

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПОКРИТТЯ ТЕРИТОРІЇ ДАТЧИКАМИ ІЗ ЗАДАНИМ РІВНЕМ ПЕРЕТИНУ ТА МІНІМІЗАЦІЄЮ ВИТРАТ

Завдяки стрімкому розвитку технологій, зокрема інформаційних, сенсори набули широкого розповсюдження та застосування у всіх галузях людської діяльності. Особливого використання сенсори та сенсорні мережі набули під час виконання збору та обробки даних різного типу. При проведенні моніторингу певної території виникає проблема максимального її покриття для збільшення інформативності та повноти накопичених даних. Одночасно з перевагою автономного використання датчиків виникає проблема тривалості роботи датчику. Дана величина залежить від ємності акумулятора. В свою чергу перед інженерами стоїть задача мінімізації конструкції датчиків, наслідком чого є зменшення об'єму акумулятора одночасно із всіма іншими компонентами. Також очевидним є факт того, що при збільшенні радіусу охоплення сенсору збільшуються енерговитрати, що в свою чергу скорочує термін використання сенсору. Крім енерговитрат, у статті до розгляду беруться витрати на обслуговування та придбання датчиків. Таким чином, крім максимізації відсотку покриття досліджуваної території виникає проблема мінімізації сумарних витрат. Очевидно, що для забезпечення передачі даних між датчиками необхідною умовою є наявність перетину зон покриття сенсорів. У даному випадку розглядається константне значення даного параметру. У матеріалах запропоновано підхід вирішення проблеми максимізації покриття території з мінімізацією витрат із заданим рівнем перетину зон покриття датчиків. Запропонований підхід ґрунтується на розв'язанні багатокритеріальної задачі нелінійного програмування. Також одним із варіантів вирішення описаної проблеми запропоновано зведення цільових функцій до однієї шляхом використання зваженої згортки критеріїв. Крім того у статті запропоновано ітераційний підхід вирішення описаної проблеми. Проведено ряд комп'ютерних експериментів. Результати проведених обчислювальних експериментів підтверджують можливість використання запропонованої інформаційної технології як у вигляді оптимізаційної проблеми так і у вигляді ітераційного процесу.

Ключові слова: датчик, покриття території, інформаційна технологія, багатокритеріальна оптимізація, нелінійна оптимізація.

Вступ. Завдяки широкому спектру застосування сенсори та сенсорні мережі набули широкого розповсюдження. Серед основних переваг сенсорів можна виділити можливість автономної роботи у поєднанні із варіативністю досліджуваної величини. Дані переваги дозволяють широко застосовувати сенсори та сенсорні мережі для виконання задач збору та обробки інформації. Під час здійснення моніторингу ключовим аспектом є максимальне покриття досліджуваної території. Автономність роботи датчиків залежить від об'єму акумулятора. Таким чином виникає проблема збільшення терміну використання сенсорів. Для передачі даних необхідною умовою є наявність перетину зон покриття елементів сенсорної мережі. Таким чином, розглядається задача максимального покриття території датчиками із заданим рівнем перетину та мінімізацією витрат.

Метою статті є створення інформаційної технології вирішення задачі максимального покриття території сенсорами із заданим рівнем перетину та мінімізацією енерговитрат.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У наш час датчики набули значного застосування завдяки ряду переваг: розмір, автономність, доступність, мобільність [1, 2]. Також датчики використовують для виконання ряду певних задач, що пов'язані із збором та обробкою інформації [3], серед яких поширеною є задача моніторингу, тобто задача оптимального покриття території заданим числом датчиків з відповідними характеристиками [4]. У роботі [5] представлено розгляд технології екологічного моніторингу, а також

