

УДК 004.451.5:621.391.681.5

Комарова Л. О., доктор техн. наук, с.н.с. Тел.: +380 (44) 249 25 54. E-mail : lacosta\_k@ukr.net  
(Державний університет телекомунікацій, м. Київ)

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СТРУКТУРНОЇ САМООРГАНІЗАЦІЇ MESH-МЕРЕЖІ СТАНДАРТУ IEEE 802.11 В СИСТЕМАХ МОНІТОРИНГУ КРИЗОВИХ СИТУАЦІЙ

**Komarova L. O. Mathematical model of structural self-organizing mesh-network of IEEE 802.11 systems for monitoring critical situations.** Conception of cell-type network which enables expansion of coverage area is offered. Conception is underlaid on the using of self-organizing off-wire network. In work the mathematical model of structural self-organizing mesh-network of IEEE 802.11 systems for monitoring critical situations, which provides: the establishment of zones of solid information cover large area; network scalability (increasing the area coverage and density of information provision) in the mode of self-organization; the use of wireless transport channels (backhaul) communication access point mode "with each other"; the sustainability of the network to loss of individual elements.

**Keywords:** mesh network, self-organization network, monitoring, sensor, the crisis situation, information coverage, standard IEEE 802.11

**Комарова Л. О. Математична модель структурної самоорганізації mesh-мережі стандарту IEEE 802.11 в системах моніторингу кризових ситуацій.** Запропонована концепція коміркової мережі, яка дає можливість розширення зони покриття. В основі концепції лежить самоорганізована безпроводова мережа. Розроблена математична модель структурної самоорганізації mesh-мережі стандарту IEEE 802.11 в системах моніторингу кризових ситуацій. Показані шляхи і можливості створення зон суцільного інформаційного покриття великої площі, масштабованості мережі у режимі самоорганізації; а також забезпечення стійкості мережі до втрати окремих елементів.

**Ключові слова:** mesh-мережа, самоорганізація мережі, моніторинг, сенсор, кризова ситуація, інформаційне покриття, стандарт IEEE 802.11

**Комарова Л. А. Математическая модель структурной самоорганизации mesh-сети стандарта IEEE 802.11 в системах мониторинга кризисных ситуаций.** Предложена концепция ячеечной сети, которая дает возможность расширения зоны покрытия. В основе концепции лежит саморганизованная беспроводная сеть. Разработана математическая модель структурной самоорганизации mesh-сети стандарта IEEE 802.11 в системах мониторинга кризисных ситуаций. Показаны пути и возможности создания зон сплошного информационного покрытия большой площади, масштабируемости сети в режиме самоорганизации; а также обеспечение стойкости сети к потере отдельных элементов.

**Ключевые слова:** mesh-сеть, самоорганизация сети, мониторинг, сенсор, кризисная ситуация, информационное покрытие, стандарт IEEE 802.11.

**Вступ.** Однією з основних переваг управління та прийняття рішень при виникненні кризових ситуацій є наявність інформації в реальному режимі часу, тому впровадження ефективної системи моніторингу та управління, яка дасть змогу здійснювати локалізацію як технічних, так і людських сил у процесі їх перебування та переміщення, забезпечить успіх виконання оперативних завдань у небезпечній зоні. З цією метою запропонована система моніторингу з просторово-часовою нестабільністю первинних джерел інформації дає змогу отримати дані про стаціонарні та мобільні об'єкти. Для таких задач можуть використовуватися мобільні сенсори, датчики на основі літаючих пристроїв (квадрокоптерів чи безпілотників) [1-5]. Сучасні наукові досягнення дозволяють створювати мініатюрні й інтелектуальні сенсори. Мініатюризація дозволяє розширювати можливості застосування та інтеграції безпроводових сенсорних мереж [6, 7].

Оцінюванню ефективності та ідентифікації технічних засобів і контрольованих ситуацій присвячені роботи багатьох вітчизняних і зарубіжних фахівців, а також міжнародних організацій [8-14]. У даний час mesh-мережі будуються з використанням поширеного безпроводового стандарту WiFi. Основні задачі, які виникають при розробці та побудови безпроводових Mesh-мереж є оптимізація потоків трафіку, і підвищення пропускної спроможності каналів зв'язку. Для вироблення ефективних рішень відносно розвитку кризової ситуації виникає потреба надання оперативної динамічної інформації, розробки архітектури когнітивної WiFi mesh-мережі спеціального призначення, організації надійного

й захищеного покриття в певній зоні для забезпечення мобільних високошвидкісних комунікацій у кризових ситуаціях.

