

ПІДХОДИ ДО РОЗРОБКИ НОВОЇ АРХІТЕКТУРИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ НЕОДНОРІДНИМИ БЕЗПРОВОДОВИМИ СЕНСОРНИМИ МЕРЕЖАМИ

*Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації, Київ, Україна

**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

Анотація. Стаття присвячена розробці нової архітектури побудови системи управління безпроводовою сенсорною мережею з різномірними сенсорами, здатними до самоорганізації інформаційного обміну, а також адаптивними до умов функціонування, які неможливо передбачити у процесі проектування.

Ключові слова: безпроводова сенсорна мережа, сенсорний вузол, функціональна модель системи управління мережею.

Аннотация. Статья посвящена разработке новой архитектуры построения системы управления беспроводной сенсорной сетью с разнородными сенсорами, способными к самоорганизации информационного обмена, а также адаптивными к условиям функционирования, которые невозможно предусмотреть в процессе проектирования.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, сенсорный узел, функциональная модель системы управления сетью.

Abstract. The purpose of this research is to develop a new architecture of building management system of wireless sensor network with heterogeneous sensors that are able to self-organize information exchange as well as are adaptive to conditions of functioning that are impossible to predict in design process.

Keywords: wireless sensor network, sensor node, functional model of the network management system.

1. Вступ

Безпроводові сенсорні мережі (БСМ) визначені як одна з найважливіших технологій ХХІ сторіччя. БСМ – це сукупність розподілених на території мініатюрних безпроводових сенсорних вузлів (стаціонарних і мобільних, призначених для збору інформації про параметри оточуючого середовища і передачі цієї інформації на спеціальні інформаційні центри). Одержана безпроводовим сенсорним вузлом інформація передається на один або декілька шлюзів безпосередньо або шляхом ретрансляції через проміжні сенсорні вузли. У випадку, коли території для моніторингу дуже великі, як шлюзи можуть використовуватися сенсорні вузли на базі безпілотних літальних апаратів (БЛА) або мобільних роботів.

Простота установлення, відносна дешевизна та висока ефективність БСМ сприяли широкому застосуванню в різноманітних галузях: сільському господарстві, промисловості, охороні навколишнього середовища тощо [1]. Проте наведені приклади застосування БСМ передбачають їх попередню інсталяцію і налаштування, що часто неможливо в умовах моніторингу об'єктів критичної інфраструктури, територій у зонах стихійного лиха (техногенних аварій), а також при веденні активних бойових дій у тактичній ланці управління військами. В таких умовах можливим виходом із ситуації є використання БСМ, побудованих за принципом MANET (Mobile Ad-Hoc Networks), що дозволяє створювати радіомережу, здатну до самоорганізації і адаптації вузлів до умов функціонування, які неможливо передбачити у процесі проектування.

Такі БСМ будуть функціонувати в автоматичному або напівавтоматичному режимі, тому сенсорні вузли повинні мати можливість приймати рішення щодо управління вузловими і мережевими ресурсами без участі людини.

БСМ критичного застосування будуть неоднорідними і можуть складатися з сукупності сенсорів (і, відповідно, мереж) різних типів: стаціонарних, мобільних, повітряних, підводних тощо, що дозволяють моніторити значну кількість фізичних параметрів на значних територіях (просторах).

Особливістю сенсорних мереж є обмеженість ресурсів (енергетичних, обчислювальних, пам'яті, радіо). Цілі управління БСМ значно відрізняються від цілей управління традиційними мережами. Сенсорні вузли повинні здійснювати:

- тривалий моніторинг заданих параметрів середовища і передачу одержаної інформації моніторингу до споживачів;
- забезпечити розподілене кооперативне функціонування в умовах обмежених ресурсів;
- підтримувати задану продуктивність мережі;
- мінімізувати витрати енергії тощо.

Для реалізації даних функцій у склад БСМ повинна входити система управління (СУ), яка має забезпечувати моніторинг і передачу трафіка моніторингу з заданою якістю в умовах несприятливих зовнішніх впливів. Тобто ефективність функціонування БСМ багато в чому залежить від ефективності процесів управління даною мережею і, відповідно, варіантів (способів) побудови системи управління.

2. Аналіз останніх публікацій

Класичні підходи, пов'язані з побудовою систем управління мережами, орієнтовані на статичні умови їх функціонування і передбачають наявність виділеної мережі обміну службовою інформацією [2].

