

**ІЄРАРХІЧНА МАРШРУТИЗАЦІЯ З БАЛАНСУВАННЯМ
НАВАНТАЖЕННЯ В СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ**

© Гладких В. М., Торошанко О. С., 2017

Запропоновано ієрархічну архітектуру сенсорної мережі (MESH-мережі) з високим ступенем масштабованості. Досліджено можливості її реалізації у режимі самоконфігурування з використанням спеціальних маршрутних протоколів маршрутизації – за запитом (AODV) та з фіксованим зв'язком (OLSR). Показано, що у разі застосування механізмів адаптивного настроювання підвищується продуктивність цих протоколів порівняно з проаналізованими базовими протоколами.

Ключові слова: сенсорна мережа, MESH-мережа, самоконфігурування, AODV, OLSR, маршрутизація, мобільний програмний агент, масштабованість мережі.

UDK 629.735.051:004.7 (043.3)

V. M. Hladkykh, O. S. Toroshanko
O. S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications**HIERARCHICAL ROUTING WITH LOAD
BALANCING IN SENSORY NETWORKS**

© Hladkykh V. M., Toroshanko O. S., 2017

In this paper, the hierarchical architecture of the sensor network (MESH-network) with a high degree of scalability is proposed. The possibilities of its realization in the mode of self-configuration using the special routing protocol at the query (AODV – Ad-hoc On-Demand Distance Vectorisation) and fixed-line routing protocol (OLSR – Optimised Link-State Routing) are investigated. The comparative analysis of radiosensors networks that function after the algorithm of mobile agents, and networks that function after the algorithm of mobile agents with directed diffusion of data stream from knots-sources to the knot receiver, is executed. It is shown that for applications, where the energy consumption has a primary importance using of mobile agents with the directed diffusion allows considerably to prolong the life cycle of network. Technologies of mobile software agents with optimisation modules and autoconfigurations increase network bandwidth, reduce transmission delay and load on the network, reduce the traffic of HELLO messages in accordance with the scalability of the network. On the basis of theoretical estimates and simulation results, it can be concluded that the application of adaptive tuning mechanisms increases the performance of the protocols OLSR and AODV in comparison with the analysed basic protocols.

The developed methods allow to create the mechanism of diminishing of loading on the separate links of network due to balancing of packages at a decision-making about routing. In theory it is possible to use offered approach for a decision-making about routing of packages in a network on the stack of TCP/IP protocols.

Key words: sensory network, MESH-network, configuration, AODV, OLSR, routing, mobile software agent, network scalability.

Вступ

Останніми роками значно зріс інтерес до розгортання мереж радіодатчиків (сенсорних мереж) для вирішення завдань розподіленого зондування, збору й обробки даних. На відміну від мереж зв'язку, які основані на протоколі IP та працюють з глобальною адресацією і маршрутизацією метрики переходів, у сенсорних вузлах, як правило, глобальні адреси відсутні. Крім того, оскільки обслуговування спеціалізованої мережі після розгортання, як правило, неможливе, існують обмеження за часом функціонування (через низький заряд батареї).

Опис архітектури, орієнтованої на спеціалізовані сенсорні мережі або мережі датчиків, можна знайти в [1] та [2]. Архітектура, запропонована в [3], працює для типового сценарію застосування, згідно з яким користувач MESH-мережі підключається до Інтернету.

З урахуванням цих особливостей сенсорні мережі потребують особливої уваги стосовно мінімізації енергоспоживання на більшості рівнів стека протоколів. Для вирішення цього завдання більшість досліджень зосереджуються на продовженні часу життя мережі, забезпеченні масштабованості великої кількості сенсорних вузлів, підвищенні відмовостійкості (наприклад, стійкості до помилок сенсорів або розряду джерела) [4, 5]. Одним з перспективних напрямів досягнення поставленої мети є запровадження механізму спрямованої дифузії та мобільних агентів.

У статті проаналізовано методи маршрутизації в мережі радіодатчиків із застосуванням механізмів спрямованої дифузії з балансуванням навантаження за допомогою так званих мобільних агентів.

Дано визначення деяких понять, які відіграють ключову роль у сенсорних мережах.

Поняття “агент” дуже близьке до поняття “система”. Основними властивостями агентів є:

- автономність роботи в деякому навколишньому середовищі;
- можливість приймати потік вхідної інформації, що надходить від навколишнього середовища;

- можливість обробляти потік вхідної інформації;

- можливість впливати на навколишнє середовище на основі результатів цієї обробки.

