

*В.Я. Петрівський, В.Л. Шевченко, О.С. Бичков, І.П. Сініцин*

## ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИВУЧОСТІ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

У сучасному технологічному світі сенсори та сенсорні мережі широко використовуються у переважній більшості сфер людської діяльності. Одним із ключових інженерних завдань під час проектування сенсорних мереж є питання забезпечення живучості мережі. У статті представлено алгоритми забезпечення живучості сенсорних мереж на основі попередньої оцінки даної властивості. Оцінка живучості залежить від топології мережі. Підвищення показника живучості сенсорної мережі досягається шляхом включення до мережі додаткових датчиків. Запропоновано алгоритм знаходження позиції додаткових датчиків, що враховує радіус покриття сенсорів та необхідність наявності перетину зон покриття датчиків для забезпечення обміну інформацією. Представлено ітераційний алгоритм забезпечення живучості мережі за наявності та врахування динамічних датчиків. Результати обчислювальних експериментів, що представлені у роботі, підтверджують ефективність запропонованих підходів. Ключові слова: сенсори, сенсорні мережі, живучість сенсорних мереж, інформаційна технологія.

### Вступ

Зважаючи на велику кількість переваг та можливостей, датчики широко застосовуються в усіх видах діяльності людини. Основними перевагами датчиків є їхній розмір, низьке споживання енергії та зручність використання [1]. Датчики використовуються для збору та вимірювання різних величин (температури, тиску, витрат тощо) [2, 3], задач аналізу [4], сканування [5] та виявлення [6]. Також датчики є частинами та широко використовуються в концепціях Інтернету речей та Всеохоплюючого Інтернету [7]. Відповідно до [8] Інтернет речей - це мережа фізичних об'єктів, доступ до яких здійснюється через Інтернет. Вони містять вбудовану технологію взаємодії з внутрішніми станами або зовнішнім середовищем. Сферами застосування сенсорних мереж є моніторинг навколишнього середовища, домашній інтелект, сфера охорони здоров'я, контроль промислових процесів, сфера сільського господарства, тощо [9]. Основними загрозами для сенсорних мереж є втрата з'єднання, різні типи атак [10], ненадійні та несанкціоновані датчики, бездротові канали зв'язку [11]. Моделювання втрати каналу зв'язку у бездротових сенсорних мережах представлено у дослідженні [12]. У статті [13] автори запропонували модель активної захисту сенсорних мереж, засновану на теорії ігор. Метод динамічної кластеризації для максимізації стабільності

бездротових сенсорних мереж представлений у роботі [14]. Також у статті [15] автори розрізняють дальність зондування та дальність зв'язку датчика, але в нашому випадку це єдиний діапазон, який називається «радіус покриття». Проблема оптимального розміщення датчиків описана в статті [16]. Згідно з [17], живучість – це властивість, що характеризує здатність системи ефективно функціонувати за наявності ушкоджень або відновлювати цю здатність за визначений проміжок часу. Фахівці виділяють функціональну та структурну живучість [18]. Слід також врахувати, що датчики можуть бути статичними та рухомими. У дослідженні живучість визначається як наявність зв'язку між усіма елементами мережі у будь-який момент часу, що забезпечується наявністю перетину зон покриття датчиків на величину, що є більшою або рівною мінімально допустимою величиною зон покриття. У випадку динамічних датчиків вжито поняття «часу тиші», що характеризує період, коли зв'язок між елементами мережі відсутній.

### Основна частина

Розглянемо певну територію, позначимо її  $A$ , та сенсорну мережу, що покриває дану територію. В свою чергу, мережа складається з  $n$  датчиків, кожен з яких має наступні характеристики:

$$s_i = s_i(x_i, y_i, r_i), \quad (1)$$

де  $x_i, y_i$  – координати датчику,  $r_i$  – радіус покриття.

