

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-09>

УДК 37:004.7

Козак Олександр Володимирович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-0919-0344>

Михайлова Людмила Миколаївна, к.т.н., професор

<https://orcid.org/0000-0002-3419-5446>

Семенишина Ірина Віталіївна, к.ф.-м.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-0487-6152>

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», м. Кам'янець-Подільський, Україна

ІНСТРУМЕНТИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА СИМУЛЯЦІЇ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ: ОГЛЯД І ПРАКТИЧНИЙ ДОСВІД

Козак О.В., Михайлова Л.М., Семенишина І.В. Інструменти моделювання та симуляції для вивчення комп'ютерних мереж: огляд і практичний досвід. Симуляція та моделювання можуть відігравати важливу роль у процесі вивчення комп'ютерних мереж. Саме ці інструменти допомагають студентам вивчити поведінку мережі та порівняти показники її продуктивності під час різних сценаріїв роботи, не вимагаючи при цьому спеціального обладнання. Однак процес інтеграції інструментів моделювання та симуляції в мережеві курси зазвичай залежить від теми курсу підготовки або особистих вподобань викладача, що може не задовольняти вимоги підготовки майбутнього фахівця. Поєднати теорію та практику в одному курсі вивчення комп'ютерних мереж надзвичайно важко, через постійне зростання складності і масштабу сучасних мереж. Це стало однією з головних даного дослідження, в ході якого було розглянуто функціонал найпопулярніших симуляторів мережі, а також згадано переваги та недоліки кожного з розглянутих інструментів, що допомогло провести аналіз можливості використання кожного з них в процесі вивчення мереж. Надано власні рекомендації для ефективного впровадження цих інструментів в процес навчання. Ці рекомендації можуть бути задіяні як на рівні шкіл та ліцеїв, так і в закладах вищої освіти, що робить їх універсальними у використанні. Питання зміни підходів у вітчизняній освіті до процесу вивчення комп'ютерних мереж визначено актуальним для наступних досліджень, оскільки через технологічну революцію та стрімкий розвиток інформаційних технологій, який триває декілька останніх десятиліть, навчальний матеріал кожного року втрачає свою актуальність, а мережі, навпаки, стають все складнішими.

Ключові слова: комп'ютерні мережі, топологія мереж, навчальні курси, моделювання, симуляція, програмні засоби, критерії оцінки.

Kozak O., Mykhailova L., Semenyshyna I. Modeling and Simulation Tools for Studying Computer Networks: Overview and Practical Experience. Simulation and modelling can play an essential role in studying computer networks. These tools help students study the behaviour of the network and compare its performance indicators during different scenarios of operation without requiring special equipment. However, the process of integrating modelling and simulation tools into network courses usually depends on the topic of the training course or the personal preferences of the teacher, which may not meet the requirements of the training of a future specialist. Combining theory and practice in one course of studying computer networks is extremely difficult due to the constant increase in the complexity and scale of modern networks. This was one of the main reasons for writing the current scientific work, during which the functionality of the most popular network simulators was considered, and the advantages and disadvantages of each of the considered tools were also mentioned, which helped to analyse the possibility of using each of them in the process of studying networks. Our recommendations for effectively implementing these tools in the learning process are provided. These recommendations can be used both at the level of schools and lyceums and in higher education institutions (HEIs), making them universal. The issue of changing approaches in domestic education to the process of studying computer networks is determined to be relevant for future research since, due to the technological revolution and the rapid development of information technologies, which has been going on for the past several decades, educational material loses its relevance every year, and networks, on the contrary, are becoming more and more complex.

Keywords: computer networks, network topology, training courses, modelling, simulation, software tools, evaluation criteria.

Постановка проблеми. Комп'ютерні мережі стали невід'ємною складовою сучасного суспільства і відіграють вирішальну роль у функціонуванні компаній, урядів та окремих людей. Компанії використовують мережі, щоб забезпечити безперервну роботу пристроїв своїх співробітників. Вони можуть допомагати ділитися файлами й іншою інформацією. Мережеве обладнання забезпечує створення, керування та підтримку цих ліній зв'язку, залишаючи їх безпечними і доступними для тих, хто їх використовує [1].

Стає зрозуміло, що мірою розвитку технологій комп'ютерні мережі розвиватимуться та відіграватимуть усе більшу роль у повсякденному житті [2]. Це обумовлює важливість вивчення комп'ютерних мереж, що може відбуватися як на основі закладів освіти, так і самостійно, базуючись на онлайн-курсах. Студенти й учні, після закінчення навчальної програми, отримують знання, які дозволяють їм працювати на посаді фахівця з комп'ютерних мереж (комп'ютерного інженера).

Фахівець з комп'ютерних мереж керує всією мережею організації, де він працює. До його обов'язків, як правило, входить встановлення комунікаційного обладнання, усунення несправностей і допомога в розробці ефективних протоколів безпеки. Він також гарантує, що комп'ютери співробітників залишаються підключеними, а вебсайти компанії та онлайн-магазин активні в будь-який час [3].