**Принципи побудови mesh-мережі.** Розвиток і повсюдне впровадження безпроводних mesh-мереж (Wireless Mesh Networks, WMNs), заснованих на технології IEEE 802.11x, визначається їх відносною дешевизною і універсальністю з точки зору надання сучасних, насамперед, мультимедійних послуг. Найбільш загальне визначення звучить як: «Mesh-мережна топологія, у якій пристрої поєднуються численними (часто надлишковими) з'єднаннями, що вводять із стратегічних міркувань».

Одним з головних принципів побудови mesh-мережі є принцип самоорганізації архітектури, що забезпечує такі можливості, як реалізацію топології мережі "кожний з кожним"; стійкість мережі при відмові окремих компонентів; масштабованість мережі – збільшення зони інформаційного покриття в режимі самоорганізації; динамічну маршрутизацію трафіку, контроль стану мережі тощо. Mesh-мережі можуть бути стаціонарними або мобільними. В останньому випадку всі або частину вузлів з часом можуть змінювати своє місце розташування.

Mesh-мережа – це багаторівнева мережа, пристрої якої (mesh-станції, МР, Mesh Points) мають функції маршрутизатора й здатні використати різні шляхи для передачі пакета.

Топологія Mesh (Рис. 1) базується на децентралізованій організації мережі, на відміну від типових мереж 802.11a/b/g, які створюються за централізованим принципом. Базові станції, що працюють в Mesh-мережах, не тільки надають послуги абонентського доступу, але й виконують функції маршрутизаторів-ретрансляторів для інших точок доступу тієї ж мережі. Завдяки цьому з'являється можливість створення самоустановлюваного й самовідновлюваного сегмента широкопasmової мережі.

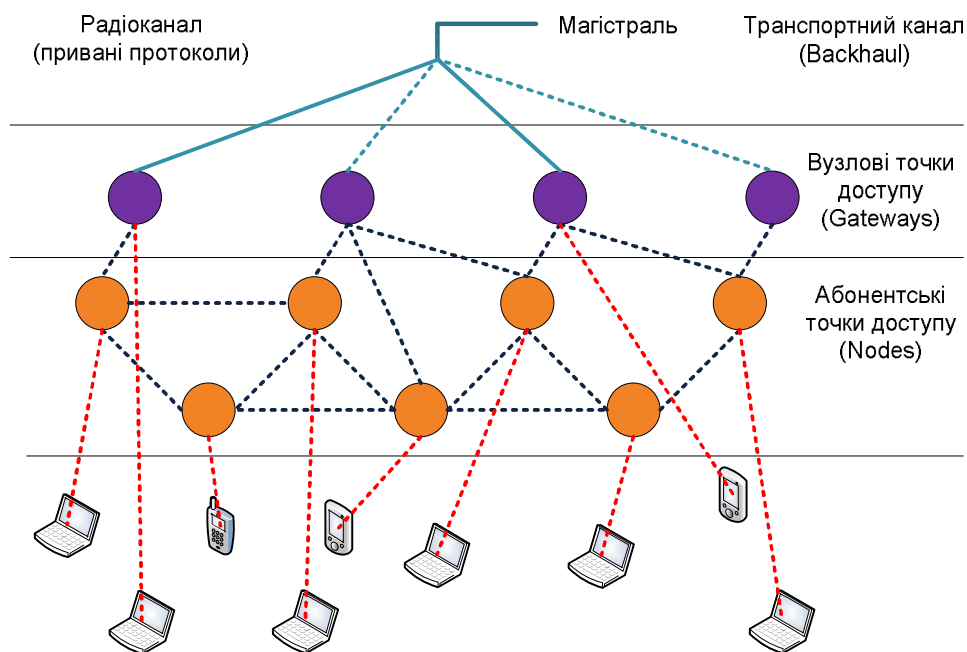


Рис. 1. Топологія mesh-мережі

Mesh-мережі будуються як сукупність кластерів. Територія покриття розділяється на кластерні зони, число яких теоретично не обмежене. Одна з таких точок є вузловою (gateway) і підключається до магістрального інформаційного каналу за допомогою кабелю (оптичного або електричного) або по радіоканалу (з використанням систем широкопasmового доступу). Вузлові точки доступу, так же як і інші точки доступу (nodes) у кластері, з'єднуються між собою (з найближчими сусідами) по транспортному радіоканалу. Залежно від конкретного рішення точки доступу можуть виконувати функції ретранслятора (транспортний канал) або функції ретранслятора та абонентської точки доступу.

