



Андрій ДУДНИК<sup>1</sup>, д-р техн. наук, доц.  
ORCID ID: 0000-0003-1339-7820  
e-mail: andrii.dudnik@knu.ua

Олександр ТРУШ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.  
ORCID ID: 0000-0002-4188-2850  
e-mail: oleksandr.trush@knu.ua

Ольга ЛЕЩЕНКО<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.  
ORCID ID: 0000-0002-3997-2785  
e-mail: olga.leshchenko@knu.ua

Наталія ДАХНО<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доц.  
ORCID ID: 0000-0003-3892-4543  
e-mail: nataliia.dakhno@knu.ua

<sup>1</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

## МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНІ У БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ МІКРОПРОЦЕСОРНИМ ЧАСТОТОМІРОМ

**Вступ.** Нині існує проблема обмежених ресурсів окремих вузлів сенсорних мереж, водночас для розв'язання багатьох задач (зокрема і позиціонування) виникає необхідність розроблення затратних методів для спільної роботи всіх вузлів мережі. Однією з таких задач є задача локалізації вузлів сенсорної мережі із самоорганізацією. Вона полягає у визначенні координат індивідуальних сенсорів без використання зовнішньої інфраструктури. З огляду на важливість інформації про розміщення об'єктів і людей, задача локалізації багато досліджувалась у минулому, і тому для її розв'язання розроблено велику кількість систем. Найвідомішою з них є система Global Positioning System (GPS). Однак підхід GPS не може бути застосований у бездротових сенсорних мережах у зв'язку з вимогами до наявності великої кількості додаткової інфраструктури (напр., супутників).

**Методи.** Використано методи аналізу та синтезу складних систем і комп'ютерного моделювання.

**Результати.** Запропоновано застосовувати метод вимірювання відстані між об'єктами на основі часу прибуття сигналу. Дано оцінку похибки вимірювання частоти під час вимірювання високих і низьких частот. Визначено, що при дослідженнях періодичних процесів у широкому діапазоні частот для досягнення заданої точності доцільно в діапазоні високих частот застосовувати цифровий частотомір, а в діапазоні низьких частот переходити до вимірювання періоду. Досліджено та побудовано графіки похибок квантування у процесі вимірювання частоти та періоду. Побудовано алгоритм роботи мікропроцесорного частотоміра, що дозволяє досліджувати періодичні процеси у широкому діапазоні. Запропоновано структурну схему мікропроцесорного частотоміра, яка дозволяє реалізувати наведений алгоритм.

**Висновки.** Впровадження розробленого мікропроцесорного частотоміра дозволить суттєво підвищити ефективність бездротових сенсорних мереж завдяки точнішому визначенню розташувань елементів мережі.

**Ключові слова:** бездротова сенсорна мережа, локалізація, відстань, мікропроцесорний частотомір, похибка вимірювання відстані.

### Вступ

Нині бездротові сенсорні мережі (БСМ) є важливим інструментом дослідження фізичного світу. Їхня важливість пов'язана з новими можливостями використання, що обумовлено такими характеристиками БСМ, як відсутність необхідності у кабельній інфраструктурі, мініатюрність вузлів, низьке споживання електроенергії, вбудований радіоінтерфейс, досить висока обчислювальна здатність, порівняно невелика вартість. Усе це зробило можливим їхнє широке застосування у багатьох сферах людської діяльності з метою автоматизації процесів збору інформації, моніторингу, контролю характеристик різноманітних технічних і природних об'єктів.

Предметом цього дослідження є бездротова сенсорна мережа, у якій запропоновано використовувати мікропроцесорний частотомір, що вимірює частоту надходження сигналів як величину, обернену до періоду між сигналами, на основі якої визначають відстань між об'єктами.

Методом дослідження є імітаційне моделювання сигналів різної частоти з метою оцінювання похибки мікропроцесорного частотоміра.

Метою дослідження є оцінювання похибки мікропроцесорного частотоміра, розроблення алгоритму його роботи та структурної схеми.

