УДК 519.6 doi: 10.15421/321718

Н.І. Ободан, М.К. Гук
Дніпровський національний університет ім. Олеся Гончара

ОПТИМІЗАЦІЯ ТОПОЛОГІЇ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ СПОВІЩЕННЯ

Розглядається задача створення оптимальної топології бездротової сенсорної мережі як задача кругового покриття. Математична модель задачі побудови оптимального покриття області враховує додаткові умови стійкості роботи мережі. Для розв'язання задачі оптимізації використовується генетичний алгоритм. Наводяться результати обчислювального експерименту.

Рассматривается задача создания оптимальной топологии беспроводной сенсорной сети как задача кругового покрытия. Математическая модель задачи построения оптимального покрытия области учитывает дополнительные условия устойчивости работы сети. Для решения задачи оптимизации используется генетический алгоритм. Приводятся результаты вычислительного эксперимента.

The problem of creating an optimal topology of the wireless sensor network as a problem of circular cover is considered. The mathematical model of the problem of optimal coverage of the region takes into account additional conditions for the stability of the network. Genetic algorithm for solving the optimization problem is used. The results of the computational experiment are given.

Ключові слова: бездротова сенсорна мережа, топологія, кругове покриття, генетичний алгоритм

Вступ. Сучасні системи безпеки будинків являють собою автоматизовані системи керування з багаторівневою мережевою структурою на базі локальної комп'ютерної мережі, яка має загальний центр керування. Система безпеки містить лінії комунікацій, контролери отримання інформації, керівні контролери та інше периферійне обладнання, призначене для збору та обробки інформації від різних датчиків. Для оцінки стану середовища у приміщенні та можливих небезпечних ситуацій використовуються датчики температури, вологості, освітленості, задимленості, загазованості та інші.

Автоматизовані системи також виконують функції централізованого керування різними засобами реагування (оповіщення, вмикання протипожежної автоматики та систем пожежогасіння, інженерних систем).

Сучасний підхід до створення внутрішньої аварійної системи базується на побудові бездротової сенсорної мережі (Wireless Sensor Network). Мережа складається з автономних кінцевих пристроїв (сенсорів), що живляться від батареї, кожний з яких має радіочастотний модуль зв'язку та датчики для виявлення небезпечних ситуацій. Пристрої обмінюються інформацією між собою і сервером. При виявленні нестандартної ситуації сервер організує роз-

© *Ободан Н.І., Гук М.К., 2017*

силку інформаційних повідомлень спеціальним службам, а також повідомлень на мобільні пристрої відвідувачів приміщення. Таким чином, здійснюється інформування відповідних служб та користувачів системи о надзвичайної ситуації для подальшого усунення проблеми.

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

Математична модель задачі створення оптимальної топології мережі. Розглянемо задачу про оптимальну топологію бездротової сенсорної мережі в будинку як задачу покриття [1].

Область дії радіопристрою характеризується відстанню, на якої ймовірність помилки при прийомі даних менша, ніж деяка прийнятна ймовірність. Для проектування мереж у закритих приміщеннях (склад, цех, офісний будинок) необхідно враховувати затухання сигналу радіопристрою залежно від довжини шляху та можливих перешкод (стіни, стелі).

У роботі розглянемо спрощену модель радіопристрою, у якої не враховується вгасання сигналу в приміщенні, а область дії радіопристрою описується колом. Тоді задача покриття на області зводиться до задачі побудови кругового покриття.

Нехай задана замкнена обмежена область $\Omega \subset R^2$ із кусочно-гладкою границею. Границя може бути сформована із фрагментів аналітично описаних кривих (відрізків прямих, дуг кіл).

Область дії кожного радіопристрою описується колом B_i, $B = \left\{ B_i, i = \overline{1,M} \right\}$ – множина кіл. Колом B_i радіуса r із центром у точці X_i будемо називати множину з R^2 виду:

$$B(X_i, r) = \left\{ X \middle| \quad X \in R^2, c(X, X_i) \le r \right\}, \tag{1}$$

де $c(X, X_i)$ – відстань від заданого центру X_i і-го кола до точки $X \in \Omega$.

