

УДК 621.396.4

О.І. Лисенко<sup>1</sup>, К.С. Козелкова<sup>2</sup>, В.І. Новіков<sup>1</sup>, Т.О. Прищепа<sup>1</sup>, А.В. Романюк<sup>1</sup><sup>1</sup> Національний технічний університет України «КПІ», Київ<sup>2</sup> Державний університет телекомунікацій, Київ

## ФУНКЦІОНАЛЬНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БЕЗПРОВОДОВОЮ СЕНСОРНОЮ МЕРЕЖЕЮ ІЗ САМООРГАНІЗАЦІЄЮ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

Викладено удосконалену функціональну модель системи управління безпроводовою сенсорною мережею із самоорганізацією для дистанційного та оперативного моніторингу стану природного середовища та оцінки загроз й ризиків виникнення надзвичайних ситуацій.

**Ключові слова:** система управління, безпроводова сенсорна мережа, функціональна модель.

### Вступ

Події останніх років показують, що практично вся територія України є зоною природно-техногенного ризику з точки зору виникнення надзвичайних ситуацій природного та техногенного характеру на об'єктах критичної інфраструктури. Тому актуальним питанням залишається розробка нових методів побудови безпроводових сенсорних мереж, що дозволять дистанційно та оперативно здійснювати моніторинг стану природного середовища заданого регіону та оцінювати загрози й ризик виникнення надзвичайної ситуації. Безпроводова сенсорна мережа (БСМ) або WSN (Wireless Sensor Network) являє собою розподілену та стійку до відмов окремих елементів мережу мініатюрних електронних пристроїв (сенсорних вузлів), які здійснюють збір даних та їх передачу в центр обробки за допомогою ретрансляції від вузла до вузла [1].

Широке використання БСМ можливе в області автоматизації процесів збору інформації, моніторингу та контролю характеристик різноманітних технічних і природних об'єктів. Сенсорні вузли можуть встановлюватися стаціонарно або мати можливість довільно пересуватися в певному просторі, не порушуючи логічної зв'язаності мережі, у цьому випадку БСМ не має фіксованої топології і має самоорганізовану структуру. Під самоорганізацією (SelfOrganizing) розуміється автоматичний вибір топології мережі, автоматичне підключення нових пристроїв до мережі, автоматичний вибір маршрутів передачі пакетів в мережі без участі людини. БСМ можуть складатися з різних типів датчиків: сейсмічних, датчиків визначення магнітного поля, теплових, інфрачервоних, акустичних, та інших. Використовуючи БСМ можна здійснювати найрізноманітніші вимірювання умов навколишнього середовища. Сенсорні вузли можуть використовуватися для неперервного зондування, виявлення та ідентифікації подій. Концепція мікрозондування і безпроводове з'єднання відкриває багато нових областей застосування для БСМ. Швидке розгортання, самоорганізація і відмовостійкість являються основними характеристиками БСМ, які роблять їх перспективним інструментом для

вирішення поставлених завдань дослідження навколишнього середовища.

**Аналіз досліджень і публікацій.** В численних публікаціях щодо БСМ [2] висвітлені технічні рішення та наводяться приклади застосування БСМ для моніторингу стану навколишнього середовища. Аналіз досліджень і публікацій показує, що на даний час залишаються недостатньо розв'язаними питання децентралізованого управління БСМ із самоорганізацією.

**Постановка завдання.** Для підвищення ефективності БСМ із самоорганізацією для моніторингу параметрів навколишнього середовища запропонована нова функціональна модель системи управління БСМ, в основі якої лежить множина методів управління, які здійснюють відповідні функції на різних рівнях моделі OSI, та наведені можливі рішення щодо побудови функціональних підсистем системи управління БСМ.

### Проблеми управління безпроводовими сенсорними мережами

Розробка БСМ з можливістю самоорганізації потребує вирішення великої кількості задач, які в загальному можна класифікувати таким чином (рис. 1).

За етапами задачі управління БСМ діляться на задачі планування, розгортання (організаційні способи) і оперативного управління (організаційно-технологічний спосіб). Етап планування здійснюється відповідно до технічного завдання з урахуванням умов застосування БСМ. Сутністю планування (виходячи із прогнозованої обстановки та наявних ресурсів) є: визначення районів покриття; способів встановлення (випадковий або детермінований) та доставки (постановці) сенсорів; визначення вузлів-шлюзів, способів збору та доставки інформації моніторингу тощо.

