

РОЗРОБКА МЕТОДУ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНІ

Дуднік А. С.

1. Вступ

Несвоєчасне визначення позиції об'єкта, що входить до складу безпроводних сенсорних мереж, призводить до генерування помилкової інформації в комп'ютеризованій системі вимірювання відстані між об'єктами. Такий недолік, в свою чергу, може призвести до, наприклад, несвоєчасного виявлення крадіжки цінних речей, джерела загоряння тощо. Особливо сприятливим середовищем, для такого роду негативних наслідків є завадова обстановка [1]. Серед різноманітних класів комп'ютерних інформаційних систем і мереж особливе місце займають системи і мережі, транспортна служба яких побудована на використанні радіоефіру в якості середовища передачі даних комп'ютеризованих систем вимірювання відстані (безпроводні сенсорні мережі) [2]. Тому при створенні наукових основ побудови комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин важливе місце займає продуктивність безпроводних сенсорних мереж. Тому актуальним є вирішення цієї проблеми за допомогою модифікації існуючої класичної еталонної моделі взаємодії відкритих систем (EM OSI/ISO). Згідно з цією моделлю проектуються, створюються і експлуатуються більшість засобів передачі даних інформаційно-вимірювальних систем. Також не менш важливим є теоретичний аналіз та пошук оптимальних методів моделювання та збільшення продуктивності каналів передачі даних комп'ютеризованих систем вимірювання відстані [3, 4].

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Одними з найбільш проблемних місць безпроводних сенсорних мереж є несвоєчасність передачі інформації, а також помилки при передачі. Це, в свою чергу, є причиною завадової обстановки та призводить до великої імовірності похибок при вимірюванні відстані. *Об'єктом даного дослідження* є складові частини безпроводної сенсорної мережі. Проблемним місцем цієї мережі є сенсорний модуль, що залежить від обмеження енергетичного запасу елемента живлення, що в свою чергу впливає на завадостійкість його передачі даних, через обмеження потужності його сигналу. На рис. 1 зображена спрощена модель транспортної системи передачі даних сенсорних мереж між 2 окремо взятими пристроями мережі.

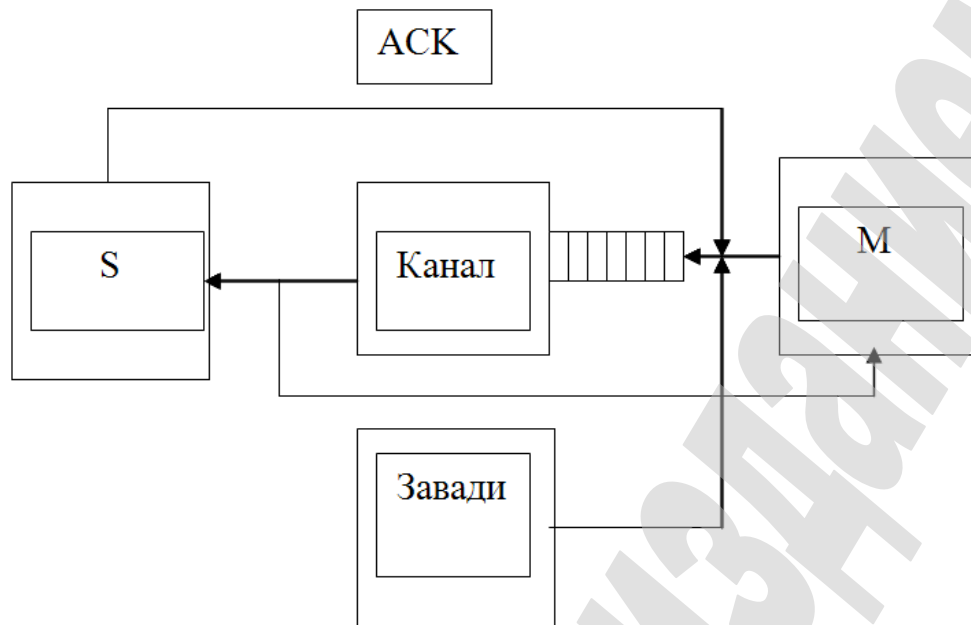


Рис. 1. Концептуальна модель фрагменту транспортної системи безпроводної сенсорної мережі: *S* – підлеглий одноканальний пристрій (slave); *M* – головний багатоканальний магістральний пристрій (master)

Модель працює наступним чином. По команді головного пристрою, підлеглий передає дані про свою відстань від сусідніх пристроїв, через безпроводний канал, на який впливають різного роду завади. Дана схема є досить спрощеною, адже між основним та підлеглим пристроєм може бути ще кілька головних, або підлеглих, як показано на рис. 2.

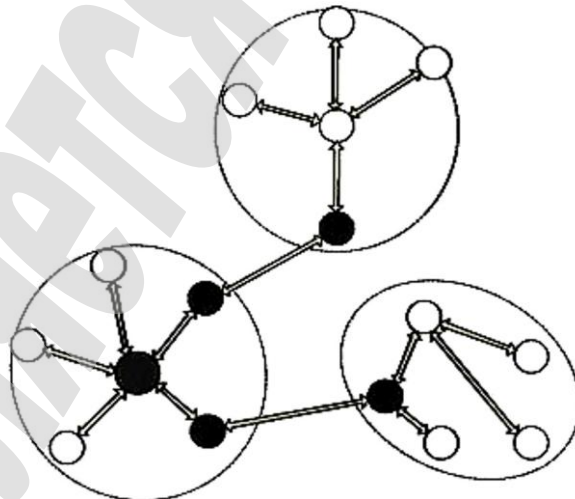


Рис. 2. Варіант топології сенсорних мереж: головні пристрої зафарбовані

Розглянувши специфіку функціонування мережі транспортування даних стандарту *ZigBee* (*IEEE 802.15.4*), розглянемо також роботу пристрою, побудованого із використанням рекомендацій стосовно технологій безпроводового транспортування даних в безпроводових інформаційних системах, структура якого зображена на рис. 3 [5].