У роботі для визначення відстані між точками $X = (x, y)$ й $X_i = (x_i, y_i)$ прийнята евклідова метрика:

$$c(X, X_i) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}. \tag{2}$$

Передбачається, що $B_i = B_i(X_i) = B_i(x_i, y_i)$, точка X_i збігається із центром кола B_i. Вектор $X_i = (x_i, y_i)$ називається вектором параметрів розміщення кола B_i.

Побудуємо об'єднання

$$\Psi = \bigcup_{i=1}^{n} B_i. \tag{3}$$

Множина Ψ називається круговим покриттям області Ω, якщо $\Omega \subseteq \Psi$.

Необхідно знайти покриття Ψ області Ω, оптимальне відповідно до деякого критерію якості $Q(X)$, $X = \left\{ X_n, \ n = \overline{1,N} \right\}$.

При моделюванні топології мережі необхідно розрізняти ролі пристроїв. Кінцеві пристрої здійснюють збір даних про параметри зовнішнього середовища (температуру, тиск, задимлення, рівень вологості) та передачу їх на сервер за допомогою ретрансляції від вузла до вузла засобами бездротового зв'язку. Роутери здійснюють прийняття інформації від кінцевих пристроїв мережі з метою її ретрансляції до сервера, а також передачу даних від сервера на кінцеві пристрої. Керування всіма вузлами мережі, а також прийняття рішень у випадку нестандартної ситуації здійснюється сервером (центром обробки інформації).

Позначимо через X_p точки розміщення роутеров. Тоді вектор $X_p = \left(x_p, y_p\right)$ – вектор параметрів розміщення кола в покритті, який утворюється p-им роутером. Якщо X_k – точки розміщення кінцевих пристроїв, то $X_k = \left(x_k, y_k\right)$ – вектор параметрів розміщення кола в покритті, який утворюється k-им кінцевим пристроєм. Тут $p = \overline{1, N_1}$, $k = \overline{1, N_2}$; N_1 – загальне число роутеров, N_2 – загальне число кінцевих пристроїв. У якості сервера обирається один з роутерів.

Введемо множину координат центрів роутерів P, ($P \subset X$) і множину координат центрів кінцевих пристроїв K, ($K \subset X$); $X_p \in P$, $X_k \in K$, $p = \overline{1, N_1}$, $k = \overline{1, N_2}$. Тоді $\left\{X_k, X_p\right\}$ – сукупність центрів кіл, які утворюють покриття множини Ω колами $B\left(X_p, r_1^{(p)}\right)$, $B\left(X_k, r_2^{(k)}\right)$ радіусів $r_1^{(p)}$, $r_2^{(k)}$, де $r_1^{(p)}$ – радіус покриття p-ого роутера, $r_2^{(k)}$ – радіус покриття k-ого кінцевого пристрою.

Необхідно розмістити на області Ω центри кіл X_k, X_p так, щоб

$$mes\left(\Omega \bigcap \left[\left(\bigcup_{p=1}^{N_1} B\left(X_p, r_1^{(p)}\right)\right) \bigcup \left(\bigcup_{k=1}^{N_2} B\left(X_k, r_2^{(k)}\right)\right)\right]\right) \Rightarrow max. \qquad (4)$$

Виділимо підмножини $\Omega^{(i)}$ множині Ω, які виникають при покритті множини Ω колами із центрами X_k, X_p:

– підмножина точок області Ω, яка не покрита колами

$$\Omega^{(1)} = \Omega \setminus \left[\left(\bigcup_{p=1}^{N_1} B\left(X_p, r_1^{(p)}\right)\right) \bigcup \left(\bigcup_{k=1}^{N_2} B\left(X_k, r_2^{(k)}\right)\right)\right]; \qquad (5)$$

– множина точок, що належать області Ω та перетину двох і більш кіл покриття

$$\Omega^{(2)} = \Omega \bigcap \left(\bigcup_{i=1}^{N_1+N_2} \bigcup_{j=1, i\neq 1}^{N_1+N_2} \left(B\left(X_i, r_i\right) \bigcap B\left(X_j, r_j\right)\right)\right); \qquad (6)$$

– множина точок, які належать хоча б одному з кіл покриття, але не належать області Ω

$$\Omega^{(3)} = \left[\left(\bigcup_{p=1}^{N_1} B\left(X_p, r_1^{(p)} \right) \right) \bigcup \left(\bigcup_{k=1}^{N_2} B\left(X_k, r_2^{(k)} \right) \right) \right] \setminus \Omega . \quad (7)$$