Головними проблемами при підготовці комп'ютерних інженерів є неефективні витрати часу та ресурсів, які відбуваються через неправильне використання сучасних інструментів моделювання і симуляції. Ключовим способом розв'язання цих проблем є аналіз можливості використання кожного інструменту в процесі вивчення мереж. Він потребує огляду функціоналу найпопулярніших симуляторів мережі та визначення їх переваг і недоліків, що буде зроблено в даному дослідженні.

Формулювання мети і завдань дослідження. Метою статті є огляд інструментів моделювання та симуляції комп'ютерних мереж у контексті їх подальшого вивчення.

Для досягнення поставленої мети були вирішені такі завдання:

1. Пояснена особливість процесу моделювання та симуляції комп'ютерних мереж і визначено його переваги.
2. Виявлено найпопулярніші симулятори комп'ютерної мережі й описано їх важливі показники.
3. Здійснено аналіз можливості використання кожного з розглянутих інструментів у процесі вивчення мереж.
4. На основі всіх минулих кроків розроблено власні рекомендації для ефективного впровадження інструментів моделювання та симуляції комп'ютерних мереж у процес навчання.

Серед методів, які були використані з метою вирішення всіх визначених завдань дослідження були такі, як:

- *метод моніторингу*: використовувався для збору, систематизації та аналізу інформації про моделювання і симуляцію комп'ютерних мереж;
- *метод порівняння*: знадобився під час дослідження симуляторів і порівняння їх найважливіших характеристик;
- *метод абстрагування*: був використаний під час дослідження для виокремлення основних понять і категорій;
- *методи аналізу та синтезу*: використані в процесі виявлення найвпливовіших елементів і чинників розвитку об'єкта дослідження.

Спеціальні групи методів збору й обробки інформації, проведення аналітичної роботи та обґрунтувань було використано з метою розв'язання загальних завдань дослідження.

Актуальність вибору теми дослідження визначена важливістю питання контролю якості вивчення комп'ютерних мереж. Саме залучення в процес навчання майбутніх комп'ютерних інженерів ефективних інструментів моделювання та симуляції дозволяє їм працювати якісніше, а компаніям – забезпечити безперебійну роботу пристроїв своїх співробітників, підтримуючи безпечність і доступність їх з'єднання між собою в умовах постійного навантаження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для початку необхідно представити методологія відбору публікацій для аналізу. Головним критерієм при виборі наукової літератури була її актуальність (не старше п'яти років, крім праці В. Точиліна) та різноманітність (роботи українських та іноземних дослідників). Після формування методології відбору наукової літератури вирішено було перейти до її аналізу. В його ході буде показано вклад праць, що аналізуються, при написанні поточної статті.

Хоч комп'ютерні мережі використовуються вже не одне десятиліття, але навіть зараз тема використання інструментів моделювання та симуляції комп'ютерних мереж цікавить багатьох вітчизняних і закордонних дослідників, які працюють у галузі інформаційних технологій.

В науковій праці О. Дячук та ін. розглянуто питання вибору інструментів для моделювання й симуляції комп'ютерних мереж. Визначено, що кожен з них є унікальним, оскільки пропонує корисні можливості для досягнення різних цілей [4]. Ця наукова праця стала фундаментальною для вибору конкретних симуляторів з метою аналізу.

У статті В. Охрімчука та І. Охрімчук проведено аналіз найбільш поширених симуляторів та симулятори комп'ютерних мереж, здійснена порівняльна оцінка їх функціональних можливостей і

визначені сфери їх потенційного застосування. [5]. Це дозволило актуалізувати важливість питання кібербезпеки в процесі створення комп'ютерної мережі.

Г. Дресева запропонувала метод моделювання мережевого трафіку з фрактальними характеристиками для тестування алгоритмів і протоколів комп'ютерних мереж. В основі такого підходу знаходиться використання фрактального аналізу та марківських процесів, що дозволяє створювати числові послідовності, максимально наближені до реального трафіку телекомунікаційних мереж [6].

Дослідження методів визначення ключових характеристик комп'ютерних мереж, зокрема їх структурної живучості та надійності, стало об'єктом наукової розвідки А. Невзорова та ін. Науковці запропонували методіку розрахунку показників надійності зв'язку, провівши аналіз можливості реконструкції мереж для забезпечення їх стабільного функціонування, та надали рекомендації щодо підвищення цих характеристик [7].

У статті К. С. Хандерао та Л. С. Хедекар виявлено, що симуляція переважає аналітичні підходи в процесі вивчення комп'ютерних мереж. Ця стаття дозволила виявити конкретні переваги симуляції засобами NS-3 над іншими методами вивчення комп'ютерних мереж [8].

Дж. Гомес та ін. дослідили і порівняли існуюче програмне забезпечення для моделювання мереж. Це допомогло провести відбір параметрів для порівняння інструментів моделювання комп'ютерних мереж [9].

Оглядова стаття Г. Х. Аддай та ін. містить аналіз 33 різних симуляторів, які використовуються для тестування й оцінки нових протоколів і підходів у бездротових сенсорних мережах (WSN). Автори оцінили переваги та недоліки кожного з симуляторів у контексті різних академічних сфер WSN, надаючи детальне порівняння інструментів аналізу продуктивності за відомими метриками [10].

