

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ „ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

**Іванушак Наталія Михайлівна**

УДК 004.942: 004.021

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ РОЗВИТКУ СТРУКТУР  
КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖ**

01.05.02 – *математичне моделювання та обчислювальні методи*

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Львів – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича Міністерства освіти і науки України, м.Чернівці.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор, Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки  
**Пасічник Володимир Володимирович,**  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
професор кафедри інформаційних систем та мереж;

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Чернуха Ольга Юрївна,**  
Центр математичного моделювання Інституту  
прикладних проблем механіки і математики  
ім. Я.С.Підстригача НАН України, завідувач відділом  
математичного моделювання нерівноважних процесів;

кандидат технічних наук, доцент  
**Луцків Андрій Мирославович,**  
Тернопільський національний університет імені Івана  
Пулюя, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж.

Захист відбудеться «11» жовтня 2013 р. о 16 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, м. Львів-13, вул. С. Бандери, 12).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів-13, вул. Професорська, 1).

Автореферат розіслано «\_\_» вересня 2013 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради,  
доктор технічних наук, професор

Р.А. Бунь

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У більшості випадків імітаційні моделі комп'ютерних систем і мереж використовують на етапі їх проектування для оцінювання прогнозованих характеристик. Під час створення імітаційної моделі мережі головним завданням проектувальника є ретельний аналіз роботи мережі, що складається з великої кількості окремих компонентів: комп'ютерів, комутаторів, маршрутизаторів, пристроїв введення-виведення, ліній зв'язку, і прийняття рішення стосовно вибору типу моделі та методів дослідження.

Незважаючи на те, що імітаційне моделювання комп'ютерних мереж враховує багато факторів та забезпечує розв'язання низки складних завдань, таких як визначення типів і параметрів активного і пасивного обладнання мережі; оцінювання необхідного запасу продуктивності основних пристроїв мережі; вибір архітектури мережі на базі критерію вартості обладнання; оцінювання середнього часу затримки передачі файлів у мережі; керування перевантаженням у мережі та ін., **актуальними** залишаються задачі статистичного дослідження локальних комп'ютерних мереж, моделювання на їх основі топології та процесів структуризації цих систем, прогнозування динаміки подальшого їх розвитку, дослідження стійкості до спрямованих атак і розповсюдження комп'ютерних вірусів.

Застосування імітаційного моделювання для таких задач є вкрай неефективним, оскільки проектування і створення моделі потребує врахування громіздкої множини факторів, ознак і параметрів. Ці задачі для свого розв'язання потребують застосування нового математичного апарату та переходу від імітаційного до ймовірнісного моделювання, що полягає в багатократному проведенні випробувань побудованої ймовірнісної моделі і подальшій статистичній обробці результатів моделювання з метою визначення шуканих характеристик аналізованого процесу у вигляді оцінок його параметрів. Точність оцінок цих параметрів визначає ступінь наближення розв'язку задачі до ймовірнісних характеристик.

Розвиток методів і технологій ймовірнісного моделювання процесів росту та структуризації комп'ютерних мереж стимулює інтерес дослідників до вивчення *теорії складних мереж (Complex Networks)*, в рамках якої пропонуються підходи до розв'язання обчислювально складних задач, які є характерними для сучасних систем. Під *складною мережею* мається на увазі система, яка складається з великої кількості компонентів; допускає «далекосяжні» зв'язки між компонентами; володіє багатомасштабною (у тому числі просторово-часовою) мінливістю. Перераховані властивості породжують ряд специфічних проблем комп'ютерної реалізації моделей складних систем. Так, велика кількість компонентів відображається на ресурсозатратності обчислювальних процедур і підвищених вимогах до об'ємів оперативної пам'яті для зберігання структур даних. Додатково, багатомасштабність складних мереж вимагає використання для їх опису параметрично зв'язаних моделей, які описують ієрархію суміжних діапазонів мінливості.

Складні мережі застосовуються для моделювання об'єктів і систем, для яких інші способи дослідження (з допомогою спостереження і активного експерименту) є недоцільними або неможливими.

Наукові роботи вітчизняних та зарубіжних вчених В. М. Глушкова, В.М.Томашевського, О. Олемського, Ю. Головача, В. В. Пасічника, О. Мриглод, П. Ердоша, А. Рені, М. Е. Дж. Ньюмана, Р. Альберт, А.-Л. Барабаші, Д. Дж. Ваттса, С. Г. Строгаца та інших дослідників внесли суттєвий вклад у розвиток теоретичних основ і практичних рішень для створення методів і засобів дослідження та проектування складних мереж, стали теоретичною та методологічною основою дисертаційної роботи. Моделювання складних систем є важливим напрямком у міждисциплінарних наукових дослідженнях. Найбільш популярними методами моделювання є підходи на основі системи диференційних рівнянь, які описують динаміку моментних або ймовірнісних характеристик мережі.

Незважаючи на те, що розгорнута велика діяльність наукового співтовариства по дослідженню багатьох реальних систем, яким притаманна мережева структура (Інтернет, WWW, мережі громадського транспорту, соціальні мережі), за усієї важливості відомих результатів, напрямків теоретичних досліджень та комп'ютерних експериментів, детального аналізу локальних комп'ютерних мереж з позиції теорії складних систем, дослідження перспективних напрямків використання методів та засобів їх вивчення, прогнозування становлення та розвитку, на даний момент ще не здійснено, що свідчить про актуальність досліджень, здійснених у дисертаційній роботі.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася відповідно до напрямку наукової діяльності кафедри комп'ютерних систем та мереж Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича за темою «Апаратно-програмні засоби підвищення ефективності та надійності обробки даних і захисту інформації в розподілених комп'ютерних системах і мережах», затвердженою Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України, № державної реєстрації 0111U004784.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є статистичне дослідження властивостей комп'ютерних мереж різних Інтернет-провайдерів, розроблення нових, удосконалення та адаптація існуючих методів і засобів математичного моделювання, які уможливають дослідження їх структури і параметрів на основі фрагментарних даних спостережень, моделювання та прогнозування процесів їх розвитку та структуризації в рамках формалізму комплексних мереж.