Особливістю Mesh є використання спеціальних протоколів, що дозволяють кожній точці доступу створювати таблиці абонентів мережі з контролем стану транспортного каналу і підтримкою динамічної маршрутизації трафіка по оптимальному маршруту між сусідніми точками. При відмові якої-небудь із них відбувається автоматичне перенаправлення трафіка по іншому маршруту, що гарантує не просто доставку трафіка адресатові, а доставку за мінімальний час.

Оскільки Mesh дозволяє організувати надійне й захищене покриття в певній зоні, ця технологія вважається ефективним рішенням для забезпечення мобільних високошвидкісних комунікацій у кризових ситуаціях.

Мережа Mesh – самовідновлювана, тобто автоматично реконфігурується у випадку відключення деяких точок доступу. Вона продовжує функціонувати, навіть якщо деякі пристрої мережі виходять із ладу. Така властивість мережі дозволяє її відновити або швидко розширити для забезпечення покриття в зоні нещастя або надзвичайної події. Фізичні властивості безпроводних комунікаційних каналів такі, що на більш коротких відстанях пропускна спроможність мережі вище. І тому одним із способів підвищення пропускної спроможності мережі стає передача даних через кілька вузлів, розділених невеликими відстанями. Такий механізм і реалізується в мережах коміркової топології. Завдяки тому, що для передачі даних на більш короткі відстані потрібна менша потужність, багатовузлова мережа може забезпечити більш високу загальну пропускну спроможність, одночасно задовольняючи всім законодавчим вимогам до пристроїв радіозв'язку, що обмежує максимальну потужність передавачів.

**Математична модель самоорганізованої mesh-мережі.** Відповідно до сформульованих вимог системного характеру пропонується математична модель структурної самоорганізації mesh-мережі стандарту IEEE 802.22. У рамках пропонованої моделі передбачаються відомими наступні дані:

$\{R_i, i = \overline{1, N}\}$  – множина mesh-станцій, де  $N$  – загальне їх кількість в мережі;

$m_j$  – число радіоінтерфейсів на mesh- станції  $R_j$ ;

$K$  – кількість каналів, що не перекриваються, які використовуються в mesh- мережі.

Крім того, нехай  $\{G_i, z = \overline{1, Z}\}$  – множина зон стійкого прийому – кластерів (Transmission Range, TR), які утворюють територіально віддалені mesh-станції, де  $Z$  – їх загальна кількість у мережі. Припустимо, що зону стійкого прийому утворює множина mesh-станцій максимальної потужності, у рамках якої станції можуть обмінюватися даними за допомогою вибраної в mesh-мережі технології безпроводного зв'язку.

З метою обліку територіальної віддаленості mesh-станцій у мережі в математичну модель введено поняття матриці зон стійкого прийому або TR-матриці. Матриця є прямокутною з кількістю рядків, що відповідає кількості зон стійкого прийому ( $Z$ ), і з кількістю стовпців, що відповідає загальній кількості mesh-станцій ( $N$ ) в мережі, тобто

$$D = \|d_{i,j}\|, i = \overline{1, Z}, j = \overline{1, N}, \quad (1)$$

де  $d_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } j\text{-а станція знаходиться у } i\text{-й } TR \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$

У рамках пропонованої моделі в ході рішення задачі розподілу каналів по радіоінтерфейсам mesh-станцій мережі необхідно забезпечити розрахунок булевої змінної:

$$x_{i,j}^k \in \{0,1\}, (i = \overline{1, N}, k = \overline{1, K}, j = \overline{1, m_i}), \quad (2)$$

причому  $x_{i,j}^k = \begin{cases} 1, & \text{якщо } j\text{-й радіоінтерфейс працює у } k\text{-у ЧК;} \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$