Найчастіше під агентом розуміють самостійну систему, що має можливість приймати вплив від зовнішнього світу, визначати свою реакцію на цей вплив і здійснювати цю реакцію. Без взаємодії з іншими агентами для вирішення якого-небудь загального цільового завдання його існування не має сенсу. Під час дослідження сенсорних мереж агента розглядають як певний набір елементів програмного коду, розподілених між окремими мережевими вузлами (сенсорами) [6, 7].

Основною відмінністю підходу, оснований на принципах мультиагентного управління, є порівняно низька обчислювальна складність реалізації його алгоритмів, що дає змогу швидко приймати оптимальні або близькі до них рішення в умовах мінливої ситуації.

Постановка задачі

У більшості робіт, що стосуються дослідження сенсорних мереж, розглядають мережі з порівняно низькою швидкістю передачі даних і наднизьким енергоспоживанням. Необхідно враховувати, що швидкість передачі та споживання енергії пов'язані між собою обернено пропорційною залежністю, а мережеві елементи не обслуговуються після розгортання і не мають поновлюваних джерел живлення. Крім того, смуга пропускання радіоканалу каналу мережі радіодатчиків спочатку є доволі вузькою. Тому для розширення діапазону швидкостей передачі даних з урахуванням накладення обмежень на витрату енергії необхідно, з одного боку, розпаралелювати потік даних, а з іншого боку – мінімізувати кількість паралельних маршрутів передачі від вузлів-джерел до точки збору інформації.

Більшість енергозбережних пропозицій ґрунтуються на традиційній клієнт-серверній моделі, коли кожен сенсорний вузол відсилає зібрані дані в центр обробки або вузол збору. Оскільки ширина каналу безпроводової сенсорної мережі, як правило, набагато менша, ніж у проводової мережі, трафік даних сенсорної мережі може перевищити можливості мережі. Щоб вирішити проблему перевантаження мережі, запропоновано розподілену сенсорну мережу, основану на

використанні так званих “мобільних агентів” для масштабування і енергозбережного збору даних (цей процес збору називається спільною обробкою сигналів і даних [3]). Під час передачі програмного коду, званого “мобільним агентом” (МА), до сенсорних вузлів, велика кількість даних може бути зменшена або перетворена на дані малого обсягу за допомогою ліквідації надмірності. Наприклад, дані сенсорів двох близько розташованих вузлів, напевно, мають схожі або однакові фрагменти, у яких дані двох сенсорів повторюються. Тому усунення надмірності під час збору даних є важливою функцією “щільних” сенсорних мереж, що слугує для зменшення трафіку даних. Функціонування мережі ґрунтується на таких припущеннях:

- архітектура сенсорної мережі побудована на кластеризації;
- вузли-джерела даних розташовані на відстані одного переходу від вершини кластера;
- велика частина надмірності виникає в даних, які можна об’єднати в один пакет даних з фіксованим розміром.

Ці припущення значно обмежують сферу застосування. Обмеження, пов’язане із реалізацією механізму кластеризації, можна усунути, вибравши плоску архітектуру сенсорної мережі, яка підходить для великої кількості практичних завдань. У цьому випадку необхідно дати відповідь на такі запитання:

- як ефективно здійснювати маршрутизацію МА від приймача до джерела, від джерела до джерела і від джерела до приймача?
- як МА визначає послідовність відвідування декількох вузлів-джерел?
- якщо дані всіх вузлів-джерел неможливо помістити в один пакет даних з фіксованим розміром, чи буде модель МА ефективніша від клієнт-серверної моделі, наприклад, в разі середовища, в якому вузли розташовані далеко один від одного і дані сенсорів не володіють достатньою надмірністю?

У цій роботі розглянуто механізм спрямованої дифузії (СД) для маршрутизації з мобільними агентами (СД-МА). СД – це протокол поширення даних у сенсорних мережах, який забезпечує такі механізми:

- надсилання запитів від вузла збору до потрібних сенсорам;
- формування градієнтів для надсилання даних від проміжних вузлів до вузла збору.

Механізм СД забезпечує ефективну маршрутизацію, але для попереднього дослідження маршрутів потрібен початковий потік запитів.