У відповідності з поставленою метою дисертаційна робота включає розв'язання таких *задач*:

- проведення аналізу основних типів штучних мереж, їх структури та методів дослідження;
- здійснення системного аналізу методів та засобів математичного моделювання комп'ютерних мереж для прогнозування процесів їх росту та кластеризації, обґрунтування вимог до них, виходячи з огляду існуючих математичних моделей, розроблення на цій основі переліку актуальних та

недосліджених задач з метою подальшого удосконалення та розробки нових методів їх науково обґрунтованих рішень;

- аналіз відомих підходів та розроблення моделі розвитку структури комп'ютерної мережі з використанням основних властивостей процесів дифузії, які уможливають відслідковувати динаміку становлення реальної мережі від моменту її зародження;
- розробка базової математичної моделі з використанням інтегральних ймовірнісних характеристик реальних комп'ютерних мереж різних Інтернет-провайдерів та апарату теорії графів для моделювання структури комп'ютерних мереж заданого об'єму та властивостей, що перебувають у стійкому стаціонарному стані, а також обґрунтування шляхів, способів ідентифікації структури і параметрів моделей мереж на основі даних спостережень;
- розробка програмного забезпечення у середовищі PROCESSING візуалізації стохастичних графів для аналізу складних мереж і спрощення аналізу реальних даних, яке є ефективним при рішенні задач, пов'язаних з дослідженням динаміки розвитку комп'ютерних мереж;
- застосування розробленого методу моделювання для аналізу, оцінювання і розвитку процесів стійкості комп'ютерних мереж до спрямованих хакерських атак та розповсюдження комп'ютерних вірусів у них.

*Об'єкт дослідження* – локальні комп'ютерні мережі та процеси їх розвитку.

*Предметом дослідження* є математичні моделі, числові методи та програмні комплекси для вирішення задач аналізу становлення та розвитку комп'ютерних мереж.

**Методи дослідження.** При виконанні дисертаційних досліджень використано апарат теорії ймовірностей і математичної статистики, теорії оптимізації, методи теорії графів, системного аналізу і теорії систем, методи розв'язування звичайних диференціальних рівнянь і аналізу алгоритмів, методи обчислювальної математики, моделювання в рамках формалізму складних мереж, що підтверджується результатами комп'ютерного експерименту.

Достовірність та обґрунтованість отриманих у дисертації наукових результатів, положень, висновків та рекомендацій забезпечується строгістю постановки розглянутих задач, обґрунтованістю застосування математичного апарата, успішною програмною реалізацією, оцінкою адекватності фізичних і математичних моделей шляхом співставлення з даними спостережень, ефективним практичним впровадженням результатів дисертаційних досліджень.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Наукова новизна роботи полягає у розв'язанні наукової задачі математичного моделювання реальних локальних комп'ютерних мереж з урахуванням їх ймовірнісних характеристик. Отримано такі нові наукові результати:

- вперше обґрунтовано використання моделі дифузії з обмеженою агрегацією для дослідження фрактальної геометрії комп'ютерних мереж, яка дає

можливість відслідковувати динаміку формування та розвитку реальних мереж від моменту їх зародження;

- вперше досліджено статистичні властивості, проведено розрахунки та апроксимації інтегральних ймовірнісних розподілів ступенів вершин, які характеризують процеси розвитку реальних комп'ютерних мереж;
- вперше розроблено новий метод генерування структури локальних комп'ютерних мереж із заданою функцією щільності розподілу ступенів вузлів з використанням апарату теорії комплексних мереж, що дає можливість відтворювати ці мережі як стохастичні графи із заданими ймовірнісними властивостями, а також здійснювати оцінки розвитку та поведінки реальних комп'ютерних мереж при зміні їх структурних властивостей та досліджувати уразливості мереж при сценарії спрямованих атак на їх вузли.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практичну цінність роботи складають: пакет прикладних програм та обчислювальних процедур, орієнтованих на моделювання комп'ютерних мереж і систем, що складаються з великого числа вузлів; розраховані інтегральні статистичні характеристики комп'ютерних мереж у м. Чернівцях та мереж громадського транспорту міст західного регіону України; розроблений метод оцінювання процесів розвитку і стійкості комп'ютерних мереж до спрямованих атак та розповсюдження комп'ютерних вірусів у них, а також вироблення оптимальної стратегії розподілу ресурсів для захисту їх елементів.

Практичні результати дисертаційної роботи використані та впроваджені у наступних організаціях та підприємствах:

- Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича, кафедрі «Комп'ютерних систем та мереж», в рамках виконання держбюджетної роботи за темою Міністерства освіти і науки України «Апаратно-програмні засоби підвищення ефективності та надійності обробки даних і захисту інформації в розподілених комп'ютерних системах і мережах» (№ державної реєстрації 0111U004784);
- частина результатів теоретичного і практичного характеру використана при розробці спецкурсів: «Автоматизоване проектування комп'ютерних систем», «Основи автоматизованого проектування складних об'єктів і систем» для студентів Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича МОН України за напрямом «Комп'ютерна інженерія»;
- Інтернет-провайдерах м. Чернівці «BV-Star&FoxNet», «DSS-Group» в межах проекту реалізації запропонованих прикладних програм для здійснення прогностичних оцінок кількості потенційних споживачів, наближеного розрахунку пасивного обладнання та побудови оптимальної стратегії захисту локальних мереж від спрямованих атак.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати, подані у дисертації, одержані здобувачем особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, автором запропоновано алгоритми програм, імітаційні моделі, виконані особисто основні розрахунки, проведено моделювання та аналіз результатів. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, особистий