У нашому випадку під живучістю мережі будемо розуміти наявність зв'язку між усіма сенсорами. Для наявності зв'язку та передачі даних між датчиками необхідною умовою є перетин зон покриття сенсорів. Позначимо величину перетину зон покриття як  $c$ . Схематично перетин зон покриття датчиків з величиною перетину  $c$  можна зобразити наступним чином:

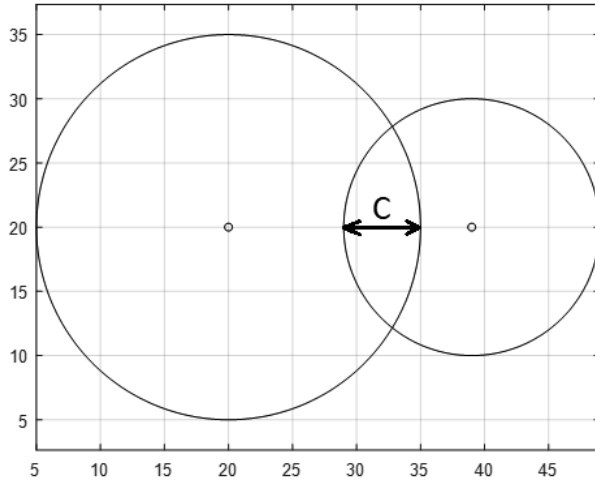


Рис. 1. Зміст величини перетину зон покриття датчиків  $c$

Для знаходження датчиків, між якими відсутній зв'язок, пронумеруємо сенсори в довільному порядку. Наступним етапом є побудова матриці зв'язків  $H$ , елементи якої будуть рівними:

$$h_{i,j} = \begin{cases} 1, \text{ зв'язок присутній} \\ 0, \text{ зв'язок відсутній} \end{cases} \quad (2)$$

Використовуючи матрицю зв'язків  $H$  та алгоритми пошуку вшир чи вглиб [19], знайдемо компоненти зв'язності неорієнтованого графа, що може бути побудований із використанням матриці  $H$ . У разі наявності понад однієї компоненти зв'язності, мережа не відповідає умові живучості. Також у даному випадку мережу можна умовно по-

ділити на множини сенсорів, зв'язаних між собою. Позначимо дані отримані множини як  $S_1, S_2, \dots, S_k$ , де  $k$  – кількість компонент зв'язності мережі. Для пари множин  $S_1$  та  $S_2$  знайдемо датчики  $s_i \in S_1$  та  $s_j \in S_2$  відстань між якими є мінімальною. У роботі [20] представлено підхід забезпечення живучості мережі у разі втрати сенсорів. Даний підхід може бути застосований для забезпечення зв'язності мережі сенсорів. Знайдемо позицію «з'єднуючого» сенсору з максимальним радіусом покриття  $r_a$  та рівнем перетину зон покриття  $c$  шляхом розв'язання наступної системи рівнянь:

$$\begin{cases} \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} = r_i + r_a - c \\ \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} = r_j + r_a - c \end{cases}, \quad (3)$$

де  $x_i, y_i, r_i$  – координати та радіус покриття сенсору  $s_i$ ,  $x_j, y_j, r_j$  – координати та радіус покриття сенсору  $s_j$ ,  $r_a$  – радіус покриття додаткового сенсору.

Розв'язком рівняння (3) будуть дві пари координат. Серед отриманих розв'язків необхідно обрати таку пару координат, коли зона покриття сенсору з даними координатами буде менше перетинатися із зонами покриття інших датчиків та менше виходити за межі загальної території  $A$ . Коли обидва результати задовольняють даний критерій, обираємо координати довільно.

Розглянемо випадок відсутності розв'язку рівняння (3). Дана ситуація буде означати неможливість знаходження позицій додаткового сенсору із заданими параметрами. У такому випадку знайдемо мінімально допустимий радіус покриття та координати додаткового сенсору. Очевидно, що даний сенсор буде мати мінімально допустимий радіус при координатах, які лежать на умовній прямій між датчиками  $s_i$  та  $s_j$ . Координати  $(x_a, y_a)$  та радіус додаткового датчику  $r_a$  будуть розв'язком наступного рівняння:

$$\begin{cases} \sqrt{(x_a - x_i)^2 + (y_a - y_i)^2} = r_i + r_a - c \\ \sqrt{(x_a - x_j)^2 + (y_a - y_j)^2} = r_j + r_a - c \\ \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} = \sqrt{(x_a - x_j)^2 + (y_a - y_j)^2} + \sqrt{(x_a - x_i)^2 + (y_a - y_i)^2} \end{cases}, \quad (4)$$

де  $x_i, y_i, r_i$  – координати та радіус покриття сенсору  $s_i$ ,  $x_j, y_j, r_j$  – координати та радіус покриття сенсору  $s_j$ .