Загальна кількість змінних (2), які визначають порядок розподілення каналів, залежить від кількості станцій у мережі, радіоінтерфейсів, які використовують канали  $i$ , відповідно, визначатиметься вираженням  $N \times m \times K$ . Результатом розрахунку змінних (2) має бути розбиття mesh-мережі в цілому і кожної зони стійкого прийому окремо на зв'язані між собою

домени колізій, в яких mesh-станції функціонують на одному і тому ж каналі. У зв'язку з цим при розрахунку шуканих змінних  $x_{i,j}^k$  в кожній окремо взятій  $G_z$  необхідно виконати ряд важливих умов-обмежень – умова включення станції в мережу:

$$\sum_{k=1}^K x_{i,j}^k \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \geq m^* \quad (i = \overline{1, N}), \quad (3)$$

де  $1 \leq m^* \leq m_i$  – цілочисленний параметр, який характеризує мінімально необхідне число радіоінтерфейсів (PI) на довільно вибраній mesh-станції;

$\sum_{k=1}^K x_{i,j}^k \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k$  – кількість ввімкнених PI на одній станції.

Умова виділення j-му радіоінтерфейсу i-ї станції не більше одного каналу.

$$\sum_{k=1}^K x_{i,j}^k \leq 1 \quad (i = \overline{1, N}, j = \overline{1, m_i}). \quad (4)$$

Умова закріплення k-го каналу на i-й станції не більш ніж за одним радіоінтерфейсом:

$$\sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k \leq 1 \quad (i = \overline{1, N}, k = \overline{1, K}). \quad (5)$$

Умова роботи двох mesh-станцій тільки на одному каналі (для однієї зони стійкого прийому):

$$\sum_{k=1}^K \left[ \sum_{j=1}^{m_i} x_{i,j}^k * \sum_{l=1}^{m_s} x_{s,l}^k \right] \leq 1, \text{ (для } (i,s) \text{ - пари станцій, } i, s = \overline{1, N}; \quad i \neq s, \quad (6)$$

вводиться для усунення небажаної структурної надмірності і носить квадратичний характер.

Умова того, що довільна mesh-станція на ввімкненому на ній радіоінтерфейсі каналу працює хоча б з однією станцією свого TR:

$$x_{i,j}^k \leq \sum_{\substack{u \in G_z \\ u \neq i}} x_{u,r}^k \quad (i \in G_z, z = \overline{1, Z}, k = \overline{1, K}, j = \overline{1, m_i}), \quad (7)$$

де  $\sum_{\substack{u \in G_z \\ u \neq i}} x_{u,r}^k$  – число станцій у зоні  $G_z$ , які працюють на k-му каналі.

Умова відсутності ефекту "прихованої станції", тобто станція, яка належить одночасно до декількох зон стійкого прийому, не повинна працювати на одному і тому ж каналі із станціями різних TR:

$$\sum_{j=1}^{m_j} x_{s,j}^k \sum_{i \in G_p} x_{i,r}^k = \sum_{j=1}^{m_j} x_{s,j}^k \sum_{i \in G_s^*} x_{i,r}^k \quad (G_p \in G_s^*, s = \overline{1, N}, k = \overline{1, K}, \quad s = \overline{1, N}), \quad (8)$$

де  $G_s^*$  – множина зон стійкого прийому, до яких належить s-а станція.

Умова зв'язності мережі (зв'язності створюваних доменів колізій mesh-станцій):

$$p = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K x_{i,j}^k \geq N + K - 1, \quad (9)$$

виконання якого спільне з (9) в умовах дефіциту каналів ( $K < N - 1$ ) гарантує, що число включених радіоінтерфейсів (p) з урахуванням числа mesh-станцій і підтримуваних в технології безпроводного зв'язку каналів забезпечить зв'язність багатоканальної mesh-мережі.

Два домени mesh-мережі зв'язні, якщо існує mesh-станція, яка одночасно працює на каналах цих двох доменів, тобто перший PI станції працює на одному каналі, а другий її PI працює на іншому каналі. Дві mesh-станції зв'язні, якщо вони знаходяться в одному домені колізій, тобто працюють на одному каналі.