**Аналіз останніх досягнень і рішень.** Питанням дослідження інформаційно-вимірювальних систем, зокрема і дослідженням технологій моделювання, управління і взаємодії комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин (напр., відстані між об'єктами), присвячено роботи сучасних вчених, серед яких:

- роботи (Квасніков, & Хаєйн, 2013а; Квасніков та ін., 2013b; Орнатський, Михалко, & Осмоловський, 2014), які присвячено вимірюванню відстані засобами вимірювальної техніки;

- дослідження (Akyildiz, 2008; Boukerche, & Oliveira, 2017; Boukerche, Oliveira, & Nakamura, 2008; Brooks, & Iyengar, 2009; Hofmann-Wellenho, Lichtenegger, & Collins, 2013), які присвячено вимірюванню відстані засобами бездротових сенсорних мереж;

- роботи (Intanagonwiwat, Govindan, & Estrin 2008; Niculescu, & Nath, 2009; Priyantha, Balakrishnan, & Teller, 2016; Savvides, Han, & Strivastava, 2010; Yu, Govindan, & Estrin, 2011), які, крім вимірювання відстані, також присвячено аналізу характеристик самих сенсорних мереж.

© Дуднік Андрій, Труш Олександр, Лещенко Ольга, Дахно Наталія, 2023



Авторами роботи (Квасніков, & Хаєйн, 2013а) запропоновано використовувати інтернет для управління вимірювальною головкою, але в аналізі та корегуванні результатів вимірювання інтернет участі не бере. Зміст праці (Квасніков та ін., 2013b) присвячено розробленню аналогових інтерфейсів інформаційних вимірювальних систем, але в ній не розглянуто засоби збільшення їхньої продуктивності. У роботі (Орнатський, Михалко, & Осмоловський, 2014), ідеться про корекцію похибок вимірювання через інформаційно-вимірювальну систему, але пропонується використовувати кабельний зв'язок. У дослідженні (Akyildiz, 2008) виконано загальний огляд існуючих технологій сенсорних мереж і лише аналіз їхніх недоліків.

У роботах (Boukerche, & Oliveira, 2017; Boukerche, Oliveira, & Nakamura, 2008) розглянуто алгоритми локалізації, що можуть покращити процес вимірювання відстані між об'єктами.

Авторами праць (Brooks, & Iyengar, 2009; Hofmann-Wellenho, Lichtenegger, & Collins, 2013) описано наявні проблеми об'єднання сенсорних мереж і шляхи їхнього розв'язання. У роботах (Intanagonwiwat, Govindan, & Estrin 2008; Niculescu, & Nath, 2009; Priyantha, Balakrishnan, & Teller, 2016; Savvides, Han, & Strivastava, 2010; Yu, Govindan, & Estrin, 2011) ідеться про методи локалізації, що застосовують супутникові навігаційні системи, зокрема і в роботі (Yu, Govindan, & Estrin, 2011) також наведено дані про енергозберігальні технології для сенсорних мереж.

У нашій роботі запропоновано розглянути рекомендації щодо покращення технічних характеристик бездротових сенсорних мереж за допомогою додаткового застосування у пристроях мережі мікропроцесорних частотомірів, з метою покращення точності вимірювання.

**Постановка задачі.** У процесі побудови приладів часто виникає необхідність у реалізації функції вимірювання частотно-часових параметрів сигналів (період, частота). Вимірювання відстані у бездротових сенсорних мережах є однією з таких задач.

Вимірювання здійснюють за принципом визначення координат на основі часу прибуття сигналу. У цьому випадку, відстань між двома вузлами безпосередньо пропорційна часу, протягом якого сигнал поширюється від одного пункту до іншого. Інформаційна складова відісланого сигналу містить час відправки. Цю відстань, вимірюють за часом відправки сигналу  $t_1$  і часом досягнення ним вузла приймача  $t_2$ , відстань між відправником і приймачем визначають за формулою

$$d = s_r (t_2 - t_1),$$

де  $s_r$  – швидкість поширення радіосигналу (швидкість світла),  $t_1$  і  $t_2$  – часи, коли сигнал відіслано і отримано (рис. 1) (Dudnik et al., 2020a; Dudnik et al., 2021; Dudnik et al., 2020b).