Отже, для забезпечення живучості мережі необхідно додати сенсор з радіусом покриття  $r_a$  з координатами  $(x_a, y_a)$ . У разі відсутності датчика з відповідним радіусом покриття  $r_a$ , необхідно використати декілька існуючих датчиків, що будуть розташовані вздовж умовної прямої між датчиками  $s_i$  та  $s_j$  та мати однакові радіуси покриття, котрі будуть задовольняти умову:

$$\begin{cases} r_a \bmod (r - c) = 0 \\ r \leq r^{max} \end{cases}, \quad (5)$$

де  $r^{max}$  – максимальний радіус покриття доступного сенсору.

Розглянемо випадок рухомих сенсорів. Нехай маємо сенсорну мережу, що складається з стаціонарних та рухомих сенсорів. Дана мережа може бути описана наступним чином:

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n, s_1^m, s_2^m, \dots, s_k^m\}, \quad (6)$$

де  $s_i$  – стаціонарні сенсори (1),  $i = \overline{1, n}$ ,  $n$  – кількість стаціонарних сенсорів,  $s_j^m$  – динамічні сенсори,  $j = \overline{1, k}$ ,  $k$  – кількість динамічних сенсорів.

У свою чергу, динамічні сенсори представимо так:

$$s_j^m = s_j^m(f_j(x_j^m, y_j^m, t), r_j^m), \quad (7)$$

де  $f_j(x_j^m, y_j^m, t)$  – рівняння руху датчику,  $x_j^m, y_j^m$  – координати датчику,  $r_j^m$  – радіус покриття,  $j = \overline{1, k}$ ,  $k$  – кількість динамічних сенсорів.

Забезпечення живучості даної системи полягає у мінімізації «часу тиші» через

забезпечення зв'язності мережі. Під «часом тиші» будемо розуміти період часу, протягом якого відсутній зв'язок усіх датчиків між собою. Забезпечення живучості досягатимемо шляхом додавання до мережі додаткових сенсорів.

Покроково ітераційна процедура забезпечення живучості сенсорної мережі у випадку динамічних датчиків може бути описана таким чином:

1. Серед сенсорів мережі  $S$  обираємо датчик, найближчий до динамічного датчика, позначимо його  $s_{nearest}(x_{nearest}, y_{nearest}, r_{nearest})$  та формуємо систему рівнянь (8);

2. Шукаємо розв'язок системи  $A$ ;

3. У разі існування розв'язку додаємо до системи рівнянь  $Q$  рівняння, що містить координати рухомого датчика в момент часу  $t_i^*$ , переходимо до наступного моменту часу  $t_{i+1}^* = t_i^* + \Delta t$ , виконуємо перевірку умови зупинки алгоритму та перехід до кроку 2, у разі негативного результату перевірки умови зупинки. Загалом рівняння  $Q$  буде мати такий вигляд (9);

4. У разі відсутності розв'язку рівняння  $Q$  додаємо сенсор із характеристиками, які є розв'язками рівняння  $Q$  у момент часу  $t_i^*$ ,  $s(x_{solution}(t_i^*), r_{solution}(t_i^*), r_{additional})$  до статичних датчиків мережі  $S$ , переходимо до наступного моменту часу  $t_{i+1}^* = t_i^* + \Delta t$ , виконуємо перевірку умови зупинки алгоритму та перехід до кроку 1 у разі негативного результату перевірки умови зупинки.

Умовою зупинки алгоритму буде вихід динамічного сенсору за межі території або досягнення сенсором початкової точки у разі циклічного руху датчику.

$$Q = \begin{cases} \sqrt{(x - x_{nearest})^2 + (y - y_{nearest})^2} = r_{nearest} + r_{additional} - c \\ \sqrt{(x - x(t_i^*))^2 + (y - y(t_i^*))^2} = r(t_i^*) + r_{additional} - c \end{cases}. \quad (8)$$

$$Q = \begin{cases} \sqrt{(x - x_{nearest})^2 + (y - y_{nearest})^2} = r_{nearest} + r_{additional} - c \\ \sqrt{(x - x(t_{i+1}^*))^2 + (y - y(t_{i+1}^*))^2} = r(t_{i+1}^*) + r_{additional} - c \\ \sqrt{(x - x(t_i^*))^2 + (y - y(t_i^*))^2} = r(t_i^*) + r_{additional} - c \\ \sqrt{(x - x(t_{i-1}^*))^2 + (y - y(t_{i-1}^*))^2} = r(t_{i-1}^*) + r_{additional} - c \\ \dots \\ \sqrt{(x - x(t_0^*))^2 + (y - y(t_0^*))^2} = r(t_0^*) + r_{additional} - c \end{cases}. \quad (9)$$