вирішення задачі розміщення сенсорів в багатокутній зоні спостереження з наявністю перешкод. Також у роботі наведено порівняльний аналіз використаних евристик SC, BC та HC. У працях [6, 7] описано алгоритми та методи розв'язання задачі моніторингу та оптимального розташування сенсорів. Алгоритм оптимального розташування сенсорів для визначення структурних пошкоджень різних видів техніки представлено у [8]. У [7, 9] представлено оптимальну стратегію розміщення датчиків для моніторингу навколишнього середовища за допомогою бездротових сенсорних мереж. Оптимізація розміщення датчиків з використанням градієнтного спуску та імовірнісного покриття представлена у роботі [10]. В свою чергу, у праці [11] представлено підхід зменшення енерговитрат сенсорної мережі шляхом регуляції зон покриття датчиків.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо двовимірну прямокутну територію з розмірами a та b , позначимо її A . Нехай дано датчики, що мають однакову величину вимірювання та змінний радіус покриття r з максимальним значенням r^{max} . Під зоною покриття сенсору будемо вважати коло з центром у певній точці зони A з координатами (x, y) та радіусом r . Враховуючи, що коло з радіусом r можна вписати у квадрат зі стороною $2r$, задачу покриття прямокутної області A розглянемо як задачу квадратної однорідної упаковки [12], що схематично може бути представлена наступним чином (рис. 1):

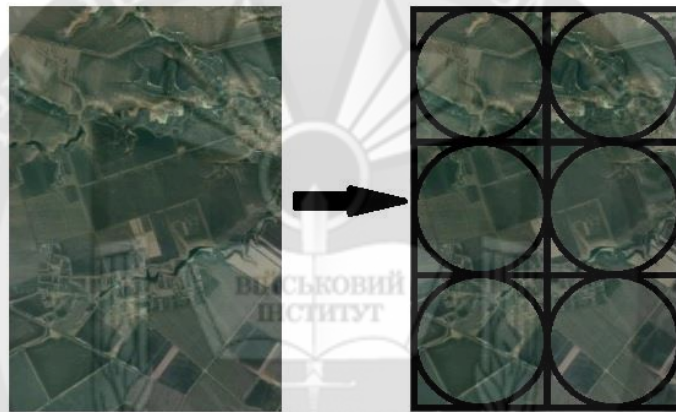


Рисунок 1 – Покриття території датчиками без перетину зон покриття

Очевидно, що під час вимірювання, можливою є ситуація наявності зон перетину покриття сенсорів, позначимо дану величину c [11]. Схематично дану величину можна зобразити наступним чином (рис. 2).

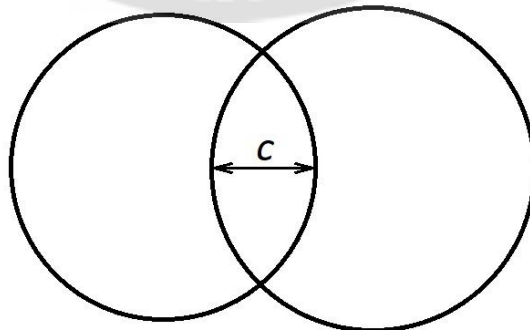


Рисунок 2 – Значення величини c

З урахуванням величини перетину зон покриття датчиків та еквівалентності радіусів покриття територію, що представлена на рис. 1 можна покрити наступним чином (рис. 3):



Рисунок 3 – Покриття території з урахуванням зон перетину

У описаному вище випадку досягається повне покриття території. Візьмемо до розгляду енерговитрати сенсору, що впливають на термін його використання та на період активного покриття території. Розглянемо обчислення витрат згідно з [11]:

$$Bc_i = \frac{r_i}{r_i^{max}} Bc_i^{max}, \quad (1)$$

де r_i – поточний радіус охоплення датчику, r_i^{max} – максимальний радіус охоплення датчику, Bc_i^{max} – витрати енергії при максимальному радіусу охоплення.

Очевидно, що при максимальному покритті термін використання сенсору є мінімальним. Враховуючи даний факт та наявність перетину зон покриття сформулюємо задачу максимального покриття території датчиками із заданим рівнем перетину та мінімізацією витрат у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} Z(r, c) &\rightarrow \max \\ E(r, c) &\rightarrow \min \end{aligned} \quad (2)$$

де $E(r, c) = nBc$, $n = \left\lfloor \frac{ab}{(2r-c)^2} \right\rfloor$, Bc – енерговитрати сенсору (1), r – радіус покриття сенсору, c – величина зони перетину датчиків, a та b – розміри зони.