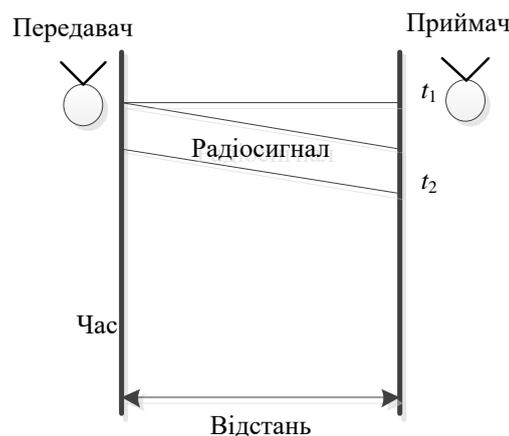


Рис. 1. Визначення відстані за допомогою часу прибуття сигналу

Далі пропонується здійснювати вимірювання частоти надходження сигналів  $f$  як величину, обернену проміжку між часом надходження сигналів  $(t_2 - t_1)$ .

У разі безпосереднього (прямого) вимірювання частоти періодичного сигналу найвагомішими є дві складові похибки – міри і порівняння. Похибка міри зумовлена нестабільністю частоти кварцового генератора. Ця складова похибки може бути відчутною під час вимірювання дуже високих частот. Похибку порівняння головним чином визначають похибкою квантування частоти  $\delta_{кч}$ . У вимірюванні низьких частот похибка квантування є визначальною складовою похибки вимірювання. Наприклад, якщо вимірюють частоту  $f_x = 10$  Гц при  $t_0 = 1$  с, то максимальна похибка квантування

$$\delta_{кч} = \frac{100\%}{f_x t_0} = \frac{100\%}{10 \cdot 1} = 10\%,$$

що неприпустимо.

Отже, через великі похибки квантування низькі частоти безпосередньо вимірюють цифровим частотоміром із невисокою точністю. Тому розв'язання завдання зменшення впливу похибки квантування на результати вимірювання завдяки було одним із важливих напрямів розроблення цифрової частотовимірювальної техніки (Кухарчук та ін., 2004).

#### Методи

В роботі пропонується використовувати методи аналізу та синтезу складних систем, вимірювання і комп'ютерного моделювання. Одним із них є метод зменшення похибки квантування.



**Метод зменшення похибки квантування мікропроцесорного частотоміра.** Перед тим, як розглядати мікропроцесорний частотомір, який радикально розв'язує вказане завдання, зупинимось на чотирьох способах зменшення похибки квантування під час вимірювання частоти:

1. Збільшення тривалості зразкового часового інтервалу  $t$ , тобто часу вимірювання. Проте можливості такого способу обмежені, оскільки для одержання малої похибки квантування (напр.,  $\delta_k = 0,01\%$ ;  $f_x = 10$  Гц) потрібний дуже великий час вимірювання:

$$t_0 = \frac{100\%}{\delta_{кч} \cdot f_x} = \frac{100\%}{0,01 \cdot 10} = 1000 \text{ с.}$$

2. Збільшення кількості імпульсів, які квантують зразковий часовий інтервал  $t_0$ , що досягається множенням вимірюваної частоти  $f_x$ . Виконання такого способу поєднано із застосуванням додаткового блока помножувача частоти, що ускладнює і підвищує вартість апаратурної частини.

3. Врахування випадкової природи похибки квантування. Забезпечується проведення багаторазових вимірювань і усереднення їхніх результатів. Це ефективний шлях зменшення впливу випадкової похибки на результат вимірювання.

4. Безпосереднє вимірювання періоду досліджуваного сигналу з наступним обчисленням частоти  $f_x = 1/T_x$ . Цей шлях дозволяє різко зменшити похибку квантування у процесі вимірювання низьких частот.

#### Результати

Застосуємо запропоновані методи в практичних ситуаціях та оцінимо вигоду який при цьому отримується.