Етап розгортання полягає розгортанні в заданому районі (наприклад, вручну чи за допомогою літака, якій розкидає сенсори з повітря над певною площею) або переміщення сенсорних вузлів. При цьому задачі етапу розгортання БСМ можуть виконуватися й на етапі оперативного управління при значних її змінах (ушкодженні, введенні нових сенсорних вузлів й ін.).

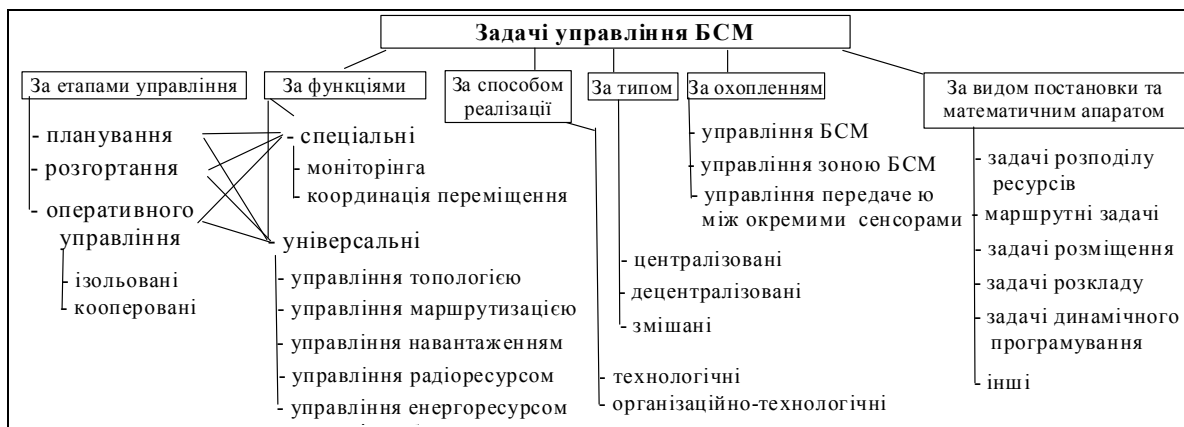


Рис. 1. Класифікація задач управління БСМ

На етапі оперативного управління за прийнятими критеріями ефективності постійно оцінюється стан сенсорної мережі, і приймаються заходи (відповідно до плану та реальної обстановки) щодо підтримання її показників ефективності функціонування в заданих межах або здійснюється їх системна (користувальницька) оптимізація. Задачі оперативного управління (на відміну від задач планування) вирішуються змішаним способом (централізовано/децентралізовано) у режимі реального часу, а за змістом багаторазово повторюються.

Вирішення зазначених вище задач на всіх етапах функціонування БСМ неможливе без ефективної системи управління БСМ [3]. До системи управління БСМ пред'являються такі вимоги: забезпечення адаптивного та розподіленого функціонування мережі з можливістю її самоорганізації; оптимізація характеристик мережі; забезпечення прийняття рішень у реальному масштабі часу; максимальна автоматизація процесів управління; безпека передачі та мінімальне навантаження службовою інформацією. Разом з тим, до особливостей системи управління БСМ можна віднести: багатомірність, яка обумовлена значною кількістю підсистем, елементів та зв'язків між ними; багатопараметричність, яка визначається різноманітністю цілей окремих підсистем та їх характеристик, вимог та показників ефективності; багатфункціональність і ієрархічність, яка визначається необхідністю рішення різних задач на різних умовах функціонування системи; значну залежність характеру функціонування від параметрів БСМ і зовнішніх впливів.

### Функціональна модель системи управління БСМ

Виходячи з призначення та особливостей БСМ, а також основних завдань управління БСМ, визначимо принципи побудови систем управління ними. Основними з них є: принцип адаптивного управління; принцип функціональності управління; принцип ієрархічності управління; принцип розподіленості та координації взаємодії; принцип оптимальності управління.

1. **Принцип адаптивного управління.** Внаслідок значної початкової невизначеності БСМ (обумовлена

інерційністю контролю стану мережі та її ідентифікації), а також невизначеністю стану зовнішнього середовища оперативне управління повинне бути адаптивним.

