

УДК 004.9:658

DOI: <https://doi.org/10.53920/ITS-2023-1-3>

Андрій Вікторович ЛЕМЕШКО,

доктор філософії з комп'ютерної інженерії, доцент,
Державний університет телекомунікацій
ORCID ID: 0000-0001-8003-3168

Артем Васильович АНТОНЕНКО,

кандидат технічних наук, доцент,
Державний університет телекомунікацій
ORCID ID: 0000-0001-9397-1209

Дмитро Ігорович КОСТЕЦЬКИЙ,

магістр,
Державний університет телекомунікацій
ORCID ID: 0009-0007-2821-7876

Максим Миколайович ШРАМ,

магістр,
Державний університет телекомунікацій
ORCID ID: 0009-0007-0640-1349

Антон Сергійович ЗАКРЕНИЧНИЙ,

магістр,
Державний університет телекомунікацій
ORCID ID: 0009-0006-3838-3539

МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖ У СЕРЕДОВИЩІ OMNET++ З ВИКОРИСТАННЯМ INET FRAMEWORK

Стаття присвячена опису методів моделювання безпроводових мереж у середовищі OMNeT++ з використанням INET Framework. У статті розглядаються основні поняття, пов'язані з моделюванням безпроводових мереж, а також описано основні вимоги до моделей безпроводових мереж. Далі, у статті розглядається середовище моделювання OMNeT++, його основні характеристики та переваги в порівнянні з іншими середовищами моделювання. Стаття розглядає основні складові моделей безпроводових мереж, такі як моделі мережевого рівня, моделі фізичного рівня, а також моделі радіоканалу. Для кожної з цих складових статті розглядаються методи моделювання та описуються можливі нюанси, пов'язані з вибором різних параметрів моделювання. У статті пропонується

детальний опис структури моделі безпроводової мережі на прикладі мережі стандарту IEEE 802.11. У цій частині статті розглядаються такі поняття, як вузол, точка доступу, а також різні типи пакетів, що передаються в мережі. Також у статті розглядаються методи моделювання різних типів мережевих протоколів, наприклад, протоколу MAC, протоколу рівня мережі та інших. У заключній частині статті розглядаються питання тестування моделей безпроводових мереж та їх аналізу. Описується методика тестування та порівняння різних моделей, а також розглядається питання аналізу результатів моделювання та їх інтерпретації. У цілому, стаття пропонує детальний опис методів моделювання безпроводових мереж у середовищі OMNeT++ з використанням INET Framework. Розглянуто один із можливих підходів до проєктування та дослідження безпроводових мереж у середовищі імітаційного моделювання OMNeT++ з використанням фреймворку INET. Показано процес моделювання як самих моделей, так і різних режимів їх роботи. Також розглянуто методологію аналізу роботи моделі на прикладі тимчасової діаграми. При розгляді підходу використано метод послідовного укладання модельованих безпроводових мереж з урахуванням особливостей режимів їх роботи. Показано простоту реалізації підходу, в якому для моделювання безпроводових мереж використовуються готові компоненти зі складу фреймворку INET. Наведено методику проєктування безпроводових мереж з використанням готових компонентів зі складу фреймворку INET. Продемонстровано можливість перевизначення вбудованих компонентів складеного модуля для створення моделі пристрою, що відповідає необхідним вимогам. Розглянуто можливі режими роботи безпроводових мереж при прямому взаємодії вузлів, і при непрямому через проміжні вузли. Продемонстровано підхід до моделювання фізичного рівня та явища інтерференції. Розглянуто підхід дослідження проблемної ситуації, що полягає у аналізі тимчасової діаграми. Практична значимість. Запропоноване середовище імітаційного моделювання дозволяє проводити дослідження проєктних рішень під час проєктування безпроводових мереж. Обґрунтовано доцільність застосування розроблених проєктів у проєктній діяльності.

Ключові слова: безпроводові мережі, комп'ютерні мережі, Wi-Fi, імітаційне моделювання, інтерференція, OMNeT++, INET, framework.

Andriy LEMESHKO

Doctor of philosophy in computer engineering,
Associate professor,
State University of Telecommunications

Artem ANTONENKO

Candidate of technical sciences, Associate professor,
State University of Telecommunications

Dmytro KOSTETSKYI

Master's student,
State University of Telecommunications

Maksym SHRAM

Master's student,
State University of Telecommunications

Anton ZAKRENYCHNYI

Master's student,
State University of Telecommunications

**MODELING OF WIRELESS NETWORKS
IN OMNET ++ ENVIRONMENT INVOLVING INET FRAMEWORK**

The article is devoted to the description of the methods of modeling wireless networks in the OMNeT++ environment using the INET Framework. The article discusses the main concepts related to the modeling of wireless networks, and also describes the main requirements for models of wireless networks. Next, the article examines the OMNeT++ simulation environment, its main characteristics and advantages compared to other simulation environments. The article considers the main components of wireless network models, such as network layer models, physical layer models, and radio channel models. For each of these components, the article considers modeling methods and describes possible nuances associated with the choice of various modeling parameters. The article offers a detailed description of the structure of the wireless network model using the IEEE 802.11 network as an example. This part of the article covers concepts such as a node, an access point, and the different types of packets transmitted on a network. The article also discusses methods of modeling various types of network protocols, for example, MAC protocol, network layer protocol, and others. The final part of the article deals with testing wireless network models and their analysis. The methodology of testing and comparing different models is described, as

well as the issue of analysis of modeling results and their interpretation is considered. In general, the article offers a detailed description of the methods of modeling wireless networks in the OMNeT++ environment using the INET Framework. One of the possible approaches to the design and research of wireless networks in the OMNeT++ simulation environment using the INET framework is considered. The process of modeling both the models themselves and their various modes of operation is shown. The methodology of analyzing the model's operation using the example of a time diagram is also considered. When considering the approach, the method of sequential laying of simulated wireless networks was used, taking into account the peculiarities of their operation modes. The ease of implementation of the approach is shown, in which ready-made components from the INET framework are used for modeling wireless networks. The method of designing wireless networks using ready-made components from the INET framework is presented. The possibility of redefining the built-in components of the assembled module to create a device model that meets the necessary requirements is demonstrated. Possible modes of operation of wireless networks with direct interaction of nodes, and with indirect interaction through intermediate nodes are considered. An approach to modeling the physical level and the phenomenon of interference is demonstrated. The approach of studying the problem situation, which consists in the analysis of the time diagram, is considered. Practical significance. The proposed environment of simulation modeling allows to conduct research of design solutions during the design of wireless networks. The expediency of using the developed projects in project activity is substantiated.