Коротко розглянемо можливості реалізації у режимі самоконфігурування з використанням спеціальних маршрутних протоколів маршрутизації за запитом (AODV – Ad hoc On-Demand Distance Vector) та протоколу маршрутизації з фіксованим зв’язком (OLSR – Optimised Link-State Routing). Для ефективного здійснення маршрутизації МА від приймача до джерела, від джерела до джерела і від джерела до приймача та однозначного визначення послідовності відвідування декількох вузлів-джерел доцільно використовувати метод динамічної маршрутизації [8]. Зазвичай динамічна зміна всієї таблиці маршрутизації здійснюється тільки в разі критичної зміни топології сенсорної мережі з метою мінімізації переданого в мережі трафіку [9].

Розроблення методу усунення надлишковості програмних додатків

Як зазначено вище, з урахуванням специфіки додатків сенсорних мереж, датчик повинен мати різні можливості для роботи з декількома додатками. Однак для вбудованого вузла з обмеженою пам’яттю нереально зберігати в локальній пам’яті усі можливі коди додатків. Введення МА не тільки забезпечує ефективний спосіб динамічного розгортання нових додатків, але й дає змогу вузлу-джерелу здійснювати локальну обробку “сирих” даних за запитом програмного додатка. Ця можливість дає змогу зменшити кількість переданих даних, оскільки буде виділено і передано тільки доречну інформацію. Дано кількісні оцінки ступеню стиснення даних.

Нехай $k_{ст}$ ($0 < k_{ст} < 1$) – коефіцієнт стиснення даних з використанням локальної обробки за допомогою МА; S_d^i – розмір блока вихідних даних на вузлі i ; S_i – загальний розмір стиснених даних. Тоді

$$S_i = S_d^i (1 - k_{ct}). \quad (1)$$

Ступінь кореляції отриманих даних між сенсорами сильно залежить від відстані між сенсорами, так що цілком можливо, що близько розташовані сенсори видаватимуть надлишкові дані. Отже, агрегація даних і ліквідація передачі непотрібних даних є важливою функцією у мережі зі щільним розміщенням сенсорів. Основна перевага – усунення надмірності та, як наслідок, продовження часу життя мережі.

Послідовність відвідування вузлів мобільним агентом може істотно позначитися на енергоспоживанні. У цій роботі алгоритм адаптований для динамічного визначення маршруту мобільним агентом.

Розглянемо завдання оцінки ключових параметрів продуктивності спрямованої дифузії (СД) та спрямованої дифузії з мобільними агентами (СД-МА), зокрема середню затримку доставки пакетів з одного кінця в інший T_{ete} і споживання енергії для відправлення пакетів даних з усіх вузлів джерел до приймального вузла (E).

Нехай T_{dd} і T_{ma} позначають середню затримку доставки пакетів з одного кінця в інший для СД і СД-МА, відповідно. До неї входять всі можливі затримки під час поширення даних, спричинені чергами, повторною передачею з-за колізій на МАС-рівні та часом передачі. H позначає кількість ретрансляційних вузлів на маршруті між останнім джерелом і вузлом-приймачем, який фактично є маршрутом з найменшим часом очікування серед усіх пар “джерело–приймач”.

Швидкість передавання обчислюється так. Розглянемо еволюцію стану системи в дискретному часі в моменти, коли на стороні відправника отримують пакети зворотного зв'язку. Нехай v_τ – швидкість відправлення у момент τ . Припустимо, що k_{fb} пакетів зворотного зв'язку відправляються з інтервалами T_{fb} часу, такими, що затримка поширення для розглянутої ланки $k_{fb} \times T_{fb}$.

Для зв'язку в розглянутих умовах нехай M_{buf} – кількість зайнятих буферів низхідного комутатора, у момент τ . Тоді середня кількість ретрансляцій для всіх пар “джерело–приймач” дорівнюватиме $H+h$. Нехай v_n – швидкість передачі даних на МАС-рівні; t_{ctrl} – загальна затримка контрольних повідомлень під час успішної передачі даних; S_d – загальний розмір відправлених даних, S_h – розмір заголовку пакета.

