

УДК 621.396.4

Кафідова О.В.,
ІТС НТУУ «КПІ»;
Гуйда О.Г.,
ст. викладач, АМУ

СПОСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

В даній роботі розглядається структура методики підвищення ефективності безпроводових сенсорних мереж, класифікація цих мереж, їхні структурні компоненти та топології, режими функціонування. Також проведений аналіз методів побудови сучасних БСМ та розроблені математичні динамічні моделі сенсорних мереж.

В данной работе рассматривается структура методики повышения эффективности беспроводных сенсорных сетей, классификация этих сетей, их структурные компоненты и топологии, режимы функционирования. Также проведен анализ методов построения современных БСМ и разработаны математические динамические модели сенсорных сетей.

The structure of the wireless sensor networks efficiency method, classification of those networks and their structural components and topologies, modes of operation and routing protocols were reviewed in this work. Also modern methods of WSN construction were analyzed and mathematical models of dynamic sensor networks were developed.

Вступ. Безпроводові сенсорні мережі (WirelessSensorNetwork) – це нові перспективні технології в галузі телекомунікацій та комп'ютерних мереж, які можуть бути використані в багатьох прикладних областях. Вони знайшли широке застосування в промисловості, сільському господарстві, правоохоронних, контролюючих і охоронних структурах. Сфера застосування безпроводових сенсорних мереж дуже швидко розширюється. Ще донедавна від сенсорів передавалися тільки вимірні показники (температура, наявність розривів в охоронній мережі та ін.) в цифровому вигляді. По сучасних БСМ передається трафік, що охоплює дані, відео-зображення і мову.

Сучасні безпроводові сенсорні мережі повинні будуватися за технологіями сучасних мереж наступного покоління NGN і забезпечувати передачу різних видів інформації. Вони мають ряд особливостей, таких як підвищені вимоги до оперативності розгортання і мобільності, наявності властивостей самоорганізації, надійності мереж, достовірності передачі даних про стан об'єктів моніторингу, оскільки втрати критичної

інформації, що надходить від сенсора, можуть мати надзвичайно високу ціну.

Безпроводові сенсорні мережі у відмінності від звичайних обчислювальних (проводових і безпроводових) мереж мають масу переваг:

- повна відсутність кабелів – електричних, комунікаційних і т.д.;
- можливість компактного розміщення або навіть інтеграції сенсорів в об'єкти навколишнього середовища;
- надійність як окремих елементів, так і, що більш важливо, усієї системи в цілому; у ряді випадків мережа може функціонувати при справності тільки 10-20% сенсорів;
- відсутність необхідності в персоналі для монтажу й технічного обслуговування.

Завдяки цим факторам передбачається стійка тенденція щодо розширення сфери застосування БСМ за якістю моніторингу, стійкістю, адаптованістю.

Аналіз досліджень і публікацій. В існуючих публікаціях висвітлюються питання ефективності БСМ. В роботах [3, 4] розглядається класифікація сенсорних мереж за кількома ознаками: середовище передачі даних, мобільність, організація, середовище моніторингу, параметри моніторингу й сфера застосування. Прикладом стаціонарної БСМ може бути мережа «Інтелектуального будинку», в якій передача даних до центру обробки даних (ЦОД) здійснюється через виділену мережу, існуючу телекомунікаційну мережу, мережу електроживлення, разом з тим, безпроводова мережа, на думку багатьох спеціалістів [2], має ряд переваг.

Постановка завдання.

Мета роботи – підвищення ефективності безпроводових сенсорних мереж.

Методику будемо розглядати як сукупність прийомів та способів, спрямованих на покращення характеристик функціонування безпроводової сенсорної мережі (БСМ).

Розглянемо основні структурні елементи методики:

1. Аналіз стану розробки безпроводової сенсорної мережі.
2. Аналіз структурних компонентів та топологій.
3. Аналіз витрат ресурсів та енергії.
4. Обґрунтування технології для побудови локальних безпроводових мереж.
5. Математичне моделювання БСМ.

1. Аналіз стану розробки безпроводової сенсорної мережі.