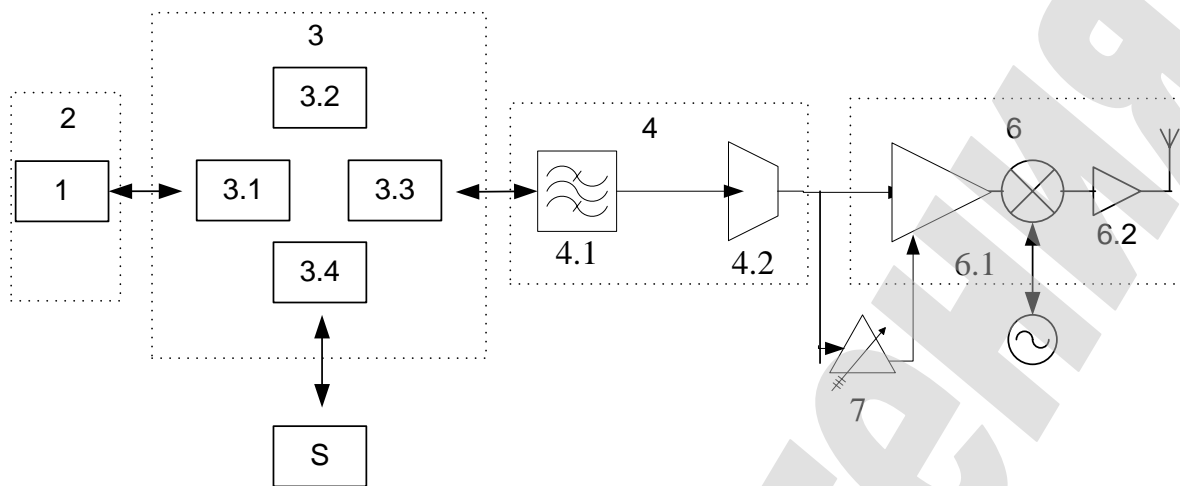


Рис. 3. Пристрій безпроводного передавання даних: 1 – інтерфейс мережевого рівня 2, 3 – модуль підрівня *LLC* канального рівня моделі *OSI*, 3.1 – блок хост-інтерфейсу, 3.2 – вбудований мікроконтролер, 3.3 – блок додатку прийомо/передавача, 3.4 – блок шинного інтерфейсу, *S* – пам'яті, 4 – модуль підрівня *MAC* канального рівня, 4.1 – контролер смуги частот, 4.2 – радіочастотний прийомо/передавач, 6 – модуль фізичного рівня, 6.1 – інтерфейс фізичного рівня, 6.2 – антена, 7 – блок автоматичного налаштування частоти

Технологія роботи даного пристрою така. Керуючий блок 1 надсилає команду про відправку пакета та сам пакет на модуль підрівня *LLC* канального рівня 3. В модулі підрівня *LLC* канального рівня *OSI* через блок хост-інтерфейсу 3.1, пройшовши відповідні перетворення за допомогою додатків даного модуля, пакет стає фреймом. Після чого вбудований мікроконтролер 3.2 передає фрейм до блоку додатку прийомо/передавача 3.3 та через блок шинного інтерфейсу 3.4 записує дані про стан передавання до пам'яті *S*, де вони ще певний час зберігаються. Блок додатку прийомо/передавача 3.3 спрямовує фрейм до модуля підрівня *MAC* канального рівня 4. В модулі підрівня *MAC* канального рівня *EM OSI/ISO* модулі контролер смуги частот 4.1 підбирає для даного фрейму оптимальний діапазон частот та спрямовує фрейм до радіочастотного прийомо/передавача 4.2. В даному модулі відбувається як перетворення фрейму у електромагнітні коливання, так й їх модуляція відповідно до вмісту фрейму. Після цього коливання передаються до модулю фізичного рівня *OSI* 6, а інформація про підібраний блоком 4.1 діапазон частот передається до блоку автоматичного налаштування частоти 7. Блок 6.1 модулю фізичного рівня *OSI* накладає електромагнітні коливання на частоту, яка налаштовується блоком 7. Коливання спрямовуються до антени 6.2, яка передає сигнал до радіоефіру.

В даній роботі пропонується метод підвищення продуктивності, що полягає у вдосконаленні алгоритму обслуговування заявок у каналі передачі даних, що зображений на рис. 1. А також у модернізації структурної схеми пристрою передачі даних, що зображений на рис. 3.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – розробка нових та удосконалення існуючих технологічних рішень для підвищення продуктивності безпроводних сенсорних мереж, що входять до складу систем вимірювання відстані.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

1. Запропонувати математичну модель обслуговування заявок в чергах каналів передачі даних безпроводних сенсорних мереж в одноканальних та багатоканальних пристроях.
2. Дослідити адаптовані алгоритми управління чергами, що можуть оптимізувати процес розподілу заявок в чергах безпроводних сенсорних пристроїв.
3. Розробити алгоритм функціонального об'єднання нижніх рівнів еталонної моделі *OSI*, щоб покращити продуктивність безпроводних сенсорних мереж в зонах невпевненого прийому та дослідити при цьому ефект від розширення стандартної смуги частот.
4. Ввести в структурну схему пристрою безпроводного передавання даних відповідні зміни, на основі алгоритму функціонального об'єднання нижніх рівнів еталонної моделі *OSI*.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

Питанням дослідження інформаційно-вимірювальних систем, в тому числі і дослідженням технологій моделювання, управління і взаємодії комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин (зокрема відстані між об'єктами), присвячено роботи сучасних вчених, серед яких:

- роботи [6–8], які присвячені вимірюванню відстані засобами вимірювальної техніки;
- роботи [9–13], які присвячені вимірюванню відстані засобами безпроводних сенсорних мереж;
- роботи [14–18], які, крім вимірювання відстані, також присвячені аналізу характеристик самих сенсорних мереж.

