

# AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.896

DOI:10.30837/rt.2022.2.209.18

*І.Ш. НЕВЛЮДОВ, д-р техн. наук, С.П. НОВОСЕЛОВ, канд. техн. наук,  
О.В. СИЧОВА, канд. техн. наук, С.І. ТЕСЛЮК*

### ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ МОБІЛЬНОГО РОБОТА У ПРОМИСЛОВОМУ ПРИМІЩЕННІ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ BLE НА ОСНОВІ ДАНИХ RSSI, ОТРИМАНИХ ВІД БАЗОВИХ СТАНЦІЙ

#### Вступ

Існуючі технології глобального позиціонування, наприклад GPS, а також технології, що використовують засоби мобільного зв'язку (GSM) не можуть бути застосовані в приміщенні де сигнал зі супутників або вишок зв'язку значно знижується, внаслідок ослаблення супутникового сигналу в стінах і перекриттях будівель, або зовсім відсутній.

На сьогодні використовуються проекти із побудови локальних систем позиціонування на основі спеціалізованих радіочастотних датчиків, наприклад, DW1000 [1], або на основі технології інфрачервоного випромінювання [2].

Вказані системи мають декілька недоліків. Системи на основі DW1000 мають високу вартість (порядку 25 USD за один сенсор), датчики ще недостатньо розповсюджені. Дана технологія визначення відстані ще не має налагоджених бібліотек для використання.

Технологія позиціонування на основі маяків з використанням оптичного інфрачервоного діапазону випромінювання має гарні показники точності визначення позиції, але має суттєвий недолік – перешкоди, які можуть повністю порушити роботу всієї системи. Тому використання даної технології в виробничому приміщенні недоцільно.

Також в процесі локального визначення положення мобільних платформ у промислових приміщеннях можуть бути використані технології бездротових мереж, таких як Bluetooth чи Wi-Fi. В такому випадку найчастіше використовують дані про потужності сигналів Wi-Fi, що можуть прийматися роботом від різних точок доступу. Але у такого методу існує проблема з забезпеченням потрібної точності, значно ускладнюючи реальну інтерференційну картину покриття Wi-Fi.

Таким чином, актуальність даних досліджень пов'язана із вирішенням проблеми локального позиціонування мобільних роботів в приміщенні з точністю до десятків сантиметрів.

#### Постановка завдання

Метою роботи є визначення локальної позиції мобільного робота за допомогою технології BLE і отриманих від базових станцій даних RSSI.

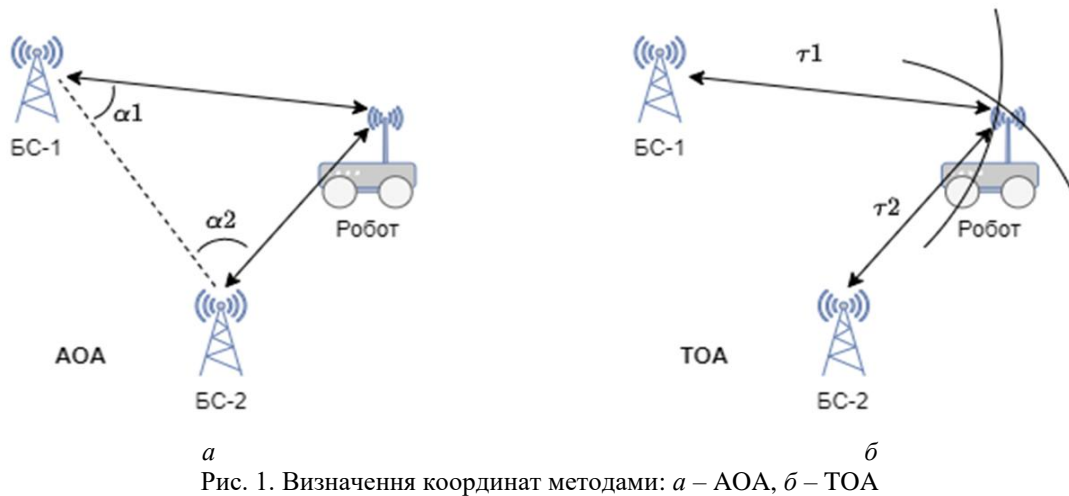
Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз методів визначення локальної позиції мобільного робота;
- розробити метод визначення положення мобільного пристрою в просторі на основі отриманих значень RSSI від базових станцій;
- розробити архітектуру програмно-апаратного комплексу;
- розробити метод визначення координати положення мобільного робота в просторі.