Keywords: wireless networks, computer networks, Wi-Fi, simulation modeling, interference, OMNeT ++, INET Framework.

Постановка проблеми. Проектування будь-якої сучасної інформаційної системи, що має складну структуру з широким набором протоколів, завжди починається з побудови та дослідження її імітаційної моделі [1]. Метою моделювання є визначення оптимальної топології, адекватний вибір мережного обладнання, визначення робочих характеристик мережі та можливий розвиток. Однією з переваг імітаційного моделювання є можливість проведення низки досліджень, що дозволяють визначити надійність системи та її стійкість у разі відмови обладнання [2, 3]. Проведення подібних досліджень на працюючій

мережі неможливо, тому що це може негативно позначитися на стабільності її роботи, до того ж при виході з ладу обладнання, що використовується, є ризик зазнати фінансових втрат. Точне моделювання досліджуваного устаткування дозволяє одержати такі самі результати роботи, як і при реальному використанні цього устаткування, при цьому дозволяє заощадити кошти з його купівлі.

На сьогоднішній день існує безліч засобів імітаційного моделювання, до яких застосовуються досить жорсткі вимоги, такі як: детальна реалізація протоколів усіх рівнів, можливість підключення власних модулів, можливість зміни параметрів імітаційної моделі, платформна незалежність, розвинений графічний інтерфейс, а також доступність продукту та його ціна. Одним з таких інструментів, що відповідає переліченим вимогам, є середовище імітаційного моделювання OMNeT++ [4], що має розвинений графічний інтерфейс як для побудови моделей, так і для аналізу отриманих результатів. Ще однією важливою перевагою є її доступність, при цьому функціонал середовища не поступається іншим платним засобам імітаційного моделювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний момент, однією з найбільш цікавих статей з цієї теми є «Design and implementation of wireless sensor network simulation using the OMNeT++ simulator» авторів A. Al-Gburi та S. Ngan. У цій статті автори розглядають питання проектування та реалізації безпроводових сенсорних мереж з використанням OMNeT++ та INET Framework. Дослідження проводилося шляхом створення моделі мережі, яка відображає реальну мережу, та її подальшої симуляції. Ще однією цікавою статтею на цю тему є «Comparative Analysis of Wireless Sensor Network Simulation Tools» авторів M. Shahbaz, S. Ullah та S. S. Khan. У цій статті проведено порівняльний аналіз інструментів моделювання мереж, зокрема OMNeT++, NS2, NS3, QualNet та OPNET. Дослідження було зосереджено на аналізі різних аспектів, таких як можливості моделювання мереж, продуктивність, точність результатів та можливості розширення. Крім того, в статті «OMNeT++ based Wireless Sensor Network Simulation» авторів P. Yadav та S. Singh описано використання OMNeT++ та INET Framework для моделювання безпроводових сенсорних мереж. У дослідженні автори зосередились на аналізі продуктивності та точності результатів моделювання.

Загалом, зазначені статті свідчать про великий інтерес до використання OMNeT++ та INET Framework для моделювання безпроводових мереж. Водночас, є певна кількість статей, які порівнюють різні інструменти моделювання, щоб визначити їх переваги та недоліки у порівнянні один з одним. Наприклад, у статті «Comparative study of simulation tools for wireless sensor network» авторів N. Kumar та M. Kumar проведено порівняльний аналіз різних інструментів моделювання, включаючи OMNeT++, NS2, NS3 та QualNet. Автори порівняли ці інструменти за кількома критеріями, такими як продуктивність, точність результатів та можливості розширення, та прийшли до висновку про переваги та недоліки кожного з них. Також, стаття «Performance evaluation of wireless sensor network protocols using OMNeT++ simulation» авторів S. Singh та P. Yadav присвячена оцінці продуктивності протоколів безпроводових сенсорних мереж з використанням OMNeT++ та INET Framework. У дослідженні було проведено порівняльний аналіз різних протоколів, а також вивчено вплив різних факторів на продуктивність мережі.

Одна з найбільш цікавих українських статей є «Моделювання та аналіз безпроводових мереж на основі стандарту IEEE 802.15.4 за допомогою платформи OMNeT++» авторів М. Кульчицької, Є. Макаренка та Ю. Хрусталева. У цій статті розглядається питання проектування та моделювання безпроводових мереж на основі стандарту IEEE 802.15.4 з використанням OMNeT++ та INET Framework. Автори провели дослідження різних параметрів мережі, таких як продуктивність та ефективність мережі, а також порівняли результати моделювання з експериментальними даними.

Окрім цього, стаття «Моделювання та дослідження безпроводових мереж на базі протоколу ZigBee з використанням платформи OMNeT++» авторів І. Гринь та Є. Дроздової присвячена моделюванню та дослідженню безпроводових мереж на базі протоколу ZigBee з використанням OMNeT++. У дослідженні автори вивчили вплив різних параметрів мережі на її продуктивність та ефективність.

Таким чином, можна сказати, що стаття про моделювання безпроводових мереж у середовищі OMNeT++ з використанням INET Framework є актуальною та важливою, оскільки ця тема є досить розгалуженою та вимагає подальших досліджень. Останні дослідження вказують на те, що OMNeT++ разом з INET Framework є потужним інструментом для моделювання та дослідження без-

проводових мереж, що дозволяє вивчати різноманітні аспекти продуктивності та ефективності мережі.

Метою статті є дослідження аналіз одного з можливих підходів до проектування та безпроводових мереж у середовищі імітаційного моделювання OMNeT++ з використанням фреймворку INET.

Предметом дослідження є процес моделювання безпроводових мереж, різні режими їх роботи та методологію аналізу роботи моделі.

Об'єктом статті є методи та інструменти, які можна використовувати для моделювання та дослідження безпроводових мереж.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо один із можливих підходів до проектування та аналізу безпроводових локальних мереж (Wireless Local Area Network — WLAN) з використанням середовища імітаційного моделювання OMNeT++. Поставлено завдання всебічного дослідження імітаційної моделі найпростішої мобільної WLAN шляхом її послідовного ускладнення для врахування особливостей різних режимів роботи безпроводової мережі. Як основу для розробки моделей пропонується використовувати типові компоненти фреймворку INET, зміна конфігурації яких дозволяє моделювати пристрої, що відповідають необхідним вимогам.