внесок здобувача такий: [1-3] – розробка математичної моделі, моделювання та візуалізація процесів, оцінка результатів; [4,17-19] – постановка проблеми та розробка математичної моделі; [5,6,20] – обґрунтування використання фізичних аналогій, дослідження факторів впливу на динаміку росту комп'ютерних мереж; [7,8] – розробка та формалізація моделі клітинного представлення дифузійного процесу; [9,10] – обробка даних, встановлення статистичних закономірностей еволюції мереж громадського транспорту, застосування алгоритму моделювання комп'ютерних мереж до мереж громадського транспорту; [11,22,25,26,30] – обґрунтування статистичних закономірностей еволюційної динаміки росту мережі, вироблення алгоритму моделювання та візуалізації; [12,23,24,27] – вивчення топологічних властивостей мереж, обґрунтування підходів та методів, що уможливають ідентифікацію структури і параметрів мережевої моделі та аналіз результатів досліджень; [13,23,24,28,29] – запропонований та апробований ефективний алгоритм моделювання та візуалізації на прикладі задач розрахунку характеристик локальних мереж, оцінка характеру еволюції; [14-16,21] – постановка проблеми, встановлення та аналіз аналогій.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на 4-й Міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютерні науки та інформаційні технології (CSIT-2009)» (Львів, 2009); V міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Інформатика та комп'ютерні технології» (Донецьк, 2009); VI міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих науковців «Інформатика та комп'ютерні технології» (Донецьк, 2010); IV міжнародній конференції молодих вчених «Комп'ютерні науки та інженерія 2010» (Львів, 2010); Міжнародній науково-технічній конференції «Системний аналіз та інформаційні технології (SAIT-2011)» (Київ, 2011); I Всеукраїнській школі-семінарі молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» (Тернопіль, 2011); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інформаційні процеси і технології. Інформатика-2011» (Севастополь, 2011); Першій Міжнародній науково-технічній конференції «Обчислювальний інтелект (OI-2011)» (Черкаси, 2011); I Всеукраїнській науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки» (Чернівці, 2011); XI міжнародній науково-технічній конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)» (Вінниця, 2012); Международной научной молодежной школе «Системы и средства искусственного интеллекта ССИИ-2012» (Кацивели, АР Крым, Украина, 2012).

**Публікації.** За результатами виконаних досліджень опубліковано 30 праць загальним обсягом 160 сторінок, з них 18 статей у фахових наукових виданнях, з них 17 з технічних наук, 12 матеріалів доповідей у збірниках міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (114

позицій), 4 додатків на 30 сторінках. У праці подано 56 рисунків, 31 таблиця. Повний обсяг роботи – 187 сторінок, з них 144 - основного тексту.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** подано загальну характеристику роботи з точки зору критеріїв дисертації: обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету й основні завдання, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів досліджень. Наведено відомості про зв'язок роботи з науковими темами, а також про апробацію роботи, особистий внесок дисертанта, публікації, обсяг і структуру дисертації.

У **першому розділі** проведено аналіз структури та властивостей основних типів штучних мереж, зокрема соціальних мереж, мереж наукової співпраці, мереж електронних повідомлень, віртуальної мережі Web-сторінок WWW, об'єднаних гіперпосиланнями, мереж цитування, мереж громадського транспорту, складної мережі роутерів і комп'ютерів Інтернету, об'єднаних фізичними та радіозв'язками, їх структури та методів досліджень на основі теорії складних мереж (complex networks theory).

Складна мережа зображується графом з досить великою кількістю вузлів різного типу, що характеризуються багатовимірними кортежами ознак і динамічно мінливими зв'язками; розподіл ознак вузлів і характеристик зв'язків може бути описаний ймовірнісною моделлю.

Аналіз сучасного стану реальних складних мереж вказав на три основних напрямки досліджень у дисертаційній роботі:

- дослідження статистичних властивостей, які характеризують поведінку мереж;
- створення моделей мереж;
- оцінювання поведінки мереж при зміні їх структурних властивостей.

В розділі означено такі основні поняття теорії складних мереж: ступінь приєднання вузла  $k_i = \sum_{j=1} a_{ij}$ ,  $a_{ij}$  – елементи матриці суміжності,  $l_{ij}$  – довжина

найкоротшого шляху між вузлами  $i, j$ , максимальний найкоротший шлях

$$l_{\max} = \max \{l_{ij}\}, \text{ середня найкоротша відстань між вузлами } \langle l \rangle = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{\substack{i=1 \\ i>j}}^N l_{ij},$$

коефіцієнт кластерності вузла  $C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)}$  та розподіл ступенів вузлів

$$P(k) = \frac{N_k}{N} \text{ або щільність вузлів, які використовуються в роботі для побудови}$$

ймовірнісних моделей та дослідження статистичних закономірностей процесу розвитку та структуризації комп'ютерних мереж.

Аналіз у різні моменти часу комплексних мережеподібних інтелектуальних систем показав, що розподіл ступенів вершин  $P(k)$  для них має чітку степеневу форму:  $P(k) \sim k^{-\gamma}$ . Показник степеневого закону  $\gamma$  не



залежить від часу і вказує на те, що структурні властивості спрямувались до чіткого постійного стану.

У другому розділі обґрунтовано математичний апарат для дослідження та моделювання комп'ютерних мереж та реалізовано дві моделі для чисельного дослідження їх фрактальної геометрії: модель дифузно-обмеженої агрегації (ДОВА) та модель випадкового приєднання користувачів послуг у мережу.

Три концепції (мала довжина шляху, кластерність, ступінь без масштабування) привели до різних напрямків у моделюванні мереж в останні декілька років і дали поштовх трьом основним класам парадигм моделювання. По-перше, випадкові графи, які є варіантом моделі Ердоша-Рені, в яких діаметр зростає логарифмічно з ростом числа вершин. Це загальна риса для більшості моделей графів. По-друге, одразу після формулювання кластерності, з'явився клас моделей, які називаються моделями малого світу Ваттса-Строгаца. Модель тісного світу пояснює, чому діаметр реальних графів може залишатися дуже малим, коли число вершин зростає. Ці моделі є проміжними між високо фрагментованими регулярними ґратками і випадковими графами. Нарешті, встановлення степеневого розподілу ступенів вершин привело до появи різних моделей без масштабування, які, зосереджуючись на динаміці мереж, повинні пояснити походження степеневого розподілу ступенів вершин та інших відхилень від розподілу Пуассона, які мають місце в реальних мережевих системах.

Більшість реальних мереж підпорядковуються степеневому закону розподілу  $P(k) \sim k^{-\gamma}$ . Графи, які їх зображають, описуються моделлю переважного приєднання Барабаші-Альберт і є безмасштабними, так як, завдяки далекосяжним взаємодіям система не має масштабу зміни характерних величин. Ця модель відтворює характер зростання в часі багатьох реальних мереж, зокрема і досліджуваних комп'ютерних.