Сучасна телекомунікаційна сенсорна мережа (WSN) – безпроводова мережа, яка складається з просторово розподілених автономних пристроїв з використанням датчиків, які забезпечують загальний контроль фізичних,

екологічних чи інших параметрів: температури, звуку, вібрації, тиску, руху, дії забруднення та ін.

WSN повинна задовольняти такі критерії:

- покривати задану територію і виконувати покладені на неї завдання з високою надійністю;
- сенсори, які входять до її складу, повинні самоорганізовуватися в бездротову мережу, через яку передається інформація з необхідною швидкістю без втрат;
- споживати мінімально можливу кількість енергії і при цьому працювати якнайдовше;
- швидко реагувати на події в зоні покриття;
- мати найменшу вартість.

Одне з актуальних застосувань сенсорних систем – це забезпечення моніторингу житлових, господарських та адміністративних приміщень. Це так звана проблема створення «Інтелектуального будинку». В такій системі встановлюються датчики для різних служб «Інтелектуального будинку»: управління світлом, кліматом, домашньою електронікою.

2. Аналіз структурних компонентів та топологій.

Взагалі телекомунікаційні сенсорні мережі будуються на базі сенсорів і ліній зв'язку. Сенсори являють собою пристрої, що складаються з датчика, який здійснює вимірювання параметрів об'єкта моніторингу, і прийомо-передавача. БСМ будуються з використанням двох типів фізичних пристроїв: повнофункціонального пристрою (FullFunctionDevice, FFD) та пристрою з обмеженим набором функцій (ReducedFunctionDevice, RFD). Пристроєм FFD може здійснюватися зв'язок як з кількома FFD, так і кількома RFD, в той час як у пристрої RFD не реалізована функція встановлення зв'язку з іншими RFD. Повнофункціональні мережні пристрої функціонують у трьох режимах (в залежності від початкової конфігурації): координатор, маршрутизатор і кінцевий вузол, а пристрої RFD – тільки в режимі кінцевого вузла.

Повнофункціональні мережні пристрої функціонують у трьох режимах (в залежності від початкової конфігурації): координатор, маршрутизатор і кінцевий вузол, а пристрої RFD – тільки в режимі кінцевого вузла [1].

Функціональний поділ фізичних пристроїв дозволяє будувати БСМ декількох топологій, які за методом організації можуть бути децентралізовані, централізовані, ієрархічні або гібридні.

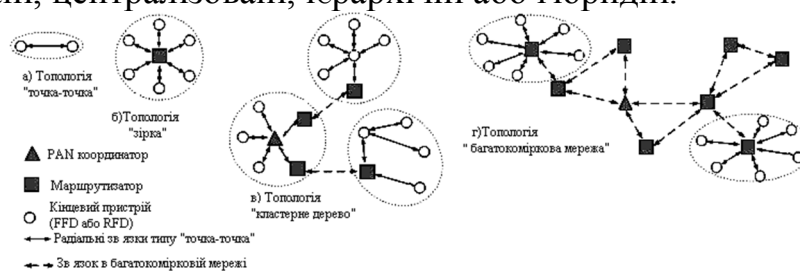


Рис. 1. Топології сенсорних мереж.

При децентралізованій структурі мережа складається з рівноправних мережних вузлів, в таких мережах кожен пристрій встановлює з'єднання з сусідніми вузлами для передачі інформації з використанням багаторазової ретрансляції (маршрутизації) (топология мережі типу «точка-точка», рис. 1а). Централізована структура мережі передбачає наявність у мережі одного маршрутизатора, який функціонує як центральна станція – концентратор, що приймає рішення маршрутизації агрегованих даних до наступного вузла. Топология побудови таких мереж відповідає типу «зірка» (мал. 1б).

З практичної точки зору серед гібридних мереж найбільший інтерес представляють топологии типу «кластерне дерево» або «багатокоміркова мережа». Топология «кластерне дерево» є множиною об'єднаних мереж типу «зірка», в вершинах яких знаходяться вузли-маршрутизатори, і присутній один координатор кластеру (рис. 1г). Мережі цього типу мають низьку відмовостійкість до змін в топологии, оскільки маршрутизатори забезпечують вибірковість шляхів і самоорганізацію мережі.