Схематично описаний вище алгоритм можна зобразити у такий спосіб (Рис. 2):



Рис. 2. Алгоритм пошуку позиції додаткових сенсорів

### Результати обчислювальних експериментів

Розглянемо сенсорну мережу, координати та радіуси покриття сенсорів якої представлені у таблиці (Табл. 1).

Таблиця 1  
Вхідні дані першого обчислювального експерименту

	$(x, y)$	$r$
$s_1$	(20, 70)	19
$s_2$	(35, 55)	7
$s_3$	(45, 85)	13
$s_4$	(80, 80)	15
$s_5$	(30, 16)	10
$s_6$	(47, 10)	10
$s_7$	(67, 17)	13

Схематично дана мережа може бути представлена так:

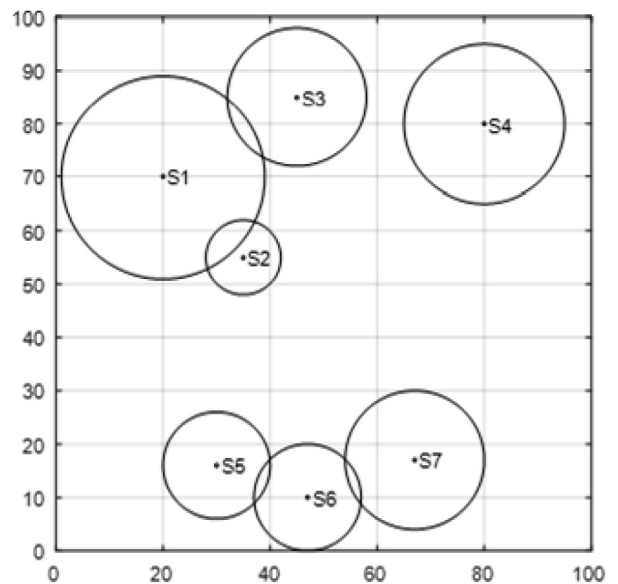


Рис. 3. Сенсорна мережа у початковому стані

Представлена мережа має 3 компоненти зв'язності та не задовольняє умову живучості. Використовуючи запропонований підхід, забезпечимо живучість мережі шляхом додаткових сенсорів із максимальним радіусом покриття  $r^{max} = 10$ . Після першої ітерації запропонованого підходу (3) кількість компонент зв'язності буде рівною 2, а отримана мережа з додатковим сенсором буде мати вигляд:

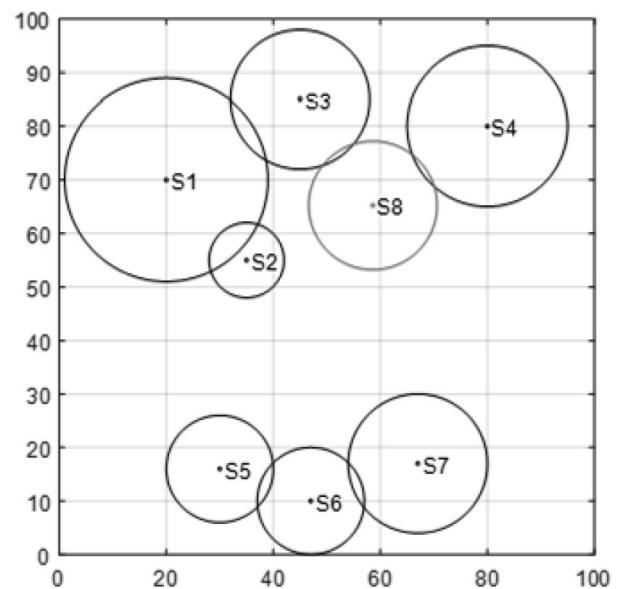
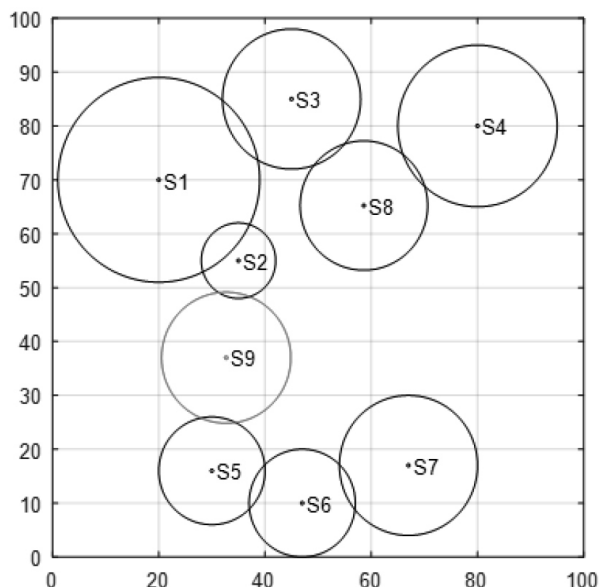


