

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-56-46>

УДК 621.396

Селепина Йосип Романович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-2421-1844>

Бондаренко Олександр Олександрович, студент

<https://orcid.org/0000-0001-9456-6715>

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

## ІНТЕГРАЦІЯ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ НА БАЗІ WI-BAS В ГІБРИДНИХ МЕРЕЖАХ

**Селепина Й.Р., Бондаренко О.О. Інтеграція систем зв'язку на базі Wi-Bas в гібридних мережах.** В роботі проведено аналіз технології Wi-BAS як ключового елемента в гетерогенних безпроводових мережах. Висвітлено основні переваги Wi-BAS, зокрема можливість забезпечення широкопasmового доступу на великих відстанях, що є важливим для віддалених і сільських районів, де використання традиційної інфраструктури малоефективне. Особлива увага приділена інтеграції Wi-BAS з сучасними мобільними технологіями, такими як LTE та 5G, що забезпечує гнучкість і масштабованість мережі. Розглянуто механізми керування частотним спектром і процедури спектрального моніторингу для підвищення ефективності та мінімізації перешкод у роботі безпроводових мереж. Запропоновано алгоритм спектрального сенсінгу для забезпечення стабільності роботи мережі в умовах зростаючого навантаження.

**Ключові слова:** гетерогенні мережі, безпроводовий зв'язок, управління, частотний спектр.

**Selepyna Y., Bondarenko O. Integration of communication systems based on Wi-Bas in hybrid networks.** The article analyzes Wi-BAS technology as a key element in heterogeneous wireless networks. The main advantages of Wi-BAS are highlighted, particularly the ability to provide broadband access over long distances, which is crucial for remote and rural areas where traditional infrastructure is inefficient. Special attention is given to the integration of Wi-BAS with modern mobile technologies such as LTE and 5G, which ensures network flexibility and scalability. Mechanisms for frequency spectrum management and spectral monitoring procedures are also discussed to improve efficiency and minimize interference in wireless network operations. The authors propose a spectrum sensing algorithm to ensure network stability under increasing load conditions.

**Keywords:** heterogeneous networks, wireless communication, management, frequency spectrum.

**Постановка наукової проблеми.** У сучасному світі бездротові технології відіграють ключову роль у розвитку інформаційного суспільства, забезпечуючи швидкий і надійний зв'язок у будь-якій точці планети. Зростаюча потреба в мобільності, збільшення кількості підключених пристроїв, зростання обсягу переданих даних та вимоги до якості обслуговування (QoS) стимулюють розвиток нових технологій і рішень у сфері телекомунікацій. Однією з таких технологій є WiBAS (WiMAX Broadband Access Systems), яка забезпечує широкопasmовий бездротовий доступ до Інтернету на великих відстанях. Проте, у світі, де інфраструктура зв'язку складається з різноманітних технологій, що виконують різні завдання, важливим стає питання інтеграції WiBAS з іншими бездротовими технологіями. Завдяки своїм характеристикам WiBAS може заповнити прогалини в забезпеченні послуг, які є недоступними або економічно недоцільними при використанні традиційних технологій мобільного зв'язку 3G/4G, або з використанням дротової інфраструктури, що часто є високовартісною та технічно і технологічно складною в реалізації у сільських віддалених районах, районах з гірським рельєфом, тощо.

Інтеграція різних бездротових технологій дозволяє створювати гібридні мережі, які поєднують переваги кожної з них і таким чином забезпечують користувачам надійний і безшовний зв'язок, незалежно від їхнього місцезнаходження та умов використання.

Іншим питанням є інтеграція WiBAS з новими високопродуктивними технологіями мобільного зв'язку, зокрема LTE та 5G, оскільки це дозволяє значно підвищити гнучкість і масштабованість мережі. Наприклад, у міських умовах, де є щільна забудова та висока концентрація користувачів, LTE та 5G можуть забезпечити високу швидкість і мінімальні затримки для мобільних пристроїв. У той же час, WiBAS може бути використаний для забезпечення зв'язку на більших відстанях або в умовах, де традиційні мобільні мережі виявляються малоефективними.