Об'єктом дослідження є WLAN, які повністю відповідають стандарту таких провідних мереж, як Ethernet [5], але використовують інше середовище передачі даних: інфрачервоне випромінювання або радіохвилі НВЧ-діапазону. Ці мережі можуть бути стаціонарними, мобільними та мобільно мандрівними. Стаціонарні вузли мережі жорстко прив'язані до певної точки простору. Мобільні допускають переміщення вузлів мережі в межах зони дії однієї точки доступу або одного сегмента мережі, а мобільні мандрівні допускають не тільки переміщення вузлів мережі, але забезпечують їх роумінг за рахунок автоматичного переключення від однієї точки доступу до іншої. За характером підключення WLAN можуть підтримувати два основні режими роботи:

- точка-точка (point-to-point), або режим Ad-Hoc [6, 7], при якому зв'язок між вузлами встановлюється безпосередньо без використання спеціальних точок доступу;
- точка-багатоточка (point-to-multipoint), або режим інфраструктури, при якому мережа складається як мінімум з однієї точки доступу, підключеної до проводової мережі та деякого набору безпроводових вузлів.

У цій статті основна увага приділена аналізу моделей мобільних Ad-Hoc мереж, що працюють як за прямої взаємодії вузлів, і при непрямій через проміжні вузли. Це дозволило дослідити роботу WLAN, що самоорганізуються, з динамічною маршрутизацією повідомлень до вузлів, що знаходяться поза зоною радіодоступу конкретного малопотужного трансівера вузла, використовуючи для цього проміжні вузли і істотно розширивши зону роботи конкретного сегменту WLAN [8, 9].

Для імітаційного моделювання такого роду мереж пропонується використовувати фреймворк INET, що входить у поставку OMNeT++. Він містить великий набір компонентів для моделювання як мережі в цілому, так і окремих її елементів, а саме: фізичного середовища та режимів розповсюдження сигналу в ній, різного типу антен, приймачів, передавачів та мережевих карток з можливістю обліку їх енергоспоживання [10].

Першим етапом на шляху вирішення поставленого завдання стала розробка технології процесу побудови та дослідження найпростішої WLAN, що складається всього з двох вузлів, пов'язаних між собою радіоканалом для передачі UDP-дейтаграм. Для проектування імітаційної моделі такої мережі достатньо використовувати лише три компоненти фреймворку INET, а саме:

- складовий модуль WirelessHost;
- складовий модуль IdealRadioMedium;
- простий модуль IPv4NetworkConfigurator.

Складовий модуль WirelessHost представляє собою модель хоста безпроводової мережі і є одним з розширень модуля StandartHost, у якому базуються й інші моделі хостів TCP/IP. Внутрішня структура цього модуля (рис. 1) складається з чотирьох рівнів: прикладного, транспортного, мережевого та каналного, представленого мережевим інтерфейсом.

Кожен із рівнів включає до свого складу набір зумовлених компонентів із складу фреймворку INET, тип яких може бути змінений через файл конфігурації. Зокрема прикладний рівень містить безрозмірний масив компонентів типу «додаток», кожен з яких моделює роботу додатка на моделі хоста. Даний модуль може генерувати вихідний трафік, передаючи його на розташовані нижче рівні, так і приймати вхідний трафік. Транспортний рівень включає до свого складу три компоненти, які моделюють протокол користувацьких датаграм (User Datagram Protocol – UDP),

протокол управління передачею (Transmission Control Protocol – TCP) та протокол передачі з керуванням потоком (Stream Control Transmission Protocol – SCTP). У складі мережного рівня є два компоненти: інтернет-протокол четвертої версії (Internet Protocol version 4 – IPv4) та інтернет-протокол шостої версії (Internet Protocol version 6). Канальний рівень містить компоненти, що реалізують мережеві інтерфейси, такі як дротовий Ethernet (Eth), безпроводовий (wlan), внутрішній петльовий інтерфейс (Loopback – lo) та ін. Кожен із рівнів з'єднуються між собою через загальні шини даних.

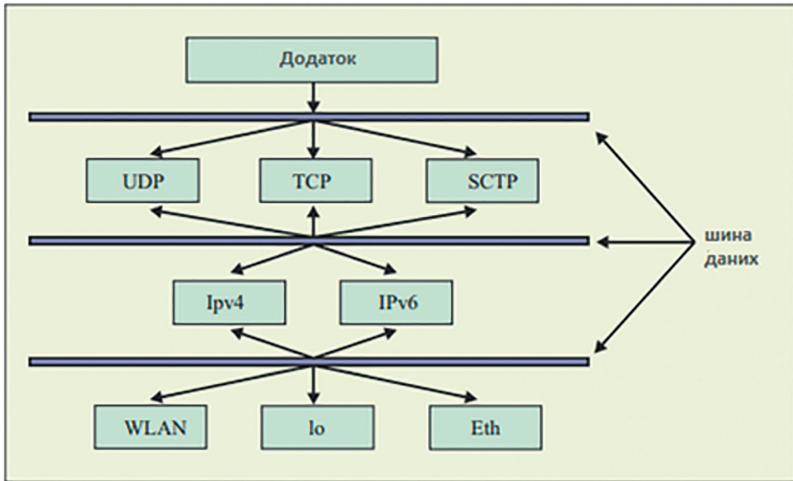


Рис. 1. Внутрішня структура хоста WirelessHost

Для імітації фізичного середовища, в якому відбувається безпроводовий зв'язок, використовується складовий модуль IdealRadioMedium. Він відповідає за моделювання поширення сигналу, його ослаблення по мірі видалення, облік завад та інших фізичних явищ. Модель фізичного середовища визначає, коли, де і як передача та сторонній шум надходять на приймачі. Модуль IdealRadioMedium має складну структуру і включає до свого складу інші зумовлені компоненти, що моделюють наступні фізичні явища та процеси:

- розповсюдження радіосигналу в просторі (propagation) – компонент описує, як радіосигнал поширюється через простір у часі;

- аналогове уявлення радіосигналу (`analogModel`) – моделює процес, як аналогове уявлення передач перетворюється на аналогове уявлення прийомів;
- фоновий шум (`backgroundNoise`) – представляє собою модель фонового шуму та описує тепловий шум, космічний фоновий шум та інші випадкові коливання електромагнітного поля, що впливають на якість каналу зв'язку;
- зменшення потужності від відстані (`pathLoss`) – описує зменшення потужності по мірі поширення сигналу через простір;
- зменшення радіосигналу при проходженні через завади (`obstacleLoss`) – являє собою модель втрат і описує зменшення потужності сигналу при його проходженні через завади та фізичні об'єкти.