Для побудови оптимального покриття множини Ω системою кіл із центрами X_k, X_p необхідно, щоб міра множини $\Omega^* = \bigcup_{i=1}^{3} \Omega^{(i)}$ була мінімальною:

$$mes\, \Omega^* \Rightarrow min . \quad (8)$$

Для забезпечення відмовостійкості бездротової сенсорної мережі необхідно передбачити можливість з'єднання кінцевого пристрою 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. Сформулюємо умови відмовостійкості у такий спосіб:

1. Кожний кінцевий пристрій повинен з'єднуватись з двома роутерами

$$\sum_{k=1}^{N_2} \sum_{j=1}^{2} \left(r_1^{(p)} - c\left(X_k, X_{pj} \right) \right) \geq 0, \quad (9)$$

де X_k – координата k-ого кінцевого пристрою; X_{pj} – координата роутера, який бачить k-ий кінцевий пристрій, розміщений у точці X_k; $p = \overline{1, N_1}$; $j = 1,2$.

2. Кожний роутер повинен з'єднуватись хоча б ще з одним роутером

$$\sum_{p=1}^{N_1} \left(r_1^{(p)} - c\left(X_p, X_{pi} \right) \right) \geq 0, \quad (10)$$

де X_p – координата роутера; X_{pi} – координата роутера, якого бачить p-ий роутер, розміщений у точці X_p; $p_i = \overline{1, N_1}$; $p \neq p_i$.

Розглянемо функцію $f\left(X, \bar{X}, r \right) = \left| c\left(X, \bar{X} \right) - r \right|$, за допомогою якої будемо визначати, чи покриває пристрій з радіусом дії r, розташований в точці $\bar{X}$, точку $X \in \Omega$.

Для забезпечення виконання умови (8) побудуємо цільовий функціонал у такий спосіб:

$$Q\left(X_p, X_k \right) = \sum_{i=1}^{3} \left[\sum_{p=1}^{N_1} \int\limits_{\Omega_p^{(i)}} f\left(X, X_p, r_1^{(p)} \right) d\Omega + \sum_{k=1}^{N_2} \int\limits_{\Omega_k^{(i)}} f\left(X, X_k, r_1^{(k)} \right) d\Omega \right], \quad (11)$$

де $\Omega_p^{(i)} = \Omega^{(i)} \bigcap \Omega_p$, $i = 1,2$;

$$\Omega_p^{(3)} = \left\{ X \in \bigcup_{p=1}^{N_1} B\left(X_p, r_1^{(p)} \right), \quad \exists\ p \mid \quad c\left(X, X_p \right) - r_1^{(p)} \leq 0 \right\};$$

$\Omega_k^{(i)} = \Omega^{(i)} \bigcap \Omega_k$, $i = 1,2$;

$$\Omega_k^{(3)} = \left\{ X \in \bigcup_{k=1}^{N_2} B\left(X_k, r_1^{(k)}\right), \quad \exists\, k \mid \quad c\left(X, X_k\right) - r_2^{(k)} \le 0 \right\}.$$

Тоді $\Omega^{(3)} = \bigcup_{p=1}^{N_1} \bigcup_{k=1}^{N_2} \Omega_p^{(3)} \Omega_k^{(3)}$.

Функції $f\left(X, X_p, r_1^{(p)}\right)$, $f\left(X, X_k, r_2^{(k)}\right)$ необхідно обирати так, щоб їх значення в граничних точках підмножин $\Omega_p^{(i)}$, $\Omega_k^{(i)}$, які водночас є й граничними точками кіл $B\left(X_p, r_1^{(p)}\right)$, $B\left(X_k, r_2^{(k)}\right)$, дорівнювали нулю:

$$f\left(X_{max_{\Omega_p}}, X_p, r_1^{(p)}\right)\Big|_{X_p \in \Omega^*} = 0; \quad f\left(X_{max_{\Omega_k}}, X_k, r_2^{(k)}\right)\Big|_{X_k \in \Omega^*} = 0.$$