Щоб побачити ефект, якого досягають, скористаємось наведеним раніше прикладом. Перейдемо до вимірювання періоду. Частота  $f_x = 10$  Гц. Відповідний період  $T_x = 0,1$  с. Сформуємо стробувальний імпульс тривалістю, що дорівнює періоду  $T_x$ , і проквантуємо його імпульсами, частота проходження яких  $f_0 = 10$  МГц (що зазвичай має місце в цифрових частотомірах). У цьому разі похибка квантування

$$\delta_{кч} = \frac{100\%}{T_x \cdot f_0} = \frac{100\%}{0,1 \cdot 10^7} = 10^{-4}\%.$$

Можна дійти висновку, що непряме вимірювання частоти  $f_x = 1/T_x$  у цьому випадку дозволило різко підвищити точність порівняно з прямим вимірюванням частоти: похибка квантування зменшилась у 100 000 разів. Однак при вимірюванні високих частот (напр.,  $f_x = 106$  Гц,  $t_0 = 1$  с,  $f_0 = 10$  Гц) похибка квантування цифрового частотоміра

$$\delta_{кч} = \frac{100\%}{t_0 \cdot f_x} = \frac{100\%}{0,1 \cdot 10^6} = 10^{-4}\%,$$

а похибка квантування цифрового вимірювача періоду надмірно зростає:

$$\delta_{кч} = \frac{100\% \cdot f_x}{f_0} = \frac{100\% \cdot 10^6}{10^7} = 10\%.$$

**Дослідження методу зменшення похибки квантування мікропроцесорного частотоміра.** Отже, у дослідженнях періодичних процесів у широкому діапазоні частот для досягнення заданої точності доцільно в діапазоні високих частот застосовувати цифровий частотомір, а в діапазоні низьких частот переходити до вимірювання періоду (рис. 2, 3).

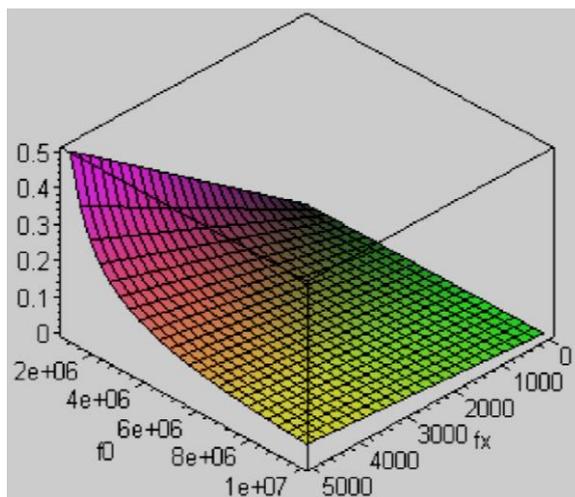


Рис. 2. Похибка квантування вимірювача періоду

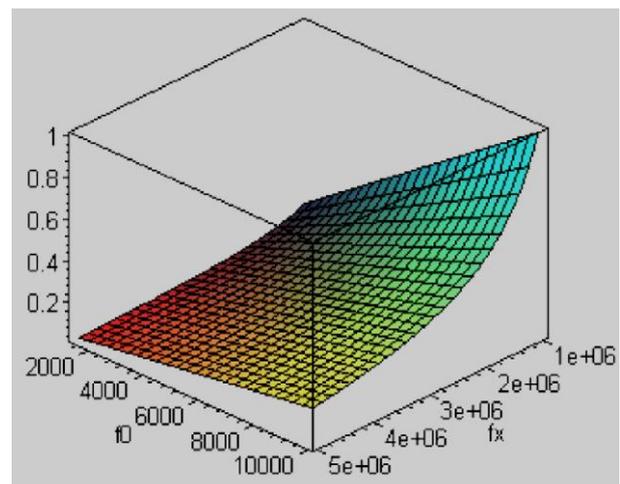


Рис. 3. Похибка квантування вимірювача частоти

Спочатку налаштовують програму на режим вимірювача періоду.

Установлюють коефіцієнт подільника частоти  $K = 1$  і вимірюють невідому частоту  $f_x$ . Вимірювану частоту подають на вхід аналогового компаратора.

Алгоритм роботи мікропроцесорного частотоміра, що дозволяє досліджувати періодичні процеси у широкому діапазоні, зображено на рис. 4.