Проаналізувавши актуальні наукові праці, монографії і статті на профільних сайтах, можна зробити висновок, що обрана тема є актуальною та цікавою для багатьох дослідників. Також, згадуючи вагомий внесок всіх перелічених вище дослідників в акт розкриття особливостей обраної теми, потрібно також відзначити низку недоліків у їх працях, головним з яких є відсутність власного погляду на практичне впровадження інструментів моделювання та симуляції у процес навчання.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. Спочатку необхідно пояснити особливості процесу моделювання та симуляції комп'ютерних мереж і визначити його переваги. Симулятор мережі – це програмне або апаратне забезпечення, яке передбачає поведінку комп'ютерної мережі, без побудови реальної мережі, імітуючи її роботу. Симуляція комп'ютерної мережі відбувається шляхом використання пристроїв і трафіку, з наступним аналізом їх ефективності. Як правило, користувачі можуть налаштувати симулятор відповідно до своїх власних аналітичних потреб. Симулятори зазвичай підтримують добре відомі протоколи, які використовуються сьогодні, такі як бездротова локальна мережа (WLAN), WiMAX, UDP та TCP (протокол керування передачею).

Деякі симулятори мережі вимагають попереднього введення сценаріїв і команд (параметрів мережі). Параметри мережі визначають стан мережі (розташування вузлів, зв'язки, передачу даних тощо). Найважливіші вихідні симуляторів містяться у файлі відстеження. Файли відстеження можуть документувати будь-які події моделювання. Деякі симулятори мають додаткові функції для збору даних безпосередньо з навколишнього середовища в різний час доби, тижня та місяця, щоб показати середній, найгірший і найкращий режими.

Мережеві симулятори також надають інструменти для полегшення візуального аналізу тенденцій і потенційних проблемних місць. Симуляція мережі складна, наприклад, коли є велика перевантаженість, середня оцінка зайнятості через високу дисперсію є важкою. Щоб оцінити переповнення мережевого буфера, час, який необхідний для відповіді, можна збільшити. Спеціальні методи, такі як контроль змін і важлива вибірка збільшують швидкість моделювання роботи мережі. Переваги використання процесу моделювання роботи мережі наведено в Таблиці 1.

Таблиця 1. Переваги моделювання роботи комп'ютерної мережі

№	Назва переваги	Опис переваги
1	Підвищення економічної ефективності	Інструменти моделювання мережі пропонують економічно ефективне рішення для тестування мережевих конфігурацій без потреби у фізичному обладнанні. Це призводить до значної економії для

		організацій, особливо на етапах планування та розробки топології мережі
2	Зниження ризиків	Імітуючи мережеві сценарії, організації можуть виявити й усунути потенційні проблеми перед упровадженням. Цей проактивний підхід знижує ризик збоїв у мережі та підвищує загальну надійність системи
3	Попередній прогноз ефективності	Моделювання мережі дає можливість проводити поглиблене тестування продуктивності, дозволяючи організаціям оцінити, як мережа поводитиметься за різних умов. Це має вирішальне значення для оптимізації продуктивності мережі та забезпечення бездоганної взаємодії з користувачем

Джерело: узагальнено авторами на основі [11].

Крім того, моделювання комп'ютерної мережі допомагає оцінити стійкість реально існуючої мережі з аналогічними параметрами до кіберзагроз, підвищивши ефективність контрзаходів. Це мінімізує ризик втрати важливих активів та забезпечує збереження конфіденційності даних. Головною перевагою процесу моделювання в контексті безпеки є те, що можна піддавати змодельовану мережу кібератакам без ризику пошкодження мережевого обладнання.

На жаль процеси моделювання та симуляції роботи комп'ютерних мереж мають і свої обмеження, серед яких основними були визначені:

- неточності внаслідок спрощення й абстракції роботи фізично існуючих мереж;
- малий масштаб симуляції, через великі потреби в обчислювальних ресурсах і складність самих обчислень;
- дисбаланс між швидкістю та точністю, який часто виникає під час моделювання мережі на рівні пакетів.

Аналізуючи переваги й обмеження моделювання роботи комп'ютерних мереж можна дійти висновку, що деякі з них можуть нівелювати інші. Прикладом такого є попередньо визначене підвищення економічної ефективності, внаслідок моделювання, що може бути нівельоване потребою в обчислювальних ресурсах і складністю самих обчислень. Саме тому на рівні організацій при моделювання мережі відбувається формування звіту, який містить оцінку цього процесу в контексті його фінансової доцільності.

Далі треба згадати специфіку застосування різних типів симуляторів. Перш за все, було виявлено, що будь-який мережевий симулятор містить широкий спектр мережевих технологій, які допомагають користувачам побудувати складні мережі з простих блоків, таких як вузли та зв'язки, це можуть бути ієрархічні мережі з різними типами вузлів (комп'ютери, концентратори, мережеві мости, маршрутизатори, комутатори). Техніки симуляції комп'ютерних мереж можна класифікувати за трьома основними категоріями:

1. Мова моделювання загального призначення (GPSS).
2. Комунікаційно-орієнтована мова моделювання.
3. Програмне забезпечення мережевого моделювання.