#### Аналіз методів визначення локальної позиції мобільного робота

В роботі пропонується використовувати технологію BLE (Bluetooth Low Energy) для визначення локальної позиції знаходження мобільного робота в просторі. Технологія базується на використанні декількох базових станцій в приміщенні та визначенні відстані між мобільним роботом та цими базовими станціями. На основі визначених відстаней методом триангуляції розраховується актуальне місцезнаходження робота.

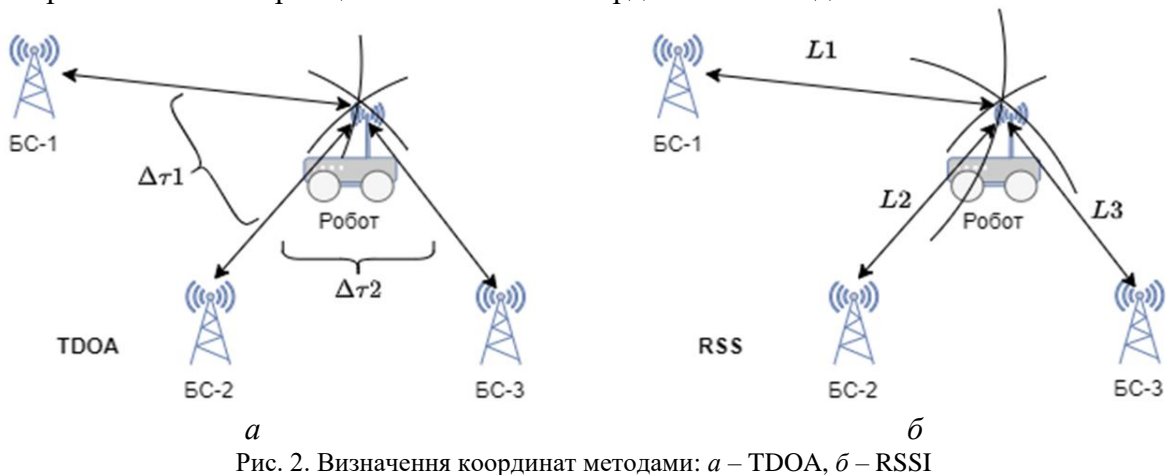
Дана технологія не є новою, але на сьогодні набирає популярності завдяки зростаючій кількості пристроїв із вбудованим модулем BLE та появою дешевих чипів з підтримкою даної технології та розвинутою інфраструктурою для створення програмного забезпечення для них. Відомі декілька методів визначення позиції в просторі [4]. На рис. 1 показані принципи визначення координат за методами AOA і TOA.



У методі AOA (Angle of arrival) (рис. 1, *a*) розташування пристрою визначається в межах трикутника, утвореного перетином осей антен трьох базових станцій (метод модифікованої триангуляції). Базові станції використовують спрямовані антени або антенні масиви для визначення кута вхідних сигналів, що надсилаються мобільним пристроєм.

В системах позиціонування, що використовують метод TOA (Time of Arrival) (рис. 1, *б*) [4], вимірюється час проходження сигналу від пристрою до базової станції. За даним методом відстань до об'єкта розраховується на основі різниці між часом надсилання сигналу і його отримання. У той же час цей підхід вимагає суворого дотримання часу синхронізації часу відправника та одержувача, що досить важко досягти. Одним із різновидів використання даного принципу, є застосування ультра-широкого діапазону (ultra-wideband) смуги вимірювання.

На рис. 2 показані принципи визначення координат за методами TDOA та RSSI.