Таким чином, при виборі структури БСМ слід враховувати необхідну дальність зв'язку, кількість сенсорів на обслуговуваній території, необхідний рівень якості обслуговування, кількість потоків інформації і обсяг переданих даних. Так, для забезпечення в одній кімнаті постійних кліматичних умов достатньо використовувати мережу типу «точка-точка» з одним або двома пристроями FFD.

3. Аналіз витрат ресурсів та енергії.

Більшість сенсорів є мобільними пристроями з вбудованими джерелами енергії. Тому одним з факторів тривалості функціонування вузла є **енергоспоживання**. Пасивне сканування каналу призводить до великих втрат енергії. Рішенням поставленого завдання є періодична активність вузлів, тобто, вузол може працювати в трьох режимах: робочий, пасивний і неробочий. З метою економного витрачання електроенергії в БСМ слід реалізувати два способи функціонування мережі. Перший з цих способів передбачає, що координатор мережі постійно активний. Він контролює мережу і тому здатний здійснювати обмін даними з максимально високою швидкістю. За сигналами координатора окремі ділянки мережі періодично переходять у робочий режим і обмінюються повідомленнями. При другому методі функціонування вся мережа знаходиться у неробочому режимі, включаючи і координатора. Обмін даними виконується у межах окремих сегментів мережі, які працюють періодично. Так вдається не тільки заощаджувати електроенергію, але й уникати впливу окремих сегментів мережі один на одного. Ілюстрація енергозберігаючого режиму з активним координатором і з координатором в неробочому режимі представлена на рис.

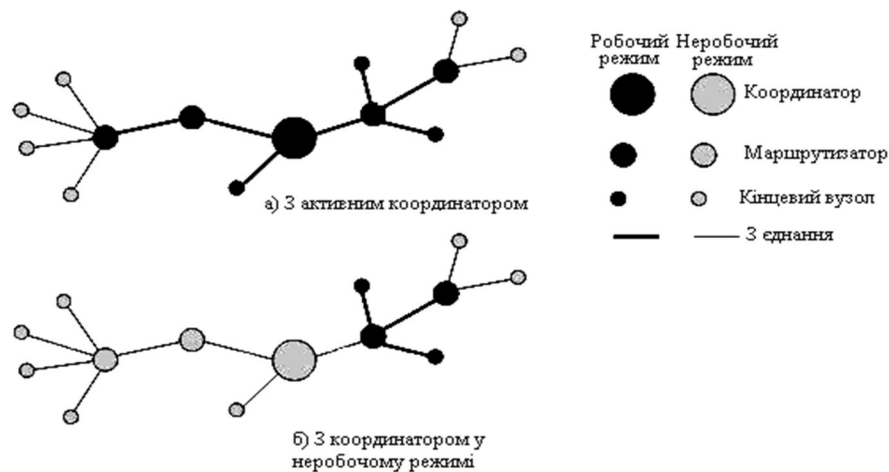


Рис. 2. Енергозберігаючі режими: а) з активним координатором; б) з координатором у неробочому режимі.

4. Обґрунтування технології для побудови локальних безпроводових мереж.

Сімейство стандартів IEEE 802.15 призначено для організації персональної мережі, складається з декількох стандартів: 802.15, 802.15.1, 802.15.3, 802.15.4. Кожен з цих стандартів може використовуватися для побудови сенсорної мережі.

Стандарт IEEE 802.15 описує фізичний рівень і рівень передачі даних. На основі цього стандарту був створений IEEE 802.15.1 (Bluetooth), який охоплює не лише функціонування двох нижніх рівнів OSI моделі, а й деякі особливості додатків більш високих рівнів. Стандарти IEEE 802.15.3, IEEE 802.15.3a є аналогами попереднього стандарту, але вони надають більшу швидкість передачі даних. Стандарт IEEE 802.15.3 підтримує швидкість передачі даних 200 Мбіт/с, що дозволяє передавати мультимедійні дані.