У рівнянні (2) величина зони покриття $Z(r, c)$ обчислюється як різниця між загальною покритою територією та площею перетинів зон покриття сенсорів у наступному вигляді:

$$Z(r, c) = Z_{covered}(r, c) - Z_{intersected}(r, c). \quad (3)$$

Враховуючи припущення, що зоною покриття датчику є коло з центром у певній точці (x, y) та радіусом r , величина $Z_{covered}(r, c)$ буде рівною:

$$Z_{covered}(r, c) = N(r, c)\pi r^2, \quad (4)$$

де $N(r, c) = \left\lfloor \frac{ab}{(2r-c)^2} \right\rfloor$, a, b – розмір зони.

Значення площі перетину зон покриття сенсорів обчислимо використовуючи [13] з урахування рівності радіусів у наступному вигляді:

$$Z_{intersected}(r, c) = m \frac{r}{2} (K(r, c) - \sin(K(r, c))), \quad (5)$$

де $K(r, c) = 2\arcsin\left(\frac{\sqrt{r^2 - (r - \frac{c}{2})^2}}{r}\right)$, m – кількість перетинів.

Будемо вважати, що зона покриття кожного сенсору перетинається або виходить за межі зони з 4 сторін, тобто $m = 4n$.

Очевидно, площа покрита сенсорами не повинна перевищувати площі досліджуваної зони. Для виконання даної умови перетворимо функцію (3) у наступному вигляді:

$$Z(r, c) = ab - Z_{covered}(r, c) + Z_{intersected}(r, c). \quad (6)$$

Згідно з перетворенням (6), функція (2) набуде наступного вигляду:

$$\begin{aligned} Z(r, c) &\rightarrow \min \\ E(r, c) &\rightarrow \min \end{aligned} \quad (7)$$

Будемо вимагати виконання наступних обмежень:

$$0 \leq r \leq r^{max}, \quad (8)$$

$$0 \leq c \leq r^{max}. \quad (9)$$

Отримана задача (7)-(9) є багатокритеріальною задачею нелінійного програмування.

Використавши метод згортки критеріїв [14] отримаємо задачу нелінійного програмування у наступному вигляді:

$$F(r, c) = \alpha_1 Z(r, c) + \alpha_2 E(r, c) \rightarrow \min, \quad (10)$$

$$0 \leq r \leq r^{max}, \quad (11)$$

$$0 \leq \alpha_1 \leq 1, 0 \leq \alpha_2 \leq 1, \quad (12)$$

$$0 \leq c \leq r^{max}. \quad (13)$$

Розв'язком задачі (10)-(13) є певне значення радіусу покриття сенсору r^* за якого досягається максимізація покриття з заданим рівнем перетину зон покриття датчиків c при мінімізації енерговитрат. Положення сенсорів будуть рівновіддаленими один від одного на величину $2r^*$.

У випадку зони довільної форми запропонований підхід можна застосувати за умови доповнення зони до прямокутної (рис. 4).

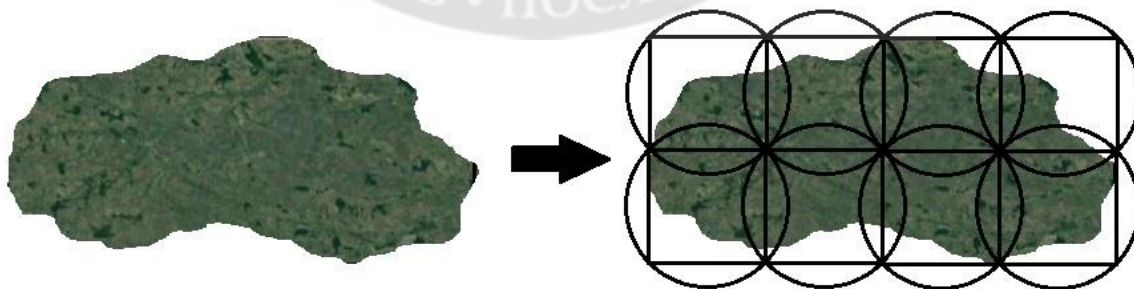


Рисунок 4 – Отримання прямокутної зони

Після отримання розв'язку задачі (10) – (13) необхідно відкинути сенсори покриття яких знаходиться за межами зони або зона покриття сенсору покриває зону менше ніж на $\beta\%$.