Доцільно, щоб в процесі структурної самоорганізації мережі mesh-станції були розподілені по доменам колізій рівномірно, тобто збалансовано. Адже продуктивність в створюваному домені прямо пропорційна числу станцій, що входять в нього. З цією метою введемо умову балансування числа mesh-станцій по доменах колізій безпроводної ІТС.

Умова балансування числа mesh-станцій по доменам колізій в залежності від територіальної віддаленості, активності станцій і кількості зон стійкого прийому матиме декілька інтерпретацій.

1. Якщо усі станції знаходяться в одній TR, умова балансування числа mesh- станцій по доменах колізій матиме наступний вигляд:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{m_j} x_{i,j}^k \leq \delta \quad (k = \overline{1, K}), \quad (10)$$

де  $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{m_j} x_{i,j}^k$  – число mesh-станцій у мережі, які працюють на k-му каналі;

$\delta$  – верхній динамічно керований поріг числа mesh-станцій в довільно вибраному домені колізій у багатоканальній mesh-мережі.

2. При обліку територіальної віддаленості станцій, тобто при знаходженні станцій в різних зонах стійкого прийому, умова балансування матиме наступний вигляд:

$$\sum_{i=1}^N d_{z,i} \cdot \sum_{j=1}^{m_j} x_{i,j}^k \leq \delta \quad (\text{для кожної } (z,k)\text{-пари, } i = \overline{1, N}, k = \overline{1, K}, j = \overline{1, m_i}), \quad (11)$$

де в лівій частині нерівності представлено число станцій в z-ої TR.

3. Важливим чинником при балансуванні числа станцій по доменах колізій їх активність, під якою в даному випадку будемо розуміти умовний коефіцієнт, який залежить від частоти виходу станції в радіоефір, тривалості сеансів зв'язку і інтенсивності трафіку, який передається. У зв'язку з цим умова балансування mesh- станцій по доменах колізій мережі може набути наступної форми:

$$\sum_{i=1}^N d_{z,i} \cdot \beta_i \sum_{j=1}^{m_j} x_{i,j}^k \leq \delta \quad (\text{для кожної } (z,k)\text{-пари, } z = \overline{1, Z}, k = \overline{1, K}), \quad (12)$$

де  $\beta_i$  – коефіцієнт активності i-ї станції, який залежить від кількості підключених користувачів, інтенсивності вхідного і вихідного трафіку, типу трафіку.

4. У зв'язку з нерівномірним завантаженням РІ-станції і зважаючи на роботу їх за різними напрямками рекомендується використати нормований коефіцієнт активності mesh-станцій  $\beta_i / \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{m_j} x_{i,j}^k$ , тоді умова балансування матиме вигляд:

$$\sum_{i=1}^N d_{z,i} \frac{\beta_i}{\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{m_j} x_{i,j}^k} \sum_{j=1}^{m_j} x_{i,j}^k \leq \delta \quad (\text{для кожної } (z,k)\text{-пари, } z = \overline{1, Z}, k = \overline{1, K}). \quad (13)$$

Розрахунок шуканих змінних і параметра  $\delta$  відповідно до умов, формалізованих нерівностями (8)-(13), доцільно здійснити в ході рішення оптимізаційного завдання, забезпечуючи мінімум або максимум попередньо вибраного критерію якості рішення задачі структурної самоорганізації. До основних вимог критерію оптимальності варто віднести, з одного боку, відповідність фізики вирішуваної задачі, тобто завдання розподілу каналів в mesh-мережі, а з іншою, можливості отримання на його основі рішень (результатів), що практично реалізуються. Таким чином, постановка самого завдання не має бути надмірно ускладнена, а для її вирішення має бути відомий або розроблений ефективний метод. У зв'язку з тим, що кількість станцій в mesh-мережах значно переважає над числом каналів, що не перекриваються, і існує необхідність рішення таких проблем як інтерференція і ефект "прихованої" станції, в якості подібного критерію був вибраний мінімум числа працюючих mesh- станцій в створюваних доменах колізій, що, як відомо, сприяє підвищенню загальною продуктивності багатоканальної mesh-мережі.

Тоді у рамках запропонованої математичної моделі завдання структурної самоорганізації з точки зору розподілу каналів в mesh-мережі набуває вигляду оптимізаційної, в ході рішення якої необхідно забезпечити виконання критерію  $\min_{x, \delta} \delta$  при виконанні умов-обмежень (10)-(13).