У загальному випадку реалізовані в INET моделі фізичного середовища описують фізичний пристрій, який здатний передавати та приймати сигнали. До їх складу входять: модель антени, моделі приймача та передавача, а також модель споживання енергії. Модель антени розподіляється між моделлю передавача та моделлю приймача. Поділ моделі передавача та моделі приймача дозволяє використовувати асиметричні конфігурації.

Розглянемо модель взаємодії двох безпроводових вузлів за протоколом UDP. Підхід до побудови цієї моделі буде розглянуто на прикладі безпроводової мережі, що складається з двох вузлів, що взаємодіють один з одним за протоколом UDP. У даній моделі вузли будуть розташовуватися на відстані 400 м один від одного, при цьому радіус дії приймача кожного з вузлів дорівнюватиме 500 м. Використання в якості протокола передачі даних UDP означає, що вузли повинні функціонувати не тільки на транспортному рівні, але й на рівні користувацьких додатків. Фреймворк INET містить два типи модулів, які працюють за протоколом UDP:

- `UDPBasicApp` – модуль, що забезпечує генерацію UDP-пакетів заданої довжини на задану IP-адресу із заданим часовим інтервалом;
- `UDPSink` – модуль, що імітує програму, яка виконує прийом повідомлень, що надійшли з рівня UDP, підрахунок їх кількості та припинення їх подальшої обробки.

У досліджуваній моделі необхідно, щоб вузол `hostA` генерував UDP-повідомлення довжиною 1 КБ і передавав його вузол `hostB` через випадковий проміжок часу. Використовувана модель без-

проводового вузла WirelessHost зі складу фреймворку INET вже має модуль інтерфейсу програми, тому для реалізації поставленого завдання необхідно лише перевизначити тип модуля, що використовується, у файлі конфігурації, який може мати наступний вигляд:

```
*.hostB.numUdpApps = 1
*.hostB.udpApp[0].typename = "UDPSink"
*.hostB.udpApp[0].localPort = 5000
*.hostA.numUdpApps = 1
*.hostA.udpApp[0].typename = "UDPBasicApp"
*.hostA.udpApp[0].destAdresses = "hostB"
*.hostA.udpApp[0].destPort = 5000
*.hostA.udpApp[0].messageLength = 1000B
*.hostA.udpApp[0].sendInterval = exponential(10ms)
```

Ця настройка повідомляє, що на вузлі hostA використовується модуль UDPBasicApp, який формує UDP-повідомлення довжиною 1 КБ і відправляє їх через випадковий інтервал часу, який описується експоненціальним розподілом із середнім значенням 10 мс. Для того, щоб сформовані повідомлення доходили до адресата, у файлі конфігурації вказується найменування вузла, якому призначене повідомлення, а також номер порту, наприклад, 5000. Вузол hostB використовує модуль UDPSink і також працює на порту 5000.

Крім рівня додатку, файл конфігурації повинен містити визначення фізичного рівня, який представляється в моделі хоста WirelessHost як мережевий адаптер, до складу якого входить антена та радіотрансмівер. У середовищі INET існує велика різноманітність радіомодулів, що підтримують різні протоколи фізичного рівня, проте в даному прикладі використовуватиметься ідеалізована модель фізичного середовища, хости якого містять модуль IdealRadio як частину IdealWirelessNic. На підставі викладеного, конфігурація фізичного рівня матиме вигляд:

```
*.host*.wlan[*].typename = "IdealWirelessNic"
*.host*.wlan[*].radio.transmitter.CommunicationRange = 500m
*.host*.wlan[*].radio.receiver.ignoreInterference = true
* *.bitrate = 1Mbps
```

Після запуску створеної імітаційної моделі на виконання відкриється графічне вікно середовища виконання, де буде представлена вся мережа та модулі, що входять до її складу. Середовище дозволяє в будь-який момент відобразити внутрішню

структуру складеного модуля двічі клацнувши по його піктограмі. Треба звернути увагу, що структура модуля, що відобразилася, буде відрізнятися від тієї, що була представлена на рис. 1. Це пов'язано з тим, що після запуску моделі виконання середовище імітаційного моделювання обробила файл конфігурації та налаштувала параметри компонентів WirelessHost.

Кожен хост має лише по одному мережному адаптеру, але з двома мережевими інтерфейсами кожен. При цьому один із них є внутрішнім петлевим (lo), а другий є зовнішнім (wlan) і підключеним до бездротової мережі через внутрішній трансівер. Обидва вузли мають однакову структуру як на фізичному рівні, так і на каналному, мережевому і транспортному рівнях. Відмінність спостерігається лише на рівні додатків, а саме, у типі використаного додатка.

Запустивши модель на виконання, можна спостерігати, як програма UDPBasicApp, що працює на вузлі hostA, формує UDP-пакети з випадковою часовою шпаруватістю. Після чого ці пакети, пройшовши через рівні UDP і IPv4, надходять в мережевий інтерфейс wlan, який ставить пакети, що надійшли, в чергу і здійснює їх передачу, як тільки виникає така можливість. Використання стекової реалізації в мережевому інтерфейсі дозволяє узгодити швидкість надходження пакетів з верхнього рівня з пропускною здатністю каналу, а також швидкістю роботи середовища. Це означає, що поки в стіковій черзі є пакети, вони передаватимуться один за одним без пробілів між ними.

За результатами імітаційного моделювання видно, що UDP-додаток на вузлі hostA за 25 с сформував 2427 пакетів. При цьому 2426 пакетів було опрацьовано на транспортному рівні UDP. З них 2422 пакети було передано по радіоканалу і надійшло на вузол hostB. Тут вони пройшли через каналний, мережевий та транспортний рівні цього вузла і надійшли в UDP-додаток хоста hostB. Таким чином, лічильник кількості пакетів вказує, що за 25 с було прийнято 2422 пакети довжиною 1028 Б (1000 Б повідомлення + 8 Б UDP + 20 Б IP) кожен, а це означає, що швидкість передачі склала близько 800 кбіт/с.