Безпроводові локальні мережі призначені для організації збору інформації в межах одного або декількох будівель, тобто характерні для нього дальності дії – сотні метрів. Технології безпроводових локальних мереж WLAN представлені сімейством стандартів 802.11, основні характеристики яких наведено в табл. 1 [5].

Таблиця 1.

Технічні характеристики сімейства стандартів IEEE 802.11

Параметр	IEEE 802.11 a	IEEE 802.11b	IEEE 802.11g	IEEE 802.11n
Частота, ГГц	5,15 - 5,25 5,725 - 5,825	2,400 – 2,483	2,400 – 2,483	2,400 – 2,483
Швидкість передачі, Мбіт/с	54	11	54	540
Радіус дії, км	0,1-0,5	0,1-0,5	0,1-0,5	0,1-0,5

Потужність передавача, мВт	40 (2,5 мВт/МГц) (5,15 - 5,25) 200 (12,5 мВт/МГц) (5,725 - 5,825) 800 (50 мВт/МГц) (5,725– 5,825)	30–500	30–500	30–500
Методи модуляції сигналу	FHSS, OFDM, 16QAM, 64QAM, BPSK, QPSK	DSSS BPSK QPSK	OFDM 16QAM 64QAM	OFDM 16QAM 64QAM
Ширина смуги каналу передачі, МГц	60 МГц 5,15 - 5,25	22	22	22
Чутливість приймача (при $P = 10^{-6}$), дБм	-82 ... -65	-89 ... -79	-73	-73

Стандарт 802.11 описує протокол організації безпроводової локальної мережі в діапазоні 2,4 ГГц зі швидкостями 1 і 2 Мбіт/с, він не отримав широкої підтримки з боку виробників через невелику пропускну здатність.

Протокол IEEE 802.11b є розширенням базового протоколу 802.11 і крім швидкостей 1 і 2 Мбіт/с передбачає швидкості 5,5 і 11 Мбіт/с.

Стандарт IEEE 802.11a передбачає використання частотного діапазону 5 ГГц і модуляції за методом ортогонального мультиплексування з поділом частот OFDM. Застосування цього стандарту дозволяє збільшити швидкість передачі в кожному каналі до 54 Мбіт/с. Стандарт 802.11a в діапазоні 5 ГГц використовує смугу частот шириною 300 МГц, розділяючи її на три ділянки по 100 МГц кожна: 5,15-5,25 ГГц (нижній), 5,25-5,35 ГГц (середній) і 5,725 - 5,825 ГГц (верхній). У кожному з них можуть бути організовані чотири канали, які не перекриваються тобто у всій смузі – 12 частотних каналів. Сумарна ширина доступного спектру в ньому приблизно в чотири рази вище, ніж в діапазоні 2,400-2,48354 ГГц (83 МГц).

Стандарт IEEE 802.11g є розвитком стандарту 802.11b/b+ і передбачає передачу даних в тому ж частотному діапазоні, але з більш високими швидкостями. Крім того, стандарт 802.11g повністю сумісний з 802.11b. У протоколі 802.11g передбачена передача на швидкостях 1, 2, 5,5, 6, 9, 11, 12, 18, 22, 24, 33, 36, 48 і 54 Мбіт/с. Деякі з даних швидкостей є обов'язковими, а деякі – опціональні.

5. Математичне моделювання БСМ.

В існуючих засобах й методах управління навантаженням і мережними ресурсами прийняття рішення здійснюється на основі одного

показника. Таке управління не є оптимальним для безпроводових технологій, оскільки в цьому випадку до зазвичай мережним проблемам, характерним для проводових і оптичних ліній, додаються проблеми, пов'язані з наявністю перешкод у лініях зв'язку, завмиранням сигналів, що вимагає вибору не тільки відповідної заводозахищеної структури сигналу і рівня випромінювання їх передавальними пристроями і точками доступу, але і процедур адаптації до сигнально – заводової обстановки, яка складається на конкретний момент часу, необхідності фрагментації пакетів і зміни швидкості передачі інформації. Тому слід розробити математичну модель багатокритеріальної оптимізації якості обслуговування, а також математичні динамічні моделі функціонування сенсорних мереж з використанням принципу справедливості на основі стійкості запропонованих моделей.