На основі фізичних аналогій розроблений спосіб графічного, динамічного зображення росту складної мережі і розвитку її компонент, що базується на методі дискретної дифузно-обмеженої агрегації, та реалізований за допомогою клітинних автоматів. Для чисельного дослідження фрактальної геометрії комп'ютерних мереж, відтворення форми та динаміки їх дендритного росту модифіковано модель дифузно-обмеженої агрегації. У географічному просторі, де спостерігається тенденція до утворення локальної комп'ютерної мережі, існує певна кількість потенційних користувачів послуг. Вони розподілені нерівномірно, тому є зміст говорити про різну концентрацію  $C$  споживачів.

Процеси дифузії описуються рівнянням дифузії  $\frac{\partial C}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right)$ , яке

розв'язується числовими методами з використанням явної різницевої схеми. В першому наближенні нове значення концентрації після кожного часового кроку обчислюється згідно з формулою:  $\hat{C}_{i,j} = C_{i,j} + D\tau \nabla^2 C$ . Для утворення нового кластера використовується частинка, яку ототожнюють з сервером мережі, до якої в подальшому приєднуються інші частинки-споживачі.

Частинки запускаються одна за одною з довільної, випадково вибраної точки на колі заданого радіуса  $r_0$ , побудованого навколо центрального зародка, більшого, ніж радіус кластера  $r_{\max}$  та слідує по своїх траєкторіях доти, доки не зіткнуться з агрегатом. Якщо в процесі свого руху частинка віддаляється від центру кластера на відстань, що перевищує  $3r_0$ , то ця частинка вилучається і запускається наступна.

Моделююча програма працює за таким алгоритмом: *створення нової точки*; *блукання точки* (важлива особливість цієї програми: точка завжди досягає периметра); *приєднання точки до кластера*. Результатом алгоритму блукання є координати точки на межі кластера. Відбувається збільшення кластера на одну точку у вказаних координатах. Природно, збільшується і периметр кластера. Структура фрактального кластера, змодельованого за цією методикою, зображена на рис. 1.

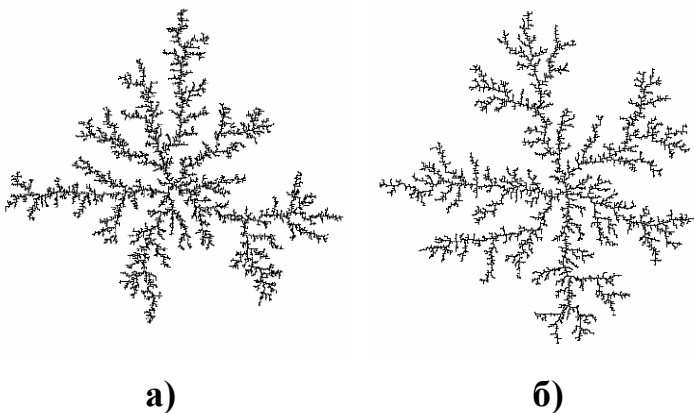


Рис.1. Фрактальна структура кластера мережі  
(а – при значенні  $D=1$ , б – при  $D=0,5$ )

Модель ДОО дає можливість на якісному рівні простежити за процесом кластеризації комп'ютерної мережі та здійснити оцінювання залежності кількості приєднаних у мережу споживачів  $M$  від радіуса кластера мережі.

Незважаючи на зовнішню схожість форм дендритного росту комп'ютерної мережі, запропонована модель має ряд суттєвих недоліків. В ній

неможливо здійснити кількісні оцінки та врахувати той факт, що мережу формують вузли з різними ступенями приєднання у мережу.

У наступній задачі враховано, що локальні комп'ютерні мережі є об'єктами графових структур і тому для їх дослідження та моделювання вибрано принцип випадкового приєднання вузлів як для класичного випадкового графа.

На основі розроблених алгоритмів реалізовано програму, результатом роботи якої є відображення динаміки росту локальної комп'ютерної мережі. Програма допускає коректування форми, розміру, орієнтування у просторі мережі, а також кількості споживачів, які утворюють простір моделювання. Вона відтворює структуру мережі, містить інформацію про число вузлів, конфігурацію зв'язків, дає можливість процес поданий у реальному масштабі часу подати у прискореному темпі роботи програми, що може бути використаним для прогнозування росту кількості споживачів для реальної мережі.

У **третьому розділі** досліджено і обґрунтовано методи, які уможливають ідентифікувати структуру і параметри моделей локальних комп'ютерних мереж на основі даних спостережень, розроблено математичну

модель генерації мережі на базі емпіричних даних, здійснено порівняльний аналіз характеристик реальних структур та розрахункових даних.

Комп'ютерна мережа зображується у вигляді графа  $G$ , який визначається як сукупність  $(V, E)$  кінцевої множини вершин  $V$ ,  $\dim(V) = N$ , і множини ребер  $E$ , яка складається із неупорядкованих пар  $(u, v)$ , де  $u, v \in V$  і  $u \neq v$ . Кожна вершина  $v$  характеризується своїм ступенем  $\deg(v) = k$ , тобто числом інцидентних їй ребер. Інтегральною характеристикою комп'ютерної мережі є закон розподілу ступенів  $p_k$ , який задає ймовірність того, що випадково вибрана вершина має ступінь  $k$ .

Ступеневу послідовність для неорієнтованого графа зручно подати у формі  $d = (k_1^{n_1}, k_2^{n_2}, \dots, k_s^{n_s})$ , де числа  $k_i$  є ступенями вершин, а показник  $n_i$  визначає кількість повторів числа  $k_i$  у послідовності. Такий запис дає можливість пов'язати дискретний розподіл ступенів вершин  $p_k$  зі ступеневою послідовністю  $d$  у формі  $p_k \stackrel{def}{=} P[x = k_i] = n_i / N$ .