У роботі [6], пропонується використовувати Інтернет для управління вимірювальною головою, але в аналізі та корегуванні результатів вимірювання, Інтернет участі не бере. Зміст роботи [7] присвячений розробці аналогових інтерфейсів інформаційних вимірювальних систем, але в ній не розглядаються засоби збільшення їх продуктивності. В роботі [8], йдеться про корекцію похибок вимірювання через інформаційно-вимірювальну систему, але пропонується використовувати кабельний зв'язок. В роботі [9] проводиться загальний огляд існуючих технологій сенсорних мереж та лише аналізуються їх недоліки. В роботах [10, 11] розглядаються алгоритми локалізації, що можуть покращити процес вимірювання відстані між об'єктами. В роботах [12, 13] розглядаються існуючі проблеми об'єднання сенсорних мереж та шляхи їх вирішення. В роботах [14–18] йдеться про методи локалізації, що застосовують супутникові навігаційні системи, зокрема в роботі [18] також йдеться про енергозберігаючі технології для сенсорних мереж.

В даній роботі пропонується розглянути рекомендації щодо покращення технічних характеристик безпроводних сенсорних мереж. Це також впливає на точність процесу локалізації та вимірювання відстані між об'єктами в зонах невпевненого прийому та з недостатньою завадостійкістю

5. Методи досліджень

В якості основного показника технічних характеристик безпроводних сенсорних мереж використано час затримки бітів в каналах передавання ($W_{\text{черги}}$). Цей час є одним із показників швидкості роботи мережі, яка в свою чергу теж впливає на точність процесу локалізації та вимірювання відстані між об'єктами. Це є вкрай важливим у тих випадках, коли відстань визначається на основі загального часу прибуття сигналу між сусідніми пристроями. Даний показник є його безпосередньою складовою.

Спочатку буде запропоновано математичну модель затримки бітів у багатоканальному пристрої (що зв'язок з більше ніж 2 сусідніми пристроями). Даний процес буде розглянуто з певною неточністю, так як його представлено, як стаціонарний, без врахування перехідних процесів (наприклад, встановлення зв'язку). Транзакт, що є неподільним об'єктом в системі імітаційного моделювання загального призначення, прирівнюється до біта, що переміщується від джерела інформації до споживача. Кожна фаза моделювалася СМО $G/M/n$ з відмовами і дисципліною $FIFO$. Універсальна система імітаційного моделювання GPSS забезпечує збір і статистичну обробку даних про транзакти, затримані в кожній точці моделі, а також інтенсивності потоків відмов. Час затримки бітів в каналах передавання ($W_{\text{черги}}$) даної мережі визначається у відповідності до формули для обчислення часу затримки в черзі багатоканального пристрою з очікуванням:

$$W_{\text{черги}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} L_{\text{черги}}, \quad (1)$$

де λ – інтенсивність надходження бітів, що передаються для i -го стану; $L_{\text{черги}}$ – середня кількість бітів, що передаються і визначається за наступною формулою:

$$L_{\text{черги}} = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i P_0}{n \cdot n! \left(1 - \sum_{i=1}^N \rho_i / n\right)^2},$$

де n – кількість розподілених підканалів безпроводового передавання даних, що для даного випадку складає 23 підканали; P_0 – імовірність того, що підканал на даний момент зайнятий, визначається за формулою:

$$P_0 = \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i}{1!} + \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i^2}{2!} + \dots + \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i^n}{n!} + \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i^{n+1}}{n! \left(n - \sum_{i=1}^N \rho_i \right)} \right)^{-1},$$

де ρ – навантаження на дану мережу безпроводового передавання даних, що визначається за формулою:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\mu}, \quad (2)$$

де λ – інтенсивність надходження бітів до мережі передавання даних при i -тому стані; μ – інтенсивність обслуговування бітів у мережі передавання даних. Підставивши усі ці значення у формулу (1), отримаємо наступну результуючу формулу:

$$W_{\text{черги}} = \frac{1}{\lambda} \frac{\left(\left(\frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\mu} \right)^{n+1} \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\mu} \frac{1}{1!} + \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\mu} \frac{1}{2!} + \dots + \frac{\left(\frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\mu} \right)^n}{n!} + \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\mu} \frac{1}{n! \left(n - \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\mu} \right)} \right)^{n+1}}{\left(\frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\mu} \right)^2 n \cdot n! \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\mu} \right)^2}.$$

Головний пристрій «*Master*» передає біти в непарні моменти часу, а підлеглий пристрій «*Slave*» – у парні. Дана модель має ієрархічну будову адже пристрій, який для окремої ділянки мережі є головним, для іншої ділянки може бути підлеглим. Експериментальне дослідження даної моделі було проведене за допомогою інструментального засобу *GPSS*, при 10^6 прогонів. З отриманих результатів виявлено, що співвідношення часу затримки відповідає реально наявним співвідношенням параметрів мережі [19].

Запропоновано модель одноканального зв'язку (коли пристрій має зв'язок лише з 2 сусідніми), результати роботи якої б відображали часові та кількісні параметри передавання даних вимірювання механічних відстані. Імітаційну модель подано відкритою одноканальною системою масового обслуговування. Модель, за класифікацією Кендала, є моделлю класу $G/M/1$ з дисципліною (алгоритмом обслуговування заявок) $FIFO$. Час затримки бітів в каналах передавання ($W_{черги}$) даної системи буде визначатись у відповідності до формули для обчислення часу затримки в черзі одноканального пристрою з очікуванням [19]:

$$W_{черги} = \frac{L_{черги}}{\sum_{i=1}^N \lambda_i (1 - P_N)}, \quad (3)$$

де $L_{черги}$ – середня кількість бітів, що передаються, визначається за наступною формулою:

$$L_{черги} = \sum_{i=1}^N n P_n,$$

де P_n – імовірність того, що в каналі інфрачервоного передавання даних знаходиться n бітів і визначається за формулою:

$$P_n = P_0 \sum_{i=1}^N \rho_i^n,$$

де P_0 – імовірність того, що підканал на даний момент зайнятий, визначається за формулою:

$$P_0 = \frac{1 - \sum_{i=1}^N \rho_i^n}{1 - \sum_{i=1}^N \rho_i^{n(n+1)}},$$

де ρ – навантаження на мережу бездротового передавання даних, що визначається за формулою (2). Підставивши дані значення у формулу (3), отримаємо наступну результуючу формулу:

$$W_{\text{черги}} = \frac{\sum_{n=0}^N n \frac{1 - \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\mu}}{\mu} \left(\frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\mu} \right)^n}{1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i}{\mu} \right)^{(N+1)}}{\sum_{i=1}^N \lambda_i (1 - P_N)}$$

Запропоновано алгоритм функціонального об'єднання нижніх рівнів еталонної моделі *OSI* (рис. 4).