У системах TDOA (рис. 2, *a*) [4], мобільний пристрій посилає сигнали позиціонування до оточуючих базових станцій, та розраховує часову різницю прибуття отриманих сигналів. Основною перевагою систем TDOA є те, що необхідно лише синхронізувати вимірювальні вузли (базові станції). Ця синхронізація, як правило, здійснюється через локальну мережу.

RSSI (Received Signal Strength Indication) використовується для вимірювання рівня потужності сигналу [3]. Найпростіші схеми розробляються, щоб прийняти вхідний сигнал і

сформувати аналогову вихідну напругу (або відповідний цифровий код, який отримується після подачі цієї напруги на АЦП), пропорційну потужності прийнятого сигналу. Можна використовувати даний показник, щоб оцінити відстань до передавача або до базової станції.

Метод позиціонування, заснований на отриманні даних RSSI (рис. 2, б), використовує характеристику розповсюдження радіосигналу (потужність сигналу). Використовуючи правильну модель розповсюдження, можна розрахувати відстані між мобільним пристроєм та базовими станціями, тим самим визначається місцезнаходження мобільного робота. Цей метод працює на невеликих відстанях, але зі збільшенням діапазону помилка зростає через специфіку розповсюдження радіосигналу.

Для вирішення завдання визначення просторового положення мобільного робота у приміщенні було обрано метод позиціонування, заснований на отриманні даних RSSI.

### **Метод визначення положення мобільного пристрою в просторі на основі отриманих значень RSSI від базових станцій**

Враховуючи специфіку пристроїв з вбудованим BLE приймачем, наприклад ESP32 та інші, де радіус дії радіосигналу визначається в межах 10 метрів, дану технологію можна застосувати для визначення положення мобільного робота в промисловому приміщенні відносно певної кількості базових станцій.

На рис. 3 подано принцип визначення положення мобільного пристрою в просторі на основі отриманих значень RSSI від базових станцій.

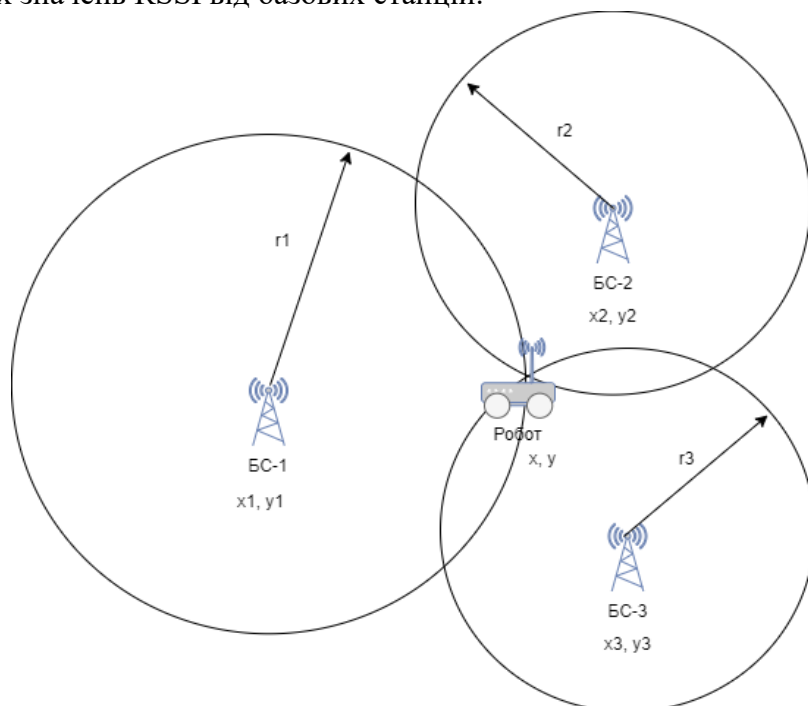


Рис. 3. Визначення положення мобільного пристрою в просторі на основі отриманих значень RSSI від базових станцій

Для визначення місцезнаходження мобільного робота в промисловому приміщенні використовується метод триангуляції. Цей метод використовується для розрахунку відносно розташування пристрою за допомогою відстаней, отриманих шляхом розрахунків на основі вимірюваних значень RSSI.