Постановка задачі багатокритеріальної оптимізації для забезпечення необхідного рівня якості обслуговування

Нехай X – рішення, яке визначене на допустимій множині рішень X , що утворений множиною управляючих параметрів. Якість рішення оцінюється безліччю окремих критеріїв $K = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$, де $k_1 \dots k_n$ – безліч критеріїв якості обслуговування в СМ. Відомо відображення множини рішень на множину окремих критеріїв $x \rightarrow K$ і відносна важливість окремих критеріїв $\Lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_n\}$. Необхідно знайти оптимальне рішення

$$x^0 = \text{opt}G[K(x), \Lambda], \quad x \in X. \quad (1.1)$$

Рішення поставленого завдання не викликає труднощів в тому випадку, якщо відомий оператор Λ і визначено вид оператора $\text{opt} G$, тобто заданий узагальнений критерій або правило, що дозволяє впорядковувати можливі рішення.

Один з найбільш поширених підходів до вирішення завдання (1.1), заснований на зведенні багатокритеріальної задачі до однокритеріальної. Такий підхід заснований на теорії корисності [9], згідно з якою передбачається, що існує деяка узагальнена оцінка цінності або корисності будь-якого рішення $x \in X$. У цьому випадку формування схеми компромісу пов'язано з видом функції корисності

$$P = F\{K_1(x), K_2(x), \dots, K_n(x)\}. \quad (1.2)$$

Для вирішення цього завдання необхідно обґрунтувати вид функції корисності локальних критеріїв $\xi(K_i)$.

Функція корисності окремих критеріїв повинна бути універсальною і добре пристосованою до обліку особливостей конкретних систем, їх цілей і критеріїв. Для цього вона повинна відповідати наступним вимогам: бути безрозмірною; мати одиничний інтервал вимірювання; бути інваріантною до виду екстремуму окремого критерію.

Перерахованим вимогам відповідає функція виду:

$$\xi_i(K_i) = \left(\frac{K_i - K_{i_{\max}}}{K_{i_{\min}} - K_{i_{\max}}} \right)^{\alpha_i}, \quad (1.3)$$

де K_i – значення i -го окремого критерію для варіанту системи; $K_{i_{\min}}$, $K_{i_{\max}}$ – його найкраще і найгірше значення, відповідне або до кордонів області допустимої зміни відповідних параметрів системи, або до програм наближеної області компромісів; α_i – показник нелінійності.

Функція корисності (1.3) характеризує ступінь наближеності до локального оптимуму за критерієм K_i . Для визначення меж наближення області компромісів X^P , тобто значень $K_{i_{\min}}$ і $K_{i_{\max}}$ користуються наступним методом. На множині допустимих рішень X проводять оптимізацію по кожному з окремих критеріїв K_i , в результаті визначається екстремальне за даним критерієм рішення

$$X_i^0 = \arg \underset{x \in X}{extr} K_i(x), \quad i = \overline{1, n} \quad (1.4)$$

і відповідні йому значення всіх окремих критеріїв, $j = \overline{1, n}$. Тоді $K_{i_{\min}} = K_i(X_i^0)$, а

$$K_{i_{\max}} = \begin{cases} \max_j K_i(x_j^0), & K_i(x) \rightarrow \min; \\ \min_j K_i(x_j^0), & K_i(x) \rightarrow \max. \end{cases} \quad (1.5)$$

Таким чином, $K_{i_{\min}}$ і $K_{i_{\max}}$, $i = \overline{1, n}$ є межами відображення наближеної області компромісів X^P на простір критеріїв. Область X^P включає в себе область компромісів (область Парето), так як для неї справедливим є необхідна умова області компромісів – включення глобальних екстремумів всіх окремих критеріїв. Область X^P ширше області Парето, так як включає в себе деякі підмножини із області згоди, тому в загальному випадку компромісні рішення, вибрані з області X^P , необхідно перевіряти на приналежність області Парето.