Мова моделювання загального призначення застосовується до будь-якої симуляції, особливо, якщо вона використовує модулі симулятора та мережеві елементи (вузли, канали, протоколи). Це дуже корисно при моделюванні мереж масового обслуговування, коли багато статистичних даних збираються автоматично [12]. Сильною стороною цієї категорії симуляторів є їх чудова адаптивність, що дозволяє користувачеві моделювати будь-яку мережу з будь-яким бажаним протоколом, а слабкою стороною є складність визначення топології мережі та її протоколів, що вимагає знання їх особливих мов програмування.

Комунікаційно орієнтована мова моделювання має велику схожість з GPSS. Але в симуляторах цієї категорії більшість елементів, необхідних для моделювання мережі, попередньо підготовлені, що зменшує час, який необхідний для самого процесу моделювання, але негативним чинником при цьому є падіння адаптивності. Прикладом симулятора цієї категорії є програма OPNET Modeler. Вона дозволила виконати аналіз мереж у контексті їх адаптивності та швидкості передачі даних. Основними параметрами аналізу були: затримка (у секундах), переданий трафік

(пакетів/секунду) та отриманий трафік (пакетів/секунду). Його результати довели, що локальна мережа працює краще, ніж бездротова локальна мережа з точки зору затримки та трафіку в офісі в ситуації, коли адаптивність і мобільність не є необхідними перевагами [13].

Категорія програмного забезпечення мережевого програмування містить повні пакети, які комунікаційно орієнтований симулятор може імітувати без необхідності кодування шляхом взаємодії користувача зі звичайним графічним інтерфейсом, на якому показані всі змодельовані елементи, що відповідають фактичним (маршрутизатори, комутатори тощо). На додаток до підвищення точності це покращує легкість і швидкість процесу моделювання, й тому підходить для користувачів, які не знайомі з технологіями програмування.

Загалом, професійні користувачі (комп'ютерні інженери), особливо ті, що мають справу зі специфічними мережами, віддають перевагу мовам моделювання, з якими важко працювати, на відміну від користувачів, які мають справу з темою моделювання більш примітивних і типових мереж. Для зручності останніх інструменти симуляції мережі повинні мати п'ять характеристик, які наведено в таблиці 2.

Таблиця. 2. Необхідні харатеристики симуляторів комп'ютерної мережі

№	Назва характеристики	Пояснення характеристики
1	Гнучкість у моделюванні	Користувач повинен мати можливість додавати нові типи загальних мережевих ресурсів, таких як вузли, посилення та протоколи, до набору емулятора
2	Легкість моделювання	Наявність графічних інтерфейсів і можливість структурованого моделювання у вигляді складних моделей на основі простих моделей, а також можливість повторного використання модулів з функцій, які прискорюють процес моделювання
3	Швидкість моделювання	Час обробки у великих симуляціях важливий для мереж із великою кількістю вузлів, що вимагає належного керування пам'яттю
4	Анімація процесів	Графічне відображення елементів мережі, які обмінюються повідомленнями один з одним, щоб вирішити помилки моделювання та зрозуміти, як це працює. У деяких програмах для моделювання симулятор запускається одночасно з графічним інтерфейсом, а в деяких інших після виконання симуляції
5	Можливість повторного запуску процесу моделювання	Метою моделювання, як правило, є дослідження впливу одного або кількох параметрів (середній розмір пакета або ємності буфера) на ефективність роботи мережі, тому повторюваність є необхідною умовою для симулятора

Джерело: власна розробка авторів.

Загалом, слід зазначити, що створення надійного та якісного симулятора мережі вимагає використання технології моделювання разом із знаннями топології мереж і протоколами.

Звичайно, поряд із зазначеними вище характеристиками, у кожного симулятора будуть деякі інші можливості, серед яких:

- присутність вбудованих модулів, що відповідають елементам мережі та протоколам;
- наявність генератора випадкових чисел і, у більш просунутих формах, здатність створювати величини з різними випадковими розподілами, оскільки більшість подій у процесі моделювання мають тип випадкових процесів;
- підтримка користувачів і функція своєчасного оновлення (особливо для нових протоколів) із повним доступом до документації;
- надання звітів про параметри продуктивності мережі (швидкість виходу, ефективність, затримку передачі тощо) у вигляді цифр і графічних кривих разом із можливістю виконання статистичних операцій за результатами інших позитивних характеристик симулятора.

Виявлені необхідні характеристики та можливості симуляторів комп'ютерної мережі дозволяють зробити висновок про їх зручність навіть для початківця в галузі інформаційних технологій. Таким чином, для початку процесу емуляції користувачу потрібно тільки вміти

побудувати топологію мереж, завантажити емулятор на свій пристрій і прочитати інструкцію для його використання.

Наступним кроком стало виявлення найпопулярніших симуляторів комп'ютерної мережі й опис їх важливих показників. Все програмне забезпечення для моделювання та симуляції мережі має свою специфіку, яка визначається його призначенням. Воно використовується як з навчальною метою, так і для професійної та аналітичної діяльності. Інструменти моделювання та симуляції комп'ютерної мережі за їх призначенням наведено на Рисунку 1.