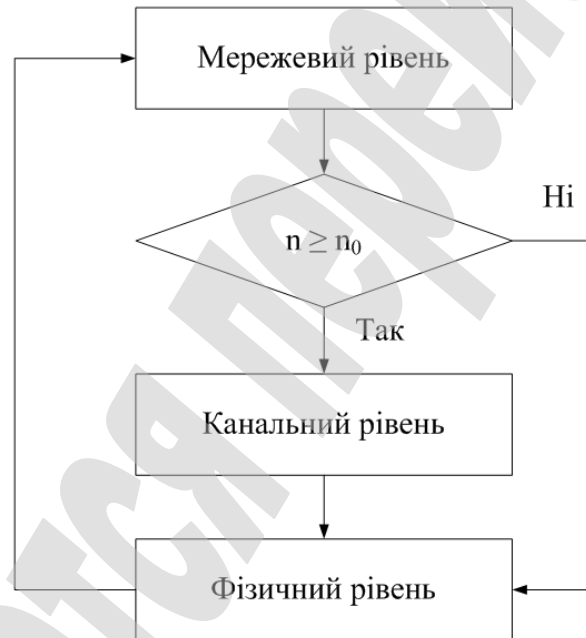


Рис. 4. Блок-схема алгоритму аналізу стану якості сигналу

Дану технологію в роботах [20, 21] було застосовано для досліджень мереж стандарту *IEEE 802.11*, а в даній роботі пропонується його застосувати до сенсорних мереж стандарту *ZigBee (IEEE 802.15.4)* із застосуванням алгоритмів «*FIFO*», «*Пріоритетне обслуговування*», «*Зважені черги*». Це дало змогу одержати за формулою (5) результати, що зображені на рис. 5, 6.

Алгоритм базується на контролюванні бітів фрейму фізичного рівня. Він побудований з тою метою, щоб з полів фрейму, які містять інформацію про середовище передавання даних, отримувати потрібну інформацію. У даному методі мережевий рівень через певні проміжки часу відсилає запити на фізичний про стан сигналу на даний момент. Інформація про стан сигналу міститься у полі, в якому перші біти тримають у собі інформацію про швидкість передавання, а інші – про стан сигналу [20].

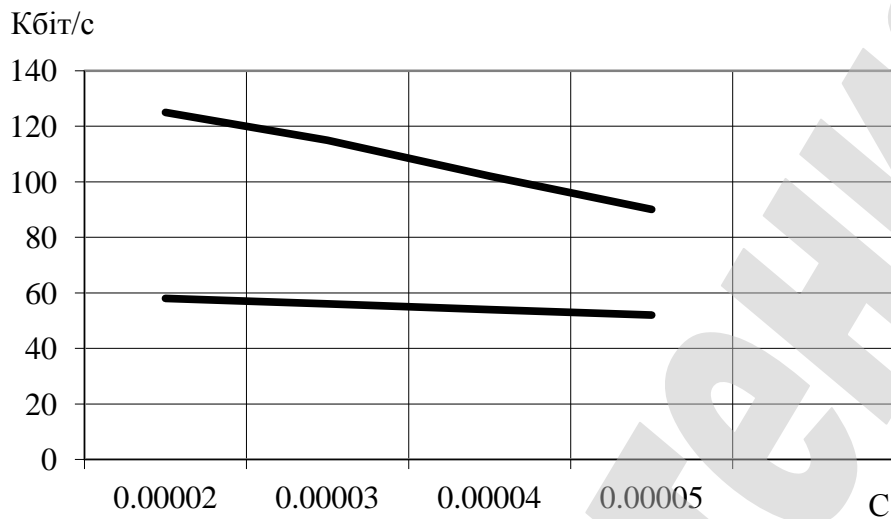


Рис. 5. Графік залежності пропускної спроможності каналу передавання від часу затримки на обробку

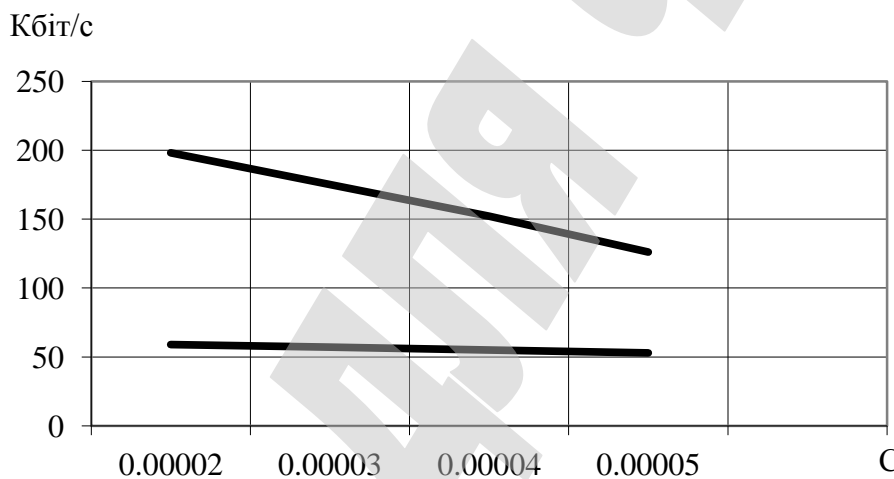


Рис. 6. Графік залежності пропускної спроможності каналу передавання від часу затримки на обробку при розширенні смуги частот