Для здійснення процесу моделювання комп'ютерних мереж використано характеристики реальних мереж, а саме «BV-Star & FoxNet», «DSS-Group» та «Кабельне телебачення міста» в м. Чернівцях, наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Характеристики комп'ютерних мереж

$k$	«BV Star & Fox Net» в м. Чернівцях						«КТМ» в м. Чернівцях		«DSS-Group» в м. Чернівцях	
	2005		2008		2011		$N=1604$		$N=2023$	
	$n_k$	$p_k$	$n_k$	$p_k$	$n_k$	$p_k$	$n_k$	$p_k$	$n_k$	$p_k$
1	207	0.761	401	0.682	614	0.671	1214	0.756	1242	0.613
2	13	0.048	37	0.063	59	0.064	67	0.042	224	0.110
3	5	0.018	48	0.082	79	0.086	71	0.044	220	0.110
4	10	0.036	28	0.047	51	0.056	38	0.024	79	0.040
5	14	0.051	19	0.032	22	0.024	84	0.052	68	0.033
6	3	0.011	14	0.024	33	0.036	34	0.021	35	0.017
7	6	0.022	6	0.010	9	0.010	20	0.012	46	0.022
8	8	0.029	8	0.014	8	0.009	26	0.016	26	0.012
9	2	0.007	8	0.014	10	0.011	7	0.004	13	0.006
10	2	0.007	6	0.010	6	0.006	15	0.009	21	0.010
11	2	0.007	6	0.010	8	0.009	3	0.002	10	0.005
12	0	0	2	0.003	7	0.008	13	0.008	14	0.007
13	0	0	2	0.003	3	0.003	4	0.002	8	0.004
14	1	0.004	1	0.001	3	0.003	2	0.001	9	0.004
15	0	0	2	0.003	3	0.003	4	0.002	4	0.002

За цими даними побудовано розподіли ступенів вершин, здійснено апроксимацію «хвостів» розподілів (рис. 2) та встановлено для них значення параметра степеневого розподілу:  $p_k = k^{-2.2}$  для мережі «BV-Star & Fox Net»,  $p_k = k^{-2.6}$  для мережі «Кабельне телебачення міста»,  $p_k = k^{-2.1}$  для «DSS-Group».

У табл.1 наведено характеристики мережі «BV-Star & Fox Net» в різні часові проміжки. Відбувається ріст та структуризація системи за степеневим розподілом  $p_k = k^{-\gamma}$ , причому значення показника  $\gamma = 2,4$  практично

залишається незмінним за останні роки в період з 2008 по 2011 рік, що вказує на те, що структурні властивості мережі перебувають у стійкому стаціонарному стані.

Метод генерації мережі для заданого закону розподілу ступенів вершин  $p_k$  характеризується параметрами узагальненої конфігураційної моделі:  $N$  – число вершин у мережі;  $s$  – число класів вершин;  $i \in \{1, 2, 3, \dots, s\}$  – позначає один із класів вершин;  $n_i$  – число вершин  $i$ -го класу;  $k_i$  – ступінь вершини  $i$ .

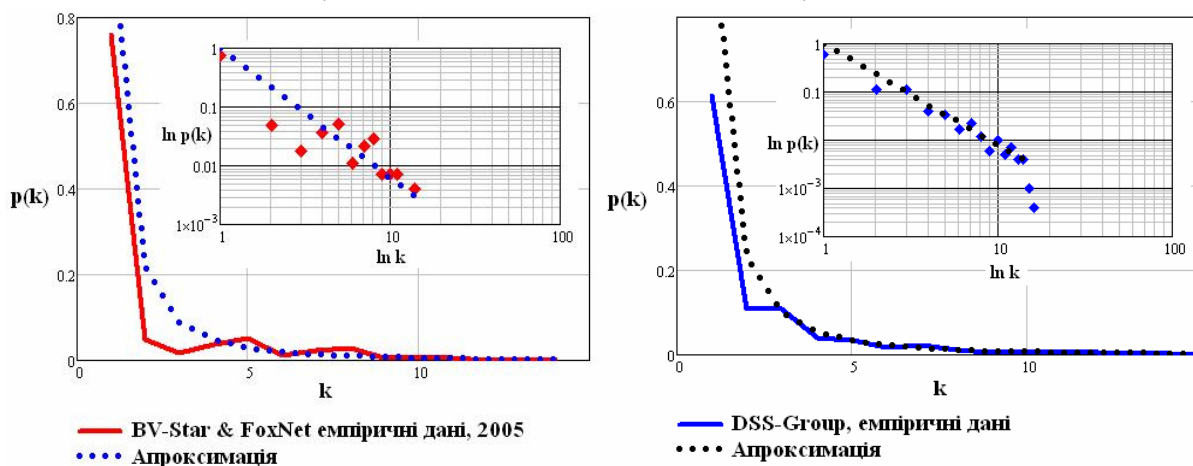


Рис.2. Апроксимація «хвостів» розподілів ступенів вершин мереж

Оскільки розподіл ступенів вершин  $p_k$  заданий, то обчислювальна процедура зводиться до наступних операцій:

- формуємо ступеневу послідовність  $d$ , вибираючи  $s$  чисел  $n_i$  згідно із заданим розподілом  $p_k$ , де  $i = \overline{1, s}$ ;
- кожній вершині  $i$  графа присвоюємо  $k_i$  «заготовок» (кінців) для майбутніх ребер;
- зі ступеневої послідовності випадковим чином отримуються пари «заготовок»; вони з'єднуються ребром у тому випадку, якщо нове ребро не приведе до утворення ребер-циклів (петель) або мультиребер; якщо ребро згенероване, то відповідні індекси із ступеневої послідовності видаляються;
- попередній крок повторюється до тих пір, поки ступенева послідовність не стане порожньою;
- укладка графа здійснюється шляхом розміщення вершин з найбільшими ступенями приєднання в центрі графа, а вершини з меншими ступенями радіально розташовуються від центру до периферії в порядку зменшення їх ступенів;
- зв'язки між вузлами заповнюються послідовно, починаючи з вершин з найбільшою кількістю ребер.

Остання умова забезпечує об'єднання всіх вузлів у єдину структуру стохастичного графа за принципом переважного приєднання Барабаші-Альберт, що відображає факт обов'язкового приєднання всіх користувачів у реальну локальну комп'ютерну мережу.