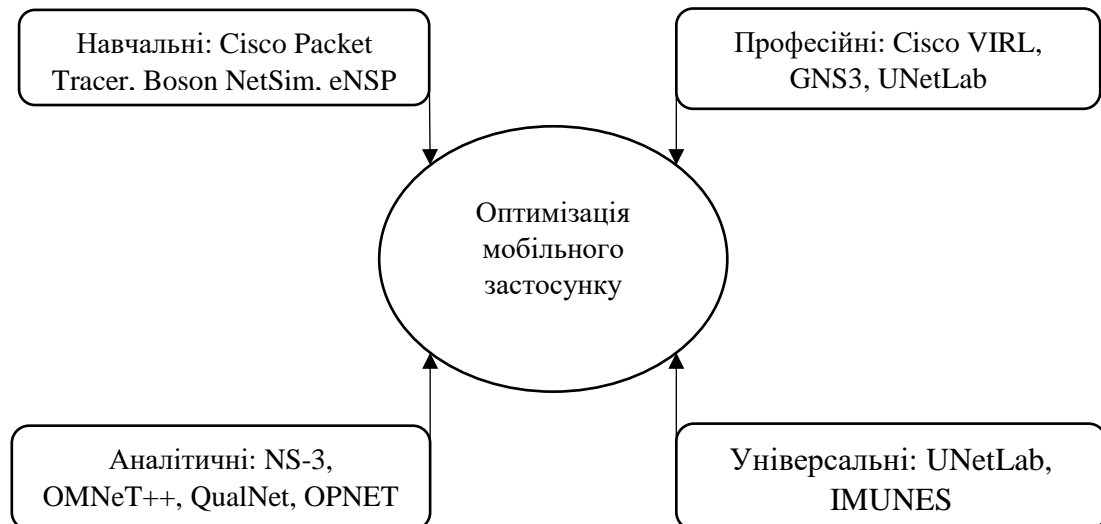


Рис. 1. Поділ інструментів моделювання та симуляції за призначенням
Джерело: власна розробка авторів.

Оскільки ця стаття присвячена огляду інструментів моделювання та симуляції комп'ютерних мереж з метою їх вивчення, то вирішено було розглянути саме симулятори Cisco Packet Tracer, Boson NetSim та eNSP.

Cisco Packet Tracer – це симулятор мережі від корпорації Cisco. Цей безкоштовний інструмент, призначений для того, щоб допомогти початківцям отримати сертифікати про знання мережевих технологій, наприклад CCNA. Програма дозволяє учням та студентам експериментувати з поведінкою мережі. Це програмне забезпечення відзначається простотою навігації і підтримує численні можливості оцінювання, візуалізації, співпраці та моделювання, щоб забезпечити безпроблемне вивчення складних ІТ-концепцій. Cisco Packet Tracer підтримує чотири групи протоколів:

- протоколи прикладного рівня (DNS, HTTP тощо);
- протоколи мережевого рівня;
- протоколи рівня передачі;
- протоколи доступу й інтерфейсу.

У нових версіях Cisco Packet Tracer постійно відбуваються покращення. Крім того, команда розробників забезпечує хорошу підтримку для користувачів. Програмне забезпечення пропонує підтримку багатьох пристроїв. Крім того, користувач може переглянути виконання всіх процесів та оцінити їх в ході симуляції [14].

Оскільки симулятор Cisco Packet Tracer добре інтегрується з академією (навчальним середовищем) Cisco, то він може працювати згідно навчального плану, щоб допомогти студентам зрозуміти тонкощі мережевого моделювання та методів візуалізації. Таким чином, це дозволяє викладачам демонструвати складні ІТ-концепції без особливих проблем.

Програмне забезпечення регулярно оновлюється, тому кожна версія має кращий рівень оптимізації і більше доступних функцій. Наприклад, в останній версії Cisco Packet Tracer було спрощено веб-інтерфейс і додано Swagger UI та стиснення Zstd. Як і будь-який інструмент Cisco Packet Tracer має свої переваги та недоліки. Серед його переваг слід підкреслити зручність для початківців, хорошу підтримку, широкі можливості моделювання мережі, можливість інтеграції із навчальним планом Cisco, підтримку кілька пристроїв та API. До його недоліків можна віднести те,

що він не ідеально підходить для експертів, має певні обмеження порівняно з фізичним обладнанням та вимагає розуміння основних мережевих концепцій [15].

Наступним було розглянуто симулятор Boson NetSim – симулятор мережі, розроблений компанією Boson Software. Він дозволяє моделювати мережеві середовища та сценарії Cisco. Цей інструмент підтримує різні команди і функції Cisco IOS, що дозволяє користувачам практикувати конфігурацію й усунення несправностей.

NetSim пропонує попередньо створені мережеві топології і сценарії, які призначені для відтворення реальних мережевих середовищ Cisco. Він дозволяє користувачам створювати і власні топології, шляхом використання інтерфейсу перетягування. NetSim підтримує різноманітні групи протоколів, серед яких:

- стек стрижневих протоколів мережі інтернет (TCP/IP);
- протоколи динамічної маршрутизації (OSPF);
- протоколи маршрутизації Cisco (EIGRP);
- протоколи очистки трафіку.

Всі переваги та недоліки використання Boson NetSim ґрунтуються на його характеристиках, які наведено в Таблиці 3.

