

О.Ю. Дячук, ст. викладач  
М.С. Колощук, асистент  
О.О. Окунькова, ст. викладач  
В.В. Воротніков, д.т.н., доц.

*Державний університет «Житомирська політехніка»*

## **Комплексний аналіз програмного забезпечення для моделювання та емуляції комп'ютерних мереж: інструменти, застосування та майбутні напрями**

*У статті пропонується комплексний аналіз різноманітного програмного забезпечення для моделювання та емуляції комп'ютерних мереж, враховуючи як комерційні, так і рішення з відкритим вихідним кодом. Розглянуто широкий спектр інструментів, зокрема Cisco Packet Tracer, Cisco VIRL, UNetLab, Pnet Lab, EVE-NG, Boson NetSim, IMUNES, OPNET, eNSP, CML, D-Link TP-Link simulator, NS-3, GNS3, OMNeT++, Mininet, QualNet та CORE. Кожне програмне забезпечення проходить всебічний огляд на основі його функцій, підтримуваних протоколів, продуктивності, зручності використання та потенційного застосування в реальних сценаріях.*

*У статті інтерпретуються результати аналізу та обговорюються їхні наслідки для мережевих досліджень, освіти та промисловості. У ній ретельно висвітлюються сильні та слабкі сторони кожного програмного інструменту і пропонуються напрями для майбутніх досліджень. Серед цих напрямів – вирішення проблем масштабованості, покращення зручності використання та дослідження додатків у таких спеціалізованих сферах, як мережева безпека та програмно-визначені мережі (SDN). Крім того, стаття заглиблюється в потенційні реальні застосування проаналізованих програмних інструментів у різних сценаріях, враховуючи проектування, оптимізацію, тестування, навчання та дослідження мереж.*

*Таким чином, ця стаття надає цінну інформацію про програмне забезпечення для моделювання та емуляції мереж, задовольняючи потреби як дослідників, так і викладачів та професіоналів галузі. Пропонуючи детальний огляд і порівняння різних інструментів, вона допомагає у виборі найбільш відповідного програмного забезпечення для конкретних вимог і цілей, тим самим слугуючи цінним ресурсом для навігації в складному ландшафті технологій мережевого моделювання та емуляції.*

**Ключові слова:** моделювання; емуляція; симуляція; мережа; мережеві топології.

**Постановка проблеми.** Швидкий розвиток мережевих технологій і зростаюча складність сучасних мереж створюють значні проблеми для дослідників, педагогів і професіоналів галузі. Ефективне проектування, оптимізація та захист мережевих інфраструктур вимагає надійних інструментів і методологій для моделювання та емуляції. Однак широкий спектр доступних програмних інструментів, кожен зі своїми функціями, можливостями та обмеженнями, може ускладнити вибір найбільш придатного інструменту для певного завдання чи проекту.

У цьому формулюванні проблеми розглядається необхідність всебічного аналізу програмних засобів моделювання та емуляції мережі, щоб допомогти зацікавленим сторонам приймати обґрунтовані рішення. Відсутність чітких вказівок і контрольних показників для оцінки цих інструментів може призвести до неефективності, неоптимальних рішень і втрачених можливостей для інновацій і прогресу в дослідженнях і розробці мереж. Крім того, оскільки мережеві технології продовжують розвиватися, зростає попит на інструменти, які можуть адаптуватися до нових вимог, ефективно масштабуватися та забезпечувати точне представлення мережевого середовища реального світу.

Таким чином, постановка завдання спрямована на визначення ключових критеріїв для оцінки програмних засобів моделювання та емуляції мережі, таких як функціональність, продуктивність, зручність використання та застосовність до сценаріїв реального світу. Вирішуючи цю проблему, зацікавлені сторони можуть отримати уявлення про сильні та слабкі сторони різних інструментів, приймати обґрунтовані рішення при виборі інструментів для конкретних завдань або проектів і сприяти розвитку мережевих досліджень, освіти та галузевих практик.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Нещодавні дослідження та публікації з моделювання та емуляції мереж зосереджені на кількох ключових сферах, враховуючи вдосконалення програмних засобів, нові методології, практичні застосування та нові тенденції в мережевих технологіях [1–4]. Аналіз представленої літератури в контексті дослідницького ландшафту дає уявлення про поточний стан галузі та визначає сфери інтересів і потенційні майбутні напрями [6, 7, 18].

Методології емуляції та моделювання комп'ютерних мереж широко вивчали та застосовували в різних галузях досліджень, включно з аналізом продуктивності мереж, розробленням протоколів і проектуванням

систем. Огляд наявної літератури підкреслює важливість методів емуляції та моделювання для розуміння поведінки мережі, оцінювання мережевих протоколів і проектування ефективних мережевих архітектур.

Емуляція і моделювання комп'ютерних мереж мають на увазі створення віртуальних уявлень мережевих компонентів, як-от маршрутизатори, комутатори та хости, для імітації мережевої поведінки і взаємодії. Ці методології можна розділити на два основні підходи: дискретно-подієве моделювання і моделювання на рівні пакетів.

При дискретно-подієвому моделюванні мережеві події представляються як дискретні події в часі, що дозволяє дослідникам моделювати поведінку мережевих компонентів і протоколів з плином часу. Цей підхід часто використовується для вивчення показників продуктивності мережі, як-от пропускна здатність, затримка і втрата пакетів, за різних умов і конфігурацій трафіка.

Моделювання на рівні пакетів, з іншого боку, передбачає моделювання руху та обробки окремих мережевих пакетів в імітованому мережевому середовищі. Цей підхід забезпечує більш детальне і докладне уявлення про поведінку мережі і зазвичай використовується для розробки, тестування і перевірки протоколів.

Обидві методології – емуляції та моделювання – мають унікальні переваги та обмеження. Дискретно-подієве моделювання забезпечує високорівневу абстракцію поведінки мережі, даючи змогу дослідникам аналізувати продуктивність і поведінку мережі без урахування тонкощів взаємодії на рівні пакетів. Однак йому може не вистачає точності під час моделювання деяких мережевих явищ, таких як перевантаження і динаміка черг.

Моделювання на рівні пакетів, з іншого боку, пропонує більш детальне і точне уявлення поведінки мережі, імітуючи переміщення і обробку окремих пакетів. Цей підхід особливо корисний для вивчення складних мережевих протоколів і взаємодій, але може вимагати більше обчислювальних ресурсів і часу на моделювання порівняно з дискретно-подієвим моделюванням.

Переваги підходів емуляції та моделювання:

- можливість вивчати й аналізувати складну поведінку та взаємодію мереж у контрольованому середовищі;
- можливість експериментувати з різними мережевими конфігураціями, топологіями і схемами трафіка, не порушуючи роботу виробничих мереж;
- економічна ефективність порівняно з реальними експериментами, оскільки зникає необхідність у дорогому обладнанні та інфраструктурі [11].

Однак у цих методологій є й обмеження, зокрема:

- спрощення й абстракції можуть призвести до неточностей у моделюванні поведінки реальних мереж;
- обчислювальна складність і вимоги до ресурсів можуть обмежувати масштабованість симуляцій, особливо для великомасштабних мереж;
- складність досягнення балансу між точністю моделювання і швидкістю моделювання, особливо при моделюванні на рівні пакетів.

Важливість програмних інструментів у мережевих дослідженнях і розробках. Програмні інструменти відіграють вирішальну роль у сприянні діяльності з емуляції та моделювання мереж, надаючи дослідникам, викладачам і промисловим фахівцям необхідну інфраструктуру і можливості для створення, налаштування та аналізу модельованих мережевих середовищ [18]. Ці інструменти пропонують широкий спектр можливостей включно з:

- підтримкою різних мережевих протоколів і технологій;
- графічними користувацькими інтерфейсами для проектування мережевих топологій і налаштування параметрів моделювання;
- механізмами моделювання, які здатні точно моделювати поведінку і взаємодію мережі;
- інструментами аналізу продуктивності для оцінки мережевих показників і оптимізації мережевих конфігурацій.

Загалом методології емуляції та моделювання, що підтримуються програмними інструментами, необхідні для просування мережевих досліджень і розробок, надаючи дослідникам і практикам засоби для вивчення, аналізу та інновацій у галузі комп'ютерних мереж.

**Метою статті** є консолідація наявних знань і уявлень у сфері мережевого моделювання та емуляції шляхом всебічного аналізу широкого спектра програмних засобів, методологій, додатків і тенденцій для підтримки прийняття рішень, виявлення прогалин у дослідженнях, сприяння залученню спільноти та слугування освітнім ресурсом.

**Викладення основного матеріалу.** У сфері комп'ютерних мереж, що швидко розвивається, можливість точного моделювання, емуляції та симуляції мережевих середовищ відіграє ключову роль у розвитку досліджень, підвищенні рівня освіти та стимулюванні інновацій у промисловості. Методи емуляції та моделювання комп'ютерних мереж пропонують потужні інструменти для дослідження

поведінки складних мережевих систем, оцінки продуктивності мережевих протоколів і тестування нових мережевих рішень у контрольованому середовищі.

Емуляція та моделювання комп'ютерних мереж незамінні в різних галузях, включно з дослідженнями мереж, освітою та промисловістю [1]. У мережевих дослідженнях емуляція і моделювання надають дослідникам платформу для вивчення нових ідей, оцінювання теоретичних концепцій і перевірки пропонувананих мережевих архітектур перед їхнім розгортанням у реальних умовах. Моделюючи різні сценарії та умови роботи мережі, дослідники можуть отримати уявлення про динаміку мережі, виявити потенційні вузькі місця та оптимізувати роботу мережі з мінімальними ризиками та витратами (рис. 1).