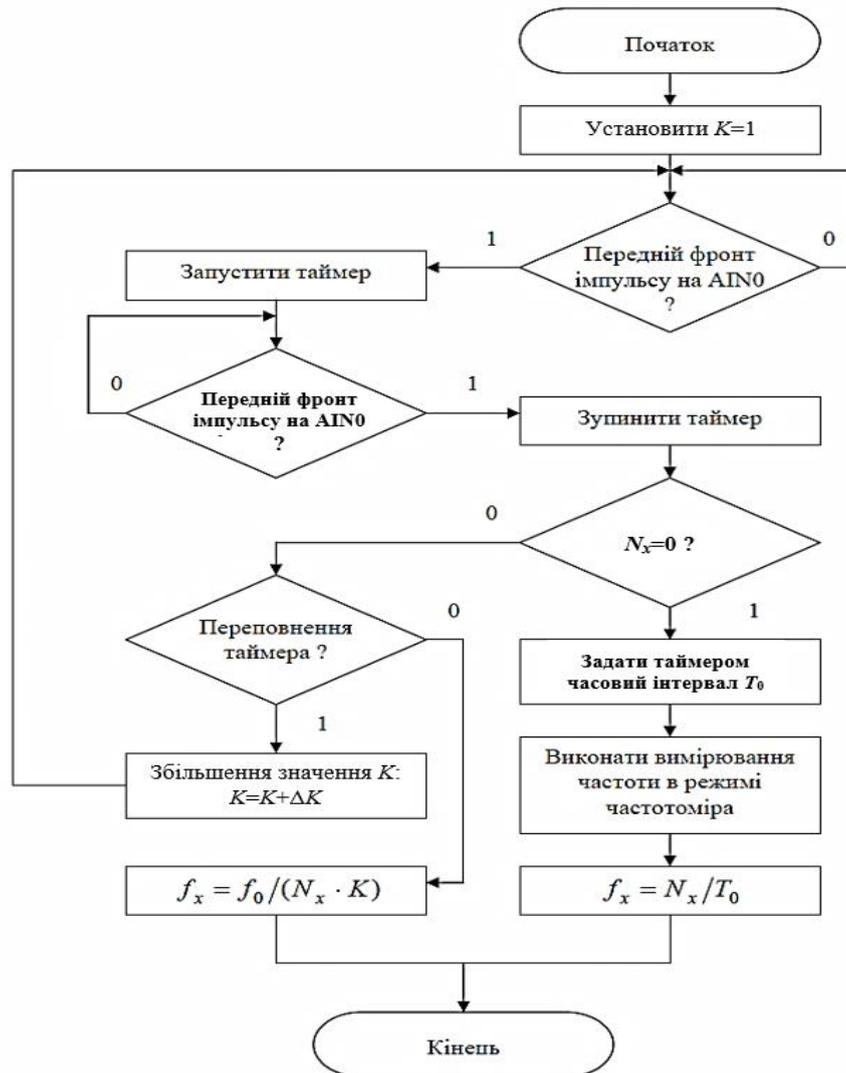


Рис. 4. Алгоритм визначення похибки квантування вимірювача частоти

Аналоговий компаратор вибрано з тієї причини, що він має досить гнучку програмну обробку інформації: програміст може вибрати пряму програмну обробку або обробку за перериванням. За переднім фронтом імпульсу на вході *AIN0* аналогового компаратора запускають таймер на рахування імпульсів  $f_0/K$ . За наступним переднім фронтом імпульсу на вході *AIN0* аналогового компаратора (після закінчення періоду  $T_x$ ) таймер мікроконтролера зупиняють і підраховують кількість імпульсів  $N_x$ .

Якщо  $N_x = 0$  (частота  $f_0$  недостатня для спрацювання вимірювача періоду), то задають за допомогою таймера часовий інтервал  $t_0$  (наприклад,  $t_0 = 1$  с) і переходять у режим вимірювання частоти. Частоту обчислюють за формулою  $f_x = N_x/T_0$ .

Структурну схему мікропроцесорного частотоміра, яка дозволяє реалізувати наведений алгоритм, зображено на рис. 5.