Таблиця. 3. Характеристики симулятора Boson NetSim

№	Назва характеристики	Опис характеристики
1	Зручний інтерфейс	NetSim надає інтерфейс, який дозволяє користувачам легко налаштувати та запускати моделювання навіть для тих, хто має обмежений досвід роботи з інструментами мережевого моделювання
2	Широкий спектр доступних мереж і протоколів	NetSim підтримує різноманітні мережі та протоколи, включаючи 5G NR, LTE, IoT, Ethernet, Wi-Fi, TCP/IP, маршрутизацію, VLAN, мобільні спеціальні мережі, автомобільні мережі, програмно визначені мережі, супутниковий зв'язок і підводні мережі
3	Великий діапазон варіантів ліцензування	NetSim пропонує гнучкі варіанти ліцензування, включаючи постійні/річні ліцензії, ліцензії на блокування вузлів/плаваючі ліцензії та параметри хмари/локальної мережі, що дозволяє користувачам вибирати та збирати компоненти відповідно до їхніх конкретних вимог
4	Можливість підключити NetSim до зовнішнього обладнання	NetSim можна підключити до реальних пристроїв, на яких запущено додатки, дозволяючи користувачам тестувати та оцінювати продуктивність своїх мережевих конфігурацій у реалістичному середовищі
5	Вихідний код C	NetSim постачається з вихідним кодом протоколу на C, що дозволяє користувачам змінювати та писати власні алгоритми. Він інтегрований із середовищем розробки MS Visual Studio для безперебійного кодування
6	Розширені утиліти	NetSim надає розширені утиліти, такі як пакетне виконання кількох симуляцій, багатопараметричне очищення та генератор сценаріїв мережі великого розміру
7	Взаємозв'язок із зовнішніми інструментами	NetSim легко інтегрується із зовнішніми інструментами, такими як MATLAB, Simulink, SUMO, Wireshark, Python, що дозволяє користувачам використовувати можливості цих інструментів для аналізу та візуалізації
8	Велика кількість прикладів	NetSim містить велику бібліотеку вбудованих прикладів і варіантів використання, що може заощадити час для користувачів, надаючи попередньо налаштовані сценарії, які служать відправною точкою для роботи симулятора

Джерело: удосконалено авторами на основі [16].

Останнім в рамках огляду став симулятор eNSP. Це китайський інструмент симуляції, який був розроблений корпорацією Huawei Technologies. У першу чергу він призначений для мережеских інженерів і архітекторів Huawei, яким необхідно перевірити проекти та конфігурації своїх мереж перед розгортанням їх у реальному світі. eNSP дозволяє створювати складні мережескі топології за допомогою графічного інтерфейсу. Цей симулятор має низку таких ключових особливостей:

- доступна підтримка пристроїв Huawei та образів NOS;
- простий у використанні графічний інтерфейс;
- наявність підтримки віртуальних мережеских функцій (VNF);
- легкість інтеграції з системою керування мережею Huawei eSpace.

До переваг симулятора eNSP відносяться: підтримка пристроїв і конфігурації Huawei з високою точністю і деталізацією; зручний інтерфейс для легкого доступу та керування; підтримка розширених функцій, таких як MPLS, BGP і VPLS; вбудовані інструменти для тестування мережі й усунення несправностей; відсутність плати за використання. Однак для нього притаманна і низка недоліків, а саме: підтримка лише пристроїв і конфігурації Huawei, що обмежує його універсальність порівняно з іншими інструментами; менший рівень деталізації і точності ніж у реальних пристроїв; менш широко використовується або підтримується порівняно з іншими інструментами; для коректної роботи може знадобитися додаткове програмне забезпечення та плагіни [17].

Після огляду найпопулярніших симуляторів мережі, що використовуються для навчання, було здійснено аналіз можливості використання кожного з розглянутих інструментів у процесі вивчення мереж. Його результати показали, що для учнів шкіл, у контексті уроків інформатики, найбільш реалістичним для використання є Cisco Packet Tracer. Цей симулятор також можна рекомендувати для самостійного вивчення мереж під час навчальних курсів. Критерієм оцінки, що дозволяє рекомендувати саме його, є простота в використанні. Для вивчення мереж в умовах закладу вищої освіти (ЗВО) можна обрати як Boson NetSim так і eNSP, але, зважаючи на недружню позицію Китаю стосовно України та велику історію американських санкцій проти корпорації Huawei Technologies, використання симулятора eNSP у вітчизняній освіті може мати багато ризиків, найголовнішим з яких є безпека користувачів і конфіденційність їх даних.

Cisco Packet Tracer не рекомендовано використовувати в умовах ЗВО через такі його особливості:

- eNSP підтримує образи NOS різних постачальників, тоді як Cisco Packet Tracer підтримує лише образи Cisco NOS;
- eNSP дозволяє автоматизацію та програмування мережі за допомогою сценаріїв Python, а Cisco Packet Tracer – ні;
- eNSP підтримує широкий спектр пристроїв, тоді як Cisco Packet Tracer – лише пристрої Cisco.

Простота використання Cisco Packet Tracer не може компенсувати таку кількість обмежень, тому на різних етапах учні та студенти повинні працювати з різними симуляторами мережі.