### 2. Принцип функціональності управління.

Об'єднання функцій системи управління у відносно незалежні групи дозволяє здійснити декомпозицію управління мережею на підсистеми (що значно спрощує задачу розробки математичного забезпечення управління): контроль елементів мережі та якості обслуговування потоків даних; збір службової інформації про стан мережі; управління побудовою та підтримкою маршрутів; управління топологією мережі; управління безпекою; управління радіоресурсом; управління навантаженням; планування корегування та навчання. Функціональна модель системи оперативного управління мережі, яка реалізується на кожному вузлі надана на рис. 2.

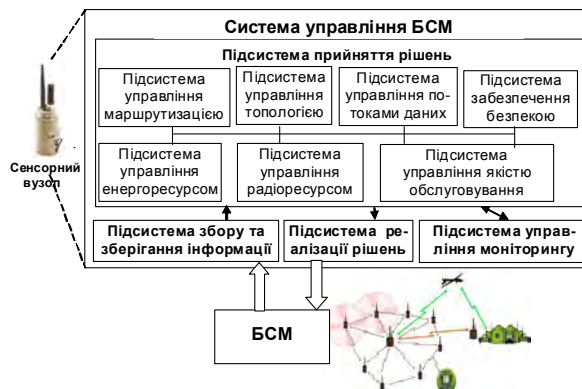


Рис. 2. Функціональна модель системи оперативного управління

3. **Принцип ієрархічності управління.** Функціональну структуру системи управління можна представити ієрархічною структурою з вертикальними зв'язками, які визначають підпорядкованість задач, що виконуються: на нижньому рівні вирішуються задачі управління сенсорним вузлом мережі; на верхньому – задачі управління всією БСМ.

4. **Принцип координації та взаємодії.** Внаслідок децентралізованого управління рішення задач управління передбачає взаємодію між вузлами за цілями, функціями управління, розподілом ресурсів тощо.

5. **Принцип оптимальності управління.** Оптимальне управління являє собою компроміс між оперативністю та обґрунтованістю управляючих впливів, що являється однією з найбільш складних задач, які належить розв'язати при побудові системи управління БСМ.

6. **Принцип автоматизації та інтелектуалізації процесів управління.** Його реалізація призвана мінімізувати участь людини в процесі управління тактичними мережами. За способом реалізації частина задач оперативного управління вирішується ізольовано (окремим вузлом, наприклад, сенсором-шлюзом), а більша частина – кооперовано, сукупністю вузлів (наприклад, маршрутизація інформаційних повідомлень й ін.). За охопленням задачі управління діляться на управління функціонуванням всієї сенсорної мережі, її зони або процесом передачі інформації за напрямом між сенсорними вузлами. За видом постановки та математичному апарату задачі діляться на задачі розміщення, розподілу ресурсів, складання розкладу, маршрутні задачі та ін.

За функціями задачі управління БСМ діляться на дві групи: спеціальні задачі управління (наприклад, визначення маршрутів переміщення сенсорів-роботів й координація їхнього переміщення) та універсальні задачі управління: управління топологією, управління маршрутизацією, управління навантаженням, управління радіоресурсом, управління енергоресурсом тощо. Однак, конкретна реалізація методів управління БСМ повинна враховувати її призначення та особливості архітектури (розмірність, мобільність, ресурс батарей тощо).

Розглянемо основні функціональні підсистеми моделі оперативного управління БСМ та напрямки їх синтезу: управління маршрутизацією, управління радіоресурсом, управління енергоресурсом, управління передачею інформації із заданою якістю обслуговування, управління безпекою, прийняття рішень по управлінню та інші.

**Підсистема маршрутизації повідомлень в БСМ.** Ця підсистема забезпечує побудову та підтримку маршрутів передачі заданої якості при виконанні вимог до їх функціонування (децентралізованості, мінімізації службового трафіку тощо). Синтез певного методу маршрутизації буде визначатися параметрами мережі (розмірністю, площею покриття) та сенсорів (кількість параметрів моніторингу, ємність батареї, потужність передавача, об'єм інформації моніторингу тощо).