Також для розв'язання описаної вище проблеми запропонуємо ітераційний підхід, що може бути описаний наступними кроками:

1. Формуємо за необхідності прямокутну зону;

2. Заповнюємо отриману зону сенсорами з радіусами покриття $r = r^{max}$;
3. Відкидаємо сенсори, що покривають зону менше ніж на $\beta\%$.
4. Обчислюємо значення $Z_i(r_i, c)$, $E_i(r_i, c)$ для кроку i .
5. Перевіряємо умову $r_i \leq r_{min}$ та у разі невиконання зменшуємо значення радіусу на величину Δr та переходимо до кроку 3;
6. Серед отриманих значень покриття та витрат обираємо оптимальні за Парето.

Результати обчислювальних експериментів. У даному розділі представлені результати комп'ютерного моделювання з використанням відомих та запропонованого підходів при розв'язанні описаної проблеми. Нехай необхідно знайти оптимальне співвідношення між радіусом покриття та величиною зони перетину при покритті заданої території (рис. 5). Після використання запропонованого підходу отримали зону з розмірами 200×100 умовних одиниць. Відомо, що радіус покриття сенсорів $r^{max} = 10$ умовних одиниць. Розв'язавши задачу у вигляді (7)-(9) або у вигляді (10)-(12) із урахуванням даних параметрів отримаємо множину Парето-оптимальних рішень. Розв'язок можна зобразити наступним чином (рис. 6).



Рисунок 5 – Зона для покриття

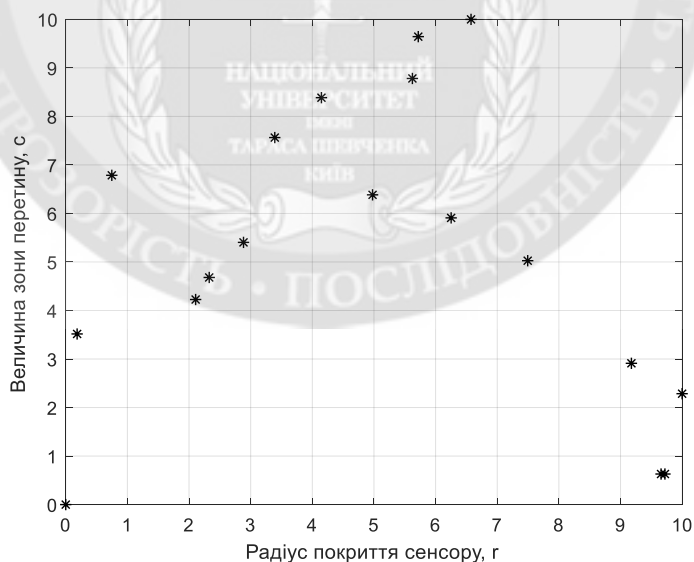


Рисунок 6 – Множина оптимальних співвідношень радіусу покриття та величини зони перетину

Розглянемо задачу оптимального покриття території (рис. 7) датчиками з сталим рівнем перетину зон покриття $c = 3$ та параметрами $r^{max} = 15$, $Bc^{max} = 10000$. Використавши описаний вище підхід отримаємо наступне значення радіусу при розв'язанні задачі у формі (7)-(9) $r^* = 7.048$. Під час розв'язання задачі у вигляді (10)-(13) при значеннях $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ оптимальне значення радіусу буде рівним $r^* = 7.065$. Результатом використання