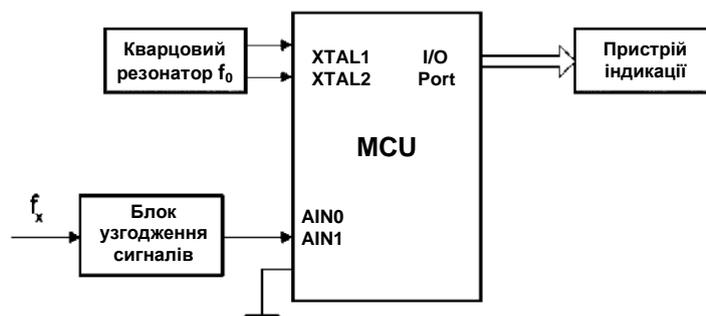


Рис. 5. Мікропроцесорний частотомір



Якщо  $N_x \neq 0$ , то перевіряють переповнення таймера мікроконтролера. У разі невиконання цієї умови обчислюють частоту, в іншому випадку збільшують коефіцієнт подільника частоти  $K = K + \Delta K$  і повертаються до вимірювання періоду. Частоту обчислюють за формулою  $f_x = f_0/(N_x \cdot K)$ .

#### Висновки

Обґрунтовано застосування методу вимірювання відстані між об'єктами, на основі часу прибуття сигналу.

Дано оцінку похибки вимірювання частоти під час вимірювання високих і низьких частот.

Визначено, що у дослідженнях періодичних процесів у широкому діапазоні частот для досягнення заданої точності доцільно в діапазоні високих частот застосовувати цифровий частотомір, а в діапазоні низьких частот переходити до вимірювання періоду.

Проведено дослідження та побудовано графіки похибок квантування під час вимірювання частоти та періоду.

Побудовано алгоритм роботи мікропроцесорного частотоміра, що дозволяє досліджувати періодичні процеси у широкому діапазоні.

Запропоновано структурну схему мікропроцесорного частотоміра, яка дозволяє реалізувати наведений алгоритм.

**Внесок авторів:** Андрій Дуднік – розроблення методів і методології дослідження та створення структурної схеми мікропроцесорного частотоміра; Олександр Труш – обґрунтування застосування методу вимірювання відстані між об'єктами та опис результатів дослідження; Ольга Лещенко – огляд літературних джерел і написання висновків; Наталія Дахно – побудова алгоритму роботи мікропроцесорного частотоміра та збір емпіричних даних.