Тоді цільовий функціонал задачі може бути поданий у вигляді:

$$Q\left(X_p, X_k\right) = \sum_{i=1}^{3} \left[\sum_{p=1}^{N_1} \int_{\Omega_p^{(i)}} \left| c\left(X, X_p\right) - r_1^{(p)} \right| d\Omega + \sum_{k=1}^{N_2} \int_{\Omega_k^{(i)}} \left| c\left(X, X_k\right) - r_2^{(k)} \right| d\Omega \right]. \quad (12)$$

Для врахування додаткових умов (9), (10), що забезпечують стійкість мережі, будемо використовувати метод штрафних функцій. Приєднаємо штрафну функцію до функціоналу (12) у такий спосіб:

$$\bar{Q}\left(X_p, X_k, \alpha\right) = Q\left(X_p, X_k\right) + \alpha \left(\sum_{k=1}^{N_2} \sum_{j=1}^{2} \frac{1}{\left(r_1^{(p)} - c\left(X_k, X_{pj}\right)\right)} + \sum_{p=1}^{N_1} \frac{1}{\left(r_1^{(p)} - c\left(X_p, X_{pi}\right)\right)} \right), \quad (13)$$

де α – додатна величина.

Таким чином, задачу пошуку мінімуму функціоналу (12) з обмеженнями (9), (10) зведено до задачі безумовної оптимізації функціоналу (13). Значення α необхідно обирати досить малим, для того щоб в околі точки мінімуму вплив функції штрафу був малим. Тоді точка мінімуму функції без обмежень $\bar{Q}\left(X_p, X_k, \alpha\right)$ буде збігатися з точкою мінімуму функції $Q\left(X_p, X_k\right)$ при наявності обмежень (9), (10).

Метод розв'язання задачі створення оптимальної топології бездротової сенсорної мережі. У якості методу розв'язання сформульованої задачі оптимізації (13) будемо використовувати генетичний алгоритм.

Генетичні алгоритми (ГА) представляють клас надійних і ефективних оптимізаційних засобів, придатних для розв'язання наукових і інженерних задач [3, 4]. Задача створення оптимальної топології бездротової сенсорної мережі характеризується нелінійним характером цільової функції та великою кількістю змінних.

У якості області $\Omega \subset R^2$, на якій необхідне розгорнути бездротову сенсорну мережу, розглядається двовимірний план поверху будинку.

Для розв'язання задачі проектування бездротової сенсорної мережі виконується дискретизація області $\Omega \subset R^2$. Область покривається рівномірною сіт-

кою, яка складається з вузлів $X_n \in M$, $n=\overline{1,N}$, де M – множина вузлів дискретизації. На рис. 1 наведено приклад двовимірної області $\Omega \subset R^2$ та результат її дискретизації.

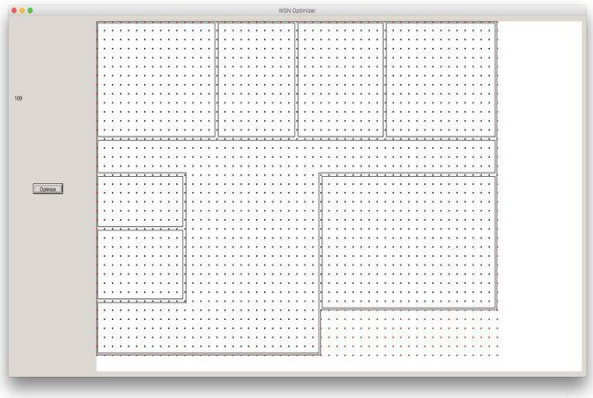


Рис.1 План поверху будівлі, дискретизація області сіткою з вузлами X_n

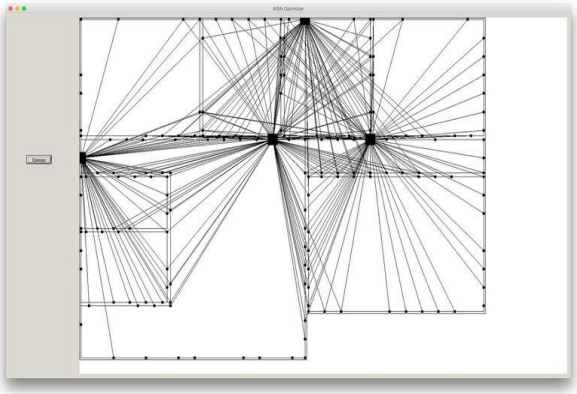


Рис. 2 Варіант топології мережі (хромосома з початкової популяції H_0), генерований випадковим чином