Дані триангуляції показують відстань мобільного пристрою від базових станцій, що побудовані на основі ESP32, використовуючи фіксовані координати станцій ( $x_n$ ,  $y_n$ ). Щоб визначити точне положення робота, цей метод використовує площу перекриття, утворену трьома колами з радіусами у центрі розташування базових станцій, що задає область локалізації для вимірюваних відстаней.

На колах представляють всі можливі місця мобільного пристрою на заданій відстані (радіусу) від базової станції. Таким чином можна розрахувати координати  $(x, y)$  розташування мобільного роботу в просторі, що є точкою перехрещення трьох кіл [7].

Координати кожної базової станції задаються на етапі підготовки до експерименту у вигляді констант (наприклад, на рис. 3 це БС-1  $(x_1, y_1)$ , БС-2  $(x_2, y_2)$ , БС-3  $(x_3, y_3)$ ).

### Розробка архітектури програмно-апаратного комплексу

Для визначення позиції мобільного пристрою застосовуються базові станції. Мінімально необхідна кількість станцій дорівнює трьом. Кожна станція має автономне джерело живлення. Мобільний пристрій послідовно підключається до всіх станцій, що знаходяться в зоні його видимості. Для цього кожні 5 – 10 секунд відбувається сканування діапазону радіочастот та визначаються пристрої, що відповідають характеристикам базових станцій. Після підключення до станції пристрої обмінюються повідомленнями для визначення потужності радіосигналу за допомогою RSSI. Архітектуру програмно-апаратного комплексу подано на рис. 4.