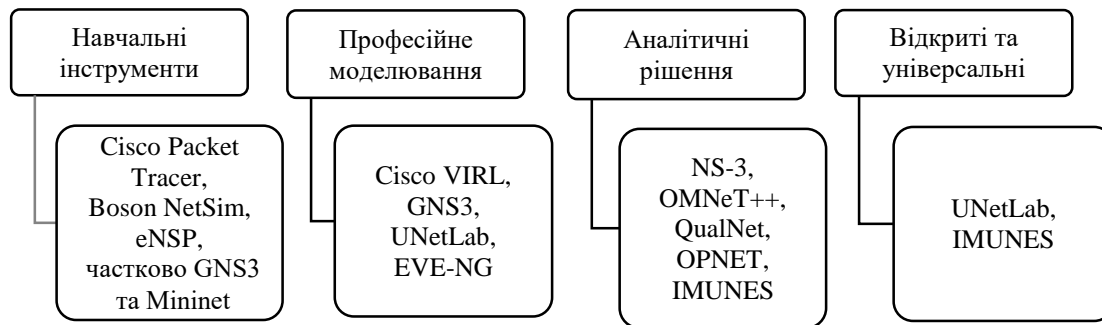


Рис. 1. Поділ програмного забезпечення за призначенням

У навчальних закладах інструменти емуляції та моделювання комп'ютерних мереж слугують неоціненною допомогою для навчання мережевим концепціям, протоколам і технологіям. Завдяки практичним експериментам з модельованими мережевими середовищами студенти можуть поглибити своє розуміння принципів роботи мережі, розвинути практичні навички налаштування мережі та усунення неполадок, а також вивчити вплив різних параметрів мережі на поведінку системи. Платформи емуляції та моделювання також сприяють спільному навчанню та експериментам, даючи змогу студентам працювати разом над мережевими проєктами та симуляціями незалежно від географічного положення.

У промисловості емуляція та моделювання комп'ютерних мереж необхідні для проєктування, тестування та оптимізації мережевих інфраструктур, сервісів і додатків. Моделюючи розгортання мережі та сценарії, організації можуть оцінити доцільність мережевих проєктів, спрогнозувати продуктивність нових технологій і виявити потенційні вразливості або ризики безпеки до впровадження змін у виробниче середовище. Засоби емуляції та моделювання також дають змогу мережевим інженерам і адміністраторам проводити реалістичне моделювання мережевих збоїв, стрибків трафіка та інших критичних подій для оцінювання стійкості та надійності мережевих архітектур і протоколів.

Оцінюючи можливості, характеристики та продуктивність обраних програмних інструментів, ми прагнемо дати уявлення про їхню придатність для різноманітних дослідницьких, освітніх і промислових застосувань. Зокрема, це дослідження спрямоване на:

- оцінку функціональності, масштабованості та простоту використання обраних програмних інструментів для емуляції та моделювання мереж;
- порівняння та зіставлення сильних та слабких сторін кожного програмного інструменту з точки зору точності моделювання, швидкості моделювання та підтримки різних мережевих сценаріїв;
- визначення потенційних варіантів використання та застосування проаналізованих програмних інструментів у мережевих дослідженнях, освіті та промисловості.

Програмні засоби, обрані для аналізу в цьому дослідженні:

Cisco Packet Tracer, Cisco VIRL, UNetLab, Pnet Lab, EVE-NG, Boson NetSim, IMUNES, OPNET SIMULATOR, eNSP, CML, D-Link TP-Link simulator, NS-3, GNS3, OMNeT++, Mininet, QualNet і CORE та інші, враховуючи як відкриті, так і комерційні рішення.

Вибір цих програмних інструментів був зумовлений їхньою популярністю, широким розповсюдженням у мережевому співтоваристві та різноманітними можливостями для емуляції та моделювання мереж. Провівши систематичну оцінку цих інструментів, ми прагнемо надати цінні ідеї та рекомендації для дослідників, викладачів і професіоналів, які бажають використовувати емуляцію та моделювання комп'ютерних мереж у своїй роботі.

Вибір програмних інструментів для аналізу в цьому дослідженні базувався на кількох ключових критеріях, серед яких:

- функціональність. Програмні засоби мають пропонувати комплексні функції та можливості для мережевої емуляції та моделювання, враховуючи підтримку різних мережевих протоколів, топологій та сценаріїв;

- простота використання. Зручні інтерфейси та інтуїтивно зрозумілий дизайн були пріоритетними для забезпечення доступності та зручності використання для дослідників, викладачів та професіоналів галузі з різним рівнем знань;
- масштабованість. Програмні інструменти мають бути здатні обробляти симуляції різного розміру і складності, від невеликих мережесценаріїв до великомасштабних корпоративних середовищ;
- багатозадачність. Можливість одночасного запуску декількох симуляцій та ефективного управління обчислювальними ресурсами вважається важливою для максимізації продуктивності та пропускну здатності;
- доступність. Перевага надавалася програмним засобам, які є широкодоступними, добре задокументованими та активно підтримуються їхніми розробниками або спільнотами користувачів.

Продуктивність кожного програмного інструменту оцінювалася за допомогою набору попередньо визначених метрик, зокрема:

- швидкість моделювання. Час, необхідний для виконання моделювання та отримання результатів;
- точність. Вірність результатів моделювання порівняно з реальними спостереженнями або теоретичними очікуваннями;
- використання ресурсів. Споживання обчислювальних ресурсів, таких як процесор, пам'ять і дисковий простір під час виконання симуляції;
- надійність. Стабільність і стійкість програмного інструменту за різних умов експлуатації та сценаріїв;
- зручність використання. Простота використання, доступність та інтуїтивність користувацького інтерфейсу та робочого процесу програмного інструменту.

Ці показники були використані для кількісної оцінки та порівняння ефективності кожного програмного інструменту, що дозволяє приймати обґрунтовані рішення та рекомендації на основі емпіричних даних та об'єктивних критеріїв.

#### **Cisco Packet Tracer**

Огляд: Cisco Packet Tracer – це інструмент моделювання мереж, розроблений компанією Cisco Systems для навчальних цілей, насамперед для вивчення мережесценаріїв Cisco [8].

Можливості: Packet Tracer пропонує зручний графічний інтерфейс для проектування, конфігурації та моделювання мережесценаріїв. Він містить широкий спектр пристроїв і модулів Cisco, що дозволяє користувачам практикувати конфігурування мережесценаріїв і протоколів.

Підтримувані протоколи: Packet Tracer підтримує різні мережесценаріїв, які зазвичай використовуються в мережесценаріїв Cisco, враховуючи TCP/IP, UDP, IPv4/IPv6, OSPF, EIGRP і VLAN.

Підтримувані мережесценаріїв топології: Packet Tracer дозволяє користувачам створювати різноманітні мережесценаріїв топології, включаючи локальні, глобальні та гібридні мережі. Він надає функцію перетягування для додавання пристроїв Cisco і підключення їх за допомогою імітованих кабелів.

Продуктивність і масштабованість: Packet Tracer оптимізовано для використання в навчальних цілях і для моделювання малих і середніх мереж. Хоча він не може запропонувати такий же рівень продуктивності і масштабованості, як інші інструменти, він забезпечує стабільне і надійне середовище для вивчення мережесценаріїв концепцій.

Зручність використання та користувацький інтерфейс: зручний інтерфейс та інтуїтивно зрозумілий дизайн Packet Tracer роблять його придатним для початківців та студентів, які вивчають мережесценаріїв концепції. Він пропонує інтерактивні симуляції та керовані дії, які допомагають користувачам практикувати налаштування мережесценаріїв пристроїв і протоколів.

Якість документації: Cisco надає вичерпну документацію та навчальні матеріали для Packet Tracer, враховуючи посібники користувача, підручники та навчальні відео. Крім того, Packet Tracer широко використовується в освітніх установах, що дозволяє легко знайти онлайн-ресурси та підтримку.

Переваги: симулятор Cisco Packet Tracer можна завантажити безкоштовно, якщо у вас є обліковий запис на Netacad.com. Packet Tracer вирізняється простотою використання та освітньою спрямованістю, що робить його ідеальним інструментом для студентів, які вивчають мережесценаріїв концепції. Він забезпечує практичний досвід навчання за допомогою інтерактивних симуляцій та керованої діяльності.

Недоліки: Packet Tracer може не мати розширених функцій і масштабованості порівняно з іншими інструментами, призначеними для дослідницького та промислового використання. Його орієнтація на мережесценаріїв технології Cisco може обмежити застосування для моделювання середовищ інших виробників.

#### **Cisco (VIRL)**

Огляд: Cisco Virtual Internet Routing Lab (VIRL) – це платформа для моделювання мереж, розроблена компанією Cisco Systems. Вона надає віртуалізоване середовище для емуляції мережесценаріїв пристроїв і протоколів Cisco [9].

**Функції:** VIRL дозволяє користувачам створювати складні мережеві топології, що складаються з маршрутизаторів, комутаторів та інших пристроїв Cisco. Він підтримує різні протоколи маршрутизації, такі як OSPF, EIGRP і BGP, а також технології комутації, такі як VLAN і STP.

**Підтримувані протоколи:** VIRL підтримує широкий спектр мережевих протоколів, які зазвичай використовуються в середовищах Cisco, враховуючи TCP/IP, UDP, IPv4/IPv6, MPLS та інші.

**Підтримувані мережеві топології:** VIRL дозволяє користувачам проектувати і налаштовувати різноманітні мережеві топології, включаючи локальні, глобальні та гібридні мережі. Він пропонує гнучкість у створенні топології та підтримує складні ієрархічні конструкції.

**Продуктивність і масштабованість:** VIRL пропонує хорошу продуктивність і масштабованість, здатний обробляти симуляції середніх і великомасштабних мережевих сценаріїв. Масштабованість може залежати від апаратних ресурсів, виділених для віртуалізованих пристроїв, і складності топології.

**Зручність використання та користувацький інтерфейс:** VIRL надає зручний графічний інтерфейс для проектування та управління мережевими топологіями. Він пропонує функцію перетягування для додавання пристроїв і з'єднань, що робить його доступним для користувачів з різним рівнем досвіду.

**Якість документації:** Cisco пропонує вичерпну документацію та навчальні ресурси для VIRL, враховуючи інструкції з встановлення, посібники користувача та відеоуроки. Крім того, VIRL користується перевагами розгалуженої мережі підтримки Cisco та онлайн-спільноти.

**Переваги:** VIRL чудово підтримує мережеві технології та протоколи Cisco, що робить його ідеальним вибором для користувачів, знайомих з середовищами Cisco. Зручний інтерфейс і велика документація роблять його придатним як для освітнього, так і для професійного використання.