**Аналіз досліджень.** Гетерогенні мережі, які поєднують різні технології доступу, такі як LTE, 5G, Wi-Fi та WiMAX, є важливою складовою сучасної телекомунікаційної інфраструктури. Широкий спектр досліджень і розробок в цьому напрямку визначають, що однією з основних проблем у створенні гетерогенних мереж є інтероперабельність між різними стандартами зв'язку та протоколами. Кожен з елементів гетерогенних мереж потребує складних механізмів керування трафіком для забезпечення безперебійної взаємодії з іншими складовими мережі. Дослідження показують, що інтеграція Wi-BAS із мобільними мережами забезпечує зменшення затримок і підвищення якості обслуговування (QoS) завдяки інтелектуальному управлінню трафіком і

частотним ресурсом. З цієї точки зору, нова технологія Wi-BAS (WiMAX Broadband Access System) демонструє значний потенціал для розширення можливостей традиційних мереж зв'язку, особливо в умовах гетерогенних мереж [1-3].

Однією з ключових переваг Wi-BAS є можливість забезпечення широкосмугового доступу на великих відстанях, до 50 км від базової станції та підтримує різні топології мереж, включаючи точка-точка (point-to-point) і точка-багатоточок (point-to-multipoint). Це робить технологію ідеальною для покриття сільських та віддалених районів, де інші види зв'язку можуть бути недоступними або занадто дорогими. Wi-BAS може підтримувати швидкість передачі даних до 70 Мбіт/с та забезпечує високу якість обслуговування за рахунок пріоритетизації трафіку та управління ресурсами мережі, що дозволяє використовувати її для підтримки високоякісних мультимедійних сервісів, таких як відеоконференції, VoIP, та стрімінг відео в режимі реального часу, що є важливим для бізнесу та критично важливих додатків. Wi-BAS працює в діапазоні частот від 2 до 66 ГГц, що дозволяє гнучко підходити до планування мережі і враховувати місцеві особливості частотного планування, а також уникати завад від інших бездротових систем. Завдяки використанню технологій модуляції та корекції помилок, Wi-BAS демонструє високу стійкість до перешкод, що забезпечує надійний зв'язок навіть у складних умовах. Проте для повноцінної інтеграції з іншими технологіями необхідно вирішити низку проблем, пов'язаних із сумісністю протоколів, управлінням QoS та оптимізацією трафіку [4].

**Мета роботи.** Метою дослідження є аналіз вимог та проблем створення гетерогенних мереж з використанням технології Wi-BAS, як оптимального рішення для розширення можливостей традиційних мереж зв'язку.

#### **Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.**

Зважаючи на рівень сьгоднішніх вимог споживачів до операторів мереж зв'язку, для підтримання рівня конкурентоспроможності, очікуваний перехід до ери LTE повинен завершитись в найближчі роки, проте більшість операторів мобільного зв'язку планують підтримувати свою існуючу інфраструктуру GSM/UMTS ще досить довго. Інтеграція різних бездротових технологій у єдину гібридну мережу може значно збільшити витрати на розгортання, налаштування та обслуговування. Це включає вартість обладнання, ліцензії на використання частотного спектру, а також витрати на навчання персоналу і технічну підтримку. Саме тому зараз на користувачській ділянці домінує плоска операторська мережа Ethernet із підтримкою застарілого трафіку для забезпечення зворотної сумісності. Прогнозується, що на шляху еволюції мобільних мереж до 4G оптимальним є домінування мікро- та піко-стіленьків [5]. Досвід показує, що малі стільники можуть ефективно підтримувати підвищену ємність мережі, знизити затримки і покращити якість обслуговування в умовах високої щільності користувачів. Використання малих стільників дозволяє операторам мобільного зв'язку розширити покриття та підвищити пропускну здатність без необхідності значного збільшення потужності передавачів або побудови нових макростільників. Завдяки цьому технологія малих стільників стала ключовим елементом у побудові гетерогенних мереж, де різні типи базових станцій працюють разом для забезпечення безперебійного з'єднання та високошвидкісної передачі даних.

Пошук рішень для реалізації зворотного зв'язку малих стільникових зв'язків, виявив переваги технології Wi-BAS, що може забезпечити з'єднання «останньої милі», виконуючи інтенсивне агрегування трафіку [1]. У міських районах, де щільність абонентів мобільного зв'язку дуже висока, з'єднання «останньої милі» можна оптимально встановити за допомогою транзитного зв'язку Wi-BAS (рис. 1). Аналіз функцій Wi-BAS показує, що технологія здатна забезпечити необхідний нам «безшовний» перехід завдяки наступним можливостям:

- агрегація трафіку LTE з кількох районів у містах;
- пріоритизація бездротового трафіку на основі VLAN/біт пріоритету/DSCP із вісьмома класами пріоритету для наскрізного QoS;
- обмін будь-якою сигнальною інформацією (інтерфейси 3GPP R.10x2) між підключеними стільниками LTE;
- низька наскрізна затримка та висока конфіденційність даних користувача відповідно до строгих вимог LTE;
- Підтримка застарілого трафіку (E1, TDM/ATM) для переходу зі змішаних сайтів RAN на LTE.
- Підтримка синхронного Ethernet.