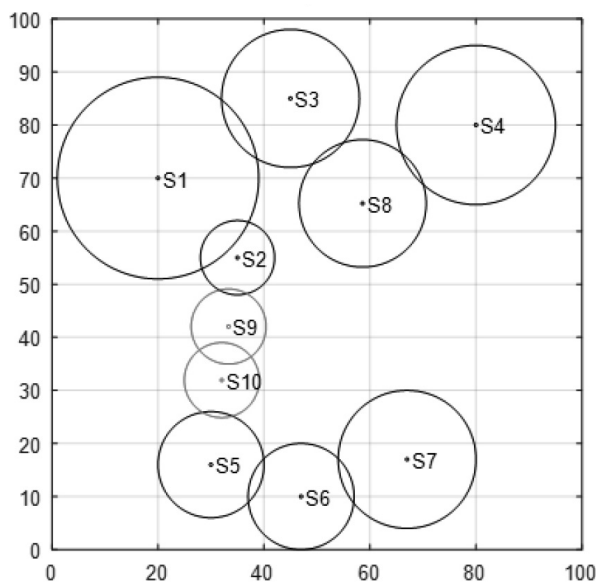
Рис. 4. Сенсорна мережа з додатковим сенсором ( $s_8$ )

Зв'язок між сенсорами  $s_2$  та  $s_5$  неможливо забезпечити сенсором із радіусом покриття  $r^{max} = 10$ . Використавши (4) додат-

ковий сенсор  $s_9$  має бути у точці з координатами (32.69, 36.98) і мати мінімальний радіус покриття 12.15 (Рис. 5а). Із врахуванням наявності сенсорів із максимальним радіусом покриття  $r^{max} = 10$  та формули (5), живучість мережі можна забезпечити шляхом включення до мережі двох сенсорів  $s_9, s_{10}$  з радіусами покриття  $r = 7,07$  та координатами (33.33, 42.03) і (32.04, 31.93) відповідно (Рис. 5б).



а)



б)

Рис. 5. Забезпечення живучості з використанням а) сенсору з мінімально допустимим радіусом; б) декількох сенсорів з радіусом не більше  $r^{max} = 10$

Розглянемо випадок наявності динамічного сенсору. Характеристики датчиків представлені у наступній таблиці (Табл. 2):

Таблиця 2  
Вхідні дані другого обчислювального експерименту

	$(x, y)$	$r$
$s_1$	(15, 17)	15
$s_2$	(17, 65)	15
$s_3$	(20, 41)	15
$s_4$	(47, 50)	15
$s_5$	(40, 20)	15
$s_{moveable}$	(95, 35)	10

Схематично описана вище мережа, динамічний датчик у початковій точці та траєкторія руху датчика можуть бути представлені наступним чином (Рис. 6):