**Недоліки:** модель ліцензування та вартість VIRL може бути надто високою для деяких користувачів, особливо для окремих дослідників або невеликих організацій. Крім того, орієнтація VIRL на технології Cisco може обмежити його застосування для моделювання середовищ інших виробників.

#### **Cisco Modeling Labs (CML)**

**Огляд:** Cisco Modeling Labs (CML) – це платформа мережевого моделювання, розроблена компанією Cisco Systems. Вона надає віртуалізоване середовище для моделювання і тестування складних мережевих сценаріїв [10].

**Функції:** CML дозволяє користувачам створювати і моделювати мережеві топології, що складаються з мережевих пристроїв і технологій Cisco. Підтримує різні протоколи маршрутизації, технології комутації та мережеві сервіси.

**Підтримувані протоколи:** CML підтримує повний набір мережевих протоколів, які зазвичай використовуються в середовищах Cisco, враховуючи TCP/IP, OSPF, EIGRP, BGP, VLAN та інші.

**Підтримувані мережеві топології:** CML пропонує гнучкість у проектуванні та налаштуванні мережевих топологій, підтримуючи різні конфігурації, такі як архітектури «точка – точка», «зірка» та «сітка». Він дозволяє користувачам створювати власні топології за допомогою графічного інтерфейсу.

**Продуктивність і масштабованість:** CML надає високопродуктивні механізми моделювання, здатні обробляти симуляції великомасштабних мережевих сценаріїв. Масштабованість може залежати від апаратних ресурсів, доступних на хост-машині, і складності симуляції.

**Зручність використання та користувацький інтерфейс:** CML пропонує зручний графічний інтерфейс для проектування, конфігурації та запуску мережевих симуляцій. Він надає інтуїтивно зрозумілі інструменти та майстри, які допомагають користувачам створювати та керувати проектами моделювання.

**Якість документації:** Cisco надає вичерпну документацію та навчальні матеріали для CML, враховуючи посібники користувача, навчальні посібники та технічну документацію. Документація охоплює встановлення, конфігурацію та використання програмного забезпечення.

**Переваги:** CML чудово підтримує мережеві технології та протоколи Cisco, надаючи користувачам реалістичне середовище для моделювання та тестування складних мережевих сценаріїв. Графічний інтерфейс та інтуїтивно зрозумілий дизайн підвищують зручність використання для користувачів усіх рівнів кваліфікації.

**Недоліки:** комерційна модель ліцензування CML може бути бар'єром для деяких користувачів, особливо для окремих дослідників або студентів. Крім того, зосередженість на технологіях Cisco може обмежити його застосування для моделювання середовищ або сценаріїв, що не належать до Cisco.

#### **UNetLab**

**Огляд:** Unified Networking Lab (UNetLab) – це мережевий емулятор з відкритим вихідним кодом, заснований на платформах віртуалізації Dynamips і QEMU. Надає платформу для емуляції різних мережевих пристроїв і протоколів [1].

**Функції:** UNetLab дозволяє користувачам створювати віртуалізовані мережеві середовища, що складаються з маршрутизаторів, комутаторів, брандмауерів та інших пристроїв. Він підтримує широкий спектр мережевих протоколів і технологій, враховуючи TCP/IP, UDP, VLAN і MPLS.

Підтримувані протоколи: UNetLab підтримує повний набір мережевих протоколів, які зазвичай використовуються в комп'ютерних мережах, що робить його придатним для моделювання різноманітних мережевих сценаріїв і середовищ.

Підтримувані мережеві топології: UNetLab пропонує гнучкість у проектуванні та конфігуруванні мережевих топологій, підтримуючи різні конфігурації, такі як архітектури типу hub-and-spoke, mesh та багаторівневі архітектури.

Продуктивність і масштабованість: UNetLab забезпечує хорошу продуктивність і масштабованість, здатний обробляти симуляції середніх і великомасштабних мережевих сценаріїв. Масштабованість може залежати від апаратних ресурсів, виділених для віртуалізованих пристроїв, і складності топології.

Зручність використання та користувацький інтерфейс: UNetLab пропонує вебінтерфейс для управління мережевими топологіями і моделюванням. Він забезпечує простий та інтуїтивно зрозумілий користувацький інтерфейс, що дозволяє користувачам легко створювати, налаштовувати та запускати симуляції.

Якість документації: UNetLab пропонує документацію та посібники користувача, щоб допомогти користувачам розпочати роботу з платформою. Однак наявність вичерпної документації та ресурсів підтримки може відрізнятись від комерційних рішень.

Переваги: UNetLab з відкритим вихідним кодом дозволяє налаштовувати і розширювати платформу, що робить її придатною для користувачів, які прагнуть гнучкості і контролю над своїми середовищами моделювання. Його вебінтерфейс забезпечує легкий доступ та управління для користувачів.

Недоліки: UNetLab може не вистачати рівня підтримки та документації, який пропонують комерційні рішення. Крім того, її залежність від внесків спільноти може призвести до повільнішого оновлення та покращення функцій порівняно з пропрієтарними платформами.

### **Pnet Lab**

Огляд: Pnet Lab – це платформа для моделювання мереж, розроблена компанією PnetLab LLC. Вона надає віртуалізоване середовище для створення та тестування мережевих конфігурацій з використанням реального мережевого обладнання [24].

Функції: Pnet Lab дозволяє користувачам емулювати мережеві топології, що складаються з фізичних і віртуальних мережевих пристроїв. Підтримує різні мережеві протоколи і технології, враховуючи TCP/IP, VLAN і MPLS.

Підтримувані протоколи: Pnet Lab підтримує широкий спектр мережевих протоколів, які зазвичай використовуються в комп'ютерних мережах, що робить його придатним для моделювання різноманітних мережевих сценаріїв і середовищ.

Підтримувані мережеві топології: Pnet Lab пропонує гнучкість у проектуванні та конфігуруванні мережевих топологій, підтримуючи різні конфігурації, такі як топологія «вузол – спиця», комірчаста та гібридна архітектури.

Продуктивність і масштабованість: Pnet Lab забезпечує хорошу продуктивність і масштабованість для моделювання середньо- і великомасштабних мережевих сценаріїв. Його продуктивність може залежати від апаратних ресурсів, доступних на хост-машині, і складності симуляції.

Зручність використання та користувацький інтерфейс: Pnet Lab пропонує зручний графічний інтерфейс для проектування та управління мережевими топологіями. Він надає інтуїтивно зрозумілі інструменти для додавання пристроїв, налаштування з'єднань і запуску симуляцій.

Якість документації: Pnet Lab надає документацію та посібники користувача, щоб допомогти користувачам розпочати роботу з платформою. Однак наявність вичерпної документації та ресурсів підтримки може відрізнятись від комерційних рішень.

Переваги: орієнтація Pnet Lab як на фізичні, так і на віртуальні мережеві пристрої забезпечує гнучкість і реалістичність у сценаріях моделювання мережі. Зручний інтерфейс та інтуїтивно зрозумілий дизайн підвищують зручність використання для користувачів усіх рівнів кваліфікації.

Недоліки: Pnet Lab може не вистачати рівня підтримки та документації, що пропонується більшими комерційними рішеннями. Крім того, його доступність може бути обмеженою порівняно з більш широко визнаними платформами.

### **EVE-NG**

Огляд: Enterprise Virtual Environment – Next Generation (EVE-NG) – це платформа емуляції мережі, призначена для створення віртуалізованих мережевих середовищ з використанням контейнерів Docker і віртуальних машин [13].

Функції: EVE-NG дозволяє користувачам емулювати складні мережеві топології, що складаються з маршрутизаторів, комутаторів, брандмауерів та інших пристроїв. Він підтримує широкий спектр мережевих протоколів і технологій, враховуючи TCP/IP, UDP, IPv4/IPv6, VLAN і MPLS.

Підтримувані протоколи: EVE-NG підтримує повний набір мережевих протоколів, які зазвичай використовуються в комп'ютерних мережах, що робить його придатним для моделювання різноманітних мережевих сценаріїв та середовищ.

Підтримувані мережеві топології: EVE-NG забезпечує гнучкість у проектуванні та конфігуруванні мережевих топологій, підтримуючи різні конфігурації, такі як архітектури типу hub-and-spoke, кільце та full-mesh.

Продуктивність і масштабованість: EVE-NG пропонує хорошу продуктивність і масштабованість, здатний обробляти симуляції середніх і великомасштабних мережевих сценаріїв. Масштабованість може залежати від апаратних ресурсів, виділених для віртуалізованих пристроїв, і складності топології.

Зручність використання та користувацький інтерфейс: EVE-NG пропонує вебінтерфейс для управління мережевими топологіями та симуляціями. Він забезпечує інтуїтивно зрозумілий і зручний інтерфейс, що дозволяє користувачам легко створювати, налаштовувати і запускати симуляції.

Якість документації: EVE-NG пропонує документацію та посібники користувача, щоб допомогти користувачам розпочати роботу з платформою. Документація охоплює посібники зі встановлення, інструкції з конфігурації та поради щодо усунення несправностей, надаючи користувачам всебічну підтримку.

Переваги: Підтримка EVE-NG контейнерів Docker та віртуальних машин забезпечує гнучкість та масштабованість, що робить її придатною для широкого спектра сценаріїв емуляції мережі. Його вебінтерфейс та інтуїтивно зрозумілий дизайн підвищують зручність використання для користувачів усіх рівнів кваліфікації.

Недоліки: EVE-NG може вимагати значних обчислювальних ресурсів, особливо при запуску масштабних мережевих симуляцій з декількома віртуалізованими пристроями. Крім того, залежність від сторонніх технологій віртуалізації може призвести до проблем сумісності або залежностей.

### **Boson NetSim**

Огляд: Boson NetSim – це комерційний мережевий симулятор, розроблений компанією Boson Software. Він надає платформу для моделювання мережевих середовищ і сценаріїв Cisco [20].

Функції: NetSim дозволяє користувачам імітувати маршрутизатори, комутатори та інші мережеві пристрої Cisco у віртуальному середовищі. Він підтримує різні команди і функції Cisco IOS, що дозволяє користувачам практикувати конфігурацію і усунення несправностей.