Сформульоване завдання з точки зору фізики процесів, що протікають у багатоканальних mesh-мережах, відноситься до класу завдань балансування мережевих ресурсів – зваженого числа mesh-станцій в доменах колізій відносно них територіальної віддаленості і активності, а з математичної точки зору – це завдання змішаного цілочисельного нелінійного програмування – MINLP (Mixed-Integer NonLinear Programming).

У моделі шукані змінні  $x_{i,j}^k$  (9) є булевими, змінна  $\delta$ , що мінімізується, являється або цілочисельною або дійсною, а обмеження на шукані змінні носять як лінійний, так і нелінійний характер.

**Висновок.** Таким чином, для розширення зони покриття запропонована концепція коміркової мережі, в основі якої лежить самоорганізована безпроводова мережа та запропонована математична модель структурної самоорганізації mesh-мережі стандарту IEEE 802.11 в системах моніторингу кризових ситуацій, що реалізує наступні можливості: створення зон суцільного інформаційного покриття великої площі; масштабованість мережі (збільшення площі зони покриття і щільності інформаційного забезпечення) у режимі самоорганізації; використання безпроводових транспортних каналів (backhaul) для зв'язку точок доступу в режимі "кожен з кожним"; стійкість мережі до втрати окремих елементів.

### **Література**

1. Гордеев Э. Н. Использование современных технологий в системах управления сетями / Э. Н. Гордеев // Электросвязь.– 2005.– № 5.– С. 12-17.
2. Нетес В. А. Управление сетями: стандарты, проблемы и перспективы / В. А. Нетес, Н. В. Трубникова // Вестник связи. – 2000. – № 2. – С. 83-88.
3. Дымарский Я. С. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи / Я. С. Дымарский, Н. П. Крутякова, Г. Г. Яновский. – Москва : ИТЦ «Мобильные коммуникации», 2003. – 384 с.
4. Архипова Н. А. Управление в чрезвычайных ситуациях / Н. А. Архипова, В. В. Кульба] / – М.: Российский государственный гуманитарный университет, 2008. – 474 с.
5. Гриняев С. Если пришла беда... Как восстановить функционирование информационной системы в чрезвычайных ситуациях? / С. Гриняев // Мир связи и информации Connect . – 2003. – № 6. – С. 120-123.
6. Ryjov A. Development of an Intelligent System for Monitoring and Evaluation of Peaceful Nuclear Activities (DISNA) / A. Ryjov, A. Belenki, R. Hooper, V. Pouchkarev, A. Fattah, L. A. Zadeh // IAEA, STR -310. – Vienna , 1998.
7. Смирнов А. А. Анализ и сравнительное исследование перспективных направлений развития цифровых и телекоммуникационных систем и сетей. / А. А. Смирнов, В. В. Босько, Е. В. Мелешко // Системи обробки інформації. – 2008. – Вип. 7(74). – С. 120-123.
8. Стеклов В. К. Сучасні системи управління в телекомунікаціях / В. К. Стеклов, Б. Я. Костік, Л. Н. Беркман; за заг. ред. В. К. Стеклова. – Київ : Техніка, 2005. – 400 с.
9. Віноградов М. А. Концепція управління корпоративною комп'ютерною мережею на основі психофізіологічних механізмів професійної діяльності людини / М. А. Віноградов, А. С. Савченко // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2013. – №3(27). – С. 5-14.
10. Баховський П. Ф. Особливості процесу управління телекомунікаційними мережами в умовах надзвичайних ситуацій / П. Ф. Баховський // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2008. – №4(6). – С.3-7.
11. О радиационном мониторинге в цивилизованных странах [Электронный ресурс] // – Режим доступа : <http://www.geiger.su>.
12. Global Information Infrastructure, Internet protocol aspects and next-generation networks // ITU-T Recommendation Y. – 2008.
13. Global Information Infrastructure terminology: Terms and definitions // ITU-T Recommendation Y 101. – 2008.
14. Walteneus Dargie. Fundamentals of Wireless Sensor Networks Theory and Practice / Walteneus Dargie, Christian Poelabauer // Wiley Series on Wireless Communications and Mobile Computing. – John Wiley & Sons Ltd, 2010. – 311 p.

Дата надходження в редакцію: 06.08.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Л. Н. Беркман