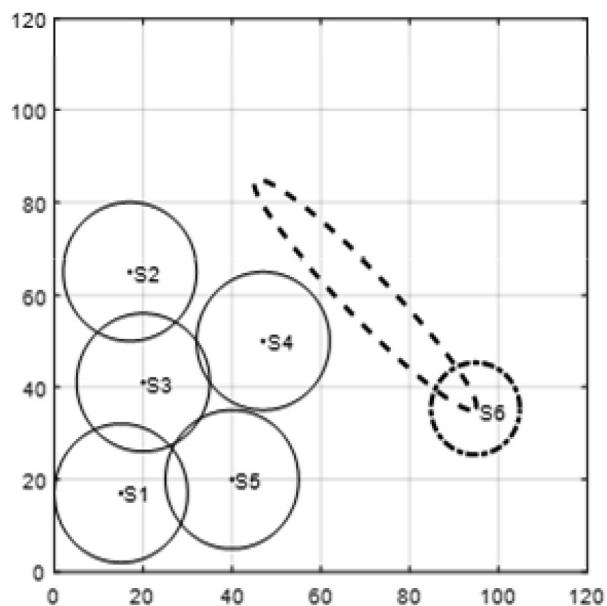


Рис. 6. Сенсорна мережа, динамічний датчик у початковій точці й траєкторія руху датчика

При значенні  $\Delta t = 1c$  величина «часу тиші» буде рівною 298с. Використовуючи описаний вище алгоритм, забезпечимо живучість мережі шляхом включення до неї додаткових датчиків. Результат роботи алгоритму схематично може бути представлений так (Рис. 7):

Результат роботи запропонованого ітераційного алгоритму, що полягає у зменшенні часу тиші, можна представити у такому вигляді (Рис. 8):