Підтримувані протоколи: NetSim орієнтований на мережеві технології та протоколи Cisco, враховуючи TCP/IP, OSPF, EIGRP, VLAN та інші. Забезпечує реалістичну симуляцію пристроїв Cisco та їхньої поведінки.

Підтримувані мережеві топології: NetSim пропонує готові мережеві топології і сценарії, призначені для відтворення реальних мережевих середовищ Cisco. Він також дозволяє користувачам створювати власні топології за допомогою інтерфейсу перетягування.

Продуктивність і масштабованість: NetSim забезпечує хорошу продуктивність і масштабованість для моделювання середньо- і великомасштабних мережевих сценаріїв Cisco. Його продуктивність може залежати від апаратних ресурсів, доступних на хост-машині, і складності симуляції.

Зручність використання та користувацький інтерфейс: NetSim пропонує зручний графічний інтерфейс для проектування і налаштування мережевих топологій. Він містить покрокові лабораторні роботи та вправи, які допомагають користувачам практикувати мережеві концепції та навички.

Якість документації: Boson Software надає вичерпну документацію та навчальні матеріали для NetSim, враховуючи посібники користувача, лабораторні посібники та відеоуроки. Документація охоплює встановлення, налаштування та використання програмного забезпечення.

Переваги: NetSim вирізняється своєю орієнтацією на мережеві технології Cisco, забезпечуючи реалістичне моделююче середовище, в якому користувачі можуть відпрацьовувати завдання з конфігурації та усунення несправностей. Зручний інтерфейс і керовані лабораторні роботи роблять його придатним для освітніх цілей і підготовки до сертифікації.

Недоліки: зосередженість NetSim на технологіях Cisco може обмежити його застосування для моделювання середовищ або сценаріїв, що не належать до Cisco. Крім того, його комерційна модель ліцензування може бути бар'єром для деяких користувачів, особливо для окремих дослідників або студентів.

### **IMUNES**

Огляд: IMUNES (Integrated Multiprotocol Network Emulator/Simulator) – це мережевий емулятор з відкритим вихідним кодом, розроблений Загребським університетом. Він надає платформу для моделювання та емуляції різноманітних мережевих сценаріїв і протоколів [17].

Функції: IMUNES дозволяє користувачам емулювати складні мережеві топології, що складаються з маршрутизаторів, комутаторів, хостів та інших пристроїв. Він підтримує різні мережеві протоколи і технології, враховуючи TCP/IP, UDP, IPv4/IPv6, OSPF та інші.

Підтримувані протоколи: IMUNES підтримує широкий спектр мережевих протоколів, які зазвичай використовуються в комп'ютерних мережах, що робить його придатним для моделювання різноманітних мережевих сценаріїв і середовищ.

Підтримувані мережеві топології: IMUNES пропонує гнучкість у проектуванні та налаштуванні мережевих топологій, підтримуючи різні конфігурації, такі як комірчаста, зіркоподібна та ієрархічна архітектури. Він дозволяє користувачам створювати власні топології за допомогою графічного інтерфейсу.

Продуктивність і масштабованість: IMUNES забезпечує хорошу продуктивність і масштабованість, здатний обробляти симуляції середніх і великомасштабних мережевих сценаріїв. Його продуктивність може залежати від апаратних ресурсів, виділених для віртуалізованих пристроїв, і складності топології.

Зручність використання та користувацький інтерфейс: IMUNES пропонує графічний інтерфейс для проектування та налаштування мережевих топологій. Він забезпечує інтуїтивно зрозумілий і зручний інтерфейс, що дозволяє користувачам легко створювати, налаштовувати і запускати симуляції.

Якість документації: IMUNES пропонує документацію та посібники користувача, щоб допомогти користувачам розпочати роботу з платформою. Однак наявність вичерпної документації та ресурсів підтримки може відрізнятись від комерційних рішень.

Переваги: відкритий характер IMUNES дозволяє налаштовувати і розширювати його, що робить його придатним для користувачів, які прагнуть гнучкості і контролю над своїми середовищами моделювання. Його графічний інтерфейс забезпечує легкий доступ та управління для користувачів.

Недоліки: IMUNES може не вистачати рівня підтримки та документації, який пропонують комерційні рішення. Крім того, її залежність від внесків спільноти може призвести до повільнішого оновлення та покращення функцій порівняно з пропрієтарними платформами.

### **OPNET**

Огляд: OPNET (Optimized Network Engineering Tools) Simulator – це комерційне програмне забезпечення для моделювання мереж, розроблене компанією Riverbed Technology. Це комплексна платформа для моделювання, аналізу та оптимізації продуктивності мережі [23].

Функції: OPNET Simulator пропонує широкий спектр функцій для мережевого моделювання, імітації та аналізу. Він підтримує різні мережеві технології та протоколи, враховуючи TCP/IP, UDP, MPLS та інші.

Підтримувані протоколи: OPNET Simulator підтримує повний набір мережевих протоколів, які зазвичай використовуються в комп'ютерних мережах, що робить його придатним для моделювання різноманітних мережевих сценаріїв і середовищ.

Підтримувані мережеві топології: OPNET Simulator пропонує гнучкість у проектуванні та налаштуванні мережевих топологій, підтримуючи різні конфігурації, такі як «точка – точка», «зірка» та комірчаста архітектура. Він дозволяє користувачам створювати власні топології за допомогою графічного інтерфейсу.

Продуктивність і масштабованість: OPNET Simulator надає високопродуктивні механізми моделювання, здатні обробляти симуляції великомасштабних мережевих сценаріїв. Його масштабованість може залежати від апаратних ресурсів, доступних на хост-машині, і складності симуляції.

Зручність використання та користувацький інтерфейс: OPNET Simulator пропонує графічний інтерфейс для проектування, конфігурації та запуску мережевих симуляцій. Він надає інтуїтивно зрозумілі інструменти та майстри, які допомагають користувачам створювати та керувати проектами моделювання.

Якість документації: Riverbed Technology надає вичерпну документацію та навчальні матеріали для OPNET Simulator, враховуючи керівництва користувача, навчальні посібники та технічну документацію. Документація охоплює встановлення, конфігурацію та використання програмного забезпечення.

Переваги: OPNET Simulator вирізняється підтримкою мережевого моделювання та аналізу, надаючи розширені можливості для оптимізації продуктивності та надійності мережі. Його графічний інтерфейс та інтуїтивно зрозумілий дизайн підвищують зручність використання для користувачів усіх рівнів кваліфікації.

Недоліки: комерційна модель ліцензування OPNET Simulator може бути бар'єром для деяких користувачів, особливо для окремих дослідників або студентів. Крім того, зосередженість на оптимізації продуктивності мережі може обмежити його застосування для певних сценаріїв моделювання.

### **eNSP Simulator (Enterprise Network Simulation Platform)**

Огляд: eNSP – це платформа для моделювання мереж, розроблена компанією «Huawei Technologies». Вона забезпечує віртуалізоване середовище для моделювання мережевих пристроїв і технологій Huawei [16].

Функції: eNSP дозволяє користувачам емулювати складні мережеві топології, що складаються з маршрутизаторів, комутаторів, брандмауерів та інших пристроїв Huawei. Він підтримує різні мережеві протоколи і технології, враховуючи TCP/IP, OSPF, BGP, VLAN і MPLS.

Підтримувані протоколи: eNSP фокусується на мережевих технологіях і протоколах Huawei, забезпечуючи реалістичне середовище моделювання, в якому користувачі можуть відпрацьовувати завдання з конфігурації та усунення несправностей.

Підтримувані мережеві топології: eNSP пропонує заздалегідь створені мережеві топології та сценарії, призначені для відтворення реальних мережевих середовищ Huawei. Він також дозволяє користувачам створювати власні топології за допомогою інтерфейсу перетягування.



Продуктивність і масштабованість: eNSP забезпечує хорошу продуктивність і масштабованість для моделювання середньо- і великомасштабних мережесценаріїв Huawei. Його продуктивність може залежати від апаратних ресурсів, доступних на хост-машині, і складності симуляції.

Зручність використання та користувацький інтерфейс: eNSP пропонує зручний графічний інтерфейс для проєктування та управління мережевими топологіями. Він надає інтуїтивно зрозумілі інструменти для додавання пристроїв, налаштування з'єднань і запуску симуляцій.

Якість документації: Huawei надає вичерпну документацію та навчальні матеріали для eNSP, враховуючи посібники користувача, лабораторні посібники та відеоуроки. Документація охоплює встановлення, налаштування та використання програмного забезпечення.

Переваги: eNSP вирізняється своєю орієнтацією на мережеві технології Huawei, забезпечуючи реалістичне середовище для моделювання, в якому користувачі можуть попрактикуватися в конфігуруванні та усуненні несправностей, характерних для пристроїв Huawei. Зручний інтерфейс і керувані лабораторні роботи роблять його придатним для освітніх цілей і підготовки до сертифікації.

Недоліки: зосередженість eNSP на технологіях Huawei може обмежити його застосування для моделювання середовищ або сценаріїв, що не належать до продукції Huawei. Крім того, його доступність може бути обмежена клієнтами або партнерами Huawei.

### **NS-3 (Network Simulator 3)**

Огляд: NS-3 – це мережевий симулятор дискретних подій, відомий своєю розширюваністю та гнучкістю. Він написаний на C++ і забезпечує підтримку широкого спектра мережесценаріїв і технологій [21].

Можливості: NS-3 пропонує повний набір функцій для емуляції та моделювання мереж, враховуючи підтримку TCP/IP, UDP, IPv4/IPv6, Wi-Fi, Ethernet і різних протоколів маршрутизації (наприклад, OSPF, BGP). Він також містить модулі для бездротових мереж, інтернет-маршрутизації та моделювання мережесценаріїв.

Підтримувані протоколи: NS-3 підтримує широкий спектр мережесценаріїв, що робить його придатним для моделювання різноманітних мережесценаріїв і середовищ.

Підтримувані мережеві топології: NS-3 дозволяє користувачам створювати власні мережеві топології за допомогою гнучкого API. Він підтримує різні мережеві конфігурації, зокрема мережі типу «точка – точка», «зірка», «сітка» і багатовузлові мережі.