**Підсистема управління радіоресурсом в БСМ.** Мета цієї підсистеми – розподіл часового, просторового, частотного, кодового ресурсів для забезпечення інформаційного обміну між сусідніми вузлами. В якості напрямків рішення проблеми розподілу радіоресурсу в БСМ можна віднести наступні: вдосконалення протоколу доступу IEEE 802.11; розробка нових методів детермінованого доступу; вдосконалення протоколу IEEE 802.15; застосування надширокосмугових сигналів (UWB) тощо.

**Підсистема управління топологією БСМ** визначає топологію, яка здатна забезпечити необхідне покриття району моніторингу та забезпечити зв'язну топологію при заданих за якістю інформаційного обміну та існуючих ресурсних обмеженнях.

**Підсистема управління енергоспоживанням.** Електроживлення сенсорних вузлів здійснюється від батарей (використання їх ємності визначається параметрами процесора, пам'яті, пристрою моніторингу і потужності прийомопередавача), тому в системі управління БСМ виділена підсистема управління енергоресурсом. Метою функціонування даної підсистеми є мінімізація споживання енергії вузлами мережі або максимізація „часу життя” мережі – часу роботи мережі до моменту відмови виконувати свої функції вузла (чи їх множини) через нульову ємність його (їх) батареї.

**Підсистема управління потоками даних** керує потоками передачі даних та бореться з переваженням.

**Підсистема управління якістю обслуговування (QoS-передачі даних).** Одним із завдань оперативного управління БСМ є забезпечення передачі певних класів трафіка з заданою якістю обслуговування (QoS, Quality of Service), наприклад, передача відеозображення полю бою. Проведено аналіз можливих методів управління якістю обслуговування за рівнями еталонної моделі. Традиційні QoS-методи управління (Differentiated service та Guaranteed service) не враховують особливості БСМ і тому є неефективними. Розробка QoS-методів управління для динамічної або статичної природи БСМ при заданих вимогах потребує окремого рішення низки задач для більшості рівнів моделі OSI з координацією їх роботи під управлінням системи управління, яка буде реалізована на кожному вузлі мережі.

Для сенсорних мереж на сьогодні запропонована низька QoS-моделей управління (наприклад, для мережевого рівня QoS-маршрутизація SPEED, для транспортного ESRT). Однак, кожен з них передбачає управління якістю на певному рівні еталонної моделі взаємодії відкритих систем. Забезпечення заданої якості обслуговування в БСМ повинне здійснюватися за функціями з їхньою реалізацією на всіх рівнях моделі OSI під управлінням виділеної QoS-підсистеми (cross level), основними елементами якої є база методів управління (за рівнями еталонної моделі) і підсистеми прийняття QoS-рішень (містить знання про цілі управління й методи їхнього досягнення, а також базу моделей ресурсів мережі).

**Підсистема забезпечення безпеки передачі даних.** Проведений аналіз основних аспектів безпеки: уразливість БСМ, потенційна можливість атак, оцінка їх погроз, необхідні сервіси безпеки та можливі механізми їх реалізації.

Сервіси безпеки повинні враховувати особливості БСМ і забезпечуватися відповідними механізмами безпеки з метою захисту від певної множини атак. Сервіси безпеки звичайно включають наступні основні

поняття: таємність, автентифікація, цілісність, контроль доступу, неспростовність та доступність. Підсистема прийняття рішень щодо оперативного управління БСМ. Системи управління можуть бути класифіковані як централізовані, децентралізовані та ієрархічні. В централізованих СУ базова станція збирає інформацію про стан сенсорної мережі та приймає рішення по управлінню. Переваги цієї СУ: необмеженість ресурсів та добра якість рішень, недолік – низька живучість, неможливість управління при розподілі мережі на підмережі та значний службовий трафік. В децентралізованих СУ критичний ресурс вузлів та значна складність задач управління. Пропонується вироблення рішень (методів управління) системою управління здійснювати за функціями управління на різних рівнях моделі OSI. Через динамічний характер задач управління, їх високу розмірність, неповноту й нечіткість контрольної інформації пропонується використати

нечітку систему управління (НСУ). Розглянуто структуру НСУ, що складається з наступних компонентів: знання про об'єкт управління; знання про цілі функціонування й управління; знання про способи досягнення цілей (рис. 3). Запропоновано схему прийняття рішень НСУ, що враховує послідовність етапів циклу управління: оцінка ситуації, визначення мети управління, виявлення необхідності управління, пошук припустимих рішень і методу досягнення поставленої цілі й реалізація обраного методу.