За методом звичайної СД паралельна відправка декількох пакетів даних може призвести до колізій у каналі, що викличе додаткову затримку передачі даних, особливо якщо кількість вузлів джерел велика [4, 5]. Нехай t_{acs} – середній час очікування для успішної передачі даних у СД, середній час очікування на резервному маршруті – T_r , а кількість пакетів даних, доставлених до вузла-приймача за час виконання завдання, – n_d . Тоді T_{dd} із урахуванням (1) обчислюється за формулою [5]:

$$T_{dd} = \frac{T_r}{n_d} + \left(\frac{S_d + S_h}{v_n} + t_{ctrl} + t_{acs} \right) (H + h). \quad (2)$$

Якщо $n_d \gg 1$, вираз (2) спрощується:

$$T_{dd} \approx \left(\frac{S_d + S_h}{v_n} + t_{ctrl} + t_{acs} \right) (H + h). \quad (3)$$

У методі СД-МА T_{ma} – це середній відрізок часу між часом, коли був створений МА, і часом, коли МА повертається до вузла-приймача; T_p – затримка проходження МА; T_{room} – середній час очікування роумінгу МА; T_{back} – середня затримка проходження МА від джерела до вузла збору.

Позначимо через τ_{acc} затримку доступу; S_p – розмір виконуваного коду мобільного агента; v_p – швидкість обробки даних.

Нехай S_{ma}^i – розмір МА у вузлі-джерелі i ; N – кількість вузлів-джерел. Тоді

$$T_{room} = \sum_{i=1}^N \left(\tau + \frac{S_d}{v_p} + \frac{S_{ma}^i + S_p + S_h}{v_n} + t_{ctrl} \right). \quad (4)$$

У (4) S_{ma}^i дорівнює

$$S_{ma}^i = S_{ma}^{i-1} + S_d (1 - r_i)(1 - p_i). \quad (5)$$

Нехай S_{ma}^N – розмір пакета МА, після того, як МА прибуде до останнього джерела. Тоді:

$$T_{back} = \left(\frac{S_{ma}^N + S_h}{v_n} + t_{ctrl} \right) H; \quad (6)$$

$$T_{ma} = \frac{T_p}{n_d} + T_{roam} + T_{back}; \quad (7)$$

і якщо $n_d \gg 1$

$$T_{ma} \approx T_{roam} + T_{back}. \quad (8)$$

Нехай E_{dd} і E_{ma} позначають витрати енергії для СД і СД-МА, відповідно. Позначимо через m_{tx} і m_{rx} споживання енергії для отримання і передавання одного біта, відповідно; b – фіксована витрата енергії на передачу пакета даних; e_{ctrl} – енергія, витрачена на обмін контрольними повідомленнями для успішної передачі даних; e_{retx} – енергія, витрачена на повторну передачу у випадку колізії СД. Тоді E_{dd} дорівнюватиме:

$$E_{dd} = [(S_d + S_h)(m_{tx} + m_{rx}) + b + e_{ctrl} + e_{retx}](H + h)N. \quad (9)$$

В СД-МА E_p є енергією, спожитою під час переміщення МА від вузла збору до першого джерела, E_{roam} – середнє значення енергії, що споживається на роумінг МА від першого джерела до останнього; E_{back} – середнє значення енергії, що спожита під час проходження МА від першого джерела до вузла збору даних; m_p – енергія, витрачена на обробку одного біта. Тоді

$$E_{roam} = \sum_{i=1}^N [S_d m_p + (S_{ma}^i + S_p + S_h)(m_{tx} + m_{rx}) + b + t_{ctrl}], \quad (10)$$

$$E_{back} = [(S_{ma}^N + S_h)(m_{tx} + m_{rx}) + b + t_{ctrl}]H. \quad (11)$$

$$E_{ma} = \frac{E_p}{n_d} + E_{roam} + E_{back}. \quad (12)$$

Якщо кількість n_d набагато більша від одиниці, у виразі (12) можна знехтувати першим доданком:

$$E_{ma} = E_{roam} + E_{back}. \quad (13)$$

Наведені формули (3)–(13) використовують для порівняльного аналізу характеристик затримки та енергоспоживання за методами СД і СД-МА. На рис. 1 та 2 зображено графіки середньої розсіяної енергії (у відсотках на вузол) і середньої затримки доставки в секундах залежно від кількості n_d пакетів, що пересилаються за секунду.