Вказані можливості додатково можна розширити за допомогою технології транзитного зв'язку E-Band PtP (60 ГГц). Ці технології мають подібні характеристики продуктивності та обидві дуже привабливі з точки зору техніко-економічних перспектив.

Типова система (рис. 1) складається з базової станції, яка обслуговує кілька розкиданих термінальних станцій. Базова станція збирає й обробляє застарілий TDM/ATM і пакетований трафік з усіх обслуговуваних ліній і пересилає його до базової мережі, завжди зберігаючи наскрізну якість обслуговування [1]. Wi-BAS комірka фізично поділена на сектори (зазвичай два або чотири) та обслуговується радіосистемою базової станції (BRS), зовнішньою частиною BS. BRS контролює радіозв'язок між BS і розподіленими термінальними станціями TS і зв'язується із зовнішньою частиною BS. Внутрішня частина BS агрегує трафік від усіх TS і надає мережеві інтерфейси магістралі. MSAD (Multi-Service Access Device), внутрішня частина TS, забезпечує інтерфейс користувача. Усі Wi-BAS елементи мережі для будь-якої кількості систем можна налаштовувати, контролювати та контролювати дистанційно за допомогою розширеної системи керування мережею.

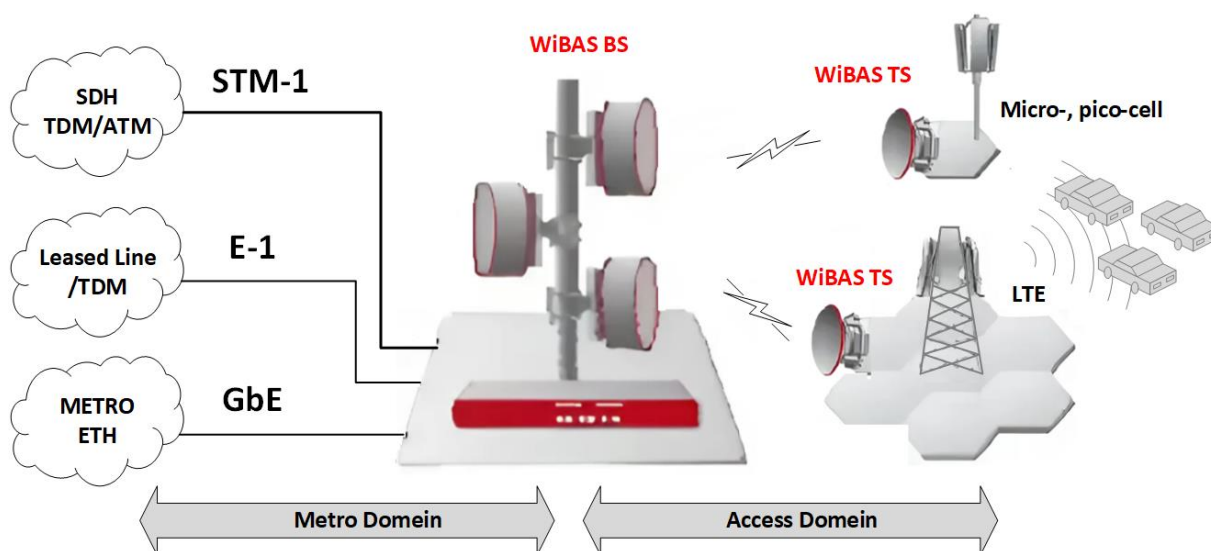


Рис.1. Схема застосування транспортного зв'язку Wi-BAS

Такий економічно-розумний підхід до мережевого планування крім того може подолати обмеження пов'язане з необхідністю прямої видимості між передавачем і приймачем, зокрема властиве для міліметрової хвилі у 5G бездротових мережах, сигнал в яких може інтенсивно відбиватися або поглинатися перешкодами, що призводить до втрат і зниження якості зв'язку.

Детальні параметри системи наведені в таблиці 1.