Алгоритми управління чергами потрібні для роботи в періоди тимчасових перевантажень при максимальному завантаженні каналів передавання сенсорної мережі. Вона знаходиться у складі комп'ютеризованої системи вимірювання механічних величин. Це потрібно тоді, коли мережевий пристрій не може впоратися з передаванням бітів на вихідний інтерфейс в тому темпі, в якому вони поступають. Якщо причиною перевантаження є недостатня продуктивність процесорного блоку мережевого пристрою, то необроблені біти тимчасово накопичуються у вхідній черзі відповідного вхідного інтерфейсу. Черг до вхідного інтерфейсу може бути декілька, якщо диференціюються запити на обслуговування по декількох класах. У тому ж випадку, коли причина перевантаження полягає в обмеженій пропускній спроможності вихідного інтерфейсу, біти тимчасово зберігаються у вихідній черзі (або чергах) цього інтерфейсу. Концептуальні моделі мереж з застосуванням різних алгоритмів управління чергами в мережах представлені відкритою багатофазною системою масового обслуговування. Кожна фаза моделювалася СМО $G/M/n$ побудована згідно умов того чи

іншого алгоритму управління чергами. Результуючою формулою для визначення часу затримки бітів в каналах передавання ($W_{чергу}$) даної мережі буде формула (1), тому що модель даної мережі також представлена у вигляді багатоканальної СМО з очікуванням. Опишемо роботу даної системи: біти, що надходять з сенсору, який передає дані вимірювання, стають у чергу на обслуговування. Далі вони стають в чергу на розподілення до робочих станцій, які є їхніми адресатами. Потім вони стають у чергу на обробку до потрібного адресату [19–21].

Зазвичай кожному з станів рівня сигналу відповідає число від 0 до 6. На основі одержаних даних мережевий рівень формує уявлення про зміну станів зв'язку, постійно порівнюючи теперішній та попередній стани ($n < n_0$ чи $n \geq n_0$). У випадку, коли зміна станів відповідає $n < n_0$, мережевий рівень відсилає повторний запит. Даний цикл буде відбуватися до тих пір, доки ситуація не стане протилежною ($n \geq n_0$) (гілка «так»). Лише тоді мережевий рівень направить до каналного пакет і віддасть наказ на його передавання. Потім каналний рівень, при наявності вільного каналу, надасть наказ на генерацію бітів фізичному рівню, у відповідності до конкретного пакету [20].

Особливості даного алгоритму було враховано в структурній схемі пристрою безпроводового передавання даних лінії, що виконувала б функцію зв'язку між додатками фізичного та мережевого рівнів еталонної моделі *OSI*. Тобто працювала б на основі даного алгоритму. Саме з цієї причини в існуючу структурну схему пристрою безпроводового зв'язку, що зображений на рис. 3, вводиться аналізатор якості сигналу 5 (рис. 7).

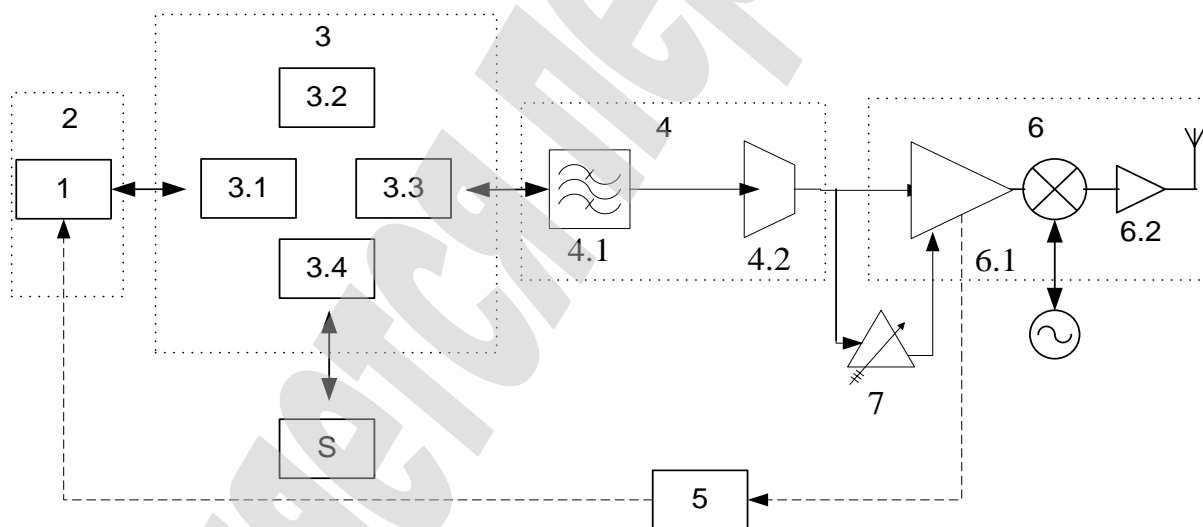


Рис. 7. Безпроводовий мережевий пристрій з системою підвищення якості передачі показників вимірювання в зонах невпевненого прийому або з недостатньою завадостійкістю: 1 – керуючий блок 1, що є частиною *NMS*, модулю мережевого рівня 2, 3 – модуль підрівня *LLC* каналного рівня моделі *OSI*, 3.1 – блок хост-інтерфейсу, 3.2 – вбудований мікроконтролер, 3.3 – блок додатку прийомо/передавача, 3.4 – блок шинного інтерфейсу, *S* – пам'ять, 4 – модуль підрівня *MAC* каналного рівня, 4.1 – контролер смуги частот, 4.2 – радіочастотний прийомо/передавач, 5 – аналізатора сигналу, 6 – модуль фізичного рівня, 6.1 – інтерфейс фізичного рівня, 6.2 – антена, 7 – блок автоматичного налаштування частоти [21–22]

При побудові пристрою, блоки розбито на модулі, згідно їхньої належності до того чи іншого рівня еталонної моделі.

