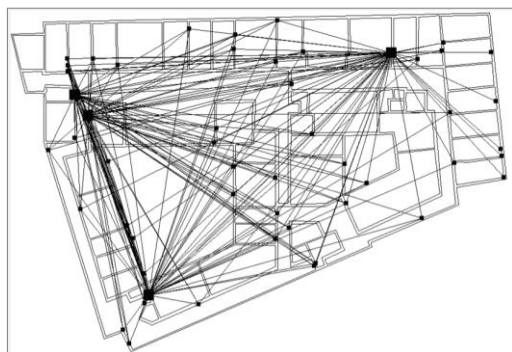


**Рис. 5 – Похибка за кількістю використаних роутерів для різних методів мутації**

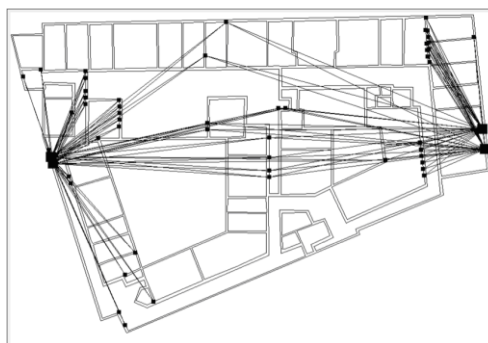


**Рис. 6 – Похибка за кількістю використаних сенсорів для різних методів мутації**

Порівняння результатів роботи алгоритму, отриманих з використанням інсерційної мутації (крива 2) та однорідної мутації (крива 3), свідчить, що вони мають приблизно однакову швидкість наближення до нульових значень похибки за кількістю використаних пристроїв. Але, оскільки при виконанні інсерційної мутації лише змінюється порядок генів без введення або видалення випадкових пристроїв, то це не призводить до значних змін у популяції, а лише дозволяє дотримуватися оптимального числа пристроїв і покращувати надійність покриття на ітераціях генетичного алгоритму (рис. 6). На рис. 7, 8 наведено декодовані результати роботи генетичного алгоритму у вигляді розташування пристроїв на плані поверху приміщення, які було отримано із використанням однорідної мутації та інсерційної мутації. Результат, отриманий з використанням інсерційної мутації (рис. 8), гірше, ніж той, який отримано із застосуванням однорідної мутації (рис. 7). При візуалізації результату на рис. 8 чотири роутери розташовані парами, на незначній відстані друг від друга.



**Рис. 7 – Декодований результат розв'язання задачі покриття із використанням однорідної мутації**



**Рис. 8 – Декодований результат розв'язання задачі покриття із використанням інсерційної мутації**



Це відбувається у зв'язку з тим, що метод інсерційної мутації об'єднує групи пристроїв для досягнення кращих показників стійкості мережі.

**Висновки.** Задачу проектування оптимальної топології бездротової сенсорної мережі сформульовано, як задачу покриття. У якості методу розв'язання обрано генетичний алгоритм. Виходячи з вигляду цільової функції задачі оптимізації сформульовано цільову функцію генетичного алгоритму. Основні генетичні оператори адаптовано до задачі проектування топології бездротових сенсорних мереж. Проведено обчислювальний експеримент, у ході виконання якого встановлено оптимальний розмір популяції; обрано процедуру однорідного схрещування, процедуру турнірного відбору; процедуру однорідної мутації. У якості критерію зупинення генетичного алгоритму обрано стагнацію результатів на ітераціях алгоритму.

#### Бібліографічні посилання

1. **Князев, Д.М.** Приложение теории графов к решению задачи топологических петель в сетях Ethernet [Текст] / Д.М. Князев, И.А. Грибанов // Сб. ст. по мат. XXXI междунар. студ. науч.-практ. конф. «Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки». – 2015. – № 4(30). – С. 54–59.
2. **Тайк, А.М.** Применение алгоритма перебора для оптимизации топологии беспроводных сетей [Text] / А.М. Тайк, С.А. Лупин, Ю.Ф. Вагапов // International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – №9. С. 80–87.
3. **Farahani, R.Z.** Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies [Text] / R.Z. Farahani, M. Hekmatfar. – Physica-Verlag, Heidelberg, Germany, 2009. – 549p.
4. **Sangwan, A.** Survey on coverage problems in wireless sensor networks [Text] / A. Sangwan, R.P. Singh // Wireless Personal Communications. – 2015. – Vol. 80, Iss. 4. – P. 1475–1500
5. **Киселева, Е.М.** Решение непрерывных задач оптимального покрытия шарами с использованием теории оптимального разбиения множеств [Текст] / Е.М. Киселева, Л.И. Лозовская, Е.В. Тимошенко // Кибернетика и системный анализ. – 2009. – № 3. – С. 98–117.
6. **Ободан, Н.І.** Оптимізація топології бездротової сенсорної мережі сповіщення [Текст] / Н.І. Ободан, М.К. Гук // Питання прикладної математики і математичного моделювання. – зб. наук праць. – 2017. – Вип. 17. – С. 154-162.

Надійшла до редколегії 22.08.2018