Табл. 1. Параметри базової станції BS та абонентської станції SS Wi-BAS

Параметри базової станції BS		Параметри абонентської станції SS	
Максимальна кількість вузлів	100	Підсилення антени (дБі)	-1
Максимальна щільність потужності (дБм/підканал)	-60	Максимальна передача потужності (Вт)	0,5
Ranging Back off Start	2	Модуляція та кодування	64 QAM
Ranging Back off End	4	Розмір буфера	64 Кб
Профіль PHY	Wireless OFDM 20 МГц	Профіль PHY	Wireless OFDMA 20 МГц
Тип профілю PHY	OFDM	Тип профілю PHY	OFDM

Вибравши WiBAS (PtMP) як основну технологію транспортного зв'язку для малих стільників, увесь макрорегіон може покриватися єдиною базовою станцією, стратегічно розміщеною в точці агрегації. У реальних мережах очікуваний діапазон малих комірок становить від 100 м до 300 м, що, з точки зору планування радіозв'язку, забезпечує певну гнучкість щодо вибору доступного місця розміщення базової станції. Перевагами чотирисекторної системи точка-

багато точок є висока масштабованість (кілька малих комірок на базову станцію), висока надійність (захист на базовій станції), зменшення витрат на експлуатацію та обслуговування. При умові необхідності розширення системи кожен новий термінал для обслуговування мікро-стільника, можна розгорнути без відвідування базової станції.

Так само Wi-BAS розширює охоплення інших широкосмугових технологій, таких як Wi-Fi, WiMAX і xDSL. Система легко інтегрується з існуючою мережевою інфраструктурою та може бути використана для одночасного надання послуг широкосмугового доступу зокрема великим бізнес-клієнтам.

Проте, при розгортанні та гібридних бездротових мереж, зокрема з використанням Wi-BAS як останньої ланки передачі інформації до споживача виникають деякі складності. Оскільки, різні бездротові технології використовують різні частотні діапазони, протоколи зв'язку, методи модуляції і стандарти якості обслуговування (QoS), то це ускладнює інтеграцію різних компонентів у єдину мережу. Забезпечення взаємодії між цими технологіями вимагає спеціальних рішень, таких як шлюзи, конвертери протоколів або адаптивні маршрутизатори.

У зв'язку зі зростанням насиченості радіопростору сигналами різноманітних комплексів і пристроїв передавання інформації, особливо гостро стоїть проблема забезпечення електромагнітної сумісності та перешкодостійкості системи зв'язку [6]. Очевидно, що кожна бездротова технологія використовує певний частотний діапазон, який може перекриватися з іншими технологіями. Це призводить до ризику взаємних перешкод і зниження ефективності роботи мережі. Саме тому, управління частотним спектром стає критично важливим завданням, яке потребує ретельного планування і динамічного розподілу частот.

Управління частотним спектром в мережах Wi-BAS включає в себе кілька важливих процесів та методів, спрямованих на оптимізацію використання частотного спектру для запобігання перешкодам, підвищення продуктивності та забезпечення сумісності з іншими бездротовими системами [7]. Зокрема:

- Wi-BAS працює в широкому діапазоні частот від 2 до 66 ГГц, що включає як ліцензовані, так і неліцензовані діапазони. Використання ліцензованих частот забезпечує захист від перешкод з боку інших користувачів, але вимагає отримання ліцензій від регуляторних органів. Неліцензовані діапазони можуть бути більш доступними, але вони також використовуються іншими технологіями, що збільшує ймовірність взаємних перешкод.

- Wi-BAS підтримує динамічний розподіл частот, що дозволяє адаптувати використання спектру в реальному часі залежно від умов навантаження і стану навколишнього середовища. Система може автоматично перемикатися на менш навантажені частоти або змінювати ширину каналу (наприклад, 3,5 МГц, 7 МГц або 14 МГц) для підвищення пропускної здатності, таким чином допомагає уникати частотних конфліктів і оптимізувати використання доступного спектру.

- Для мінімізації перешкод між різними базовими станціями або іншими бездротовими системами, що працюють в тих же або сусідніх частотних діапазонах, Wi-BAS використовує різні методи управління інтерференцією. Це може включати використання розширених методів модуляції, таких як OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), а також динамічне регулювання потужності передавачів, щоб знизити вплив перешкод на інші пристрої.