Радіопристрої (роутери, кінцеві пристрої) $X_p \in P$, $X_k \in K$ розташовуються у вузлах сітки $X_n \in M$, які належать $S = \bigcup S_l$, де S_l – ділянки ліній $x = const$ або $y = const$; $P \subset M$; $K \subset M$. Таким чином виконуються технічні умови – радіопристрої розташовуються на стінах приміщення на заздалегідь визначеній висоті.

Генетичний алгоритм – це ітераційна процедура, яка обробляє групу хромосом (розв'язків задачі), що мають назву популяція. У якості хромосоми (розв'язку задачі) будемо використовувати вектор, складений з номерів вузлів сітки, у яких розміщаються кінцеві пристрої й роутери.

Розглянемо механізм кодування хромосоми. Один з найпоширеніших способів сформувати хромосому – кодувати значення змінних у бітовому векторі. Для кожного вузла сітки виділяється по 2 біта. Кодування інформації про розміщення радіопристрою (кінцевого пристрою, роутера) у вузлі сітки виконується в такий спосіб:

00 – радіопристрій (роутер або кінцевий пристрій) у вузлі не розміщено;
01 – у вузлі розміщений кінцевий пристрій;
10 – у вузлі розміщений кінцевий пристрій;
11 – у вузлі розміщений роутер.

На початковій стадії виконання генетичного алгоритму ініціалізується певна популяція хромосом, у якій елементи масиву (біти), заповнені випадковим чином. Розмір популяції при розв’язанні дорівнював 30 хромосомам. Для генерації популяції використовувались різні варіанти розміщення кінцевих пристроїв у вузлах дискретизації області. Набір хромосом для початкової популяції генерувався випадковим чином. На рис. 2 наведено розташування пристроїв на плані приміщення (варіант топології мережі), що відповідає однієї випадково сгенерованій хромосомі у початковій популяції. На рис. 2 чо-

рними точками позначено місце розташування кінцевих пристроїв, чорні квадрати відповідають місцю розташування роутерів.

У генетичному алгоритмі якість хромосоми оцінюється з точки зору пристосованості. Для обчислення пристосованості кожної хромосоми у популяції використовувалася цільова функція задачі. Цільова функція (13) характеризує якість розв'язку задачі покриття, який відповідає даній хромосомі (варіанту топології мережі).

У процесі обробки популяції до неї послідовно застосовуються різні генетичні оператори, такі як кросинговер, мутація, із заданими ймовірностями P_s й P_m відповідно. На кожній ітерації кращий розв'язок з поточної популяції використовується для формування нової популяції, після чого цикл (генерація) повторюється. Число циклів визначається числом генерацій T.

У роботі для реалізації генетичного алгоритму використовувалась наступна схема:

Крок 1. Задати розмір популяції M, число генерацій T, імовірність кросинговеру P_s й імовірність мутації P_m.

Крок 2. Задати випадковим чином початкову популяцію H_0 розміром M.

Крок 3. $t=0\left(t=1,2,...,T\right)$.

Крок 4. Вибір випадковим чином М пар хромосом з популяції $H\left(t\right)$ й застосування операції кросинговеру до кожної пари із заданою ймовірністю P_s.

Крок 5. Застосування операції мутації до кожної хромосоми популяції $H\left(t\right)$ із заданою ймовірністю P_m.

Крок 6. Відбір M хромосом, які забезпечують найкращі значення цільової функції (13), з попередньої популяції $H\left(t\right)$ до нової популяції $H\left(t+1\right)$.

Крок 7. $t=t+1$

Крок 8. Якщо $t<T$, то перехід до кроку 4.

Крок 9. Відбір хромосоми з найкращим значенням цільової функції.

Крок 10. Трансформація з фенотипу в генотип для відображення результатів роботи алгоритму.

На рис. 2, 3, 4 зображено етапи роботи генетичного алгоритму.