Розглянемо модель статичної маршрутизації для взаємодії віддалених вузлів. Можливості застосування імітаційного середовища OMNet++ не обмежуються процесом проектування та дослідження лише простих моделей. Вона дозволяє також досліджувати складніші моделі та ситуації, такі як у роботі [11], де

на прикладі створеної імітаційної моделі проводової комп'ютерної мережі було проаналізовано ефективність використання резервування передач. Інший приклад, який буде розглянуто нижче, демонструє підхід до проектування та дослідження складнішої структури, але вже безпроводової мережі [12, 13]. Припустимо, що є необхідність забезпечення безпроводового зв'язку та передачі UDP-повідомлень від вузла hostA до вузла hostB з радіусом дії їх приймачів всього 250 м. При цьому відстань між цими вузлами становить 400 м, що виключає можливість їх прямої взаємодії. Додатково між вузлами розташовані ще три вузли hostR1, hostR2 та hostR3, які в процесі своєї роботи можуть надавати інтерференційні завади на роботу сусідніх вузлів. Особливість досліджуваної моделі полягає в тому, що приймачі мережних адаптерів, володіючи малою потужністю, обмежують радіус їхньої дії, що призводить до неможливості прямого зв'язку між двома вузлами. Однак з'єднання може бути встановлене, якщо між цими вузлами будуть розташовуватися інші вузли, які можуть транслювати та передавати мережні пакети. Для цього всі або частина проміжних вузлів мають підтримувати маршрутизацію.

Якщо до вихідної моделі (рис. 3) додати ще три вузли, обмежити потужність всіх приймачів до 250 м і запустити модель на виконання, то можна побачити, що вузол hostA відправляє UDP-пакети на сусідні вузли, проте останні не приймають їх, оскільки ці пакети їм не призначені. Для того, щоб сусідні вузли не відкидали отримані пакети, а передавали їх на інший вузол, необхідно, щоб на проміжних вузлах було налаштовано таблицю маршрутизації [14]. У цьому найпростішому випадку розглянуто приклад статичної маршрутизації, яка налаштовується через простий модуль IPv4NetworkConfiguration у файлі конфігурації, який має такий вигляд:

```
#Автоматичне налаштування статичних маршрутів
*.configurator.config = xml("<config>
<interface host='**' address='10.0.0.x' netmask='255.255.255.0' />
<autoroute metric='errorRate' />
</config>")
#Вимкнення оптимізації записів таблиці маршрутизації
*.configurator.optimizeRoutes = false
#Вимкнення записів таблиці маршрутизації, створених з мережевої маски
**.RoutingTable.netmaskRoutes = ""
```

Ця установка здійснюється за допомогою рядка XML, параметри якого повідомляють конфігуратору, щоб він призначав IP-адреси в діапазоні 10.0.0.x і використовував оцінну частоту помилок передач між вузлами мережі для налаштування статичних маршрутів. Таким чином, маршрути будуть формуватися так, щоб мінімізувати сумарні помилки, що призводить до створення правильно налаштованої IPv4 мережі без будь-яких додаткових ручних налаштувань. Сформовані таблиці маршрутизації зберігаються у параметрі routingTable кожного з хостів, яка доступна для перегляду у графічному середовищі виконання (рис. 2).

```

routes (std::vector<inet::IPv4Route *>)
├── routes[4] (inet::IPv4Route *)
│   ├── [0] = dest:10.0.0.2 gw:10.0.0.3 mask:255.255.255.255 metric:0 if:wlan0(10.0.0.1) REMOTE MANUAL
│   ├── [1] = dest:10.0.0.3 gw:* mask:255.255.255.255 metric:0 if:wlan0(10.0.0.1) DIRECT MANUAL
│   ├── [2] = dest:10.0.0.4 gw:* mask:255.255.255.255 metric:0 if:wlan0(10.0.0.1) DIRECT MANUAL
│   └── [3] = dest:10.0.0.5 gw:10.0.0.3 mask:255.255.255.255 metric:0 if:wlan0(10.0.0.1) REMOTE MANUAL

```

Рис. 2. Маршрутизація вузла hostA:

dest – адреса призначення, **gw** – шлюз; **mask** – маска підмережі; **metric** – метрика мережі, **REMOTE MANUAL** – віддалений доступ; **DIRECT MANUAL** – прямий доступ

З наведеної таблиці видно, що вузол hostA (10.0.0.1) має прямий інтерфейс зв'язку з вузлами hostR1 (10.0.0.3) та hostR2 (10.0.0.4). Також у таблиці є маршрут, який інформує, що до вузла hostB (10.0.0.2) можна дістатися через вузол hostR1, використовуючи останній як шлюз, а вузол hostR3 (10.0.0.5) може бути доступний через шлюз hostR2. Закінчивши конфігурування моделі мережі та запустивши її на виконання, можна в динаміці побачити, як згенерований вузлом hostA пакет UDP надходить на вхід вузла hostR1, проте тепер він не відкидає цей пакет, а приймає його та здійснює його пересилання іншому вузлу.

Цей процес відбувається відповідно до налаштувань статичної маршрутизації, при якій проміжні вузли даного сегмента WLAN відіграють роль шлюзів, збільшуючи практично вдвічі діапазон можливої безпроводової взаємодії вузлів hostA і hostB. Основна відмінність цієї моделі полягає в тому, що вона моделює процес, при якому сформований вузлом hostA пакет (UDPBasicAppData-0) надходить у радіоканал не безпосередньо до вузла hostB, а проходячи через мережевий та канальний рівні вузла hostA, адресується

ся тепер вузлу hostR1. Цей процес виконується на базі, що зберігається в пам'яті вузла hostA, таблиці маршрутизації, на основі якої всі пакети, призначені для доставки на вузол hostB, адресуються для передачі на вхід вузла hostR1. Пакети, що надійшли на його вхід, будуть підніматися до мережного рівня і відразу відправлятися зворотно в мережу відповідно до таблиці маршрутизації, що зберігається в пам'яті вузла hostR1. Так як вузол hostR1 має прямий маршрут доступу до вузла hostB, то UDP-пакет, що надійшов на його вхід, буде безпосередньо трансльований вузлу hostB.

Розглянемо модель обліку взаємних завад. У попередній моделі WLAN були реалізовані ідеалізовані умови роботи мережі, в якій не враховувалося таке фізичне явище як інтерференція радіохвиль, що виникає при вступі на вхід радіоприймача двох і більше радіосигналів, через що вони стикаються, спотворюються та збивають нормальну роботу приймача радіосигналу [1]. До цього моменту цей ефект не враховувався, і по суті моделювалися пристрої з повним дуплексним зв'язком [15]. При цьому в середовищі OMNeT++ в якості базових реалізовано чотири способи опису та подання сигналів.

Перше уявлення називається range-based (заснований на діапазонах). Саме воно реалізовано у компоненті IdealRadioMedium. Перевагою цієї структури є компактність, передбачуваність та висока продуктивність. Однак її недолік полягає в тому, що вона не точно відбиває реальну поведінку фізичного середовища.