6. Результати досліджень

У результаті моделювання були отримані параметри роботи мережі, зокрема затримка в чергах каналів передавання сусідніх пристроїв, що відповідає пропускній спроможності каналу передавання у випадку, коли навантаження на даний канал є максимальним [19].

Розглянуто 3 моделі відповідної структури, у яких застосовувались 3 різні алгоритми управління трафіком, що застосовуються у різних стандартах IEEE 802.11, а саме «FIFO», «Пріоритетне обслуговування», «Зважені черги». Проведене дослідження з метою порівняльної характеристики між цими алгоритмами за критеріями пропускної спроможності каналів передавання, максимальної швидкості передавання показників, дальності передавання показників, кількості підканалів. Після ряду досліджень з метою порівняння, проведених за правилами процедури підтримки прийняття рішень «*Analytic hierarchy process*» (АНР) по даним алгоритмам було отримано наступні підсумкові коефіцієнти, а саме:

- алгоритм «FIFO» – 0,228;
- алгоритм «пріоритетне обслуговування» – 0,222;
- алгоритм «Зважені черги» – 0,55.

У результаті даних порівнянь досліджено, що алгоритм «зважені черги» в двічі кращий, ніж 2 інших. Проведено дослідження, які показали, що результати, отримані при використанні моделі типу $G/M/n$ для моделювання передачі показників вимірювання сенсорними мережами, є найбільш точними серед інших моделей.

Досліджено модель сенсорної мережі на концептуальному рівні. На основі результатів моделювання даної мережі при стандартній смузі частот мережі «ZigBee» (2400–2483,5 МГц ISM-діапазону), за формулою (1) була одержана характеристика на рис. 5. Стандартну смугу частот було розширено на 80 МГц та за формулою (1) знято характеристику, що на рис. 2.

У підсумку зроблений висновок, що розширення смуги частот хоч і погіршує на початку швидкісні показники передавання показників вимірювання сенсорною мережею ZigBee, але значно поліпшує інші параметри, зокрема пропускну спроможність.

Досліджено одноканальну сенсорну мережу. Передавання показників вимірювання, в даному випадку, буде відбуватися від одного вимірювального пристрою до іншого. Залежність пропускної спроможності каналу передавання (C) від часу затримки на обробку в обслуговуючому пристрої каналу, яку зображено на рис. 8, було одержано за формулою (3).

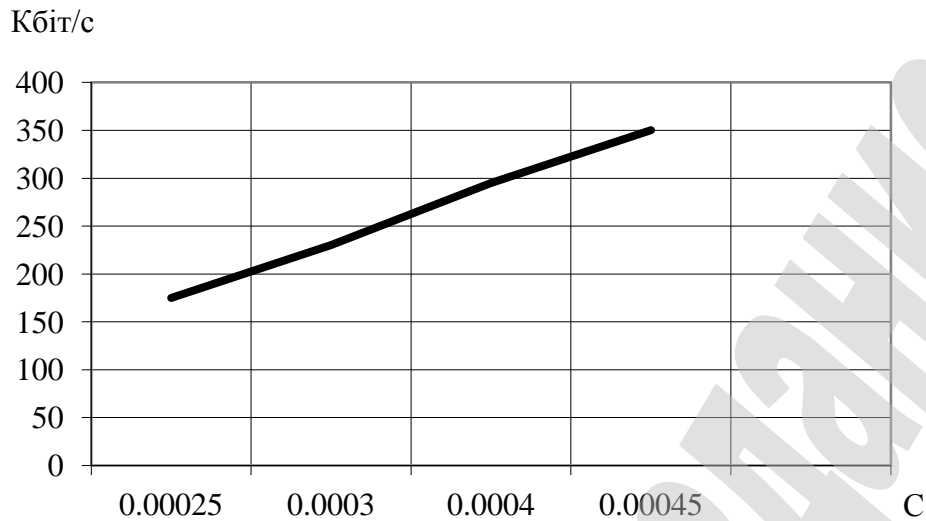


Рис. 8. Графік залежності пропускної спроможності каналу передавання від часу затримки на обробку в обслуговуючому пристрої каналу

На рис. 8 спостерігається лінійне зростання навантаження, що свідчить про стабільну поведінку обслуговуючих пристроїв при моделюванні стаціонарних процесів за допомогою моделей типу $G/M/1$.

Було проведено експеримент зі стандартним алгоритмом роботи сенсорного пристрою, структуру якого зображено на рис. 3, результати якого відображено на рис. 9.