#### Список використаних джерел

- Квасніков, В. П., & Хаєїн, Т. М. (2013). Концепція перевірки координатно-вимірювальних машин через Інтернет. *Метрологія та прилади*, (6), 48–53.
- Квасніков, В. П., Орнатський, Д. П., Нічікова, Т. П., & Гаврилов, І. В. (2013). Способи побудови аналогових інтерфейсів інформаційно-вимірювальних систем механічних величин. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, (1), 164–169.
- Кухарчук, В. В., Кучерук, В. Ю., Долгополов, В. П., & Грумінська, Л. В. (2004). *Метрологія та вимірювальна техніка*. УНІВЕРСУМ-Вінниця. <http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/2716/000137.pdf?sequence=1>
- Орнатський, Д. П., Михалко, М. В., & Осмоловський, О. І. (2014). Аналоговий інтерфейс для дистанційних вимірювань переміщень диференціально-трансформаторними індуктивними датчиками. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 1/2 (67), 52–57.
- Akyildiz, I. F. (2008). Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks. IEEE Communications Magazine*, 250.
- Boukerche, A., & Oliveira H. (2017). Towards an integrated solution for node localization and data routing in sensor networks. *22th IEEE Symposium on Computers and Communications* (p. 449–454). Aveiro, Portugal. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Boukerche, A., Oliveira, H., & Nakamura, E., (2008). A novel location-free greedy forward algorithm for wireless sensor networks. *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Communications, Beijing, China*. (p. 2096–2101). Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Brooks, R. R., & Iyengar, S. S. (2009). *Multi-Sensor Fusion: Fundamentals and Applications*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Dudnik, A., Daria, P., Kobylychuk, M., Domkiv, T., Dahno, N., & Leshchenko, O. (2020). Intrusion and Fire Detection Method by Wireless Sensor Network. *2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory* (p. 211–215). Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Dudnik, A., Kuzmich, L., Trush, O., Domkiv, T., Leshchenko, O., & Vyshnivskiy, V. (2020). Smart Home Technology Network Construction Method and Device Interaction Organization Concept. *2020 IEEE 2nd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing* (p. 1–6). Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Dudnik, A., Kvasnikov V., Trush, O., & Domkiv, T. (2021). Development of Distributed Multi-Segment Wireless Networks for Determining External Situations. *In Information Technology and Interactions. CEUR Workshop Proceedings*, (2845), 127–137.
- Hofmann-Wellenho, B., Lichtenegger, H., & Collins, J. (2013). *Global Positioning System: Theory and Practice* (14th ed.). Springer-Verlag, Berlin.
- Intanagonwiwat, C., Govindan, R., & Estrin D. (2008). Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. *In Proceedings of the 6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, Boston, MA, ACM Press (p. 56–67). University Chicago.
- Niculescu, D., & Nath, B. (2009). Ad hoc positioning system (aps) using aoa. *Proceedings of INFOCOM*, San Francisco, CA (p. 238).
- Priyantha, N., Balakrishnan, H., & Teller, S. (2016). The cricket compass for context aware mobile applications. *17th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*. Rome, Italy (p. 325). Mobile Computing and Networking Forum.
- Savvides, A., Han, C., & Strivastava, M. (2010). Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors. *7th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, Rome, Italy (p. 166–179). Mobile Computing and Networking Forum.
- Yu, Y., Govindan, R., & Estrin, D. (2011). Geographical and energy aware routing: A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. *Technical Report CSD-TR-01-0023, UCLA Computer Science Department*.

#### References

- Akyildiz, I. F. (2008). Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks. IEEE Communications Magazine*, 250.
- Boukerche, A., & Oliveira H. (2017). Towards an integrated solution for node localization and data routing in sensor networks. *22th IEEE Symposium on Computers and Communications* (p. 449–454). Aveiro, Portugal. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Boukerche, A., Oliveira, H., & Nakamura, E., (2008). A novel location-free greedy forward algorithm for wireless sensor networks. *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Communications, Beijing, China* (p. 2096–2101). Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Brooks, R. R., & Iyengar, S. S. (2009). *Multi-Sensor Fusion: Fundamentals and Applications*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Dudnik, A., Daria, P., Kobylychuk, M., Domkiv, T., Dahno, N., & Leshchenko, O. (2020). Intrusion and Fire Detection Method by Wireless Sensor Network. *2020 IEEE 2nd International Conference on Advanced Trends in Information Theory*, 211–215. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Dudnik, A., Kuzmich, L., Trush, O., Domkiv, T., Leshchenko, O., & Vyshnivskiy, V. (2020). Smart Home Technology Network Construction Method and Device Interaction Organization Concept. *2020 IEEE 2nd International Conference on System Analysis & Intelligent Computing*, 1–6. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Dudnik, A., Kvasnikov V., Trush, O., & Domkiv, T. (2021). Development of Distributed Multi-Segment Wireless Networks for Determining External Situations. *In Information Technology and Interactions. CEUR Workshop Proceedings*, (2845), 127–137.
- Hofmann-Wellenho, B., Lichtenegger, H., Collins, J. (2013). *Global Positioning System: Theory and Practice* (14th ed.), Springer-Verlag, Berlin.
- Intanagonwiwat, C., Govindan, R., & Estrin D. (2008). Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. *In Proceedings of the 6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*, Boston, MA, ACM Press, 56–67. University Chicago.
- Kucharuk, V. V., Kucheruk, V. Yu., Dolgoplov, V. P., & Gruminska, L. V. (2004). *Metrology and Measuring Devices*. Universum-Vinnitca, <http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/2716/000137.pdf?sequence=1> [in Ukrainian].
- Kvasnikov, V. P., & Haiem, T. M. (2013). Concept of coordinate-measuring machines verification through the Internet. *Metrology and devices*, (6), 48–53 [in Ukrainian].
- Kvasnikov, V. P., Ornatsky, D. P., Nichikova, T. P., & Gavrilova, I. V. (2013). Methods of analog interface design for informational-measuring systems of mechanical values. *Measuring and computer hardware in technological processes*, (1), 164–169 [in Ukrainian].
- Niculescu, D., & Nath, B. (2009). Ad hoc positioning system (aps) using aoa. *Proceedings of INFOCOM*, San Francisco, CA. 238.
- Ornatsky, D. P., Mikhalko, M. V., & Osolovsky, O. I. (2014). Analog Interface for shift distant measurements using differential-transformer-based inductive sensors. *Східно-Європейський журнал передових технологій*, 1/2 (67), 52–57 [in Ukrainian].
- Priyantha, N., Balakrishnan, H., & Teller, S. (2016). The cricket compass for context aware mobile applications. *17th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking*. Rome, Italy, 325. Mobile Computing and Networking Forum.