Для забезпечення цих функцій в системі постійно здійснюється моніторинг спектру для постійного відстеження стану частотного діапазону [7-8]. На сьогодні активно розвивається ряд паралельних технологій спектрального моніторингу, пристосованих до систем різного рівня складності. Сюди входить і використання сучасних спектральних аналізаторів, систем моніторингу на основі програмно-конфігурованих радіо (SDR - Software-Defined Radio), або централізованих систем управління спектром, що дозволяють здійснювати аналіз частотного спектру в реальному часі. Таким чином виконується ряд завдань, від ідентифікації джерел перешкод і перевірки відповідності частотних діапазонів, до виявлення перевантажених частотних діапазонів і прийняття рішень щодо оптимізації використання спектру, а також забезпечення глобального огляду стану частотного спектру в межах всієї мережі.

Технічне забезпечення, при цьому, може бути інтегрованим в базові станції або розміщене окремо для постійного моніторингу радіочастотного середовища, включаючи мобільні платформи моніторингу.

Хоча Wi-BAS системи не є когнітивними радіомережами в повному сенсі, вони інтегрують кілька сучасних методів моніторингу спектру, включаючи централізоване управління спектром, динамічний доступ до спектру, спектральний сенсинг і використання спектральних аналізаторів.

Спектральний сенсинг, при цьому, як процес виявлення наявності або відсутності сигналів у певному частотному діапазоні, є ключовим компонентом когнітивних радіомереж і системи управління спектром. Для реалізації процедури спектрального сенсингу розроблено алгоритм (рис. 2), що включає реалізацію функціональних кроків, кожен з яких відіграє важливу роль у точному і надійному визначенні стану спектру.

Алгоритм спектрального сенсингу складається з кількох кроків, які забезпечують ефективне виявлення сигналів у певному частотному діапазоні. Основними завданнями цього процесу є точне і надійне визначення стану спектра для оптимізації використання частотних ресурсів і мінімізації взаємних перешкод у безпроводових мережах. Залежно від умов та вимог, алгоритм може бути налаштований на використання різних методів виявлення сигналів, що дозволяє адаптуватися до специфічних сценаріїв використання. Ця технологія є важливою для когнітивних радіомереж, де пристрої можуть автоматично перемикатися на менш завантажені частоти для мінімізації перешкод.



Рис.2. Алгоритм реалізації процедури спектрального сенсингу

Хоча переваги впровадження систем моніторингу спектру очевидні, залишається низка проблем, що наразі не мають єдиного рішення. Зокрема, моніторинг великих ділянок радіочастотного спектру вимагає спеціального обладнання, яке може бути громіздким і дорогим. З'являються рішення використання БПЛА для здійснення ефективного моніторингу великих територій, що вимагає стратегічного розгортання радіодавачів і створення оптимізованих траєкторій польоту [8]. Останні дослідження спрямовані на розв'язання проблеми проектування траєкторії БПЛА за допомогою штучного інтелекту, однак стандартний дизайн траєкторії та підхід до оптимізації для роїв БПЛА для спільного моніторингу спектру відсутні.

Наступним питанням є врахування обмежень на максимальну затримку, яка допускається при отриманні та аналізі інформаційних даних, з метою зменшення похибок при регулюванні в режимі реального часу. Вирішення цієї проблеми вимагає розробки інноваційних алгоритмів штучного інтелекту та передових технологій обробки сигналів. Крім того, збереження конфіденційності

накладає додаткові обмеження на типи даних, доступних пристроям збору інформації, ускладнюючи отримання інформації з бездротових мереж. Це підкреслює необхідність розробки нових, високонадійних алгоритмів, призначених для отримання конкретних аналітичних даних із неконфіденційних наборів даних, сприяючи вдосконаленню технології моніторингу спектру для узгодженню роботи та оптимізації гетерогенних безпроводових мереж.

**Висновки.** Виконано аналіз умов інтеграції технології Wi-BAS як проміжної ланки в гетерогенних безпроводових мережах, що пропонує надійне, високоефективне та комплексне рішення для надання послуг доступу віддаленим користувачам і створення нових джерел доходу для операторів. Показано можливості системи для бездоганної інтеграції з існуючими операторськими мережами завдяки когнітивним функціям керування доступним радіоресурсом, які здатні самостійно виявляти зміни у спектрі, адаптуватися до них, навчатися на основі попереднього досвіду та забезпечувати ефективне використання спектру з мінімальними перешкодами для інших користувачів. Показано, що для забезпечення оптимальної сумісності необхідно впроваджувати ефективні технології та алгоритми спектрального моніторингу. Запропоновано алгоритм реалізації процедури спектрального сенсингу для контролю за частотним діапазоном, що є критичним для підтримки надійності та ефективності безпроводових мереж. Використання цих технологій дозволяє оптимізувати розподіл спектру, виявляти і усувати перешкоди, а також забезпечувати стабільну роботу мережі в умовах постійно зростаючого навантаження на радіочастотний ресурс. Незважаючи на значні переваги, які можуть бути досягнуті завдяки гібридним безпроводовим мережам, їх створення і підтримка вимагають ретельного планування, технологічної компетентності та значних ресурсів. Подолання цих викликів є ключовим завданням для забезпечення стабільної та ефективної роботи таких мереж у різних умовах експлуатації.