Підходи до побудови СУ мережами MANET [3] не враховують значну обмеженість ресурсів вузлів БСМ, хоча можуть слугувати основою при створенні СУ БСМ.

Запропоновані підходи [4–9] до побудови СУ БСМ розглядають різні аспекти управління даними мережами. В [4] наводиться класифікація і розглядаються різноманітні варіанти побудови СУ БСМ.

Так, системи управління MANNA (Management Architecture for Wireless Sensor Networks) і BOSS (Bridge Of the SensorS) представляють традиційні підходи управління мережею, основані на моніторингу стану мережі і управлінні нею. Також аналізуються СУ БСМ, орієнтовані на управління ресурсами потужності: Agent-Based Power Management, SenOS, AppSleep, Node-Energy Level Management або які реалізують функції управління трафіком: Siphon, DSN RM, WinMS та інші.

У роботі [5] запропоновано функціональний підхід до управління БСМ. Розглядаються підсистеми управління маршрутизацією, трафіком, витратами енергії і виявленням відмов.

У роботі [6] запропонована центральна система управління, побудована на SNMP-протоколі (Simple Network Management Protocol) і яка дозволяє управляти роботою невеликої сенсорної мережі.

У [7] акцентовано увагу на необхідність координації цільових функцій управління топологією і маршрутизацією при їх реалізації в системі управління.

У [8] розглянуті питання усунення відмов у мережі.

У [9] багатоагентний підхід, при якому кожний агент СУ виконує певну функцію управління.

У [10] пропонується здійснювати багатокритеріальну оптимізацію ряду задач управління (максимізувати покриття, мінімізувати потужність передачі, мінімізувати кількість активних вузлів з одержанням зв'язкової топології) з використанням генетичних алгоритмів.

Метою статті є розробка нової архітектури побудови системи управління БСМ з різнорідними сенсорами критичної інфраструктури.

3. Основна частина

Підходи до побудови СУ БСМ базуються на досягненнях сучасної теорії управління мережами і теорії розподілених систем.

Виділимо основні особливості системи управління БСМ:

- багатовимірність, що обумовлена великою кількістю підсистем, елементів і зв'язків між ними;
- багатопараметричність, що визначається різноманітністю цілей окремих підсистем, різноманітність їх характеристик, вимог і показників ефективності;
- багатofункціональність та ієрархічність, що впливає з необхідності розв'язання різних задач управління на різних рівнях і етапах функціонування системи;
- сильна залежність характеру функціонування від параметрів БСМ і зовнішніх впливів.

У той же час до системи управління БСМ висуваються такі основні вимоги:

- забезпечення моніторингу заданих об'єктів (зон) у заданий час;
- передача різних типів трафіка (дані, відео, голосові повідомлення) моніторингу з заданою якістю;
- забезпечення адаптивного і розподіленого функціонування мережі з можливістю її самоорганізації;
- прийняття рішень у реальному або близькому до реального масштабу часу;
- оптимізація характеристик мережі (в першу чергу максимізація часу її життя, мінімальне завантаження мережі службовою інформацією, максимізація площі покриття, баланс витрати енергії вузлів, мінімізація потужності передачі вузлів, мінімізація кількості активних вузлів, оптимізація топології і зв'язності активних вузлів тощо);
- максимальна автоматизація процесів управління мережею.

Архітектура СУ БСМ може бути реалізована централізованим, децентралізованим та ієрархічним способами.

У централізованій СУ провідну роль відіграє базова станція. Вона збирає інформацію про всі вузли і керує всією мережею. Переваги даної архітектури – це необмеженість ресурсів базової станції, що дозволяє проводити аналіз стану мережі, вирішувати задачі управління значної обчислювальної складності і розраховувати необхідні параметри для всієї мережі, зменшуючи тим самим витрати енергоресурсу самих сенсорних вузлів. Недоліками можна вважати низьку живучість даної системи і концентрацію трафіка навколо базової станції.

Децентралізовані системи управління, що реалізовані на кожному сенсорному вузлі, мають високу живучість, але потребують міжвузлової координації і значного службового трафіка при зміні умов функціонування мережі. До того ж необхідна розробка ефективних децентралізованих алгоритмів функціонування і витрат обчислювальних і зв'язкових ресурсів на їх виконання, що, у свою чергу, призводить до додаткової витрати енергоресурсів вузлів.