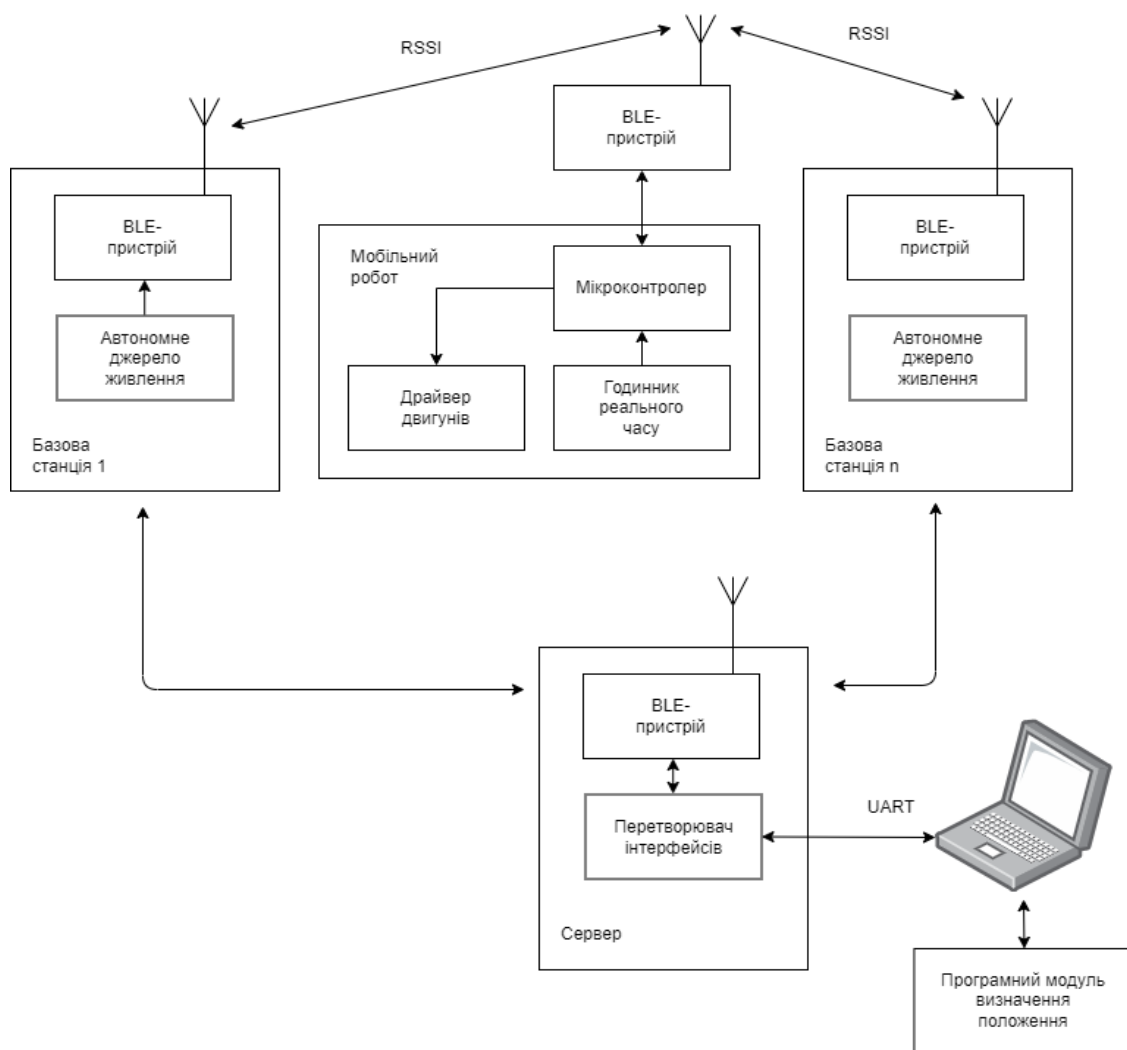


Рис. 4. Архітектура програмно-апаратного комплексу

Кожна базова станція зберігає дані про останній сеанс зв'язку у внутрішній пам'яті. Сервер програмно-апаратного комплексу з певною періодичністю опитує всі наявні базові станції та одержує від них набір даних останніх сеансів.

Кожний набір даних містить ID пристрою, MAC адресу пристрою та базової станції, значення RSSI, що було отримано в процесі сеансу зв'язку. Ці дані за допомогою одного з

інтерфейсів зв'язку, наприклад UART, потрапляють до персонального комп'ютера, де програмний модуль визначає координати місцезнаходження мобільного робота.

### Розрахунок координат положення мобільного робота в просторі

Як показано на рис. 3, щоб розрахувати координати позиції мобільного робота (BLE-пристрою), необхідні координати центрів трьох кіл  $((x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3))$ , що є попередньо визначеними координатами базових станцій.

Радіуси кожного кола – це відстань між кожним BLE-пристроєм та роботом. Для кожного кола справедливе рівняння [3, 5]:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = r_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = r_3^2 \end{cases} \quad (1)$$

В результаті отримуємо наступні рівняння:

$$\begin{cases} 2x(-x_1 + x_2) + 2y(-y_1 + y_2) = r_1^2 - r_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2 \\ 2x(-x_2 + x_3) + 2y(-y_2 + y_3) = r_2^2 - r_3^2 - x_2^2 + x_3^2 - y_2^2 + y_3^2 \end{cases} \quad (2)$$

Перепишемо ці два рівняння, використовуючи константи  $A, B, C, D, E, F$ , отримаємо систему двох рівнянь:

$$\begin{cases} A_x + B_y = C \\ D_x + E_y = F \end{cases} \quad (3)$$

Вирішуючи рівняння для  $x$  та  $y$ , отримаємо:

$$x = (C \cdot B - F \cdot B) / (E \cdot A - B \cdot D), \quad (4)$$

$$y = (C \cdot D - A \cdot F) / (B \cdot D - A \cdot E). \quad (5)$$

Таким чином, розраховуються координати  $x$  та  $y$  у визначеному під час проектування просторі.

Для отримання радіусів  $r_1, r_2, r_3$  необхідно обчислити відстань від мобільного пристрою до відповідної базової станції на основі даних RSSI. Для рішення даної задачі скористуємось рівнянням [6]:

$$L = 10 \left( \frac{P_m - RSSI}{10N} \right), \quad (6)$$

де  $P_m$  – вимірювана потужність (RSSI) на відстані один метр від передавача;  $RSSI$  – отримане значення RSSI з базових станцій;  $N = 2$ .