запропонованого ітераційного алгоритму є значення $r^* = 7$. Відповідно до отриманих результатів розташування сенсорів схематично можна зобразити наступним чином (рис. 7):

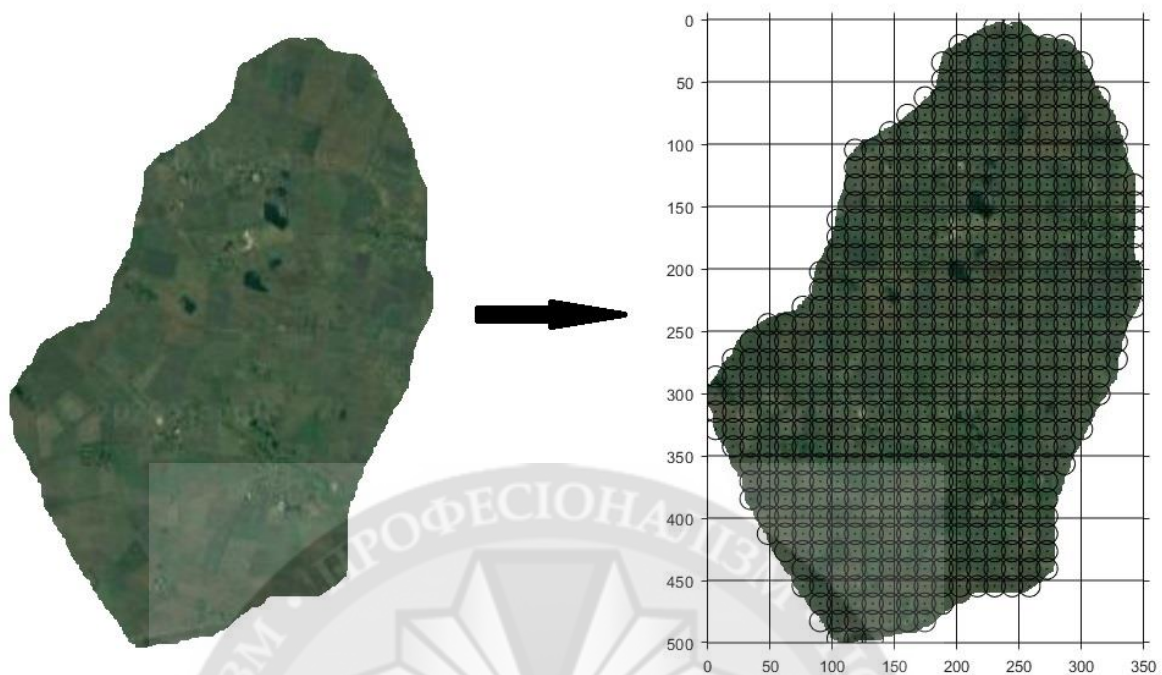


Рисунок 7 – Покриття обраної зони з допустимим рівнем перетину $c = 3$

Висновки. У статті представлено підхід вирішення задачі максимізації покриття території сенсорами із заданим рівнем перетину зон покриття та мінімізацією витрат. Під витратами мається на увазі енерговитрати, що можуть бути поєднані із витратами на обслуговування датчиків. Величина перетину зон покриття розглядалася як стала величина для всіх сенсорів. Представлена задача описана як багатокритеріальна задача нелінійного програмування. Одним із запропонованих підходів вирішення поставленої задачі є використання методу згортки цільових функцій. Також запропоновано ітераційний алгоритм розв'язання описаної проблеми. Представлені результати обчислювальних експериментів підтверджують доцільність використання запропонованих підходів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Pandey, M., Mishra, G. Types of Sensor and Their Applications, Advantages, and Disadvantages. / Emerging Technologies in Data Mining and Information Security. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2019 № 814. Springer, Singapore. Pp. 791-804.
2. Michalaki, P., Quddus, M., Pitfield, D., Mageean, M., Huetson, A. A Sensor-based System for Monitoring Hard-shoulder Incursions: Review of Technologies and Selection Criteria / MATEC Web of Conferences. 2016. № 81. С. 1-8.
3. Argyriou, A. Data Collection from Resource-Limited Wireless Sensors for Cloud-Based Applications. / GLOBECOM 2015 - 2015 IEEE Global Communications Conference. 2014.
4. Геоматика в моніторингу довкілля та оцінці загрозливих ситуацій : монографія / [О. Л. Дорожинський та ін.] ; за ред. проф. Олександра Дорожинського ; Нац. ун-т "Львів. політехніка". - Львів : Вид-во Львів. політехніки, 2016. - 399 с. : рис. - ISBN 978-617-607-923-1.