Для збільшення ефективності використання симуляторів у процесі навчання викладачам потрібно ініціювати такі практики:

- вивчати документацію й інструкції до використання різноманітних симуляторів під час занять;
- проводити тестування навичок практичного використання учнями симуляторів;
- регулярно оновлювати навчальний план (допомагає покращити продуктивність програми навчання);
- створювати тестові мережі на основі найкращих моделей і симуляцій з метою заохочення учнів.

Отже, процеси моделювання та симуляції комп'ютерних мереж мають вирішальне значення для успішного створення реальних мереж. Вони допомагають під час навчання, оскільки для використання симуляторів від учнів вимагається знати особливості протоколів та топології мереж.

Висновки та перспективи подальшого дослідження. В умовах перманентного розвитку інформаційних технологій неможливо уявити роботу компаній без комп'ютерних мереж. У ході

дослідження було розглянуто функціонал найпопулярніших симуляторів мережі (Cisco Packet Tracer, Boson NetSim та eNSP), а також згадано переваги та недоліки кожного з розглянутих інструментів, що допомогло провести аналіз можливості використання кожного з них у процесі вивчення мереж. Його результати показали, що для учнів шкіл, у контексті уроків інформатики, найбільш реалістичним для використання є Cisco Packet Tracer, а для студентів ЗВО – Boson NetSim та eNSP.

Також було надано власні рекомендації для ефективного впровадження цих інструментів у процес навчання. Ці рекомендації можуть бути задіяні як на рівні шкіл та ліцеїв, так і в закладах вищої освіти, що робить їх універсальними у використанні. Питання зміни підходів у вітчизняній освіті до процесу вивчення комп'ютерних мереж визначено актуальним для наступних досліджень, оскільки через технологічну революцію та стрімкий розвиток інформаційних технологій, який триває декілька останніх десятиліть, навчальний матеріал кожного року втрачає свою актуальність, а мережі, навпаки, стають дедалі складнішими.

Список бібліографічного опису:

1. Section Technologies. The Importance of Computer Networking in your Business. *LinkedIn*. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/importance-computer-networking-your-business-section-technologies> (дата звернення: 07.12.2024).
2. Importance of Computer Networking. *GeeksforGeeks*. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/importance-of-computer-networking/> (дата звернення: 07.12.2024).
3. What Is a Network Specialist and How to Become One. ZipRecruiter Marketplace Research Team. URL: <https://www.ziprecruiter.com/career/Network-Specialist/What-Is-How-to-Become#:~:text=Job%20Description%20Sample-What%20Is%20a%20Network%20Specialist?.develop%20more%20effective%20security%20protocol>. (дата звернення: 07.12.2024).
4. Дячук О. Ю., Колошук М. С., Окунькова О. О., Воротніков В. В. Комплексний аналіз програмного забезпечення для моделювання та емуляції комп'ютерних мереж: інструменти, застосування та майбутні напрями. *Технічна інженерія*. 2024. № 1 (93). С. 153–169. URL: [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-153-169](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-153-169) (дата звернення: 07.12.2024).
5. Охрімчук В. В., Охрімчук І. А. Аналіз засобів моделювання мереж щодо можливості їх використання для практичної підготовки фахівців із кібербезпеки. *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем*. 2024. Т. 1. № 27 (I). С. 56–68. URL: <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.27.05> (дата звернення: 07.12.2024).
6. Дреєва Г. М. Метод імітаційного моделювання трафіку комп'ютерної мережі з фрактальними властивостями. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2022. Т. 4. № 70. С. 75–78. URL: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.075> (дата звернення: 07.12.2024).
7. Моделі оцінки структурної живучості та надійності комп'ютерних мереж / А. Невзоров та ін. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2023. № 3. С. 164–169. URL: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-19> (дата звернення: 07.12.2024).
8. Khandergao K. S., Khedekar L. S. Study and systematic review of computer network simulation with NS-3. *International Journal of Interdisciplinary Innovative Research & Development (IJIIRD)*. 2021. Vol. 6, No. 1. P. 28–33. URL: <https://ijiird.com/wp-content/uploads/060106.pdf> (дата звернення: 07.12.2024).
9. A survey on network simulators, emulators, and testbeds used for research and education / J. Gomez et al. *Computer Networks*. 2023. Vol. 237. Article 110054. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.110054> (дата звернення: 07.12.2024).
10. Investigating and analyzing simulation tools of wireless sensor networks: A comprehensive survey / G. H. Adday et al. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 22938–22977. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3362889> (дата звернення: 07.12.2024).
11. Top 10 most popular network simulation tools. *I-MEDITA*. URL: <https://www.imedita.com/blog/top-10-list-of-network-simulation-tools/> (дата звернення: 07.12.2024).
12. Davronbekov D., Aripov J. Simulation modeling of the data network diagnosis system using GPSS. *Acta of Turin Polytechnic University in Tashkent*. 2023. Vol. 13, No. 2. P. 16–20. URL: <https://acta.polito.uz/index.php/journal/article/view/218> (дата звернення: 07.12.2024).
13. Noman H. M., Hussein M. A., Abdulrazzaq A. A. WiMax network design and simulation for middle technical university campus using OPNET modeler. *Iraqi Journal of Science*. 2023. Vol. 64, No. 12. P. 6586–6595. URL: <https://doi.org/10.24996/ij.s.2023.64.12.38> (дата звернення: 07.12.2024).
14. Krasnoshepa D. V., Siryk S. F. Heterogeneous computer networks simulation in Cisco Packet Tracer environment. *Scientific Collection «InterConf»*. 2022. No. 132. P. 466–469. URL: <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/article/view/1685/1715> (дата звернення: 08.12.2024).
15. Buggs C. Cisco Packet Tracer. *Softonic*. URL: <https://packet-tracer.en.softonic.com/> (дата звернення: 08.12.2024).
16. What is NetSim? *TrustRadius*. URL: <https://www.trustradius.com/products/netsim/reviews#overview> (дата звернення: 08.12.2024).
17. GNS3 vs EVE-NG vs Packet Tracer vs VIRL vs eNSP: Which network emulator or simulator is right for you? *Infosyte*. URL: <https://infosyte.com/network-simulators/> (дата звернення: 10.12.2024).