Необхідно зазначити, що на якість сигналу впливає розташування модулів зв'язку, орієнтація антени, віддаленість базових станцій та мобільного пристрою від стін будівлі, наявність інших пристроїв в ефірі. Важливу роль має частота роботи пристроїв, в нашому випадку це 2,4 ГГц. Також такі перешкоди, як людина в приміщенні, можуть впливати на результати вимірювань відстані між пристроями.

Для збільшення точності позиціонування пропонується використовувати більше базових станцій, ніж мінімально можливе для конкретного типу приміщення.

### Висновки

Запропонований метод дозволяє вирішувати задачу визначення локальної позиції мобільного робота в промисловому приміщенні з використанням модулів радіозв'язку, що

працюють за технологією BLE. В якості таких пристрів в даній роботі пропонується використувати модулі ESP32. Дистанція від мобільного роботу до базових станцій визначається на основі даних RSSI, що отримуються в результаті «спілкування» двох пристроїв – робота і базової станції. Використовуючи метод триангуляції, отримано формули для вирішення задачі визначення координат об'єкту, що рухається в просторі. Необхідно враховувати, що значення RSSI дуже нестабільне, тому точність позиціонування буде залежати також від кількості базових станцій та від використаних додаткових програмних інструментів, наприклад, фільтра Калмана.

#### Список літератури:

1. S. Novoselov, "Wireless Sensor Network for Communication Between Base Stations in the Local Positioning System," 2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 2018, pp. 383-386, doi: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632140.
2. S. Novoselov and O. Donskov, "Distributed local positioning system using DWM1000 location chip," 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 2017, pp. 489-492, doi: 10.1109/INFOCOMMST.2017.8246445.
3. M. E. Rusli, M. Ali, N. Jamil and M. M. Din, "An Improved Indoor Positioning Algorithm Based on RSSI-Trilateration Technique for Internet of Things (IOT)," 2016 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE), 2016, pp. 72-77, doi: 10.1109/ICCCE.2016.28.
4. Y. Wang, Xu Yang, Yutian Zhao, Yue Liu and L. Cuthbert, "Bluetooth positioning using RSSI and triangulation methods," 2013 IEEE 10th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2013, pp. 837-842, doi: 10.1109/CCNC.2013.6488558.
5. P. S. Dravya, Ujwal K. Holla, K. N. Pushpalatha. (2020). Indoor Navigation System using BLE and ESP32. 10.22214/irjaset.2020.32089.
6. M. Golestanian, H. Lu, C. Poellabauer and J. Kenney, "RSSI-Based Ranging for Pedestrian Localization," 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/VTCFall.2018.8690714.
7. S. Novoselov and O. Donskov, "Study of mobile device wireless control technology in the visible range of the electromagnetic radiation," 2016 Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), 2016, pp. 123-124, doi: 10.1109/INFOCOMMST.2016.7905355.
8. S. Novoselov, O. Sychova and S. Tesliuk, "Development of the Method Local Navigation of Mobile Robot a Based on the Tags with QR Code and Wireless Sensor Network," 2019 IEEE XVth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), 2019, pp. 46-51, doi: 10.1109/MEMSTECH.2019.8817405.
9. I. Nevludov, O. Sychova, A. Andrusevich, S. Novoselov, D. Mospan and V. Mospan, "Simulation of the Sensor Network of Base Stations in a Local Positioning System in Intelligent Industries," 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/PAEP49887.2020.9240842.
10. I. Nevludov, S. Novoselov, O. Sychova and S. Tesliuk, "Development of the Architecture of the Base Platform Agricultural Robot for Determining the Trajectory Using the Method of Visual Odometry," 2021 IEEE XVIIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), 2021, pp. 64-68, doi: 10.1109/MEMSTECH53091.2021.9468008.
11. I. Nevludov, S. Novoselov, O. Sychova, S. Tesliuk. Production Workspace Obstacle Avoidance Mobile Robot Trajectory Modeling 2021: Fifth International Scientific and Technical Conference "COMPUTER AND INFORMATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES" pp.61-62.
12. I. Nevludov, O. Sychova, O. Reznichenko, S. Novoselov, D. Mospan and V. Mospan, "Control System for Agricultural Robot Based on ROS," 2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/MEES52427.2021.9598560.
13. L. Li, Y. Wu, Y. Ren and N. Yu, "A RSSI Localization Algorithm Based on Interval Analysis for Indoor Wireless Sensor Networks," 2013 IEEE International Conference on Green Computing and Communications and IEEE Internet of Things and IEEE Cyber, Physical and Social Computing, 2013, pp. 434-437, doi: 10.1109/GreenCom-iThings-CPSCom.2013.90.
14. N. N. Sümer, N. Ataklı and O. Kucur, "Using RSSI-Based Bluetooth Low Energy for Indoor Location Detection," 2020 5th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK), 2020, pp. 83-87, doi: 10.1109/UBMK50275.2020.9219422.
15. A. Golestani, N. Petreska, D. Wilfert and C. Zimmer, "Improving the precision of RSSI-based low-energy localization using path loss exponent estimation," 2014 11th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC), 2014, pp. 1-6, doi: 10.1109/WPNC.2014.6843302.