Друга структура є вузькосмуговим сигналом зі скалярною потужністю сигналу, що несе частотою і смугою пропускання. Його перевага в тому, що дозволяє обчислювати ставлення сигналу/шуму, а також те, що в більшості випадків його достатньо для моделювання мереж стандарту IEEE 802.11.

Третя структура даних визначає сигнал, потужність якого змінюється пізніше. У цьому випадку потужність сигналу представлена однимірним годинниковим значенням, яке точно слідує за переданими імпульсами. Дане подання використовується при моделюванні радіохвиль стандарту IEEE 802.15.4a UWB.

Четверте уявлення використовує багатовимірні значення для опису потужності сигналу, що змінюється як за годинаю, так і частотою. Дане уявлення може бути використане при моделюванні радіохвиль стандарту IEEE 802.11b.

У всіх розглянутих прикладах використовувалася найпростіша модель фізичного середовища на основі модуля

IdealRadioMedium, який використовує діапазонне уявлення, де ступінь впливу сигналу на сусідні вузли залежить від відстані, на якому вони знаходяться. Працюючи з цим модулем та її конфігурацією виділяються лише три основні діапазони.

1. Communication range – діапазон впевненого прийому та передачі радіосигналу;

2. Interference Range – діапазон, у якому нормальний зв'язок вже неможливий, але він ще суттєво впливає на приймачі інших пристроїв;

3. Detection range – діапазон, де немає впливу вузла на приймачі інших пристроїв, але є можливість виявити факт наявності та роботи цього пристрою.

Для дослідження ступеня взаємного впливу радіохвиль у файлі конфігурації компонент IdealRadioMedium був налаштований на інтерференційний діапазон з відстанню 500 м. Присвоєні параметри описують той факт, що радіосигнали стають слабше з відстанню, але існує діапазон, в якому вони більше не можуть бути правильно прийняті, але вони все ще досить сильні, щоб впливати на інші сигнали, що призводить до збою прийому.

```
#Допускаємо облік завад у радіоприймачі від роботи сусідніх вузлів *.host*.wlan[*].radio.receiver.ignoreInterference = false
```

```
#Робимо інтерференційний діапазон, що дорівнює подвійному діапазону зв'язку *.host*.wlan[*].radio.transmitter.maxInterferenceRange = 500m
```

```
#Відображення на схемі інтерференційного діапазону вузла hostA*.hostA.wlan[0].radio.displayInterferenceRange=true
```

Для дослідження цього режиму файл конфігурації був включений режим реєстрації та запису подій, які відбуваються у моделі за годину її прогону. Після закінчення роботи моделі було сформовано файли звітів, згідно з якими за час роботи моделі:

- вузол hostA сформував 92 UDP-повідомлення розміром 1 КБ кожний;
- рівень UDP вузла hostA пройшла 91 дейтаграма розміром 1008 Б;
- до мережі, пройшовши рівень MAC, відправлено 89 пакетів розміром 1028 Б;
- проте на вузол hostB надійшов лише 1 пакет за 1 з модельного часу.

Якщо тепер проаналізувати тимчасову діаграму зареєстрованого процесу моделювання мережі, то можна виявити, що тільки

на 800 мс модельного часу на вхід wlanB.hostB.udpApp(0) надійшло одне з перших повідомлень, яке було згенеровано вузлом hostA і ретрансльовано вузлом hostR1. Висока інтенсивність (середня година на 10 мс) випадкової генерації UDP-пакетів вузлом hostA, наявність інтерференційних завад та боротьба за доступ до безпроводового середовища передачі даних, призвели до того, що відправлення повідомлення з вузла hostA на вузол hostB було здійснено лише в момент значної паузи на вузлі hostA. При цьому боротьба за доступ до безпроводового середовища передачі даних велася між вузлами hostA і hostR1, які хотіли передати вузлу hostB як прямі, так і ретрансльовані UDP-пакети. Але якщо на вузол hostB надійшло одне з перших, відправлених із вузла hostA повідомлень, це говорити про те, що воно в мережі не пропало і змогло десь зберегтися. На цей питання дає відповідь графік залежності від часу (T) довжини черги (L), що формується в буфері адаптера мережевого шлюзу hostR1, який ретрансльює пакети між вузлами hostA та hostB. З наведеного на рис. 3 графіка видно, що за 1 с модельного часу в цьому буфері збереглося майже 80 відправлених вузлом hostA пакетів, які вузол hostR1 не встиг ретрансльувати в hostB. На даний момент значення максимальної довжини черги буфера адаптера визначено за замовчуванням у відповідному модулі фреймворку INET. У реальній безпроводовій мережі довжина буфера або його об'єм мають велике значення для роботи мережі, особливо якщо цей адаптер використовується у такому пристрої, як шлюз.

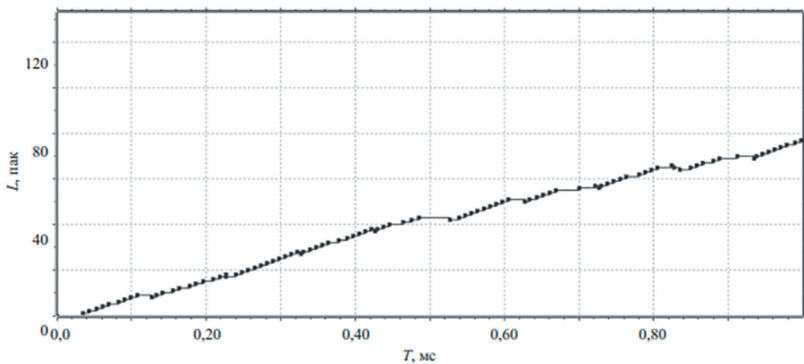


Рис. 3. Графік довжини черги у буфері мережевого шлюзу вузла hostR1

Причини які заважали в моделі UDP-паketу, що моделюється, з буфера шлюзу hostR1 дійти до вузла hostB раніше? Відповідь це питання дає аналіз зареєстрованих у мережі подій, які відбувалися у процесі її роботи [16 – 19]. Розглянуто часову діаграму роботи всіх елементів для всіх вузлів безпроводової мережі, звідки видно, що:

- перший пакет (UDPData-0) надходить у мережу (подія #22) і через деякий інтервал часу досягає вузлів hostR1 (#23) і hostB (#26). Причому друга подія відбувається пізніше, оскільки вузол hostB розташований далі;
- вузол hostB приймає радіосигнали від вузла hostA (#26 - #45), але не розпізнає їх через значну віддаленість від джерела передачі;
- вузол hostR1 починає успішний прийом пакета від вузла hostA (# 23 - # 32);
- в процесі передачі першого пакета, додаток wlanB.hostA.udpApp(0) (#27) генерує друге повідомлення UDPBasicAppData-1, яке не може бути відправлено в мережу. Воно поміщається в буфер мережного адаптера і буде там до кінця роботи мережного адаптера з першим пакетом. Цей момент описує подію #36 і зелена пунктирна стрілка, що пов'язує його з подією #27;
- вузол hostR1, успішно закінчивши прийом першого пакета (#32), звертається до своєї таблиці маршрутизації (#35). На її основі він переадресує прийнятий пакет на вузол hostB і відправляє його до мережі (#39);
- проте трохи раніше (#32) вузол hostA почав передачу другого пакета, який раніше зберігався в буфері його мережевого адаптера;
- на вхід приймача вузла надходять одночасно два радіосигнали (#48 і #51), які інтерферують між собою, не дозволяючи вузлу hostB розпізнати UDP-пакет, що йде від шлюзу.