Продуктивність і масштабованість: NS-3 відомий своїм високопродуктивним механізмом моделювання, здатним ефективно обробляти симуляції середньо- та великомасштабних мережесценаріїв. Однак масштабованість NS-3 може бути обмежена для дуже великих мереж через його вимоги до пам'яті та обчислювальних ресурсів.

Зручність використання та користувацький інтерфейс: NS-3 насамперед орієнтований на досвідчених користувачів і дослідників, знайомих з програмуванням на C++. Хоча він пропонує багатий набір функцій, його крива навчання може бути крутою для початківців. Інтерфейс користувача базується на командному рядку, що може бути менш інтуїтивно зрозумілим для деяких користувачів.

Якість документації: NS-3 надає обширну документацію, враховуючи навчальні посібники, приклади та посилання на API. Однак через її складність і розширюваність навігація по документації може вимагати певних зусиль.

Переваги: NS-3 вирізняється розширюваністю і гнучкістю, що дозволяє користувачам налаштовувати і розширювати його функціональність відповідно до конкретних дослідницьких потреб. Вона також виграє від активного розвитку та активної спільноти користувачів.

Недоліки: крива навчання і складність NS-3 може відлякати користувачів-початківців. Крім того, його масштабованість для дуже великих мережесценаріїв може бути обмеженою порівняно з іншими інструментами.

### **GNS3 (Graphical Network Simulator-3)**

Огляд: GNS3 – це графічний мережевий симулятор, призначений для створення складних мережесценаріїв з використанням віртуальних машин і реальних мережесценаріїв [14].

Можливості: GNS3 пропонує зручний графічний інтерфейс для проєктування та налаштування мережесценаріїв. Він підтримує інтеграцію з платформами віртуалізації, такими як VMware і VirtualBox, що дозволяє користувачам запускати віртуалізовані мережеві пристрої та прилади.

Підтримувані протоколи: GNS3 підтримує широкий спектр мережесценаріїв, враховуючи TCP/IP, UDP, IPv4/IPv6, MPLS, BGP і OSPF. Він також забезпечує підтримку Cisco IOS, Juniper JunOS та інших мережесценаріїв операційних систем.

Підтримувані мережеві топології: GNS3 дозволяє користувачам створювати складні мережеві топології, що складаються з віртуальних маршрутизаторів, комутаторів, брандмауерів та інших мережесценаріїв пристроїв. Підтримуються різні мережеві конфігурації, включаючи топології типу hub-and-spoke, full-mesh та ієрархічні топології.

Продуктивність і масштабованість: GNS3 здатний моделювати мережеві топології середнього та великого масштабу, залежно від ресурсів, доступних на хост-машині. Його продуктивність і масштабованість можуть бути обмежені апаратними ресурсами, виділеними для віртуалізованих мережевих пристроїв.

Зручність використання та користувацький інтерфейс: GNS3 пропонує зручний графічний інтерфейс, який спрощує процес проектування та налаштування мережевих топологій. Він надає функцію перетягування для додавання мережевих пристроїв і підключення їх за допомогою віртуальних кабелів.

Якість документації: GNS3 надає вичерпну документацію, зокрема настанови зі встановлення, підручники та посібники користувача. Крім того, форуми спільноти користувачів та онлайнві ресурси надають користувачам цінну підтримку і допомогу.

Переваги: GNS3 вирізняється простотою використання та графічним інтерфейсом, що робить її доступною для користувачів з різним рівнем знань. Вона також має велику і активну спільноту користувачів, яка надає широкі ресурси і підтримку.

Недоліки: GNS3 може вимагати значних обчислювальних ресурсів, особливо під час виконання великомасштабних мережевих симуляцій з декількома віртуалізованими пристроями. Крім того, його підтримка реальних мережевих пристроїв може бути обмеженою порівняно з іншими інструментами.

### **OMNeT++ (Objective Modular Network Testbed на C++)**

Огляд: OMNeT++ – це середовище дискретно-подієвого моделювання, яке в основному використовується для моделювання та імітації комунікаційних мереж, протоколів та розподілених систем [22].

Можливості: OMNeT++ пропонує модульну архітектуру та розширюваний фреймворк для розробки мережевих симуляцій. Забезпечує підтримку різних мережевих протоколів, враховуючи TCP/IP, UDP, IPv4/IPv6 та користувацькі протоколи.

Підтримувані протоколи: OMNeT++ підтримує широкий спектр мережевих протоколів і технологій, що робить його придатним для моделювання різноманітних мережевих сценаріїв і середовищ.

Підтримувані мережеві топології: OMNeT++ дозволяє користувачам створювати власні мережеві топології, використовуючи модульні компоненти та імітаційні моделі. Він підтримує різні мережеві конфігурації, враховуючи дротові, бездротові та гібридні мережі.

Продуктивність та масштабованість: OMNeT++ оптимізовано для продуктивності та масштабованості, він здатний обробляти симуляції середніх і великих мережевих сценаріїв. Його модульна архітектура дозволяє користувачам налаштовувати та оптимізувати симуляції для конкретних дослідницьких цілей.

Зручність використання та користувацький інтерфейс: OMNeT++ надає інтерфейс командного рядка для запуску симуляцій та управління імітаційними моделями. Хоча він не може запропонувати такий самий зручний інтерфейс, як графічні інструменти моделювання, він надає потужні можливості для проектування, конфігурації та виконання мережевих симуляцій. Крім того, OMNeT++ пропонує широку підтримку візуалізації та аналізу результатів, що дозволяє користувачам ефективно аналізувати результати моделювання та метрики.

Якість документації: OMNeT++ пропонує вичерпну документацію, враховуючи посібники користувача, навчальні посібники та посилання на API. Крім того, активна спільнота користувачів надає цінну підтримку та ресурси для користувачів, які потребують допомоги в розробці симуляцій та усуненні несправностей.

Переваги: OMNeT++ вирізняється своєю гнучкістю та розширюваністю, що дозволяє користувачам моделювати та імітувати складні мережеві сценарії з точністю і достовірністю. Модульна архітектура та підтримка розробки власних протоколів роблять його придатним для широкого спектра науково-дослідницьких проєктів.

Недоліки: крива навчання OMNeT++ може бути крутою для користувачів, які не знайомі з концепціями дискретно-подієвого моделювання та програмуванням на C++. Крім того, інтерфейс командного рядка і відсутність графічного інтерфейсу можуть відлякати деяких користувачів, які надають перевагу візуальним інструментам моделювання.

### **Mininet**

Огляд: Mininet – емулятор мережі з відкритим вихідним кодом, призначений для створення реалістичних віртуальних мережевих середовищ з використанням контейнерів Linux (LXC) або віртуальних машин (VM) [19].

Можливості: Mininet надає легку і масштабовану платформу для емуляції мережевих топологій за допомогою стандартних утиліт Linux і просторів мережевих імен. Підтримує різні мережеві протоколи, враховуючи TCP/IP, UDP, Ethernet і OpenFlow.

Підтримувані протоколи: Mininet підтримує широкий спектр мережевих протоколів, які зазвичай використовуються в комп'ютерних мережах, що робить його придатним для моделювання різноманітних мережевих сценаріїв і середовищ.

Підтримувані мережеві топології: Mininet дозволяє користувачам створювати власні мережеві топології за допомогою API на основі Python або інтерфейсу командного рядка. Він підтримує різні мережеві конфігурації, такі як дерево, кільце, сітку та багатохоб-топологію.

Продуктивність і масштабованість: Mininet оптимізований для продуктивності та масштабованості, здатний ефективно емулювати середні та великі мережеві топології. Його легка архітектура та ресурсоефективний дизайн роблять його придатним для запуску декількох паралельних симуляцій на одній хост-машині.

Зручність використання та користувацький інтерфейс: Mininet надає простий та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс командного рядка для створення та управління мережевими топологіями. Хоча він не може запропонувати такий же рівень графічної візуалізації, як інші інструменти, його легка конструкція і простота використання роблять його доступним для користувачів з різним рівнем знань.

Якість документації: Mininet пропонує вичерпну документацію, враховуючи інструкції з встановлення, навчальні посібники та посилання на API. Крім того, активна спільнота користувачів надає цінну підтримку та ресурси для користувачів, які потребують допомоги з емуляцією та моделюванням мереж.

Переваги: Mininet вирізняється простотою та легкістю використання, що робить його ідеальним вибором для користувачів, які хочуть швидко налаштувати та експериментувати з мережевими топологіями. Його легка конструкція і масштабованість роблять його придатним як для освітніх, так і для дослідницьких цілей.

Недоліки: Mininet може не мати розширених функцій і можливостей налаштування порівняно з іншими інструментами моделювання. Його залежність від контейнерів Linux може обмежити його сумісність з певними операційними системами та середовищами.

### **QualNet**

Огляд: QualNet – це комерційне програмне забезпечення для моделювання мереж, розроблене компанією Scalable Network Technologies. Воно пропонує розширені можливості для моделювання та імітації різних типів мереж, враховуючи дротові, бездротові, мобільні та спеціальні мережі. QualNet відомий своїми високоточними симуляціями, широкою підтримкою протоколів і можливостями всебічного аналізу [25].

Особливості: підтримка широкого спектра мережевих протоколів, враховуючи TCP/IP, UDP, HTTP, FTP, IEEE 802.11, 802.15, 802.16 та інші. Гнучке проектування топології мережі, що дозволяє користувачам створювати складні мережеві сценарії з безліччю вузлів, зв'язків і моделей трафіка. Реалістичні моделі мобільності для імітації мобільних і спеціальних мереж, разом з моделями випадкових точок, випадкових переміщень і групової мобільності. Детальні показники продуктивності та інструменти аналізу для оцінки пропускної здатності мережі, затримок, втрат пакетів та інших ключових показників продуктивності.

Продуктивність і масштабованість: QualNet відомий своїм високопродуктивним механізмом моделювання, здатним обробляти великомасштабні мережеві симуляції з тисячами вузлів. Він пропонує ефективні можливості паралельного моделювання, що дозволяє користувачам використовувати переваги багатоядерних процесорів і розподілених обчислювальних середовищ для швидшого виконання симуляцій. Однак масштабованість QualNet може бути обмежена апаратними ресурсами і складністю моделювання.