16. J. Wisanmongkol, L. Klinkusoom, T. Sanpechuda, L. Kovavisaruch and K. Kaemarungsi, "Multipath Mitigation for RSSI-Based Bluetooth Low Energy Localization," 2019 19th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), 2019, pp. 47-51, doi: 10.1109/ISCIT.2019.8905164.
17. S. Saxena, A. Pandey and S. Kumar, "A Multistage RSSI-based Scheme for Node Compromise Detection in IoT Networks," 2019 IEEE 16th India Council International Conference (INDICON), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/INDICON47234.2019.9029092.
18. S. Cortesi, M. Dreher and M. Magno, "Design and Implementation of an RSSI-Based Bluetooth Low Energy Indoor Localization System," 2021 17th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), 2021, pp. 163-168, doi: 10.1109/WiMob52687.2021.9606272.
19. P. Sthapit, H. -S. Gang and J. -Y. Pyun, "Bluetooth Based Indoor Positioning Using Machine Learning Algorithms," 2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics – Asia (ICCE-Asia), 2018, pp. 206-212, doi: 10.1109/ICCE-ASIA.2018.8552138.
20. S. Subedi, G. -R. Kwon, Seokjoo Shin, Suk-seung Hwang and Jae-Young Pyun, "Beacon based indoor positioning system using weighted centroid localization approach," 2016 Eighth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 2016, pp. 1016-1019, doi: 10.1109/ICUFN.2016.7536951.
21. A. Noertjahyana, I. A. Wijayanto and J. Andjarwirawan, "Development of Mobile Indoor Positioning System Application Using Android and Bluetooth Low Energy with Trilateration Method," 2017 International Conference on Soft Computing, Intelligent System and Information Technology (ICSIT), 2017, pp. 185-189, doi: 10.1109/ICSIT.2017.64.

*Надійшла до редколегії 15.05.2022*

*Відомості про авторів:*

**Невлюдов Ігор Шакирович** – д-р техн. наук, професор, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки; Україна; e-mail: [igor.nevliudov@nure.ua](mailto:igor.nevliudov@nure.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9837-2309>

**Новоселов Сергій Павлович** – канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки; Україна; e-mail: [sergiy.novoselov@nure.ua](mailto:sergiy.novoselov@nure.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3190-0592>

**Сичова Оксана Володимирівна** – канд. техн. наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки; Україна; e-mail: [oksana.sychova@nure.ua](mailto:oksana.sychova@nure.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0651-557X>

**Теслюк Сергій Ігорович** – Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки; Україна; e-mail: [serhii.tesliuk@nure.ua](mailto:serhii.tesliuk@nure.ua); ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0711-9250>