Підсумовуючи дослідження моделі WLAN з урахуванням інтерференційних завад від роботи сусідніх пристроїв, слід зазначити, що спостерігається суттєве зниження продуктивності роботи. Більшу частину часу передавальний вузол і шлюз працюють одночасно, що викликає прихід на трансивер приймаючого вузла відразу двох сигналів та їхнє «зіткнення» між собою.

Такий підхід до організації безпроводових мереж є неприйнятним, і щоб звести до мінімальної завади, потрібен деякий протокол доступу до мультимедіа середовища, що дозволить визначати, який хост і коли має право на передачу даних [17, 18]. Одним із таких протоколів може бути працюючий на рівні MAC протокол на основі CSMA/CA з додатковими підтвердженнями та механізмом повтору, якою в середовищі OMNeT++ реалізує модуль CsmCaMac, який при відповідних налаштуваннях може успішно апроксимувати базовий режим 802.11b Ad-Hoc [20 – 22].

Висновки та пропозиції. Наведені дослідження дозволяють продемонструвати, як імітаційне моделювання використовується при проектуванні та вивченні роботи реальних безпроводових мереж. Показано можливість створення імітаційних моделей безпроводових мереж з використанням готових компонентів зі складу фреймворку INET, які допомагають описувати різні елементи мережі, а також виконувати їх гнучке налаштування для моделювання необхідної поведінки.

Продемонстровано підхід моделювання різних режимів роботи безпроводових мереж на прикладі реалізації прямої взаємодії при проектуванні режиму Ad-Hoc, а також непрямого, за якого реалізується процес маршрутизації через проміжні вузли. Дослідження у статті такого фізичного явища, як інтерференція, дозволив виявити факт негативного впливу один на одного розташованих вузлів, які погіршують якість радіозв'язку і можуть призводити до зниження швидкості передачі даних або їх повної втрати.

У статті також продемонстровано підхід дослідження роботи безпроводової мережі шляхом аналізу файлу часової діаграми, вивчення якого дозволило пояснити причину суттєвих затримок у ретрансляції мережних пакетів.

© Лемешко А.В., Антоненко А.В., Костецький Д.І., Шрам М.М., Закреничний А.С., 2023

ЛІТЕРАТУРА

1. Varga, A. The OMNeT++ discrete event simulation system. In Proceedings of the European Simulation Multiconference. Prague. Czech Republic. 2001.
2. Sommer, C., Dressler, F. and Gansen, T. (2008) On the need for bidirectional coupling of road traffic microsimulation and network simulation.

In Proceedings of the 11th Communications and Networking Simulation Symposium (CNS), Ottawa, ON, Canada. 2008. P. 71 – 79.

3. Hämmäinen, H., Mäkelä, J., Mahonen, P. and Niemi, V. (2008) OMNeT++ network simulation framework. In Proceedings of the 5th ACM International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM), Vancouver, BC, Canada. 2002. P. 171 – 178.

4. INET Framework User's Guide, <https://inet.omnetpp.org/docs/users-guide/>.

5. Bhattacharjee, A., Rahmani, A.M. and Salim, U.A. (2015) Modeling and simulation of wireless sensor networks using OMNeT++ and MiXiM framework. In Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Computer, Communication and Control (IC4), Indore, India. 2015. P. 1 – 6.

6. Castañeda, L.E., Moya, F., Casilari, E. and Lloret, J. (2016) A comparative study of network simulators for wireless sensor networks. In Proceedings of the International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM), Fez, Morocco. 2016. P. 1 – 6.

7. Твердохліб А.О., Коротін Д.С. Ефективність функціонування комп'ютерних систем при використанні технології блокчейн і баз даних // *Таврійський науковий вісник*. Серія: Технічні науки. 2022. (6).

8. Цвик О.С. Аналіз і особливості програмного забезпечення для контролю трафіку // *Вісник Хмельницького національного університету*. Серія: Технічні науки. 2023. (1).

9. Новіченко Є.О. Актуальні засади створення алгоритмів обробки інформації для логістичних центрів // *Таврійський науковий вісник*. Серія: Технічні науки. 2023. (1).

10. Зайцев Є.О. Smart засоби визначення аварійних станів у розподільних електричних мережах міст // *Таврійський науковий вісник*. Серія: Технічні науки. 2022. (5).

11. Li, F., Li, X., Li, B. and Li, Q. (2017) A comprehensive survey of network simulators for wireless networks. *Journal of Network and Computer Applications*. 88. P. 18 – 44.

12. Singh, S., Purohit, P. and Kothari, A. (2017) Comparative analysis of wireless sensor network simulators: A survey. In Proceedings of the International Conference on Emerging Trends in Engineering, Science and Technology (ICETEST), Jaipur, India, 2017. P. 1 – 5.

13. Ali, M., Khan, M., Memon, Q. and Kumar, D. (2019) Performance comparison of network simulators for wireless sensor networks. In Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Computational and Communication Paradigms (ICACCP), Sikkim, India. 2019. P. 1 – 6.

14. Khajehpour, H. and Roudsari, M.H. (2019) A survey on network simulators for wireless sensor networks // *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 8(1). P. 2.

15. Koucheryavy, A. Quality of Service (QoS) classes for Ubiquitous Sensor Networks / A. Koucheryavy, A. Prokopiiev // ICACT'2009: Proceedings, 15–18 February, Phoenix Park, Korea, 2009. P. 107 – 109.

16. Kolomoitcev V.S., Bogatyrev V.A. The fault-tolerant structure of multilevel secure access to the resources of the public network // *Communications in Computer and Information Science*. 2016. V. 678. P. 302 – 313.