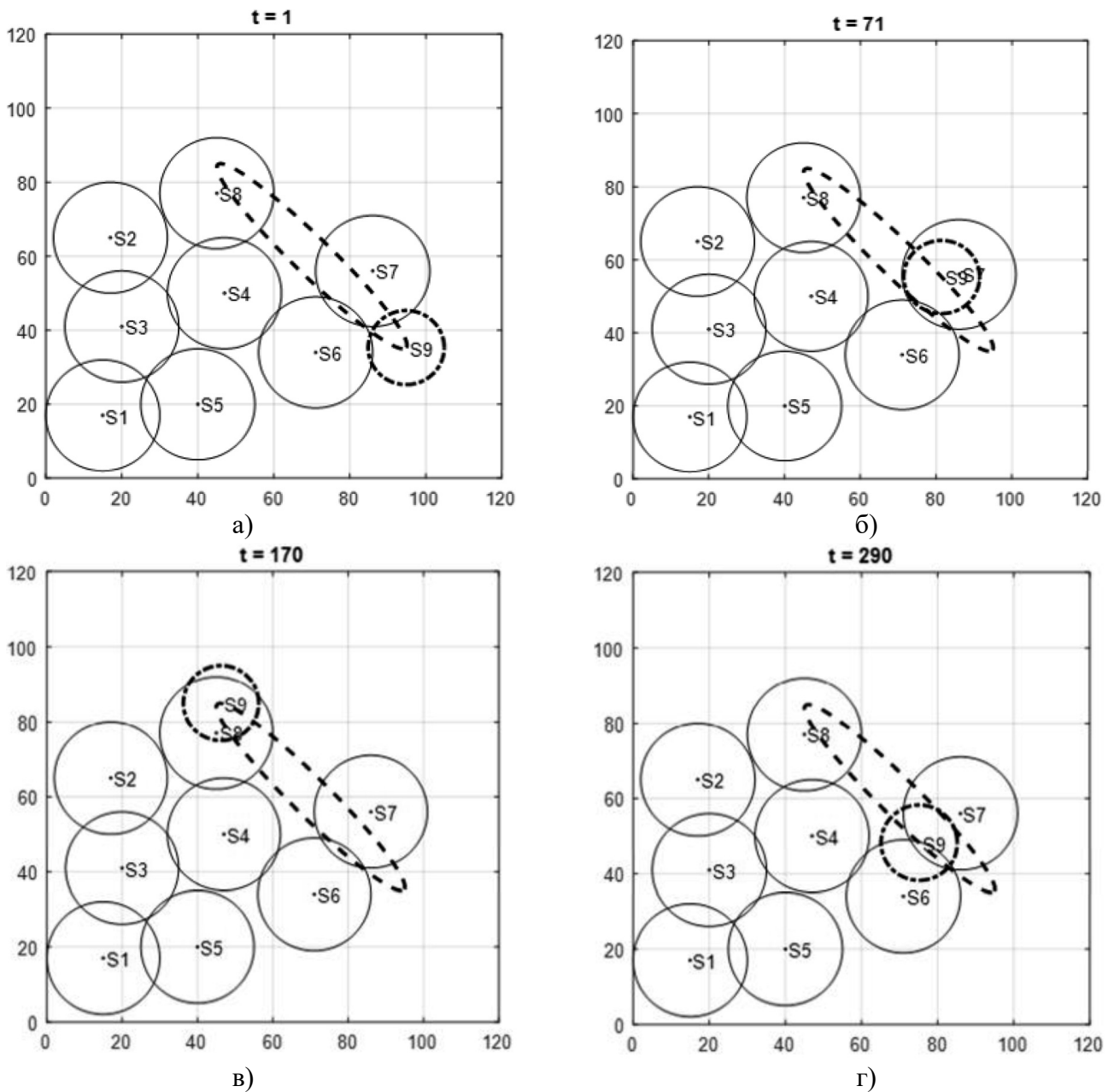


Рис. 7. Сенсорна мережа, динамічний датчик у різні моменти часу

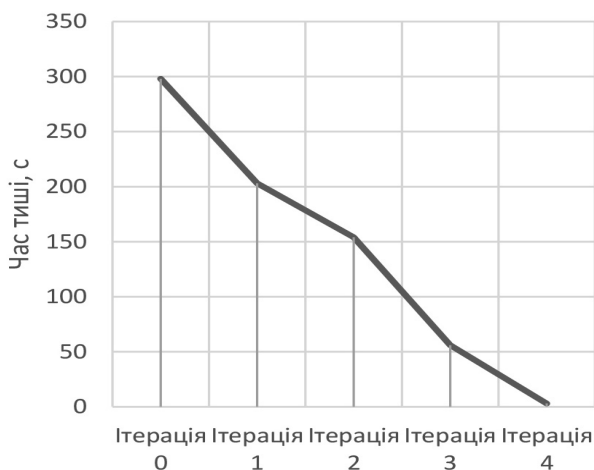


Рис. 8. Значення величини часу тиші на різних ітераціях роботи алгоритму

### Висновки

У статті представлено інформаційну технологію забезпечення живучості сенсорних мереж. Під поняттям живучості сенсорної мережі розуміється наявність зв'язку між усіма сенсорами в мережі. Зв'язок між сенсорами забезпечується завдяки перетину зон покриття на мінімально допустимому величину перетину, яка є сталою величиною. Розглядаються випадки статичних та динамічних датчиків. У випадку динамічних сенсорів запропоновано ітераційний алгоритм забезпечення живучості мережі шляхом додавання до мережі додаткових статичних сенсорів із

визначеним радіусом та рівнем перетину зон покриття. Представлені результати обчислювальних експериментів підтверджують ефективність запропонованих підходів.