Зручність та інтерфейс користувача: QualNet надає зручний графічний інтерфейс для проектування мережевих топологій, налаштування параметрів моделювання та візуалізації результатів моделювання. Його інтуїтивно зрозумілий дизайн і макет дозволяють користувачам легко створювати, змінювати і аналізувати мережеві симуляції. Крім того, QualNet пропонує вичерпну документацію та ресурси підтримки, щоб допомогти користувачам почати роботу з програмним забезпеченням і вирішити проблеми.

Переваги: високоточне моделювання з підтримкою широкого спектра мережевих протоколів. Комплексні інструменти аналізу для оцінки продуктивності та поведінки мережі. Зручний інтерфейс і велика документація для простоти використання.

Слабкі сторони: комерційне ліцензування може бути дорогим для окремих користувачів або невеликих організацій. Обмежена підтримка користувацьких реалізацій та розширень протоколів. Вимоги до апаратних ресурсів можуть бути високими для великомасштабних симуляцій.

### **CORE (Common Open Research Emulator)**

Огляд: CORE – це програмне забезпечення для емуляції мереж з відкритим вихідним кодом, розроблене Військово-морською дослідницькою лабораторією США. Це гнучка і розширювана платформа для моделювання та імітації різноманітних мережевих середовищ, зокрема дротових, бездротових і віртуальних мереж. CORE призначений для підтримки експериментів і досліджень мережевих протоколів, архітектур і технологій [12].

Особливості: модульна архітектура з підтримкою користувацьких типів мережевих вузлів, типів з'єднань та генераторів трафіка. Інтеграція з популярними технологіями віртуалізації, такими як QEMU і Docker, для моделювання віртуалізованих мережевих середовищ. Широка підтримка протоколів,

враховуючи TCP/IP, UDP, BGP, OSPF, MPLS, VLAN та інші. Скриптовий інтерфейс для автоматизації завдань моделювання та проведення повторюваних експериментів.

Продуктивність і масштабованість: CORE оптимізовано для продуктивності та масштабованості, що дозволяє користувачам моделювати великомасштабні мережі з сотнями і тисячами вузлів. Він пропонує ефективне управління ресурсами та механізми планування симуляції для забезпечення безперебійного виконання складних симуляцій. Однак масштабованість CORE може залежати від таких факторів, як апаратні ресурси, топологія моделювання та складність мережевих конфігурацій.

Зручність використання та інтерфейс користувача: CORE надає інтерфейс командного рядка (CLI) для налаштування і запуску симуляцій, а також графічний інтерфейс користувача (GUI) для візуалізації мережевих топологій і результатів моделювання. У той час як CLI пропонує більшу гнучкість і контроль над параметрами моделювання, графічний інтерфейс забезпечує інтуїтивно зрозуміле середовище для проєктування і взаємодії з мережевими симуляціями. CORE також пропонує обширну документацію та ресурси підтримки спільноти, щоб користувачі могли навчатися та усувати несправності.

Переваги: відкритий вихідний код і вільний доступ для академічних і дослідницьких цілей. Модульна архітектура і розширюваний фреймворк для налаштування і розширення можливостей моделювання. Інтеграція з технологіями віртуалізації для моделювання складних мережевих середовищ.

Недоліки: більш крута крива навчання порівняно з комерційними альтернативами через інтерфейс командного рядка та модульну архітектуру. Обмежені інструменти графічної візуалізації та аналізу порівняно з комерційними альтернативами. Відсутність офіційної технічної підтримки та документації порівняно з комерційними альтернативами.

### **Симулятори D-Link та TP-Link**

Огляд: симулятори D-Link [15] та TP-Link [5] – це платформи для моделювання мереж, що надаються компаніями D-Link Corporation і TP-Link Technologies Co., Ltd. відповідно. Ці симулятори дозволяють користувачам моделювати і тестувати мережеві конфігурації з використанням віртуальних мережевих пристроїв D-Link або TP-Link.

Функції: симулятори D-Link і TP-Link дозволяють користувачам емулювати мережеві топології, що складаються з віртуальних маршрутизаторів, комутаторів та інших пристроїв D-Link або TP-Link. Вони підтримують різні мережеві протоколи і технології, які зазвичай використовуються в комп'ютерних мережах.

Підтримувані протоколи: симулятори D-Link і TP-Link підтримують широкий спектр мережевих протоколів і технологій, враховуючи TCP/IP, UDP, VLAN, OSPF та інші. Вони забезпечують реалістичне середовище моделювання, в якому користувачі можуть відпрацьовувати завдання з налаштування та усунення несправностей, характерних для пристроїв D-Link або TP-Link.

Підтримувані мережеві топології: симулятори D-Link і TP-Link пропонують гнучкість у проєктуванні і налаштуванні мережевих топологій, підтримуючи різні конфігурації, такі як топологія «вузол – спиця», комірчаста й ієрархічна архітектури. Вони дозволяють користувачам створювати власні топології за допомогою графічних інтерфейсів.

Продуктивність і масштабованість: продуктивність і масштабованість симуляторів D-Link і TP-Link можуть різнитися залежно від апаратних ресурсів, доступних на хост-машині, і складності симуляції. Як правило, вони оптимізовані для моделювання малих і середніх мережевих сценаріїв.

Зручність використання та користувацький інтерфейс: симулятори D-Link і TP-Link надають зручні графічні інтерфейси для проєктування, налаштування і запуску мережевих симуляцій. Вони пропонують інтуїтивно зрозумілі інструменти та майстри, які допомагають користувачам створювати та керувати проєктами моделювання.

Якість документації: симулятори D-Link і TP-Link зазвичай надають документацію та посібники користувача, щоб допомогти користувачам почати роботу з платформами. Однак доступність і повнота документації може різнитися в різних симуляторах D-Link і TP-Link.

Переваги: симулятори D-Link і TP-Link вирізняються тим, що вони зосереджені на мережевих технологіях відповідних компаній, надаючи користувачам реалістичні симуляційні середовища, в яких вони можуть практикувати конфігурування та усунення несправностей, характерних для пристроїв D-Link або TP-Link. Їхні зручні інтерфейси та інтуїтивно зрозумілий дизайн підвищують зручність використання для користувачів усіх рівнів кваліфікації.

Недоліки: симулятори D-Link і TP-Link можуть мати обмеження з точки зору масштабованості та розширюваності порівняно з більш комплексними платформами для моделювання. Крім того, їхня орієнтація на технології конкретних постачальників може обмежити їхню застосовність для моделювання гетерогенних мережевих середовищ.

В таблиці 1 представлено ключові характеристики, які надають повний огляд програмних інструментів для моделювання та емуляції мереж.

Таблиця 1

Характеристика програмних інструментів для моделювання та емуляції мереж

Показник / Програмні інструменти	Cisco Packet Tracer	Cisco VIRL	CML	UNetLab	Pnet Lab	EVE-NG	Boson NetSim	IMUNES	OPNET	eNSP	NS-3	GNS3	OMNeT++	Mininet	QualNet	CORE	D-Link та TP-Link	
Безкоштовне ПЗ	ТАК	НІ	БВ	ТАК	ТАК	БВ	НІ	ТАК	НІ	БВ	ТАК	БВ	ТАК	ТАК	НІ	ТАК	ТАК	
Відкритий вихідний код	НІ	НІ	НІ	НІ	НІ	НІ	НІ	ТАК	НІ	НІ	ТАК	НІ	ТАК	ТАК	НІ	ТАК	НІ	
Загальнодоступний для завантаження	ТАК	НІ	БВ	ТАК	ТАК	БВ	НІ	ТАК	НІ	БВ	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	НІ	ТАК	ТАК	
Повнофункціональний IOS	Ч	ТАК	ТАК	Ч	Ч	ТАК	НІ	НІ	НІ	Ч	НІ	Ч	НІ	НІ	НІ	НІ	НІ	
Підтримка Windows	ТАК	ТАК	ТАК	НІ	ТАК	ТАК	ТАК	НІ	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	НІ	ТАК	НІ	ТАК	
Підтримка Linux	НІ	ТАК	ТАК	ТАК	НІ	ТАК	НІ	ТАК	НІ	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	НІ	ТАК	ТАК	
Кросплатформеність	Ч	ТАК	ТАК	НІ	НІ	ТАК	НІ	НІ	НІ	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	НІ	НІ	НІ	ТАК	
Якість документації	В	В	В	С	Н	В	В	С	В	С	В	В	В	В	В	С	Н	
Режим симуляції	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	НІ	ТАК	ТАК	ТАК	
Режим емуляції	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	НІ	ТАК	НІ	ТАК	НІ	ТАК	НІ	ТАК	НІ	ТАК	НІ	
Сумісність з реальними контролерами	Ч	ТАК	В	В	В	В	Н	С	Н	В	Н	В	Н	С	Н	С	Н	
Масштабованість	О	В	С	С	Н	В	С	С	В	С	В	С	В	С	В	С	Н	
Коректність результатів роботи	В	В	В	В	В	В	С	В	В	В	В	В	В	В	В	В	Н	
Кількість з'єднань	О	В	О	С	Н	В	С	С	В	С	В	С	В	С	В	С	Н	
Wi-Fi	ТАК	ТАК	ТАК	О	НІ	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	О	ТАК	ТАК	О	
Служба підтримки	О	КП	КП	СП	СП	КП	КП	СП	КП	КП	СП	КП	СП	СП	КП	СП	О	
Автоматичне оновлення	ТАК	ТАК	ТАК	НІ	НІ	КП	ТАК	НІ	ТАК	КП	НІ	КП	НІ	НІ	ТАК	НІ	НІ	
Легкість впровадження	В	С	В	С	В	С	В	С	С	С	С	С	С	С	С	С	В	
Підготовчі курси	Д	Д	Д	НІ	НІ	НІ	ТАК	НІ	ТАК	НІ	НІ	НІ	НІ	НІ	ТАК	НІ	НІ	
Навчальні посібники	Д	Д	Д	О	О	Д	ТАК	О	ТАК	О	Д	Д	Д	Д	ТАК	Д	О	
Підтримка графічного інтерфейсу	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	НІ	ТАК	ТАК	НІ	ТАК	ТАК	ТАК	
Інтеграція з реальними пристроями	НІ	ТАК	ТАК	НІ	НІ	КП	НІ	НІ	НІ	КП	НІ	ТАК	НІ	НІ	НІ	НІ	НІ	
Інтеграція з хмарними технологіями	НІ	ТАК	ТАК	НІ	НІ	КП	НІ	НІ	ТАК	КП	НІ	НІ	НІ	НІ	НІ	НІ	НІ	
Підтримка мультивендорних рішень	НІ	О	О	О	НІ	ТАК	ТАК	О	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	О	ТАК	О	О	
Підтримка віртуалізації	НІ	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	НІ	ТАК	ТАК	ТАК	НІ	ТАК	НІ	ТАК	НІ	ТАК	НІ	
Можливість розширення функціоналу	О	КП	КП	О	О	КП	О	ТАК	О	КП	ТАК	КП	ТАК	ТАК	О	ТАК	О	
Багатокористувацький режим	НІ	ТАК	ТАК	НІ	НІ	КП	НІ	НІ	ТАК	КП	НІ	КП	НІ	НІ	НІ	НІ	НІ	
Підтримка мережних протоколів	Ш	Ш	Ш	Ш	О	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш	Ш	О	Ш	Ш	О	
Підтримка SDN/NFV	НІ	ТАК	ТАК	НІ	НІ	ТАК	НІ	НІ	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	ТАК	О	ТАК	О	НІ	
Локалізація інтерфейсу	БМ	АМ	АМ	АМ	АМ	АМ	АМ	АМ	АМ	АМ	АМ	АМ	БМ	АМ	АМ	АМ	АМ	ВР