17. Bogatyrev V.A., Slastikhin I.A. The models of the redundant transmission through the aggregated channels // *ACSR-Advances in Computer Science Research*. 2017. V. 72. P. 294 – 299.

18. Bogatyrev S.V., Bogatyrev V.A. Analysis of the Timeliness of Redundant Service in the System of the Parallel-Series Connection of Nodes with Unlimited Queues // *Proc. 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. 2018. P. 8604379.

19. Семенчук, О., Татарчук, Т., & Чебанова, Н. (2016). Моделювання технології LTE в системах масового обслуговування. Наукові праці Національного університету «Львівська політехніка».

20. Яворський, Б., Дубинський, Ю., & Дорошко, С. (2016). Моделювання технології Wi-Fi у середовищі мережевого симулятора OMNeT++. Збірник наукових праць НТУ «ХПІ».

21. Кулікова, О., Рева, О., & Яковлева, І. (2018). Моделювання безпроводових мереж на основі WSN у середовищі OMNeT++. Наукові праці ДонНТУ. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка».

22. Васильченко, Д. В., & Перетягін, О. В. (2019). Моделювання технології NB-IoT у середовищі OMNeT++. Наукові праці Херсонського державного університету. Серія: Електроніка і телекомунікації.

REFERENCES

1. Varga, A. The OMNeT++ discrete event simulation system. In *Proceedings of the European Simulation Multiconference, Prague, Czech Republic, 2001* [in English].

2. Sommer, C., Dressler, F. and Gansen, T. (2008) On the need for bidirectional coupling of road traffic microsimulation and network simulation. In *Proceedings of the 11th Communications and Networking Simulation Symposium (CNS), Ottawa, ON, Canada, 2008*, P. 71 – 79 [in English].

3. Hämmäinen, H., Mäkelä, J., Mahonen, P. and Niemi, V. (2008) OMNeT++ network simulation framework. In Proceedings of the 5th ACM International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM), Vancouver, BC, Canada. 2002. P. 171 – 178 [in English].

4. INET Framework User's Guide, <https://inet.omnetpp.org/docs/users-guide/> [in English].

5. Bhattacharjee, A., Rahmani, A.M. and Salim, U.A. (2015) Modeling and simulation of wireless sensor networks using OMNeT++ and MiXiM framework. In Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Computer, Communication and Control (IC4), Indore, India. 2015. P. 1 – 6 [in English].

6. Castañeda, L.E., Moya, F., Casilari, E. and Lloret, J. (2016) A comparative study of network simulators for wireless sensor networks. In Proceedings of the International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM), Fez, Morocco. 2016. P. 1 – 6 [in English].

7. Tverdokhlib A.O., Korotin D.S. Efektyvnist funktsionuvannia kompiuternykh system pry vykorystanni tekhnolohii blokchein i baz dannykh. Tavriiskyi naukovyi visnyk. Serii: Tekhnichni nauky, 2022, (6) [in Ukrainian].

8. Tsvyk O.S. Analiz i osoblyvosti prohramnoho zabezpechennia dlia kontroliu trafiku. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky, 2023. (1) [in Ukrainian].

9. Novichenko Ye.O. Aktualni zasady stvorennia alhorytmiv obrobky informatsii dlia lohistychnykh tsentriv. Tavriiskyi naukovyi visnyk. Serii: Tekhnichni nauky, 2023 (1) [in Ukrainian].

10. Zaitsev Ye.O. Smart zasoby vyznachennia avariinykh staniv u rozpodilnykh elektrychnykh merezhakh mist. Tavriiskyi naukovyi visnyk. Serii: Tekhnichni nauky, 2022. (5) [in Ukrainian].

11. Li, F., Li, X., Li, B. and Li, Q. (2017) A comprehensive survey of network simulators for wireless networks // *Journal of Network and Computer Applications*. 88. P. 18 – 44 [in English].

12. Singh, S., Purohit, P. and Kothari, A. (2017) Comparative analysis of wireless sensor network simulators: A survey. In Proceedings of the International Conference on Emerging Trends in Engineering, Science and Technology (ICETEST), Jaipur, India. 2017. P. 1 – 5 [in English].

13. Ali, M., Khan, M., Memon, Q. and Kumar, D. (2019) Performance comparison of network simulators for wireless sensor networks. In Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Computational and Communication Paradigms (ICACCP), Sikkim, India. 2019. P. 1 – 6 [in English].

14. Khajehpour, H. and Roudsari, M.H. (2019) A survey on network simulators for wireless sensor networks. *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 8(1). P. 2 [in English].

15. Koucheryavy, A. Quality of Service (QoS) classes for Ubiquitous Sensor Networks / A. Koucheryavy, A. Prokopiev // ICACT'2009: Proceedings, 15–18 February, Phoenix Park, Korea. 2009. – P. 107 – 109 [in English].

16. Kolomoitcev V.S., Bogatyrev V.A. The fault-tolerant structure of multilevel secure access to the resources of the public network // Communications in Computer and Information Science. 2016. V. 678. P. 302 – 313. [in English].

17. Bogatyrev V.A., Slastikhin I.A. The models of the redundant transmission through the aggregated channels // ACSR-Advances in Computer Science Research. 2017. V. 72. P. 294 – 299. doi: 10.2991/itsmssm-17.2017.60 [in English].

18. Bogatyrev S.V., Bogatyrev V.A. Analysis of the Timeliness of Redundant Service in the System of the Parallel-Series Connection of Nodes with Unlimited Queues // Proc. 2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF). 2018. P. 8604379. [in English].

19. Semenchuk, O., Tatarchuk, T., & Chebanova, N. (2016). Modeling LTE technology in mass service systems. Scientific works of the Lviv Polytechnic National University [in Ukrainian].

20. Yavorsky, B., Dubinsky, Yu., & Doroshko, S. (2016). Modeling Wi-Fi technology in the OMNeT++ network simulator environment. Collection of scientific works of NTU «KhPI» [in Ukrainian].

21. Kulikova, O., Reva, O., & Yakovleva, I. (2018). Simulation of WSN-based wireless networks in the OMNeT++ environment. Scientific works of DonNTU. Series «Informatics, Cybernetics and Computer Engineering» [in Ukrainian].

22. Vasylychenko, D. V., & Peretyagin, O. V. (2019). Simulation of NB-IoT technology in the OMNeT++ environment. Scientific works of Kherson State University. Series: Electronics and telecommunications [in Ukrainian].

СТАТТЯ НАДІЙШЛА ДО РЕДАКЦІЇ 12.05.2023