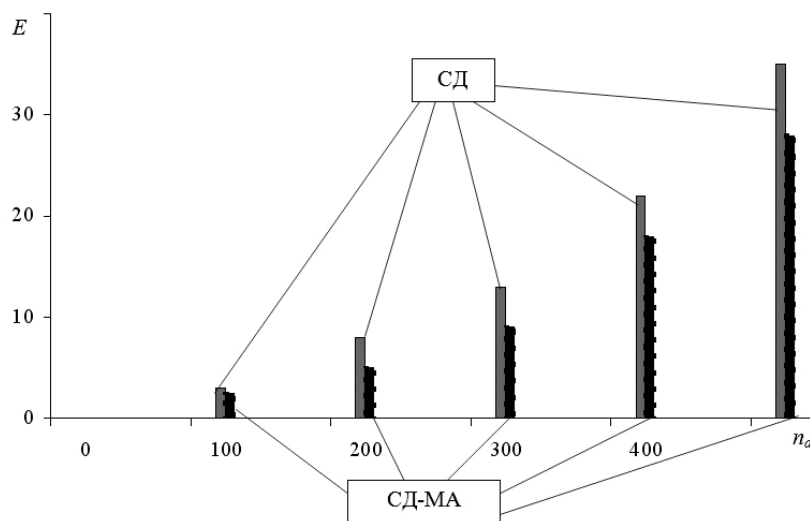


Рис. 1. Залежність середньої розсіяної енергії від n_d , % на вузол

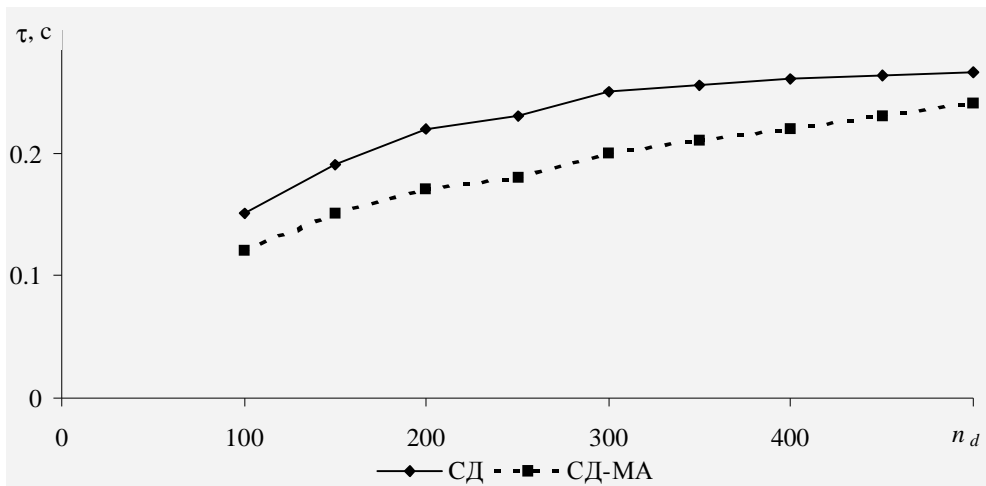


Рис. 2. Залежність середньої затримки доставки від n_d

Під час розрахунків і моделювання на ЕОМ за формулами (8) і (12) встановлено, що в 70 % випадків за методом СД-МА затримка доставки приблизно на 15–25 % менша, ніж за методом СД. Перевищення затримки доставки даних у разі використання методу СД-МА порівняно з методом СД не спостерігалось.

Відповідно, і витрата енергії у разі використання методу СД-МА у всіх випадках не вища, ніж за методом звичайної спрямованої дифузії.

Балансування навантаження за багатошляхової маршрутизації

Як відомо [8, 10], алгоритм маршрутизації реалізується тією частиною програмного забезпечення мережевого рівня, яка відповідає за вибір вихідної лінії для відправки пакета, який надійшов. Такі цілі алгоритмів маршрутизації, як справедливість і ефективність, можуть здатися очевидними – навряд чи хто-небудь заперечуватиме проти них. Однак вони часто виявляються взаємовиключними. Очевидно, необхідний компроміс між справедливим виділенням трафіку всім станціям і оптимальним використанням каналу в глобальному сенсі. Перш ніж намагатися шукати прийнятне співвідношення справедливості та оптимальності, необхідно вирішити, що саме треба оптимізувати.

Можна мінімізувати середній час затримки або збільшити пропускну здатність мережі. Однак ці цілі також суперечать одна одній, оскільки робота будь-якої системи з чергами поблизу максимуму продуктивності передбачає довге очікування в чергах. Як компроміс багато мереж намагаються мінімізувати кількість пересилань для кожного пакета, щоб знизити час проходження пакета по мережі, а також навантаження на мережу, в результаті чого покращується пропускну здатність.