Розглянута функція корисності (1.3) є не єдиною можливою. Вибір їх конкретного виду та кількісних параметрів є евристичною операцією.

Для вибору єдиного рішення з області компромісів необхідно обґрунтувати аксіоматику і на її основі сформулювати правило (схему компромісу) прийняття рішення. Для вирішення цього завдання потрібна додаткова інформація, яку можна отримати шляхом аналізу та формалізації особливостей цілей системи.

Узагальнений критерій, за відомих кількісних значеннях вагових коефіцієнтів w_i окремих критеріїв $K_i(x)$ або їх функції корисності $\xi_i(K_i)$ приймає наступний вигляд:

$$J(k) = \max_{x \in X} \sum_{i=1}^n w_i \xi_i [K_i(x)], \quad i = \overline{1, n}, \quad \sum_i w_i = 1 \quad (1.6)$$

Під рішенням багатокритеріальної задачі будемо розуміти сукупність керованих змінних, які забезпечують оптимум одночасно до всіх введених

критеріїв оптимальності. Визначимо безліч керованих параметрів і безліч критеріїв оптимальності. Визначимо три основних параметри якості послуг для СМ, які повинні узгоджуватися мережними пристроями при встановленні з'єднання при реалізації принципу самоорганізації: достовірність інформації, що передається, затримка при передачі пакетів, відсоток втрачених пакетів [6].

Показник ймовірності переданої інформації $K_1(x)$, згідно IEEE 802.15.2-2003 [7], може бути визначений частотою бітових помилок.

$$K_1(x) = BER = \left(\frac{2^{8-1}}{2^8 - 1} \right) SER_{11} = \frac{128}{255} SER_{11} \quad (1.7)$$

де SER_{11} – імовірність помилки символу, визначається виразом

$$SER_{11} \leq 24 \cdot Q(\sqrt{4 \cdot SIR}) + 16 \cdot Q(\sqrt{6 \cdot SIR}) + 174 \cdot Q(\sqrt{8 \cdot SIR}) + 16 \cdot Q(\sqrt{10 \cdot SIR}) + 24 \cdot Q(\sqrt{12 \cdot SIR}) + Q(\sqrt{16 \cdot SIR}) \quad (1.8)$$

$Q(x)$ – функція, визначена як Гауссовою розподіл:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt$$

SIR – співвідношення сигнал/завада.

Функція, що описує затримку при передачі пакетів, згідно G.107 [8], залежить від трьох чинників і може бути виражена за допомогою наступного співвідношення:

$$K_2(x) = I_{dte} + I_{dle} + I_{dd} \quad (1.9)$$

де I_{dte} – оцінка погіршення QoS через відлуння джерела повідомлення

$$I_{dte} = \left[\frac{N_{0e} - N_e}{2} + \sqrt{\frac{(N_{0e} - N_e)^2}{4} + 100} - 1 \right] \cdot (1 - e^{-\tau}) \quad (1.10)$$

$N_{0e} = -1.5 \cdot (N_0 - N_L)$, N_0 [дБ] – потужність різних джерел шуму (шум схем, ефективний шум кімнати, власні шуми), N_L [дБ] – потужність шумів на приймальній стороні,

$$N_e = 80 + 2.5 \cdot (G - 14) \quad (1.11)$$

V – оцінка відлуння джерела повідомлення на приймальній стороні, τ – затримка між приймаючою стороною і точкою приєднання, де відбуваються відображення сигналу на неоднорідностях;

I_{dle} – оцінка погіршення QoS із-за затримки і відлуння сигналу

$$I_{dle} = \frac{N_0 - N_{le}}{2} + \sqrt{\frac{(N_0 - N_{le})^2}{4} + 169}, \quad (1.12)$$

N_{le} – оцінка затримки на підтвердження прийому τ_r та середнього значення відлуння на всьому шляху передачі S : $N_{le} = 10.5 \cdot (S + 7) \cdot (\tau_r + 1)^{-0.25}$;

I_{dd} – оцінка абсолютної затримки

$$I_{dd} = 25 \cdot \left\{ \left(1 + X^6\right)^{\frac{1}{6}} - 3 \cdot \left(1 + \left[\frac{X}{3}\right]^6\right)^{\frac{1}{6}} + 2 \right\}, \quad (1.13)$$

$$X = \frac{\log\left(\frac{\tau_a}{100}\right)}{\log 2},$$

τ_a – абсолютна затримка між сторонами передачі і прийому в одному напрямку передачі.