References:

1. Section Technologies. (2023, September 20). *The importance of computer networking in your business*. LinkedIn. Retrieved from <https://www.linkedin.com/pulse/importance-computer-networking-your-business-section-technologies>
2. GeeksforGeeks. (2020, September 17). *Importance of computer networking*. Retrieved from <https://www.geeksforgeeks.org/importance-of-computer-networking/>
3. ZipRecruiter Marketplace Research Team. (n. d.). *What is a network specialist and how to become one*. Retrieved from <https://www.ziprecruiter.com/career/Network-Specialist/What-Is-How-to-Become#:~:text=Job%20Description%20Sample-.What%20Is%20a%20Network%20Specialist?.develop%20more%20effective%20security%20protocol.>
4. Dyachuk, O. Y., Koloshchuk, M. S., Okunkova, O. O., & Vorotnikov, V. V. (2024). Comprehensive analysis of software for modeling and emulating computer networks: tools, applications and future directions. *Tekhnichna inzheneriya*, 1(93), 153–169. Retrieved from [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-153-169](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-153-169) [in Ukrainian].
5. Okhrimchuk, V., & Okhrimchuk, I. (2025). Analysis of network modelling tools for the possibility of their use for practical training of cybersecurity specialists. *Problems of Construction, Testing, Application and Operation of Complex Information Systems*, 1(27(I)), 56–68. Retrieved from <https://doi.org/10.46972/2076-1546.2024.27.05> [in Ukrainian].
6. Drieieva, H. (2022). A method of simulation of computer network traffic with fractal properties. *Control, Navigation and Communication Systems. Academic Journal*, 4(70), 75–78. Retrieved from <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.075> [in Ukrainian].
7. Nevzorov, A. Skliarenko, O. Kolodinska, Ya. & Nikolaievskiy, O. (2023). Assessment models of structural survival and reliability of computer networks. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, (3), 164–169. Retrieved from <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-19> [in Ukrainian].
8. Khanderao, K. S., & Khedekar, L. S. (2021). Study and systematic review of computer network simulation with NS-3. *International Journal of Interdisciplinary Innovative Research & Development (IJIRD)*, 6(1), 28–33. URL: Retrieved from <https://ijird.com/wp-content/uploads/060106.pdf>
9. Gomez, J., Kfoury, E. F., Crichigno, J., & Srivastava, G. (2023). A survey on network simulators, emulators, and testbeds used for research and education. *Computer Networks*, 237, Article 110054. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.110054>
10. Adday, G. H., Subramaniam, S. K., Zukarnain, Z. A., & Samian, N. (2024). Investigating and analyzing simulation tools of wireless sensor networks: A comprehensive survey. *IEEE Access*, 12, 22938–22977. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3362889>
11. I-MEDITA. (n. d.). *Top 10 Most Popular Network Simulation Tools*. Retrieved from <https://www.imedita.com/blog/top-10-list-of-network-simulation-tools/>
12. Davronbekov, D., & Aripov, J. (2023). Simulation modeling of the data network diagnosis system using GPSS. *Acta of Turin Polytechnic University in Tashkent*, 13(2), 16-20. Retrieved from <https://acta.polito.uz/index.php/journal/article/view/218> [in English].
13. Noman, H. M., Hussein, M. A., & Abdulrazzaq, A. A. (2023). WiMax network design and simulation for middle technical university campus using OPNET modeler. *Iraqi Journal of Science*, 64(12), 6586–6595. Retrieved from <https://doi.org/10.24996/ijs.2023.64.12.38>
14. Siryk, S. (2022). Heterogeneous computer networks simulation in Cisco Packet Tracer environment. *Scientific Collection «InterConf»*, 132, 466-469. Retrieved from <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/article/view/1685/1715>
15. Buggs, C. (n. d.). *Cisco Packet Tracer*. Softonic. Retrieved from <https://packet-tracer.en.softonic.com/>
16. NetSim. (n. d.). *What is NetSim?* Retrieved from <https://www.trustradius.com/products/netsim/reviews#overview>
17. Infosyte. (2023, March 13). *GNS3 vs EVE-NG vs Packet Tracer vs VIRL vs eNSP: Which Network Emulator or Simulator is Right for You?* Retrieved from <https://infosyte.com/network-simulators/>