Ієрархічна архітектура передбачає введення в мережі множини головних вузлів, які з'єднані з певними групами сенсорних вузлів і відповідають за їх функціонування, і застосовується при значній розмірності мережі. Всі головні вузли підключено до базової станції.

Виходячи з особливостей СУ і вимог, що пред'являються до неї, можна визначити основні принципи її функціонування: адаптивність, функціональність, ієрархічність, розподіленість і координація взаємодії, оптимальність.

1. *Принцип адаптивного управління.* Внаслідок значної початкової невизначеності

мережі, що обумовлена інерційністю системи контролю її стану і її ідентифікації, а також невизначеністю стану зовнішнього середовища, оперативне управління повинно бути адаптивним.

2. *Принцип функціональності управління.* Об'єднання функцій системи управління у відносно незалежні групи дозволяє здійснити декомпозицію управління мережею на дві основні підсистеми (що значно спрощує задачу розробки математичного забезпечення управління): управління процесом моніторингу і управління процесом передавання цієї інформації. У свою чергу ці підсистеми управління мережею будуть включати такі функції: контроль елементів мережі і якості обслуговування потоків даних; збирання службової інформації про стан мережі; управління побудовою і підтримкою маршрутів; управління топологією мережі; управління безпекою; управління радіоресурсами; управління навантаженням; планування, коригування і навчання тощо.

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

4. *Принцип оптимальності управління.* Оптимальне управління є компромісом між оперативністю та обґрунтованістю керуючих впливів, що є однією з найскладніших задач, які належить розв'язати при побудові системи управління БСМ.

5. *Принцип автоматизації та інтелектуалізації процесів управління.* Його реалізація повинна мінімізувати участь людини у процесі управління тактичними мережами.

6. *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.

Пропонується нова функціональна модель системи управління мережею, яка враховує цикл управління (рис. 1):

1. Збір інформації про стан мережі (при цьому системі управління необхідно приймати рішення за обсягом, типом, способом, рівнями, функціями збору службової інформації).

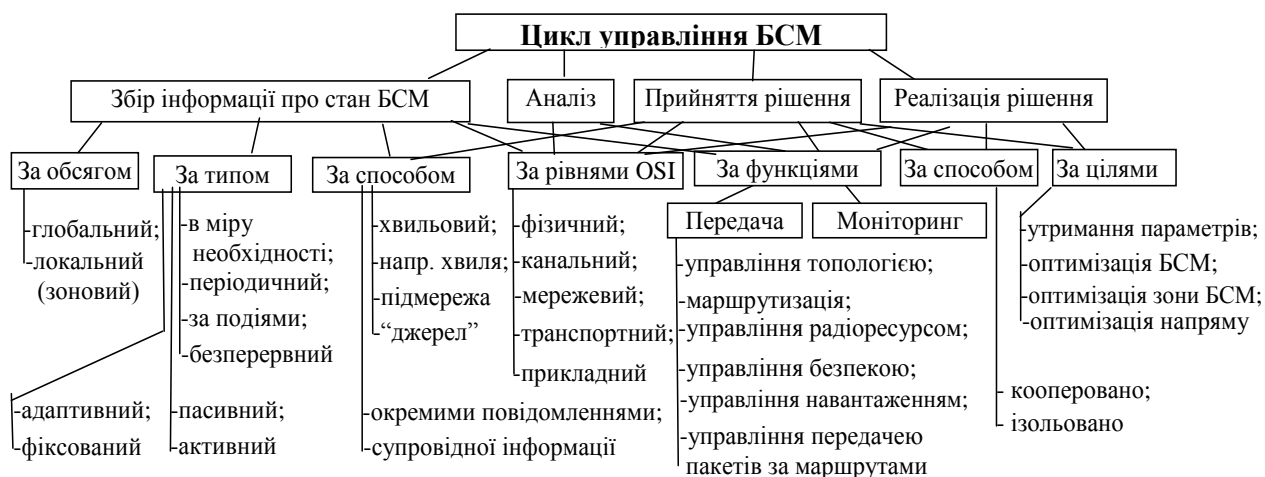


Рис. 1. Класифікація задач оперативного управління в циклі управління БСМ

2. Аналіз даної інформації – ідентифікується ситуація в мережі, визначаються рівень виконання мережею своїх функцій, необхідність керуючого впливу, цілі управління з подальшою деталізацією їх на підцілі.

3. Прийняття рішення (вибір способу моніторингу, обчислення маршруту, вибір методу передачі, способу розсилання службової інформації тощо).