Функція, що описує надійність передачі пакетів, згідно G.107, може бути визначена наступним виразом:

$$K_3(x) = I_e + (95 - I_e) \cdot \frac{P_{pl}}{P_{pl} + B_{pl}}, \quad (1.14)$$

де I_e – коефіцієнт впливу процедури кодування-декодування на відсоток втрачених пакетів, P_{pl} – ймовірність втрати пакета, B_{pl} – стійкість до втрат пакетів.

Крім розглянутих окремих критеріїв K_1 , K_2 , K_3 , що входять до загального критерію (1.5), можуть бути включені й інші, що визначається конкретним рішенням того чи іншого завдання.

Висновки. Сенсорні системи нині інтенсивно розвиваються, удосконалюються і є важливою складовою частиною інформаційного суспільства, забезпечуючи моніторинг різних промислових, природних, соціальних та інших процесів.

Розглянута доцільність побудови сучасної БСМ у вигляді багаторівневої ієрархічної структури, де рівні ієрархії відповідають масштабності тієї або іншої ділянки мережі, а принцип самоорганізації реалізований на всіх рівнях.

Проведено аналіз важливої проблеми БСМ – проблеми електроживлення окремих елементів. Показано, що електроживлення, як правило, забезпечується від автономних джерел, що встановлюються у різних елементах БСМ. Це вимагає використання методу енергозбереження, який досягається через використання режимів функціонування вузлів: робочий, пасивний, неробочий.

Обґрунтована доцільність побудови сучасної БСМ на основі безпроводових технологій, що забезпечує надійність функціонування і мобільність БСМ. Для персональних безпроводових мереж рекомендується використовувати стандарт 802.15.4 ZigBee.

Показана можливість застосування принципу справедливості для різних режимів роботи БСМ.

Використані джерела інформації:

1. Сенсорные сети: состояние, решение и перспективы / [Алгулиев Р.М., Фаталиев Т.Х., Агаев Б.С., Алиев Т.С.] // ISSN 1684-2588 Телекоммуникации. Ежемесячный научно-технический информационно-аналитический и учебно-методический журнал. –2007. –№4. –С. 27—32.
2. Зелевич Е.П. Развитие идентификационных технологий для использования в инфокоммуникационных системах / Е.П. Зелевич В.И. Каледин//Век качества. –2005. –№ 5. –С. 52—55.
3. Сенсорные сети: состояние, решение и перспективы / [Алгулиев Р.М., Фаталиев Т.Х., Агаев Б.С., Алиев Т.С.] // ISSN 1684-2588 Телекоммуникации. Ежемесячный научно-технический информационно-аналитический и учебно-методический журнал. –2007. –№4. –С. 27—32.
4. Кучерявый Е.А. Принципы построения сенсоров и беспроводных сенсорных сетей / Е.А. Кучерявый, С.А. Молчан, В.В. Кондратьев // Электросвязь. –2006. № 6.
5. Григорьев В.А. Сети и системы радиодоступа / Григорьев В.А., Лагутенко О.И., Распаев Ю.А. –М.: Эко-Трендз, 2005. –384 с.
6. Горяева С.Н. Анализ достоверности передаваемой информации в системах абонентского радиодоступа / С.Н. Горяева // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2007»: Материалы 3-ей междунар. молодежной науч.-техн. конф., 2007г. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, –2007г. – С. 233
7. IEEERecommendation 802.15.2—2003.
8. ITU-TRecommendationG.107 (03/2003).
9. Андронов А.М. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебник для вузов / А.М. Андронов, Е.А. Копытов. –СПб.: Питер, 2004. – 461 с.