Savvides, A., Han, C., & Strivastava, M. (2010). Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors. *7th ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*, Rome, Italy, 166–179. Mobile Computing and Networking Forum.

Yu, Y., Govindan, R., & Estrin, D. (2011). *Geographical and energy aware routing: A recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks*. Technical Report CSD-TR-01-0023, UCLA Computer Science Department.

Отримано редакцією журналу / Received: 07.03.23  
Прорецензовано / Revised: 17.03.23  
Схвалено до друку / Accepted: 24.03.23

Andriy DUDNIK<sup>1</sup>, DSc (Engin.), Assoc. Prof.  
ORCID ID: 0000-0003-1339-7820  
e-mail: andrii.dudnik@knu.ua

Oleksandr TRUSH<sup>1</sup>, PhD (Engin.), Assoc. Prof.  
ORCID ID: 0000-0002-4188-2850  
e-mail: oleksandr.trush@knu.ua

Olga LESHCHENKO<sup>1</sup>, PhD (Engin.), Assoc. Prof.  
ORCID ID: 0000-0002-3997-2785  
e-mail: olga.leshchenko@knu.ua

Natalia DAKHNO<sup>1</sup>, PhD (Engin.), Assoc. Prof.  
ORCID ID: 0000-0003-3892-4543  
e-mail: nataliia.dakhno@knu.ua

<sup>1</sup> Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

## THE METHOD OF DISTANCE MEASUREMENT IN WIRELESS SENSOR NETWORKS BY MEANS OF A MICROPROCESSOR FREQUENCY METER

**B a c k g r o u n d .** Currently, there is a problem of limited resources of individual nodes of sensor networks, to solve many problems (including positioning), there is a need to develop methods for joint work of all nodes of the network. One of such tasks is the task of localization of nodes of the sensor network with self-organization. It consists in determining the coordinates of individual sensors without the use of external infrastructure. The problem of localization has been extensively studied in the past, as information on the location of objects or people is important in many applications, and a large number of systems have been developed to address them. The most famous of these is the Global Positioning System (GPS). However, the GPS approach cannot be applied to WSN due to its requirements for a large number of additional infrastructures (e.g. satellites).

**M e t h o d s .** In this paper methods of complex systems analysis and synthesis as well as computer simulation are used.

**R e s u l t s .** In this study, it is proposed to use the method of measuring the distance between objects, based on the time of arrival of the signal. The estimation of error of measurement of frequency, at measurement of high and low frequencies is given. It is determined that in the study of periodic processes in a wide range of frequencies to achieve a given accuracy, it is advisable to use a digital frequency meter in the high frequency range, and in the low frequency range to move to period measurement. Research has been conducted and graphs of quantization errors in frequency and period measurement have been constructed. An algorithm of microprocessor frequency meter operation is built, which allows studying periodic processes in a wide range. The block diagram of the microprocessor frequency meter is offered, which allows implementing the given algorithm.

**C o n c l u s i o n s .** Implementation of the designed microprocessor frequency meter allows one substantially increase efficiency of wireless sensor networks due to more precise measurements of the network elements positions.

**K e y w o r d s :** wireless sensor network, localization, distance, microprocessor frequency meter, distance measurement error.

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.