На рис.3 подано алгоритм генерації довільної можливої конфігурації мережі із заданим розподілом ступенів вершин  $p_k$ .

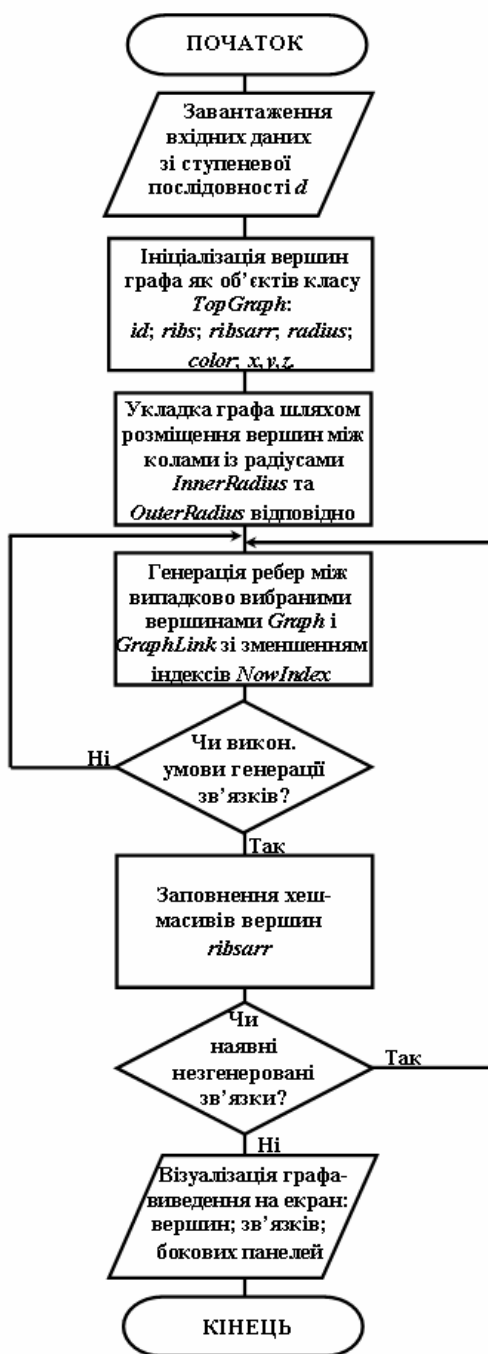


Рис.3. Блок-схема програмної реалізації алгоритму моделювання

В основу розроблених програмних засобів дослідження та опрацювання структури алгоритмів покладено розроблені власні методи і алгоритми, що базуються на представленні комп'ютерних мереж у вигляді стохастичних графів.

**Четвертий розділ** присвячено моделюванню просторової структури та динаміки росту реальних комп'ютерних мереж та мереж громадського транспорту міст західного регіону України із застосуванням розроблених методів та алгоритмів, підтверджено їх ефективність у задачах прогнозування та стійкості комп'ютерних мереж до спрямованих атак.

Результатом програмної реалізації запропонованого алгоритму є власне комп'ютерна мережа, зображена у вигляді стохастичного графа з відомим числом вершин і заданим розподілом ймовірностей їх приєднання (рис.4).

Роботу алгоритму моделювання та адекватність описання моделлю реальної структури проілюстровано шляхом генерації графа з використанням характеристик реальних комп'ютерних мереж «BV-Star & Fox Net», «Кабельне телебачення міста» та «DSS-Group» у Чернівцях (табл.1).

За вибіркою визначено розподіли таких числових характеристик

для реальних мереж:

- 1) кількість вершин у мережі  $n_k$  з різними ступенями їх приєднання;
- 2) впорядкований список ступенів вершин у вигляді ступеневої послідовності  $d = (k_1^{n_1}, k_2^{n_2}, \dots, k_s^{n_s})$  для моделювання стохастичного графа;
- 3) відповідні ймовірності  $p_1, p_2, p_3, \dots, p_s$  приєднання вершин з різними ступенями  $k_i$  ( $i = \overline{1, s}$ ) у мережу.

Як ілюстрація, на рис.4 наведено приклад візуалізації стохастичного графа, який відображає топологію мережі «BV-Star & FoxNet».

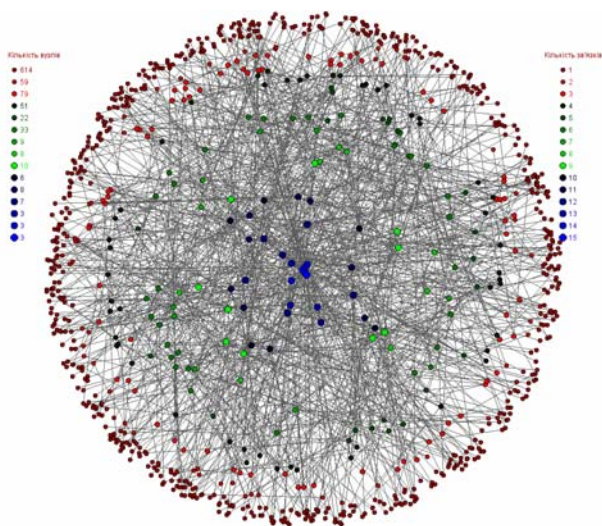


Рис.4. Стохастичний граф, що відповідає ймовірнісній моделі мережі «BV-Star & FoxNet»

Для здійснення процесу динамічної візуалізації використано алгоритм укладання графа, який дає найбільш інформативне відображення структури та властивостей мереж.

Запропонований у роботі алгоритм дає можливість здійснити прогнозування розвитку мережі. Як приклад, відслідковуючи динаміку становлення мережі «BV-Star & Fox Net» за останні роки, наведену в табл.1, здійснивши процес моделювання за визначеним для неї інтегральним законом розподілу ймовірностей  $p_k = k^{-2,4}$  та щорічним приростом  $\Delta N \approx 110$  вершин цієї мережі, можна

обчислити прогнозовану кількість користувачів, серверів та комутаторів у ній у 2014 р. (табл.2).