Розв'язання конфлікту справедливості та оптимальності у процесі маршрутизації тісно пов'язане з балансом потоків для мережі з необмеженою пам'яттю у вузлах.

Розглянемо мережу, що складається з W вузлів комутації пакетів, пам'ять яких являє собою пул однорідних буферів. Канали зв'язку для простоти передбачаються абсолютно надійними, так що повторення передачі пакетів між сусідніми вузлами визначається лише зайнятістю буферної пам'яті вузла. Пакети надходять у мережу із R зовнішніх джерел з інтенсивністю $\Lambda_r = (r=1, R)$.

Нехай $\lambda_{0i}(r) = \Lambda_r P_{0i}(r)$. Тоді очевидно, що загальний потік, який надходить у мережу, визначається як $\Lambda = \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^W \lambda_{0i}(r)$.

Рівняння балансу потоків для вузлів розглянутої мережі має вигляд [11]

$$\lambda_i(r) = \lambda_{0i}(r) + \sum_{R=1}^W \lambda_R(r) \pi_R(\lambda_R) P_{Ri} + \lambda_i(r)(1 - \pi_i(\lambda_i)), \quad i = \overline{1, W}; \quad r = \overline{1, R}, \quad (14)$$

де $\lambda_R = \sum_{r=1}^W \lambda_R(r)$; $\pi_R(\lambda_R)$ – стаціонарна імовірність наявності вільного буфера в R -му вузлі.

Система (14) може бути записана у вигляді:

$$\lambda_i(r) = \frac{1}{\pi_i(r)} (\lambda_{0i}(r) + \sum_{R=1}^W \lambda_R(r) \pi_R(\lambda_R) P_{Ri}(r)).$$

Вводячи позначення $g_i(r) = I_i(r) p_i(I_i)$, $i = \overline{1, W}$; $r = \overline{1, R}$ і підставляючи $g_i(r)$ в (2), одержуємо систему рівнянь балансу потоків для мережі з необмеженою пам'яттю у вузлах:

$$g_i(r) = I_{0i}(r) + \sum_{R=1}^W g_R P_{Ri}(r).$$

Останній вираз показує, що, зберігаючи баланс потоків, які пропускає мережа, інтенсивності потоків у вузлі з обмеженою буферною пам'яттю перевершують відповідну інтенсивність мережі з необмеженою пам'яттю в $1/p_i(I_i)$ разів. А кількість повторень передачі по каналах мережі $(R, i) R \neq i; R, i = \overline{1, W}$ можна вважати розподіленою за геометричним законом із середнім $1/p(I_i)$. Останнє еквівалентно збільшенню відносної частоти відвідування центрів обслуговування моделі замкненої мережі, якщо $F_i = 1 - p_i(I_i)$. Отже, взаємовплив за міжвузлового квіттування виявляється у функціональній залежності

$$\pi_i(\lambda_i) = \Phi_i(\pi_i(\lambda_i), \dots, \pi_W(\lambda_W)).$$

Для прийняття рішення про маршрутизацію пакетів за критерієм рівномірного завантаження мережі необхідно використовувати інформацію про топологію мережі та стан завантаження шляху від активного маршрутизатора до вузла призначення пакетів. Найраціональнішим є варіант використання пакетів даних для визначення затримок до тих вузлів, шлях до яких відомий активному маршрутизатору. А для визначення затримок у тій частині мережі, топологія якої невідома, застосовують службові команди серверів. Теоретично можливо використати запропонований підхід для прийняття рішення про маршрутизацію пакетів у мережі на стеці протоколів TCP/IP.

Висновки

1. У роботі виконано порівняльний аналіз мереж радіодатчиків, які працюють за алгоритмом мобільних агентів, і мереж, в яких застосовується алгоритм мобільних агентів зі спрямованою дифузією потоків даних від вузлів-джерел до вузла-приймача. Результати розрахунків і моделювання показують, що результуюча затримка у разі використання СД-МА в рідкісних випадках гірша, ніж у СД, але здебільшого енергоспоживання СД-МА менше. Отже, для застосувань, для яких споживання енергії має першорядне значення, СД-МА дає змогу значно більше продовжити життєвий цикл мережі, ніж звичайна СД.