4. Реалізація рішення (розсилання службової інформації, резервування ресурсу, установлення потужності передачі тощо).

Функціональна модель складається з таких основних підсистем (рис. 2):

- збір та зберігання інформації про стан мережі;
- аналіз і прийняття рішень: окремо по моніторингу і процесу передавання даних;
- інтелектуалізація та координація;
- управління витратами енергоресурсу вузлів;
- реалізація рішень щодо управління мережею.



Рис. 2. Функціональна модель системи оперативного управління БСМ

1. Підсистема збору і зберігання інформації про стан мережі повинна здійснювати збір інформації про стан мережі та її збереження в базі даних.

Методи збирання інформації можна класифікувати (рис. 1):

- за обсягом – глобальний та локальний (зоновий);
- за типом – фіксований і адаптивний;
- за регулярністю – періодичний, за подіями (у міру необхідності) і неперервний;
- за аналізом транзитного трафіка – пасивний (не передбачає розсилання службової інформації) і активний;
- за способом передавання службової інформації – «хвильовий» (напрявлена «хвиля», за виділеною під мережею) і «джерельний» (передача інформації за завчасно визначеним маршрутом).

Різні функції (рівні) управління вимагають різного обсягу (кількості параметрів) і глибини збору інформації про стан мережі. Глибина збору i -м вузлом мережі зазвичай визначається відстанню (площею при наявності системи позиціонування), вираженою кількістю ретрансляційних дільниць від даного вузла. Звісно, знання повної інформації про мережу дозволяє приймати більш обґрунтовані рішення, проте призводить до значного росту службового трафіка в умовах динаміки топології і вхідного трафіка. Тому класичні рішення оптимального розподілу потоків у мережі не прийнятні в БСМ, оскільки потребують знання глобального контролю мережі, що неможливо в БСМ. Отже, необхідний пошук

рішень користувальницької оптимізації при мінімізації ресурсів мережі та їх одержання в умовах неповної інформації про її стан.

2. Підсистема аналізу і прийняття рішень по процесах моніторингу та передачі даних.

Управління моніторингом включає такі функції:

– управління розгортанням – збір інформації про об’єкти спостереження, визначення методів (способів) розміщення вузлів, вибір типу і кількості сенсорних вузлів з урахуванням параметрів і середовища моніторингу, типу організації сенсорної мережі, одержання зв’язної мережі тощо;

– управління покриттям – визначення типу покриття об’єкта (цілі, площі, зони, сектора, вибір моделі покриття в залежності від ступеня і коефіцієнта покриття);

– управління спостереженням – розрахунок активних сенсорних вузлів, сесій спостереження сенсорів і мережевої зв’язності тощо;

– управління якістю моніторингу.

Процес прийняття рішень по управлінню моніторингом включає таку послідовність дій: аналіз об’єкта моніторингу (кількість, площа, час, кількість параметрів моніторингу тощо) – вибір мережі (способу) моніторингу – визначення функції управління – визначення рівня реалізації OSI для процесу передачі.

Управління процесом передачі містить такі етапи (рис. 3):

1. Збір інформації про стан мережі (СУ приймає рішення про обсяг, частоту, глибину способу збору інформації).