Примітка: СП – спільнота, Ч – частково, О – обмежена, БВ – безкоштовна версія, КП – комерційна пропозиція,

БМ – багатомовна, АМ – Англійська, В – висока, С – середня, Н – низька, Д – доступні, Ш – широка, ВР – залежить від ресурсу

При виборі ПЗ доцільно дотримуватися порядку дій, що представлено на рисунку 2.

<b>Визначення цілей та вимог</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Чітко визначити цілі та сценарії використання емуляції / моделювання мережі, такі як навчання, тестування, розробка або дослідження.</li> <li>• Визначити конкретні вимоги, такі як підтримка різних протоколів, топологій мережі, масштабованість, інтеграція з іншими інструментами та середовищами</li> </ul>
<b>Дослідження ринку</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Провести ретельне дослідження доступних рішень для емуляції / моделювання мереж, враховуючи комерційні та відкриті програмні продукти.</li> <li>• Розглянути онлайн-ресурси, форуми та публікації в галузевих виданнях</li> </ul>
<b>Оцінка функціональних можливостей</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Оцінити функціональні можливості програмного забезпечення для емуляції / моделювання мереж, такі як підтримка різних мережевих протоколів (TCP/IP, OSPF, BGP тощо), типів пристроїв (маршрутизатори, комутатори, брандмауери), масштабованість, візуалізація та моніторинг мережі</li> </ul>
<b>Оцінка продуктивності та масштабованості</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Провести тестування продуктивності та масштабованості програмного забезпечення, враховуючи розмір мережі, кількість вузлів та трафік, який потрібно емулювати / моделювати</li> </ul>
<b>Інтеграція та сумісність</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Оцінити можливість інтеграції програмного забезпечення для емуляції / моделювання з іншими інструментами та середовищами, такими як середовища розробки, системи управління мережею, системи моніторингу та аналізу трафіка</li> </ul>
<b>Підтримка та документація</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Оцінити наявність і якість підтримки постачальника, враховуючи документацію, форуми спільноти, оновлення та технічну допомогу</li> </ul>
<b>Витрати та ліцензування</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Оцінити наявність і якість підтримки постачальника, враховуючи документацію, форуми спільноти, оновлення та технічну допомогу</li> </ul>
<b>Зручність використання та навчальні ресурси</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Оцінити зручність використання програмного забезпечення, інтерфейс користувача та наявність навчальних ресурсів, таких як керівництва, відеоуроки та навчальні курси</li> </ul>
<b>Пілотне тестування та відгуки користувачів</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Провести пілотне тестування програмного забезпечення у контрольованому середовищі та зібрати відгуки від потенційних користувачів</li> </ul>
<b>Вибір ПЗ</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• На основі всебічної оцінки вибрати програмне забезпечення, яке найкраще відповідає цілям, вимогам та бюджету організації</li> </ul>
<b>План впровадження та навчання</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Розробити план впровадження вибраного програмного забезпечення, враховуючи етапи розгортання, налаштування, інтеграцію з існуючими системами та програми навчання для користувачів</li> </ul>
<b>Моніторинг та удосконалення</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Встановити процеси для постійного моніторингу ефективності впровадженого програмного забезпечення, збору відгуків від користувачів та вдосконалення використання згідно з мінливими потребами організації</li> </ul>

Рис. 2. Рекомендації вибору ПЗ

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Всебічний аналіз різних програмних продуктів для моделювання та емуляції мереж дає цінну інформацію про їхні можливості, застосування та наслідки для реальних сценаріїв. Кожен інструмент пропонує унікальні можливості і функції, що відповідають конкретним потребам і цілям користувачів у дослідницькій, освітній і промисловій сферах.

Кілька програмних продуктів, таких як Cisco VIRL, UNetLab, EVE-NG і GNS3, з'явилися як універсальні платформи для проєктування, тестування і валідації мережевих архітектур. Ці інструменти

мають графічні інтерфейси, підтримку віртуалізованих середовищ і великі бібліотеки мережевих пристроїв, що робить їх придатними для широкого спектра сценаріїв, враховуючи міграцію центрів обробки даних, оптимізацію мережі та тестування протоколів.

Boson NetSim, Cisco Packet Tracer та eNSP чудово підходять для практичного навчання студентів та професіоналів у сфері мережевої освіти та підготовки до сертифікації. Вони забезпечують інтерактивні лабораторні вправи, реалістичне моделювання та підтримку мережевих технологій Cisco, що дозволяє студентам отримати практичні навички та знання з мережевих концепцій та конфігурацій.

IMUNES, OPNET та Pnet Lab пропонують спеціалізовані можливості для проведення досліджень та експериментів з розробки мережевих протоколів, аналізу продуктивності та оптимізації. Ці інструменти надають симуляційні середовища, адаптовані до конкретних дослідницьких цілей, що дозволяє дослідникам оцінювати нові протоколи, алгоритми і технології в контрольованих умовах.

NS-3, OMNeT++ та Mininet демонструють свої сильні сторони у проведенні досліджень та експериментів на основі моделювання, зокрема, у бездротових сенсорних мережах, мобільних мережах ad hoc та кібербезпеці. Ці інструменти пропонують налаштовані імітаційні моделі, підтримку реалізації протоколів і детальний аналіз продуктивності, що дозволяє дослідникам вивчати складну поведінку мереж і оцінювати ефективність нових технологій і рішень.

Отримані результати свідчать про те, що вибір програмного забезпечення для моделювання та емуляції мереж має відповідати конкретним вимогам проекту, цілям і досвіду користувача. Ці інструменти мають значний потенціал для вирішення різних проблем, пов'язаних з мережами, враховуючи проектування, оптимізацію, тестування, навчання та дослідження мереж.

Обмеження, з якими ми зіткнулися під час дослідження: складність налаштування та конфігурації, вимоги до ресурсів, проблеми масштабованості, обмеження сумісності та висока вартість комерційних пропозицій. Майбутні дослідження можуть бути спрямовані на усунення цих обмежень шляхом розробки більш зручних інтерфейсів, оптимізації продуктивності, підвищення масштабованості і поліпшення сумісності з різними мережевими середовищами і технологіями.

Проаналізовані програмні продукти мають широке застосування в різних реальних сценаріях і галузях, враховуючи телекомунікації, кібербезпеку, освіту, наукові дослідження і розробки. Наприклад:

- у телекомунікаціях ці інструменти можна використовувати для проектування та оптимізації мережевої інфраструктури, оцінки нових протоколів зв'язку та усунення несправностей у мережі;
- у сфері кібербезпеки вони можуть полегшити моделювання кібератак, тестування заходів безпеки та оцінку захисту мережі від загроз і вразливостей;
- в освіті вони можуть покращити практичний досвід навчання, забезпечити інтерактивні лабораторні вправи і підтримати підготовку до сертифікації на мережевих курсах і навчальних програмах;
- у сфері досліджень і розробок вони можуть сприяти дослідженню нових мережевих технологій, оцінці продуктивності протоколів і розробці інноваційних рішень для складних мережевих викликів.

Результати цього дослідження узгоджуються з існуючою літературою з мережевого моделювання та програмного забезпечення для емуляції, що підкреслює важливість цих інструментів у різних галузях і сферах застосування. Хоча можуть бути розбіжності в конкретних випадках використання або показниках продуктивності, загальний консенсус полягає в тому, що ці інструменти відіграють вирішальну роль у розвитку мережевих технологій і вирішенні складних мережевих проблем. Подальші дослідження та експерименти сприятимуть вдосконаленню цих інструментів і розширенню їхніх можливостей для майбутніх застосувань.

#### Список використаної літератури:

1. Тугай М.Ю. Аналіз вільного програмного забезпечення для роботи з комп'ютерними мережами / М.Ю. Тугай, А.В. Чорна // Сучасний рух науки : Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., 6–7 груд. – Дніпро, 2018. – С. 1354–1359 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://eprints.mdpu.org.ua/id/eprint/2639/>.
2. Горяченко К. Огляд систем імітаційного моделювання телекомунікаційних мереж / К.Горяченко, М.Доротюк // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2014. – № 5. – С. 115–118 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu\\_tekh\\_2014\\_5\\_25](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2014_5_25).
3. Польнов О. Технічні засоби моделювання роботи мереж / О.Польнов, К.Горяченко, В.Мішан // Технічні науки. – 2020. – № 5. – С. 35–38 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2021/03/7-2.pdf>.
4. Точилін В.В. Software- tool systems simulation modeling of computer networks and their possible extension of Petri nets / В.В. Точилін // Проблеми інформатизації та управління. – 2008. – Vol. 1, № 23. DOI: 10.18372/2073-4751.1.9248.
5. Симулятор TP-Link / TP-Link [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.tp-link.com/uk-ua/support/emulator/>.