2. Запропонована методика дозволяє знизити завантаженість мережі та запобігти перевантаженню її окремих ланок. Розроблені методики дають можливість створити механізм зменшення навантаження на окремі ланки мережі за рахунок балансування пакетів під час прийняття рішення про маршрутизацію.

1. Lin C. R., Gerla M. Adaptive Clustering for Mobile Wireless Networks // IEEE J. Select. Areas Commun. – September 1997. 2. Bandyopadhyay S., Coyle E. An Energy-Efficient Hierarchical Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks // Proceedings of IEEE INFOCOM. – April 2003. 3. Al-Karaki J. N., Kamal A. E. Routing techniques in wireless sensor networks: a survey // IEEE Wireless Communications. – 2004. – Vol. 11, no. 6. – P. 6–8. 4. Торошанко А. С. Метод управления передачей данных в сетях радиодатчиков с помощью мобильных агентов // Наукові записки Українського

науково-дослідного інституту зв'язку. – 2011. – № 3. – С. 46–50. 5. Виноградов Н. А., Торошанко А. С. Повышение точности измерений в беспроводных сенсорных сетях путем коррекции дрейфа параметров датчиков // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2012. – Т. 10, № 4. – С. 14–20. 6. Akkaya K., Younis M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks // *Ad Hoc Networks*. – 2005. – Vol. 3, no. 3. – P. 325–349. 7. Qi H., Xu Y, Wang X. Mobile-agent-based collaborative signal and information processing in sensor networks // *Proceedings of the IEEE*. – 2003. – Vol. 91, no. 8. – P. 1172–1183. 8. Stallings W. *Foundations of Modern Networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud*. – Pearson Education, Inc., Old Tappan, New Jersey, 2016. – 538 p. 9. Сергушев А. Ф. Отказоустойчивая сенсорная сеть для систем безопасности потенциально опасных промышленных объектов / А. Ф. Сергушев // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – Раздел III. Процессы управления, автоматизация и математическое моделирование. – 2015. – № 12(173). – С. 149–161. 10. Tanenbaum A. S., David J. Wetherall D. J. *Computer Networks*, 5th Ed. – Prentice Hall, Cloth, 2011. – 960 p. 11. Вишневецкий В. М. *Теоретические основы проектирования компьютерных сетей*. – М.: Техносфера, 2003. – 512 с.

References

1. Lin, C. R. and Gerla, M. (1997). *Adaptive Clustering for Mobile Wireless Networks*. *IEEE J. Select. Areas Commun*, September 1997. 2. Bandyopadhyay, S. and Coyle, E. (2003). *An Energy-Efficient Hierarchical Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks*. *Proceedings of IEEE INFOCOM*, April 2003. 3. Al-Karaki, J. N. and Kamal A. E. (2004). *Routing techniques in wireless sensor networks: a survey*. *IEEE Wireless Communications*, 11(6), pp. 6–8. 4. Toroshanko, A. S. (2011). “A method of data transfer control by mobile agents in mesh sensor networks”. *Naukovi zapysky Ukrainskoho naukovo-doslidnoho instytutu zviazku*, 3, pp. 46–50. 5. Vinogradov, N. A. and Toroshanko, A. S. (2012). *Increase of exactness of measurings in wireless sensory networks by the correctionof drift of sensors parameters*. *Visnyk Derzhavnoho universytetu informatsiino-komunikatsiinykh tekhnolohii*, 10(4), pp. 14–20. 6. Akkaya, K. and Younis, M. (2005). *A survey on routing protocols for wireless sensor networks*. *Ad Hoc Networks*, 3(3), pp. 325–349, 2005. 7. Qi, H., Xu, Y. and Wang X. (2003). *Mobile-agent-based collaborative signal and information processing in sensor networks*. *Proceedings of the IEEE*, 91(8), pp. 1172–1183. 8. Stallings, W. (2016). *Foundations of Modern Networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud*. Pearson Education, Inc., Old Tappan, New Jersey. 9. Sergushev, A. F. (2015). *Fault tolerance sensory network for the safety systems of potentially dangerous industrial objects*. *Izvestija JuFU, engineerings sciences, section III, management processes, automation and mathematical modelling*, 12(173), pp. 149–161. 10. Tanenbaum, A. S., David, J. and Wetherall, D. J. (2011). *Computer Networks*, 5th Ed. Prentice Hall, Cloth. 11. Vishnevskij V. M. (2003). *Theoretical bases of computer networks planning*, Moskva: Tekhnosfera.