Таблиця 2. Прогнозована кількість зв'язків у мережі «BV-Star & Fox Net»

N=1245	$k$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	$n_k$	751	271	89	45	26	17	12	8	6	5	4	3	3	3	3

Адекватність моделі встановлюється шляхом зіставлення оцінок усередненого апроксимованого та реального розподілів ступенів вузлів  $p_k$

згідно з формулою  $\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (p_k - \bar{p}_k)^2$ . Розкид даних для досліджуваних

мереж у різні часові проміжки, наведених у табл.1, порівняно з усередненими апроксимованими у відсотковому відношенні складає  $7.5 \div 3.5\%$  мінливості варіаційного ряду, що свідчить про адекватність описання моделлю реальних мереж.

Запропонована абстрактна модель комп'ютерної мережі забезпечує прогностичне оцінювання атакуючих дій різних категорій порушників за рахунок реалізації найбільш розповсюджених сценаріїв загроз безпеки мережі, а саме спрямованих та випадкових атак на вузли. Випадковим атакам (відмова, збоєм, R-атакам) властивий випадковий вибір атакуючого вузла. Класична стратегія цілеспрямованих атак (I-атак) полягає у послідовному знищенні вузлів з максимальною зв'язаністю.

Розроблено узагальнену агентну модель еволюції мережевого ансамблю в умовах дестабілізуючих загроз. Основними компонентами описової конструкції мережі являються *модель загроз* та *модель безпеки*. На вхід моделі загроз подається сформований стохастичний граф, що відображає структуру реальної мережі. Над графом проводяться два сценарії атак – «природна» ліквідація вершин і ребер, що відповідає випадковим R-атакам, та ліквідація вершин з найбільшими ступенями, тобто I-атака. Відносний розмір максимального

кластера  $S$  визначається часткою вузлів, що містяться у найбільшому кластері мережі  $S = 1 - \sum_{k=1}^{k_{\max}} \frac{k \cdot n_{del}(k)}{N}$ , де  $n_{del}(k)$  – кількість видалених вузлів ступеня  $k$ ,  $N$  – загальна кількість вузлів у мережі.

Запропонована модель забезпечує імітацію атак у вигляді комбінованих загроз незахищеним вузлам мережі в прямій (R-загрози + I-загрози) та зворотній (I-загрози + R-загрози) послідовності. З допомогою цієї моделі виявлено, що для будь-якої з представлених мереж атакуюча комбінація I-R є більш ефективною, ніж R-I (рис.5).

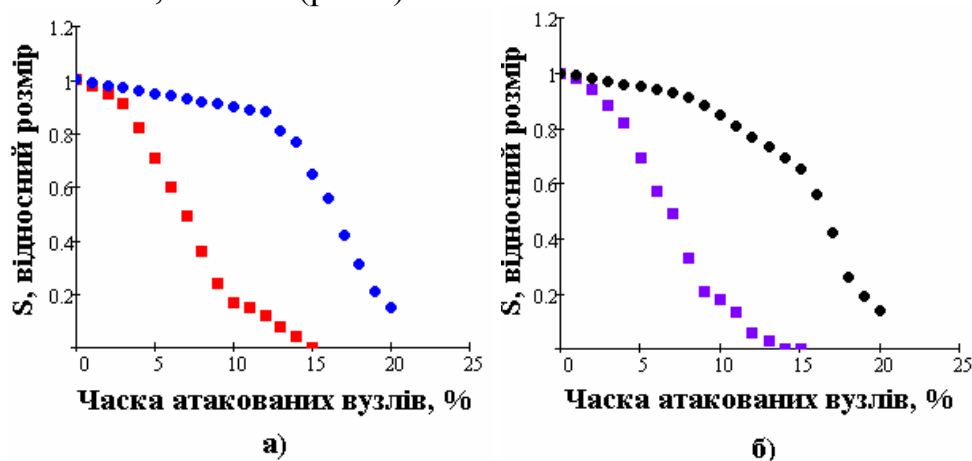


Рис.5. Залежність  $S$  в мережах «BV-Star & FoxNet» (а), «KTM» (б) від кількості атакованих вузлів, що піддаються I+R (■) та R+I (●) атакам

Розроблена *модель безпеки* враховує, що основною мірою безпеки є ризик:  $R = \rho_{th} \cdot \rho_v \cdot Pl$ , де  $R$  – ризик,  $Pl$  – ціна втрати  $\rho_{th}$  і  $\rho_v$  – відповідні ймовірності загрози та вразливості. Відмінною особливістю цієї мережевої моделі є деталізація атак за рахунок докладного опису складових частин пари «джерело – уразливість». Модель уможливорює шляхом зіставлення опису джерел загроз, близьких до реальних, вивчати більш складні атаки на системи, ніж у їх традиційному трактуванні в теорії комплексних мереж. Елементом мережі приписуються величини їх уразливості, в загальному випадку, з  $\rho_v(i)$  відмінними від 1, які визначаються об'ємом фінансових вкладів  $F_i$  в безпеку  $i$ -го елемента:  $\rho_v(i) = f(F_i)$ .

Для комп'ютерних мереж «BV-Star & FoxNet», «KTM» та «DSS-Group» досліджено реакцію відповідних змодельованих стохастичних графів на цілеспрямовані загрози захищених елементів – вузлів. Вважалось, що ймовірність успішної атаки на вузол змінюється тільки зі зміною  $\rho_{вр}(i)$ , яка зменшується експоненційно зі збільшенням «товщини» захисного бар'єра  $d_i$ , який визначається об'ємом затрат, тобто  $d_i \sim F_i$ .

Вважаючи, що стратегія безпеки визначає розподіл ресурсів між вузлами, здійснено дослідження реакції мережі на загрози для випадків відсутності фінансування та різних можливих стратегій розподілу інвестицій для захисту, які залежать від ступеня вузла (при однаковому сумарному об'ємі). Будуючи оптимальну стратегію захисту мережі, обумовлену як вибором її топології, так і

розподілом ресурсів на захист її елементів, необхідно максимально точно оцінювати стратегію та дії атакуючої сторони. Так, із проведених досліджень випливає, що оптимальною стратегією захисту локальних комп'ютерних мереж є стратегія захисту вузлів із високими та середніми ступенями приєднання. Для вивчення властивостей, пов'язаних з надійністю та захистом від уразливості локальних комп'ютерних мереж, реалізовано процедуру виділення «опорної мережі», що полягає у багатоетапному відрізання листів початкового графа.