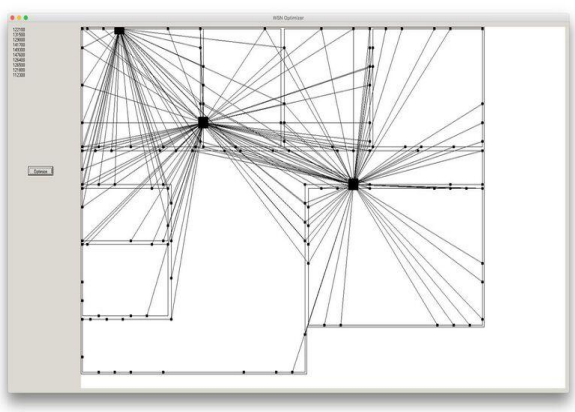


Рис. 3 Етап роботи генетичного алгоритму, $t=10$

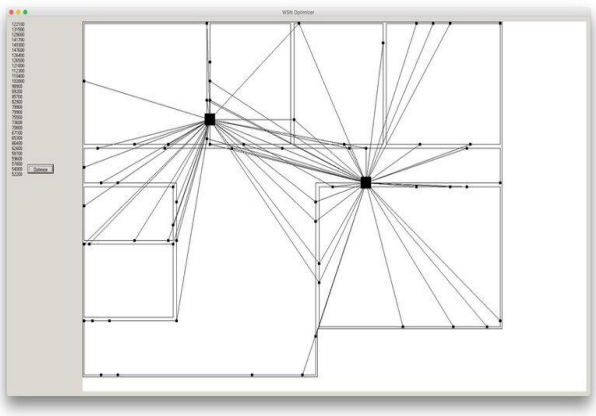


Рис. 4 Етап роботи генетичного алгоритму, $t=30$

Для реалізації генетичного алгоритму було обрано мову програмування C#. У програмному продукті було розроблено структури для зберігання даних про план будинку, інформації стосовно розташування пристроїв мережі, даних про хромосоми і популяції.

Програма складається з декількох класів (модулів). Модуль роботи із планами будинків здійснює перетворення інформації з файлів типу json, та забезпечує збереження, графічне відображення плану будівлі на екранній формі.

Для забезпечення стійкої роботи генетичного алгоритму виконувалось налаштування параметрів – числа генерацій T, розміру популяції M. Встановлено, що тривалість еволюційного процесу відповідає за властивість генетичного алгоритму уникати локальних екстремумів при пошуку розв'язків, а розмір популяції та значення імовірності мутації впливають на поступове покращення розв'язків у кожній новій популяції.

Висновки.

1. Задача створення оптимальної топології бездротових сенсорних мереж сформульована як задача покриття.
2. Сформульовано цільову функцію й систему обмежень, що забезпечують оптимальне покриття області і виконання додаткових умов відмовостійкості мережі.
3. У якості методу розв'язання задачі оптимізації обрано генетичний алгоритм. Основні генетичні оператори (селекція, кросинговер, мутація, формування початкової популяції) адаптовано стосовно до задачі проектування топології бездротових сенсорних мереж.
4. Розроблено адаптивний алгоритм, що забезпечує швидку збіжність до розв'язку, здійснено налаштування параметрів алгоритму, виконано його програмну реалізацію.
5. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує розв'язання задачі та відображає отриманий розв'язок (топологію бездротової сенсорної мережі для плану поверху у будівлі) у графічної формі.

Бібліографічні посилання

1. **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.
2. **Панкратов, А.В.** Метод регулярного покрытия прямоугольной области кругами заданного радиуса [Текст] / А.В. Панкратов, В.Н. Пацук, Т.Е. Романова // Радиоэлектроника и информатика. – 2002. – № 1 (18). – С. 50–52
3. **Maaranen, H.** On Initial Populations of a Genetic Algorithm for Continuous Optimization Problems [Text] / H. Maaranen, K. Miettinen, A. Penttinen // Journal of Global Optimization. – 2007. – Pp. 405-436.
4. **Sangwan, A.** Survey on coverage problems in wireless sensor networks [Text] / A. Sangwan, R.P. Singh // Wireless Personal Communications. – 2015. – Vol. 80, Issue 4. – P. 1475–1500.

Надійшла до редколегії 24.04. 2017