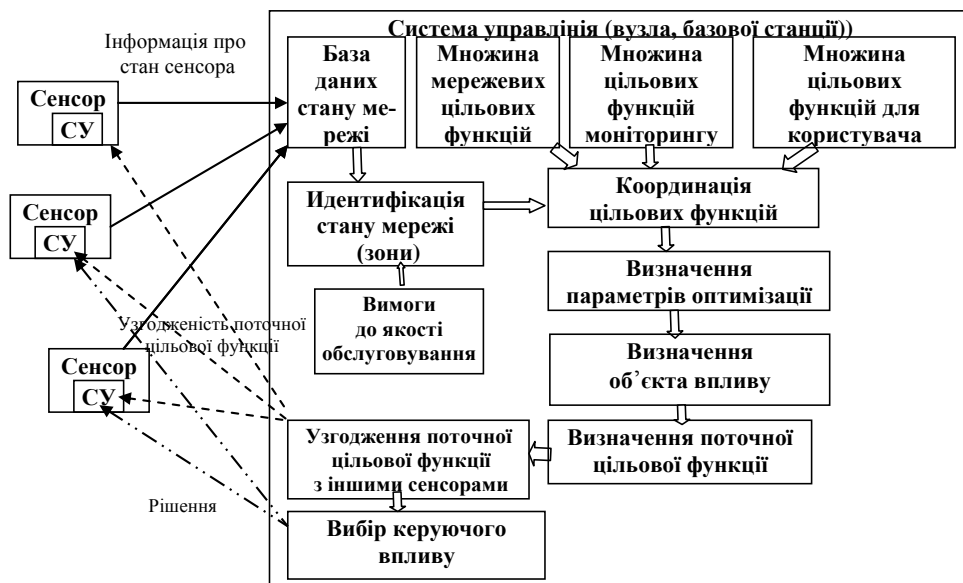


Рис. 3. Процес прийняття рішення системою управління

2. Аналіз інформації про стан мережі. СУ ідентифікує ситуацію в мережі (зоні і самому вузлі), перевіряє виконання мережею своїх функцій і визначає необхідність керуючої дії.

3. Виявлення цілі управління з наступною деталізацією їх на підцілі і прийняття рішення.

Система управління БСМ:

– визначає поточну множину параметрів оптимізації – мережевих і користувальницьких;

– визначає об’єкти управління (вузол, зона, напрямок);

– визначає поточну цільову функцію (функції) управління (маршрутизація, енергозабезпечення тощо);

– узгоджує (координує) її з сусідніми сенсорними вузлами (якщо вузли одного рангу) або призначає її підпорядкованим сенсорним вузлам (якщо це центр управління БСМ або головний вузол зони БСМ);

– вибирає керуючу дію по етапах.

3. Підсистема реалізації рішення здійснює установаження певних параметрів мережі: потужності передавання вузлів, способу моніторингу, резервування ресурсу, розсилання службових повідомлень тощо.

4. Підсистема координації інтелектуалізації. Існуючі підходи до проектування телекомунікаційних мереж зв'язку передбачають незалежність функцій управління за рівнями OSI. Так, стек протоколів кожного рівня працює незалежно. Проте даний підхід не враховує особливості БСМ і не дозволяє забезпечити оптимізацію показників ефективності на кожному рівні OSI (або в цілому) при різних умовах функціонування мережі і вимогах певного типу трафіка (інформації моніторингу).

В умовах змішаного управління (частка функцій виконується централізовано центрами управління БСМ, а друга децентралізовано – вузлами) можна визначити дві взаємозалежні групи цілей:

мережеві (зонові) – оптимізація мережевих або зонових показників ефективності;

користувальницькі – досягнення заданої якості передачі між сенсорними вузлами та шлюзами, тобто оптимізація за напрямком передачі.

До мережевих (зонових) цілей управління можна віднести оптимум таких параметрів $C_i = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$:

C_1 – ступінь покриття території моніторингу сенсорними вузлами (рухомими чи стаціонарними);

C_2 – час функціонування БСМ (її зони) у разі її автономної роботи;

C_3 – продуктивність всієї БСМ чи її зони;

C_4 – структурна надійність (зв'язність) мережі, її зон;

C_5 – кількість ресурсів (стаціонарних та мобільних сенсорів, аероплатформ тощо), які необхідно задіяти для досягнення певної мети;

C_6 – потужність передач вузлів мережі чи її зони;

C_7 – обсяг службового трафіка, який генерується для збору інформації про стан БСМ;

C_8 – час планування, розгортання, відновлення БСМ;

C_9 – параметри безпеки і т.д.

Для координації управління по моніторингу і передавання (за рівнями OSI) пропонується введення надбудови координації (cross-level).

Пропонується введення в підсистему координації і інтелектуалізації бази методів управління, кожен з яких ефективний при різних ситуаціях на мережі. Методи управління розбиті на дві підгрупи: за рівнями OSI і функціями управління.

На етапі оперативного управління за прийнятими критеріями ефективності СУ постійно оцінює стан сенсорної мережі і вживає заходів (у відповідності з планом і реальною ситуацією) щодо утримання її показників ефективності функціонування в заданих межах або здійснюється їх оптимізація.

В умовах обмеженості інформації про стан мережі, її неповноти для ідентифікації ситуації і прийняття рішень по вибору методів управління пропонується використовувати методи штучного інтелекту.

Під час прийняття рішень система управління повинна ідентифікувати ситуацію – стан мережі (зони, напрямку), визначити цільові функції управління і вибрати із множини можливих методів управління оптимальний (раціональний) для даної ситуації і заданої цілі управління з урахуванням можливих обмежень ресурсів сенсорних вузлів.