#### Список бібліографічного опису

1. WiBAS-C System. Опис системи. Вид. 3 англ. Intracom S.A. Telecom solutions, Пеанія, Афіни, 2012. 121 с.
2. Бешлей Г., Шкоропад Ю., Бешлей М., Климаш М. Конвергенція гетерогенних безпроводових мереж для майбутніх комунікацій: архітектура, QoS та управління ресурсами. Інформаційні та комунікаційні технології, електронна інженерія. Т. 2, № 2. 2022. С. 20-32. DOI: <https://doi.org/10.23939/ictee2022.02.020>
3. Атасро А., Адегоке Е., Алатіше А., Ор'я М. Гетерогенні безпроводові мережі: огляд архітектур взаємодії. Міжнародний журнал інженерії та технологій. Т. 2. 2012. С. 220-232.
4. Лян Г., Ю Х. Алгоритм вибору мережі для гетерогенних безпроводових мереж на основі характеристик послуг і переваг користувачів. Wireless Com Network, Т. 241. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13638-018-1264-5>
5. Аль-Хававрех М.С., Зрейкат А.І. Аналіз продуктивності мережі WIMAX у різних моделях розповсюдження. Міжнародний журнал комп'ютерних наук і інформаційної безпеки (IJCSIS), Т. 15, № 1, січень 2017.
6. Ума М., Ганапаті П. Ефективний моніторинг трафіку для безпроводових мереж. Міжнародний журнал комп'ютерних додатків 53(9). 2012. С. 51-59. DOI: <https://doi.org/10.5120/8453-2255>
7. На Ся, Ван Конг, Пінг Хуайчжень, Чжао Чжунцю, Чень Юцін, Ван Пейпей, Ду Хуачжень, Дін Шен, Ю Йонгтан. Оптимізаційні алгоритми в мережах безпроводового моніторингу: огляд. Neurocomputing, Т. 489. 2022. С. 584-598. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.12.072>
8. Тесті Е., Джорджетті А. Аналітика безпроводових мереж для нової ери патрулювання і моніторингу спектра. IEEE Wireless Communications, 99. 2024. С. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWC.012.2300374>

#### References

1. WiBAS-C System. System description. Ed 3 en. Intracom S.A. Telecom solutions, Peania, Athens, 2012. 121p.
2. Beshley H., Shkoropad Y., Beshley M., Klymash M. Convergence of heterogeneous wireless networks for future communications: architecture, QoS and resource management. Information and communication technologies, electronic engineering. Vol. 2, No. 2. 2022. pp. 20-32. DOI: <https://doi.org/10.23939/ictee2022.02.020>
3. Atayero A., Adegoke E., Alatishe A., Orya M. Heterogeneous Wireless Networks: A Survey of Interworking Architectures. International Journal of Engineering and Technology. Volume 2. 2012. pp. 220-232.
4. Liang G., Yu H. Network selection algorithm for heterogeneous wireless networks based on service characteristics and user preferences. Wireless Com Network, Vol. 241. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13638-018-1264-5>
5. AL-Hawawreh M.S., Zreikat A.I. Performance Analysis of a WIMAX Network in Different Propagation Models. International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS), Vol. 15, No. 1, January 2017.
6. Uma M., Ganapathi P. An Efficient Network Traffic Monitoring for Wireless Networks. International Journal of Computer Applications 53(9). 2012. pp. 51-59. DOI: <https://doi.org/10.5120/8453-2255>
7. Na Xia, Cong Wang, Huaizhen Peng, Zhongqiu Zhao, Yuqing Chen, Peipei Wang, Huazheng Du, Sheng Ding, Yongtang Yu. Optimization algorithms in wireless monitoring networks: A survey. Neurocomputing, Volume 489. 2022. pp. 584-598. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.12.072>
8. Testi E., Giorgetti A. Wireless Network Analytics for the New Era of Spectrum Patrolling and Monitoring. IEEE Wireless Communications, 99. 2024. pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWC.012.2300374>