### Література

1. French P.J. Smart Sensors: Advantages and Pitfalls. Technologies for Micro/Nano-Devices, Sensors and Actuators. 2018.
2. Rahman A. Assignment on Temperature Sensors. 2018. DOI: 10.13140/RG.2.2.16747.23844.
3. Sparks D. MEMS pressure and flow sensors for automotive engine management and aerospace applications. MEMS for Automotive and Aerospace Applications. 2013. P. 78–105.
4. Panayotova G., Dimitrov G. and Dimitrov D. Wireless Sensors for analysis transport systems. 10th International Conference on Computer Science and Information Technology. 2017.
5. Lercari N. Terrestrial Laser Scanning in the Age of Sensing. Digital Methods and Remote Sensing in Archaeology. 2016. P. 3–33.
6. Teixeira T., Gershon D. A Survey of Human-Sensing: Methods for Detecting Presence, Count, Location, Track, and Identity. ACM Computing Surveys. 2010. №5. P. 59.
7. Abdul-Qawy A., Magesh E. and Tadisetty S. The Internet of Things (IoT): An Overview. Int. Journal of Engineering Research and Applications. 2015. P. 71–82.
8. Evans D. (2011). The Internet of Things How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything. Cisco Internet Business Solutions Group. Available from: [https://www.cisco.com/c/dam/en\\_us/about/ac79/docs/innov/IoT\\_IBSG\\_0411FINAL.pdf](https://www.cisco.com/c/dam/en_us/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf).
9. Prasanna S., Rao S. An Overview of Wireless Sensor Networks Applications and Security. International Journal of Soft Computing and Engineering. 2012. P. 538–540.
10. Panayotova G., Dimitrov G. Modeling and dataprocessing of information systems. Artificial Intelligence and Pattern Recognition (AIPR). 2016.
11. Zhu L., Zhang Z. and Xu C. Secure Data Aggregation in Wireless Sensor Networks. Secure and Privacy-Preserving Data Communication in Internet of Things. 2017.
12. Kurt S., Tavli B. Path Loss Modeling for Wireless Sensor Networks: Review of Models and Comparative Evaluations. IEEE Antennas and Propagation Magazin. 2016.
13. Alim Al Islam A., Hyder C., Kabir H. at all. (2014). Stable Sensor Network (SSN): A dynamic clustering technique for maximizing stability in wireless sensor networks. Wireless Sensor Network. №7. P. 538–554.
14. Farsi M., Elhosseini M. and Badawy M. Deployment Techniques in Wireless Sensor Networks, Coverage and Connectivity: A Survey. 2019.
15. Maksimovic M., Milosevic V. Evaluating the optimal sensor placement for smoke detection. Yugoslav J. Oper. Res. 2016. №26. P. 33–50.
16. Gupta K., Kulia P. and Jana P. Genetic algorithm for k-connected relay node placement in wireless sensor networks. Proc. 2nd Int. Conf. Comput. Commun. Technol. 2016. P. 721–729.
17. Додонов, О. Г., 2011. Живучість складних систем: аналіз та моделювання: навч. посіб. у 2-х ч. / О. Г. Додонов, М. Г. Кузнецова, О. С. Горбачик. – Київ: НТУУ «КПІ», 264 с.
18. Додонов А. Г., 2011. Живучість информационных систем / А. Г. Додонов, Д. В. Ландэ. – Киев: Наук. думка, 2011. – 256 с.
19. Cormen T., Leiserson C., Rivest R. at all. (2009). Introduction to Algorithms.
20. Petrivskiy V., Dimitrov G., Shevchenko V. at all. (2020). Information Technology for Big Data Sensor Networks Stability Estimation. Information & Security: An International Journal 47. №. 1. P. 141–154.

Одержано: 18.11.2021

### Про авторів:

Петрівський Володимир Ярославович, аспірант.

Кількість публікацій в українських виданнях – 22.

Кількість зарубіжних публікацій – 6.

Індекс Хірша – 1.

<https://orcid.org/0000-0001-9298-8244>.

Шевченко Віктор Леонідович,  
доктор технічних наук, професор.  
Кількість публікацій в українських  
виданнях – понад 300.  
Кількість зарубіжних публікацій – 17.  
Індекс Хірша – 3.  
<https://orcid.org/0000-0002-9457-7454>.

Бичков Олексій Сергійович,  
доктор технічних наук, професор.  
Кількість публікацій в українських  
виданнях – понад 300.  
Кількість зарубіжних публікацій – 37.  
Індекс Хірша – 5.  
<https://orcid.org/0000-0002-9378-9535>.

Сініцин Ігор Петрович  
доктор технічних наук, старший  
науковий співробітник.  
Кількість публікацій в українських  
виданнях – 80.

Індекс Хірша – 1.  
<http://orcid.org/0000-0002-4120-0784>

***Місце роботи авторів:***

Київський національний університет іме-  
ні Тараса Шевченка,  
Факультет інформаційних технологій,  
Кафедра програмних систем і технологій,  
вул. Богдана Гаврилишина, 24,  
Київ, Україна, 02000.  
E-mail: [vovapetrivskyi@gmail.com](mailto:vovapetrivskyi@gmail.com),  
[gii2014@ukr.net](mailto:gii2014@ukr.net),  
[bos.knu@gmail.com](mailto:bos.knu@gmail.com).

Інститут програмних систем НАН Укра-  
їни  
пр. Академіка Глушкова, 40, корпус 5,  
м. Київ, Україна, 03187.  
E-mail: [ipsinitsyn@gmail.com](mailto:ipsinitsyn@gmail.com)