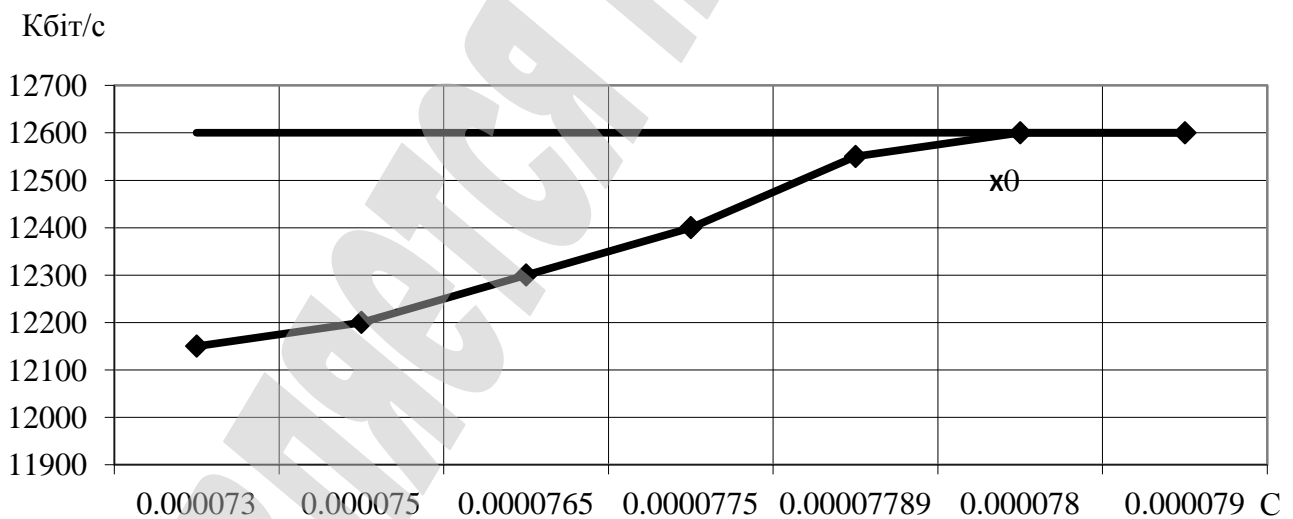


Рис. 9. Графік залежності часу затримки від навантаження каналу передавання

Точка насичення X_0 визначається за формулою:

$$X_0 = \frac{1}{V_d R_d},$$

де X_0 – найбільше навантаження для даної мережі; V_d – коефіцієнт відвідування для вузла d ; R_d – час перебування бітів у мережі для вузла d .

В каналах передавання даної мережі перерозподіл потоків буде відбуватися за допомогою алгоритму курування чергами «Зважені черги».

Далі в експеримент було внесено зміни, відповідно алгоритму, що зображено на рис. 4, та його опису.

На основі даних досліджень, за формулою (1) було одержано характеристику, наведену на рис. 10.

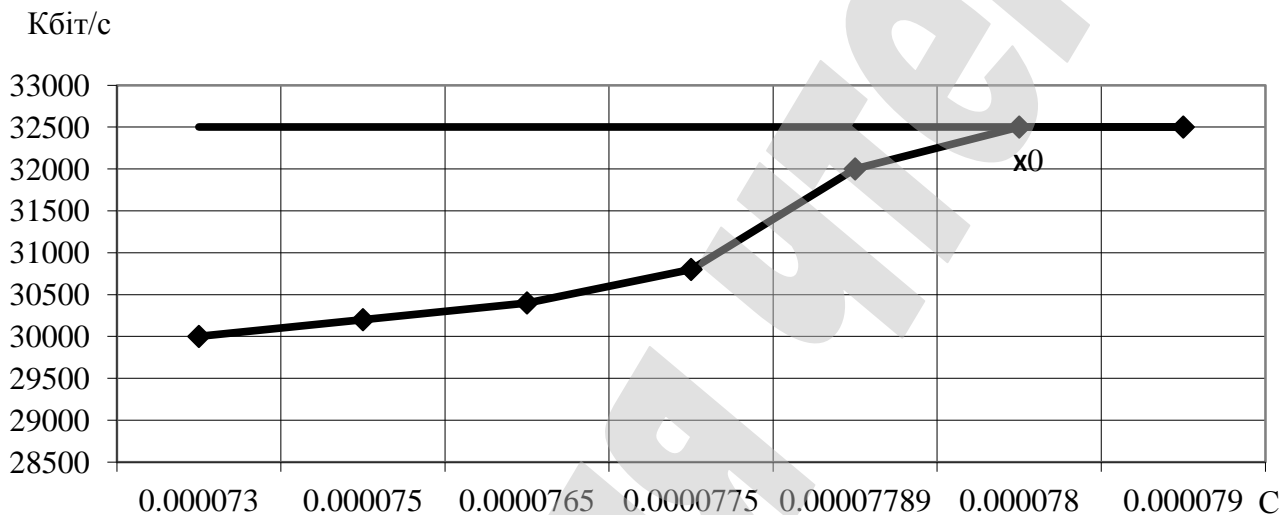


Рис. 10. Графік залежності часу затримки від навантаження каналу передавання

Як показано на рис. 10, даний алгоритм вносить в роботу сенсорної мережі досить позитивні зміни. Це видно з того, що при значному зростанні навантаження в каналах передавання час затримки бітів в черзі на обробку майже не змінився. Тобто канал передавання даних пристрою, що працює за цим алгоритмом, витримує навантаження майже в 2,5 рази, ніж при стандартному алгоритмі. Цілком імовірно, що таким покращенням сприяє зменшення відсотку помилкових пакетів та запитів на їх повторну відправку, що також потребують певного часу для обробки. А також перехід на стандарт з більшою потужністю при падінні рівня сигналу. Це безумовно покращує стійкість роботи сенсорної мережі, значно зменшуючи імовірність відсутності сигналу в зонах невпевненого прийому.

7. SWOT-аналіз результатів дослідження

Strengths. Сильною стороною даної розробки, у порівнянні з аналогами, є можливість зберігати сталі показники пропускнуєї спроможності, при значно більшому навантаженні. Дана розробка не викличе додаткових затрат на більш потужніші елементи живлення для сенсорних пристроїв, а також не потребує додаткового технічного супроводу після її впровадження.

Weaknesses. Слабкою стороною розробки є те, що виникнуть додаткові затрати на модернізацію сенсорних пристроїв. Це пов'язано з заміною мікроконтролерів та/або їх перепрограмуванням на запропонований в роботі алгоритм.

Opportunities. Впровадження запропонованої розробки у сенсорну мережу дасть їй можливість здійснювати передачу даних без падіння показників продуктивності, витримуючи при цьому в 2,5 рази більше навантаження, ніж аналоги.

Threats. На першому етапі впровадження системи необхідно виділити додаткові кошти для реалізація програмно-апаратного комплексу.

8. Висновки

1. Розроблено математичний апарат для дослідження процесу обслуговування заявок в чергах каналів передавання даних безпроводних сенсорних мереж, що дало змогу отримати результати досліджень з достатньою точністю.

2. Виявлено, що адаптований алгоритм «Зважені черги» за критеріями пропускної спроможності каналів передавання, максимальної швидкості передавання показників, дальності передавання показників, кількості підканалів у 2 рази кращий, ніж інші.