5. Данилюк С. Л. Концептуальні підходи до вирішення задачі оптимального розміщення сенсорів в області екологічного моніторингу / С. Л. Данилюк. // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки оборони. 2016. №26. С. 45–48.
6. Кочкаров, А.А., Яцкин, Д.В. Алгоритм поиска оптимального расположения сенсоров для решения задачи мониторинга пространства // Программные продукты и системы. 2016. №3 (115).
7. Krishnamurthy, P., Khorrami, F. Optimal Sensor Placement for Monitoring of Spatial Networks / IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. 2017. № 1(15). С. 33-44.

8. Li, C.H., Yang, Q.W. Optimal Sensor Placement Algorithm for Structural Damage Identification / Recent Patents on Engineering. 2020. № 14(69). Pp. 69-81.
9. Castello, C., Fan, J., Davari, A., Chen, R-X. Optimal sensor placement strategy for environmental monitoring using Wireless Sensor Networks / Proceedings of the Annual Southeastern Symposium on System Theory. 2010. Pp. 275 - 279.
10. Akbarzadeh, V., Lévesque, J., Gagne, C., Parize, M. Efficient sensor placement optimization using gradient descent and probabilistic coverage [Електронний ресурс] Sensors (Basel), 2014. № 8(14). Режим доступу до журн.:<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4179027/>.
11. Петрівський, В.Я., Шевченко, В.Л., Бражиненко, М.Г. Збільшення часу роботи датчиків шляхом регулювання енерговитрат / Системи обробки інформації. 2019. № 3(158). С. 36-41.
12. Stoyan, Y.G., Yaskov, G.N. Packing identical spheres into a cylinder / International Transactions in Operational Research. 2010. № 17. С. 51–70.
13. Petrivskiy, V., Shevchenko, V., Bychkov, O., Brazhenenko, M. Information technology of the increasing sensors term of use considering their movement / 2020 IEEE 16-th International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH). 2020. Pp.86-89.
14. Wesner, N. Multiobjective Optimization via Visualization / Economics Bulletin, 2017. № 2(37). Pp. 1226–1233.

REFERENCES:

1. Pandey, M., Mishra, G. (2019), "Types of Sensor and Their Applications, Advantages, and Disadvantages", Emerging Technologies in Data Mining and Information Security. Advances in Intelligent Systems and Computing, No. 814. Springer, Singapore. pp. 791-804.
2. Michalaki, P., Quddus, M., Pitfield, D., Mageean, M., Huetson, A. (2016), "A Sensor-based System for Monitoring Hard-shoulder Incursions: Review of Technologies and Selection Criteria", MATEC Web of Conferences. No. 81. pp. 1-8.
3. Argyriou, A. (2015), "Data Collection from Resource-Limited Wireless Sensors for Cloud-Based Applications", GLOBECOM 2015 - 2015 IEEE Global Communications Conference.
4. Dorozhynskiy, O.L. (2016), "Geomantyka v monitoryngu dovykillya ta ocinci zagrozhlyvyh ssytuacii: monografiia" [Geomatics in environmental monitoring and threat assessment], Lviv, 399 p.
5. Danyliuk, S.L. (2016), "Konceptyalni pidhody do vyrishennya zadachi optymalnogo rozmishchennya sensoriv v oblasti ekologichnogo monitoryngu" [Conceptual approaches to solving the problem of optimal placement of sensors in the field of environmental monitoring], Modern information technologies in the field of security and defense, No. 26, pp. 45–48.
6. Kocharov, A.A., Yackin, D.V. (2016) "Algoritm poiska optimalnogo razpolozeniya sensorov dla resheniya zadachi monitoringa prostranstva" [Algorithm for finding the optimal location of sensors for solving the problem of monitoring space], Software products and systems, No. 3(115).
7. Krishnamurthy, P., Khorrami, F. (2017), "Optimal Sensor Placement for Monitoring of Spatial Networks", IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, No. 1(15), pp. 33-44.
8. Li, C.H., Yang, Q.W. (2020), "Optimal Sensor Placement Algorithm for Structural Damage Identification", Recent Patents on Engineering, No. 14(69), pp. 69-81.
9. Castello, C., Fan, J., Davari, A., Chen, R-X. (2010), "Optimal sensor placement strategy for environmental monitoring using Wireless Sensor Networks", Proceedings of the Annual Southeastern Symposium on System Theory, pp. 275 - 279.
10. Akbarzadeh, V., Lévesque, J., Gagne, C., Parize, M. (2014), "Efficient sensor placement optimization using gradient descent and probabilistic coverage", Sensors (Basel), No. 8(14), <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4179027/>.
11. Petrivskiy, V.Y., Shevchenko, V.L., Brazhenenko, M.G. (2019), "Increase the operation time of sensors by regulating power consumption," Information processing systems, No. 3(158), pp. 36-41.
12. Stoyan, Y.G., Yaskov, G.N. (2010), "Packing identical spheres into a cylinder", International Transactions in Operational Research, No. 17, pp. 51–70.
13. Petrivskiy, V., Shevchenko, V., Bychkov, O., Brazhenenko, M. (2020) "Information technology of the increasing sensors term of use considering their movement", 2020 IEEE 16-th International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH). pp.86-89.
14. Wesner, N. (2017), "Multiobjective Optimization via Visualization", Economics Bulletin, No. 2(37), pp. 1226–1233.

Petrivskyi V.Y., Dr. Eng. Sc. Shevchenko V.L., Dr. Eng. Sc. Bychkov O.S., Ph.D. Loza V.M.
INFORMATION TECHNOLOGY OF TERRITORY COVERING BY SENSORS WITH THE
CONSTANT INTERSECTION LEVEL AND COST MINIMIZATION

Thanks to the rapid development of technologies, in particular information, sensors have become widespread and used in all areas of human activity. Sensors and sensor networks have received special use during the collection and processing of data of various types. When monitoring a certain territory, the problem arises of its maximum coverage in order to increase the information content and completeness of the accumulated data. Simultaneously with the predominance of autonomous use of sensors, the problem of the duration of the sensor operation arises. This value depends on the capacity of the battery. In turn, engineers are faced with the task of minimizing the design of the sensors, which results in a decrease in the volume of the battery simultaneously with all other components. It is also obvious that as the sensor coverage radius increases, the energy consumption increases, which in turn shortens the sensor life. In addition to energy costs, the article considers the costs of servicing and purchasing sensors. Thus, in addition to maximizing the percentage of coverage of the study area, the problem of minimizing the total costs arises. Obviously, to ensure data transfer between sensors, a necessary condition is the presence of the intersection of the sensor coverage areas. In this case, the constant value of this parameter is considered. The materials propose an approach to solving the problem of maximizing the coverage of the territory with minimizing costs for a given level of intersection of the coverage areas of the sensors. The proposed approach is based on solving a nonlinear multiobjective optimization problem. Also, one of the options for solving the described problem is proposed to reduce the objective functions in one by using a weighted convolution of criteria. In addition, the article proposes an iterative approach to solving the described problem. A number of computer experiments have been carried out. The results of the performed computational experiments confirm the possibility of using the proposed information technology both in the form of an optimization problem and in the form of an iterative process.

Keywords: sensor, territory coverage, information technology, multicriteria optimization, nonlinear optimization.