Кількість і конкретні задачі оперативного управління визначаються характеристиками і умовами функціонування мережі, а також прийнятими технологічними рішеннями на етапі її проектування.



Рис. 4. Рівні та функції системи управління БСМ

Пропонується нова архітектура побудови системи управління неоднорідними БСМ, яка передбачає: для неоднорідної мережі – координацію і інтелектуалізацію процесів прийняття рішень для кожного класу БСМ; для кожної мережі БСМ – координацію і інтеграцію, рівну OSI по цілях і функціях управління (рис. 4).

5. Підсистема управління витратами енергоресурсу вузлів реалізує одну з основних задач управління БСМ, яка повинна бути реалізована при моніторингу і передачі даних із координацією по всіх моделях OSI.

4. Висновки

Для рішення задач управління різномірними сенсорними мережами критичної інфраструктури пропонуються принципово нові підходи до побудови системи управління даними мережами. Запропонована нова архітектура побудови системи управління даними мережами. Її особливостями є розбиття задач управління на функціональні підзадачі (збору інформації, моніторингу, передачі даних, управління енергоспоживанням, реалізацією рішень). Для підвищення якості рішень, що приймаються, і, відповідно, ефективності функціонування даних мереж запропоновано здійснювати координацію цільових функцій управління і інтелектуалізувати процес прийняття рішень по вибору методів управління в залежності від ситуації на мережі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Achatterjee A. Practical Applications Of Wireless Sensor Network Based On Military / A. Achatterjee, M. Pandey // Environmental, Health And Home Applications: A Survey International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2014. – Vol. 5, Issue 1. – P. 1043 – 1050.
2. Subramanian M. Network Management: Principles and Practice (2nd Ed.) / Subramanian M. – Kindle Edition, 2012. – 726 p.
3. Minochkin A. Control System of Mobile Ad-hoc Networks / A. Minochkin, V. Romanyuk // Proc. of International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET 2008). – Lviv, 2008. – P. 414 – 415.
4. Winnie L.L. Management in Wireless Sensor Networks / L.L. Winnie, A. Datta, R. Cardell-Oliver. – Режим доступу: <https://pdfs.semanticscholar.org/587b/046f91dc60568045579ae39cbd1b23c7a713.pdf>.
5. Georgoulas D. Sensor Network Management and Functionality: An Overview / D. Georgoulas, K. Blow // Wireless Sensor Network. – 2009. – Vol. 1. – doi:10.4236/wsn.2009.14032 (Published Online, November 2009). – P. 257 – 267.
6. An Efficient Management System for Wireless Sensor Networks / Y.-W. Ma, J.-L. Chen, Y.-M. Huang [et al.] // Sensors. – 2010. – Vol. 10, Issue 12. – P. 11400 – 11413.

7. Slama I. Topology Control and Routing in Large Scale Wireless Sensor Networks [Електронний ресурс] / I. Slama, B. Jouaber, D. Zeghlache // Wireless Sensor Network. – 2010. – Vol. 2. – P. 584 – 598. – Режим доступу: <http://www.SciRP.org/journal/wsn>.
8. Paradis L., A Survey of Fault Management in Wireless Sensor Networks Journal of Network and Systems Management / L. Paradis, Q. Han // Journal of Network and Systems Management. – 2007. – Vol. 15. – P. 171 – 190.
9. Multi-Agent Architecture for the Design of WSN Networks [Електронний ресурс] / A. Hamzi, M. Koudil, J.-P. Jamont [et al.] // Applications Wireless Sensor Network. – 2013. – Vol. 5, N 25. – 14 p. – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.4236/wsn.2013.52003>.
10. Jameii S.M. Multiobjective Optimization for Topology and Coverage Control in Wireless Sensor Networks [Електронний ресурс] / S.M. Jameii, K. Faez, M. Dehghan // International Journal of Distributed Sensor Networks. – 2015. – Vol. 11, Issue 2. – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.1155/2015/363815>.
11. Lisenko A. Objective control functions of mobile ad-hoc networks using unmanned aerial vehicles. Actual problems of unmanned aerial vehicles developments / A. Lisenko, S. Danylyuk, V. Romanyuk // IEEE 3rd international Conference. – 2015. – P. 243 – 246.

Стаття надійшла до редакції 15.05.2017