В умовах децентралізованого управління кожен вузол буде реалізовувати дві взаємозалежні групи цілей, що визначають багатокритеріальність управління: користувальницькі цілі (досягнення екстремуму або виконання обмежень на показники ефективності при передачі повідомлень) і мережеві (зонаві) цілі (досягнення оптимальних мережевих або зонавих показників ефективності).

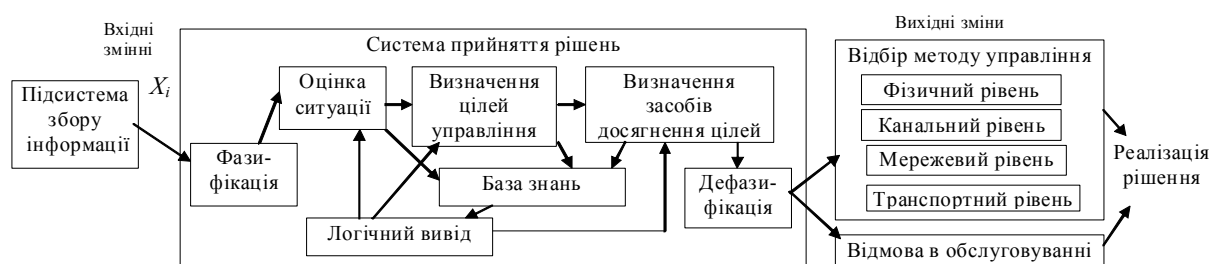


Рис. 3. Процес прийняття рішення по управлінню БСМ

Задача ухвалення рішення в управлінні БСМ зведена до задачі багатокритеріальної оптимізації для нечітко заданих цілей й альтернатив, представлених у вигляді дерева „цілі – методи”.

### Висновки

Проведений аналіз задач управління БСМ дозволив запропонувати нову функціональну модель системи управління БСМ, в основі якої лежить множина методів управління, які здійснюють відповідні функції на різних рівнях моделі OSI. Наведені можливі рішення щодо побудови функціональних підсистем системи управління БСМ. Запропоновані рішення складають основу побудови інтелектуальної БСМ зв'язку, яка дозволить: побудувати адаптивну архітектуру, що самоорганізується; забезпечити

оптимізацію передачі даних із заданою якістю; автоматизувати процеси її управління.

### Список літератури

1. Міночкін А.І. Перспективи розвитку тактичних сенсорних мереж / А.І. Міночкін, В.А. Романюк, О.В. Жук // Збірник наукових праць. – К.: ВІПІ НТУУ “КІП”. – 2007. – № 4. – С. 112-119.
2. Самоорганізуючіся радіосети со сверхширокополосными сигналами / С.Г. Бунин, А.П. Войтер, М.Е. Ильченко, В.А. Романюк. – К.: Наук. думка. – 444 с.
3. Миночкин А.И. Методология оперативного управления мобильными радиосетями / А.И. Миночкин, В.А. Романюк // Зв'язок. – 2005. – № 2. – С. 53-58.

Надійшла до редколегії 26.08.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.В. Барабаш, Державний університет телекомунікацій, Київ.

### ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ С САМООРГАНИЗАЦИЕЙ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

А.И. Лысенко, Е.С. Козелкова, В.И. Новиков, Т.А. Прищепа, А.В. Романюк

В научной статье предложена усовершенствованная функциональная модель системы управления беспроводной сенсорной сети с самоорганизацией для дистанционного и оперативного мониторинга состояния природной среды и оценки угроз и рисков возникновения чрезвычайных ситуаций.

**Ключевые слова:** система управления, беспроводная сенсорная сеть, функциональная модель.

### FUNCTIONAL MODEL OF WIRELESS SENSOR NETWORK CONTROL SYSTEM WITH SELF-ORGANIZATION FOR MONITORING ENVIRONMENTAL PARAMETERS

A.I. Lysenko, E.S. Kozelkova, V.I. Novikov, T.A. Prischepa, A.V. Romanyuk

In this paper is proposed improved functional model of wireless sensor network control system with self-organization for distance and operational monitoring of the environment state as well as threat and risk assessment of emergencies.

**Keywords:** control system, wireless sensor network, functional model.