3. Запропоновано алгоритм, що об'єднує нижні рівні еталонної моделі *OSI*, у поєднанні з розширенням стандартної смуги частот, що покращило швидкість передачі даних майже на 200 Кбіт/с.

4. Модернізовано структурну схему пристрою безпроводного передавання даних, функціонально об'єднавши блоки, що відповідають нижнім рівням еталонної моделі *OSI*. Це дало змогу пристрою, при сталих показниках пропускної спроможності, витримувати в 2,5 рази більше навантаження.

Література

1. Kuzmych L. V. Neparаметrychna identyfikatsiya shchilnosti rozpodilu virohidnosti v skladniy postiyno zminniy zavadoviy obstanovtsi // Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system (KZiATPS – 2018): proceedings. Vol. 2. Chernihiv: ChNTU, 2018. P. 178.

2. Wireless sensor networks: a survey / Akyildiz I. F. et al. // Computer Networks. 2002. Vol. 38, No. 4. P. 393–422. doi: [http://doi.org/10.1016/s1389-1286\(01\)00302-4](http://doi.org/10.1016/s1389-1286(01)00302-4)

3. Erkin A. N. Osobennosti proektirovaniya besprovodnyh ZigBee – setey na baze mikrokontrollerov firmy Jennic // Besprovodnye tekhnologii. 2010. No. 2. P. 20–24.

4. Localization in Wireless Ad-hoc Sensor Networks using Multilateration with RSSI for Logistic Applications / Wang X. et al. // Procedia Chemistry. 2009. Vol. 1, No. 1. P. 461–464. doi: <http://doi.org/10.1016/j.proche.2009.07.115>

5. IEEE Standard for Information technology-- Local and metropolitan area networks – Specific requirements – Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). doi: <http://doi.org/10.1109/ieeestd.2006.232110>

6. Kvasnikov V. P., Khaein T. M. Kontseptsiya povirky koordynatno-vymiriuvalnykh mashyn cherez Internet // Metrolohiya ta prylady. 2013. No. 6. P. 48–53.

7. Sposoby pobudovy analohovykh interfeisiv informatsiyno-vymiriuvalnykh system mekhanichnykh velychyn / Kvasnikov V. P. et al. // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. 2013. No. 1. P. 164–169.

8. Omatskyi D. P., Mykhalko M. V., Osmolovskyi O. I. Analog interface for remote measurements by differential-transformer inductive sensors // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. Vol. 1, No. 2 (67). P. 52–57. doi: <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.21078>
9. Akyildiz I. F. Wireless sensor networks: A survey. *Computer Networks // IEEE Communications Magazine*. 2008. P. 250.
10. Towards an Integrated Solution for Node Localization and Data Routing in Sensor Networks / Boukerche A. et al. // 2007 IEEE Symposium on Computers and Communications. 2007. doi: <http://doi.org/10.1109/iscc.2007.4381550>
11. A Novel Location-Free Greedy Forward Algorithm for Wireless Sensor Networks / Boukerche A. et al. // 2008 IEEE International Conference on Communications. 2008. doi: <http://doi.org/10.1109/icc.2008.402>
12. Brooks R. R., Iyengar S. S. *Multi-Sensor Fusion: Fundamentals and Applications*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2009. P. 120.
13. Hofmann-Wellenho B., Lichtenegger H., Collins J. *Global Positioning System: Theory and Practice*. 14th ed. Springer-Verlag, 2013.
14. Intanagonwiwat C., Govindan R., Estrin D. Directed diffusion // *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking – MobiCom '00*. 2000. doi: <http://doi.org/10.1145/345910.345920>
15. Niculescu D., Nath B. Ad hoc positioning system (APS) using AOA // *IEEE INFOCOM 2003. Twenty-second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (IEEE Cat. No.03CH37428)*. 2003. doi: <http://doi.org/10.1109/infcom.2003.1209196>
16. The cricket compass for context-aware mobile applications / Priyantha N. B. et al. // *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking – MobiCom '01*. 2001. doi: <http://doi.org/10.1145/381677.381679>
17. Savvides A., Han C.-C., Strivastava M. B. Dynamic fine-grained localization in Ad-Hoc networks of sensors // *Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking – MobiCom '01*. 2001. doi: <http://doi.org/10.1145/381677.381693>
18. Yu Y., Govindan R., Estrin D. Geographical and Energy Aware Routing: a recursive data dissemination protocol for wireless sensor networks. URL: https://pdfs.semanticscholar.org/11ca/e1f847d741052bffba9af8d9fbd39973fd94.pdf?_ga=2.235051969.1371947614.1530007013-1007961932.1515747226
19. Dudnik A. S. Problemy ta perspektyvy rozvytku ekonomichnoi kibernetiky: monograph // *Metod zastosuvannya suchasnykh bezprovodovykh tekhnolohiy v informatsiynykh ekonomichnykh systemakh*. Kyiv: VD TOV «Agrar Media Group», 2013. P. 172–179.
20. Dudnik A. S., Bondarenko Yu. V. Systema pokrashchenoho predavannia danykh bezprovodovykh kompiuternykh merezh standartu IEEE 802.11 // *Nauka i molod*. 2012. No. 11 (12). P. 113–116.
21. Dudnik A. S., Shevtsova Ye. V., Zubarieva O. O. Sposib pidvyshchennia produktyvnosti bezprovodovykh kompiuternykh merezh na osnovi mizhrivnevoi vzaiemodiyi ta prystry dlia yoho realizatsii // *Problemy informatyzatsiyi ta upravlinnia*. 2011. No. 4 (36). P. 45–50.
22. Prystryi pidvyshchennia yakosti predavannia danykh v bezdrotovykh merezhakh v zonakh nevpevnenoho pryomu abo z nedostatnoiu zavadostyky: Pat. No. 60400 UA. MPK N04V 7/005 / Dudnik A. S. et al. No. u201007469; declared: 15.06.2010; published: 25.06.2011, Bul. No. 12. 4 p.