6. Lantz B. A network in a laptop: rapid prototyping for software-defined networks / B.Lantz, B.Heller, N.McKeown // Hotnets-IX: Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks. – 2010. – P. 1–6. DOI: 10.1145/1868447.1868466.
7. Abramov V. Application of combined models of computer networks in the training process / V.Abramov // Cybersecurity: education science technique. – 2019. – No. 4. – P. 24–31. DOI: 10.28925/2663-4023.2019.4.2431.
8. Cisco [Electronic resource]. – Access mode : [https://www.cisco.com/c/uk\\_ua/index.html](https://www.cisco.com/c/uk_ua/index.html).
9. Cisco Learning Network / Cisco [Electronic resource]. – Access mode : <https://learningnetwork.cisco.com/s/virl>.
10. Cisco Modeling Labs / Cisco [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.cisco.com/c/en/us/products/cloud-systems-management/modeling-labs/index.html>.
11. Comparative properties analysis of open, free and commercial software / S.S. Velykodniy and other // Information Technology and Computer Engineering. – 2018. – Vol. 41, № 1. – P. 21–27. DOI: 10.31649/1999-9941-2018-41-1-21-27.
12. CORE Developer's Guide / CORE Documentation [Electronic resource]. – Access mode : <https://coreemu.github.io/core/devguide.html>.
13. EVE-NG [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.eve-ng.net/>.
14. GNS3 [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.gns3.com/>.
15. GUI Emulator PRO [Electronic resource]. – Access mode : <https://tools.dlink.com/intro/emulator/>.
16. Huawei eNSP Firmware & Software Download / Huawei [Electronic resource]. – Access mode : <https://support.huawei.com/enterprise/en/data-communication/ensp-pid-9017384/software>.
17. IP network emulator / simulator / IMUNES [Electronic resource]. – Access mode : <https://imunes.net/>.
18. Matkurbanov D. Analysis of network emulation and simulation software / D.Matkurbanov, K.Rakhimjanov // Sciences of europe. – 2021. – № 79. – P. 38–46.
19. Mininet Overview / Mininet [Electronic resource]. – Access mode : <http://mininet.org/overview/>.
20. NetSim™ [Electronic resource]. – Access mode : <https://netsim.boson.com/>.
21. NS-3 [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.nsnam.org/>.
22. OMNeT++ Discrete Event Simulator // OMNeT++ [Electronic resource]. – Access mode : <https://omnetpp.org/>.
23. OPNET Modeler / Riverbed Support [Electronic resource]. – Access mode : <https://support.riverbed.com/content/support/software/opnet-model/modeler.html>.
24. PNETLab : Lab is Simple [Electronic resource]. – Access mode : <https://pnetlab.com/pages/main>.
25. Qualnet – Une entreprise canadienne qui se consacre à l'installation et à l'entretien d'infrastructures de réseaux sans fil, ainsi qu'à la construction des structures associées / Qualnet [Electronic resource]. – Access mode : <https://qualnet.ca/en/>.

#### References:

1. Tuhai, M.Yu. and Chorna, A.V. (2018), «Analiz vilnoho prohramnoho zabezpechennia dlia roboty z kompiuternymy merezhamy», *Suchasnyi rukh nauky*, Mizhnar. nauk.-prakt. internet-konf., 6–7 hrud., Dnipro, pp. 1354–1359, [Online], available at: <http://eprints.mdpu.org.ua/id/eprint/2639/>
2. Horiashchenko, K. and Dorotiuk, M. (2014), «Ohliad system imitatsiinoho modeliuвання telekomunikatsiinykh merezh», *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, No. 5, pp. 115–118, [Online], available at: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu\\_tekh\\_2014\\_5\\_25](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchnu_tekh_2014_5_25)
3. Polnov, O., Horiashchenko, K. and Mishan, V. (2020), «Tekhnichni zasoby modeliuвання roboty merezh», *Tekhnichni nauky*, No. 5, pp. 35–38, [Online], available at: <http://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2021/03/7-2.pdf>
4. Tochylin, V.V. (2008), «Software- tool systems simulation modeling of computer networks and their possible extension of Petri nets», *Problemy informatyzatsii ta upravlinnia*, Vol. 1, No. 23, doi: 10.18372/2073-4751.1.9248.
5. TP-Link, «Symuliator TP-Link», [Online], available at: <https://www.tp-link.com/uk-ua/support/emulator/>
6. Lantz, B., Heller, B. and McKeown, N. (2010), «A network in a laptop: rapid prototyping for software-defined networks», *Hotnets-IX: Proceedings of the 9th ACM SIGCOMM Workshop on Hot Topics in Networks*, pp. 1–6, doi: 10.1145/1868447.1868466.
7. Abramov, V. (2019), «Application of combined models of computer networks in the training process», *Cybersecurity: education science technique*, No. 4, pp. 24–31, doi: 10.28925/2663-4023.2019.4.2431.
8. Cisco, [Online], available at: [https://www.cisco.com/c/uk\\_ua/index.html](https://www.cisco.com/c/uk_ua/index.html)
9. Cisco, «Cisco Learning Network», [Online], available at: <https://learningnetwork.cisco.com/s/virl>
10. Cisco, «Cisco Modeling Labs», [Online], available at: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/cloud-systems-management/modeling-labs/index.html>
11. Velykodniy, S.S. et al. (2018), «Comparative properties analysis of open, free and commercial software», *Information Technology and Computer Engineering*, Vol. 41, No. 1, pp. 21–27, doi: 10.31649/1999-9941-2018-41-1-21-27.
12. CORE Documentation, «CORE Developer's Guide», [Online], available at: <https://coreemu.github.io/core/devguide.html>
13. EVE-NG, [Online], available at: <https://www.eve-ng.net/>
14. GNS3, [Online], available at: <https://www.gns3.com/>
15. GUI Emulator PRO, [Online], available at: <https://tools.dlink.com/intro/emulator/>
16. Huawei, «Huawei eNSP Firmware & Software Download», [Online], available at: <https://support.huawei.com/enterprise/en/data-communication/ensp-pid-9017384/software>
17. IMUNES, «IP network emulator / simulator», [Online], available at: <https://imunes.net/>
18. Matkurbanov, D. and Rakhimjanov, K. (2021), «Analysis of network emulation and simulation software», *Sciences of europe*, No. 79, pp. 38–46.



19. Mininet, «Mininet Overview», [Online], available at: <http://mininet.org/overview/>
20. NetSim™, [Online], available at: <https://netsim.boson.com/>
21. NS-3, [Online], available at: <https://www.nsnam.org/>
22. OMNeT++, «OMNeT++ Discrete Event Simulator», [Online], available at: <https://omnetpp.org/>
23. Riverbed Support, «OPNET Modeler», [Online], available at: <https://support.riverbed.com/content/support/software/opnet-model/modeler.html>
24. PNETLab : Lab is Simple, [Online], available at: <https://pnetlab.com/pages/main>
25. Qualnet, «Qualnet – Une entreprise canadienne qui se consacre à l’installation et à l’entretien d’infrastructures de réseaux sans fil, ainsi qu’à la construction des structures associées», [Online], available at: <https://qualnet.ca/en/>

**Дячук** Ольга Юріївна – старший викладач кафедри комп’ютерної інженерії та кібербезпеки Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-6996-4700>.

Наукові інтереси:

- комп’ютерні мережі;
- кібербезпека;
- архітектура комп’ютера.

**Колощук** Марія Сергіївна – асистент кафедри комп’ютерної інженерії та кібербезпеки Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0009-0001-5825-2054>.

Наукові інтереси:

- комп’ютерні мережі;
- кібербезпека;
- архітектура комп’ютера.

**Окунькова** Оксана Олексіївна – старший викладач кафедри комп’ютерної інженерії та кібербезпеки Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0009-0004-0093-0694>.

Наукові інтереси:

- інформаційні та комп’ютерні технології в освіті.

**Воротніков** Володимир Володимирович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри комп’ютерної інженерії та кібербезпеки Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0001-8584-3901>.

Наукові інтереси:

- комп’ютерні мережі та мережні технології;
- мережна безпека;
- кібербезпека;
- керування складними інформаційними системами.

**Dyachuk O.Y., Koloshchuk M. S., Okunkova O.O., Vorotnikov V.V.**  
**Comprehensive Analysis of Computer Network Simulation and Emulation Software: Tools, Applications, and Future Directions**

The article offers a comprehensive analysis of various software for modeling and emulating computer networks, including both commercial and open source solutions. A wide range of tools is considered, including Cisco Packet Tracer, Cisco VIRL, UNetLab, Pnet Lab, EVE-NG, Boson NetSim, IMUNES, OPNET SIMULATOR, eNSP, CML, D-Link TP-Link simulator, NS-3, GNS3, OMNeT++, Mininet, QualNet, and CORE. Each software undergoes a comprehensive review based on its features, supported protocols, performance, usability, and potential application in real-world scenarios.

The paper interprets the results of the analysis and discusses their implications for networking research, education, and industry. It thoroughly highlights the strengths and weaknesses of each software tool and suggests areas for future research. These areas include addressing scalability issues, improving usability, and exploring applications in specialized areas such as network security and software-defined networking (SDN). In addition, the article delves into potential real-world applications of the analyzed software tools in various scenarios, including network design, optimization, testing, training, and research.

In summary, this article provides valuable insights into network modeling and emulation software, meeting the needs of researchers, educators, and industry professionals alike. By offering a detailed overview and comparison of different tools, it assists in selecting the most appropriate software for specific requirements and purposes, thereby serving as a valuable resource for navigating the complex landscape of network modeling and emulation technologies.

**Keywords:** modeling; emulation; simulation; network; network topologies.

Стаття надійшла до редакції 11.04.2024.