Побудову опорної мережі Інтернет-провайдера «BV-Star & FoxNet» здійснено шляхом видалення різної кількості листів на кожному етапі моделювання. В результаті отримано опорну мережу, що складається з 197 вузлів, кожен з яких має ступінь, не менший, ніж 2 (рис.6).

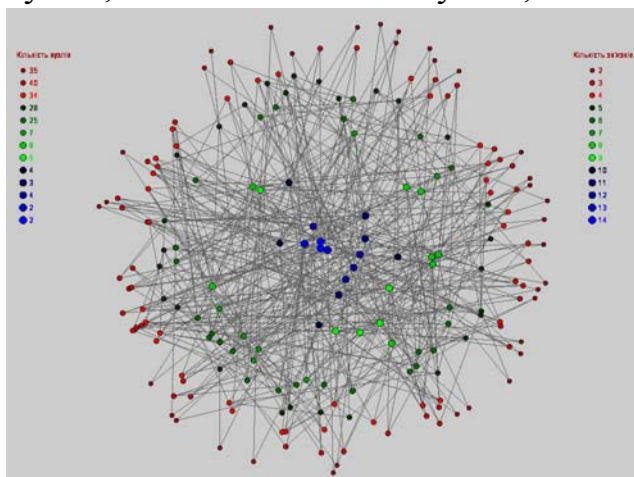


Рис.6. Опорна мережа «BV-Star & FoxNet»

Дослідження отриманих опорних мереж дають можливість ефективно підійти до рішення широкого спектра задач стійкості практично значущих мережевих конструкцій. Розроблені алгоритми та принципи ймовірнісного моделювання безмасштабних комп'ютерних мереж використано та адаптовано до дослідження мереж громадського транспорту (ГТ) міст західного регіону України. Зібрані дані та проаналізовані мережі ГТ чотирьох найбільших міст західного регіону України: Львова, Івано-Франківська, Тернополя та Чернівців. Вперше розраховано сукупні розподіли ступенів вузлів  $P(k)$  для мереж ГТ в L – та P – просторах. В L – просторі вони наближено описуються степеневими законами  $P(k) \sim k^{-\gamma}$ , а у P – просторі обчислювалися згідно з формулою  $P(k) = \int_k^{k_{\max}} p(k')dk'$ . Результати досліджень характеристик мереж ГТ наведено в табл. 3.

Таблиця 3. Характеристики мереж ГТ міст України (N – кількість зупинок, R – кількість маршрутів,  $\gamma$  і  $\alpha$  - показники розподілів  $P(k)$  в L- та P- просторах відповідно з їхніми відхиленнями  $\Delta\gamma$ ,  $\Delta\alpha$ )

Місто	N	R	$\langle k \rangle$	$\gamma$	$\Delta\gamma$	$\alpha$	$\Delta\alpha$
Львів	209	110	3,212	2.33	0.23	0.0322	0.0006
Івано-Франківськ	89	60	4,292	1.67	0.20	0.0461	0.0009
Тернопіль	84	45	3,606	2.1	0.30	0.0253	0.0004
Чернівці	118	53	5,402	2.05	0.17	0.0414	0.0006

Розроблено аналітичну модель для визначення середніх довжин шляху у мережах ГТ. Встановлено універсальну залежність середніх міжвузлових відстаней у мережах ГТ від розподілу ступенів вершин цих мереж.



## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ РОБОТИ

В дисертаційній роботі розв'язано актуальну наукову задачу розроблення методів та засобів математичного моделювання процесів розвитку структур комп'ютерних мереж, що має важливе значення для підвищення ефективності функціонування цих мереж і захищеності їх елементів від спрямованих атак. При цьому отримано сформульовані нижче основні результати.

1. Проведено аналіз топології та властивостей основних типів штучних мереж, їх структури та методів досліджень в рамках формалізму теорії складних мереж (complex networks theory) з метою використання їх статистичних властивостей, методів та засобів дослідження для вивчення локальних комп'ютерних мереж, які є предметною областю дослідження дисертаційної роботи.

2. Виходячи із статистичних закономірностей, яким підпорядковані графи, що зображають локальні комп'ютерні мережі, продемонстровано, що вони відносяться до систем без масштабування зміни характерних величин мережі, а зростання та переважне приєднання цих безмасштабних складних мереж відбувається за степеневим законом розподілу ймовірностей, чим зумовлений вибір моделі Барабаші-Альберт в ролі прототипу моделювання локальних комп'ютерних мереж.

3. Запропоновано концепцію комп'ютерного моделювання процесів утворення та росту фрактальних кластерів комп'ютерної мережі за алгоритмом обмеженої дифузії агрегації та методів теорії графів. Здійснено моделювання процесу росту комп'ютерної мережі у вигляді дендритів, що пов'язано зі схожістю як у структурному рості, так і в математичному ймовірнісному описі механізмів еволюції складних мереж та росту дендритних кристалів. Отримані результати дають можливість на якісному рівні відтворити дендритну топологію комп'ютерних мереж.

4. Обчислено інтегральні ймовірнісні характеристики реальних комп'ютерних мереж Інтернет-провайдерів м. Чернівці: «BV-Star & FoxNet», «Кабельне телебачення міста» та «DSS-Group» у різні часові проміжки, проведено їх апроксимацію для здійснення процесу моделювання.

5. Вперше розроблено нову математичну модель генерування структури локальних комп'ютерних мереж із заданою функцією щільності розподілу ступенів вузлів з використанням апарату теорії комплексних мереж, що дало можливість відтворювати ці мережі як стохастичний граф із заданими ймовірнісними властивостями. На основі запропонованого у роботі алгоритму моделювання здійснено прогнозування еволюційної динаміки розвитку та становлення реальних комп'ютерних мереж на наступні роки.

6. Запропоновані в роботі математичні моделі відтворення сценаріїв атак використано для оцінювання уразливості змодельованих стохастичних графів та розв'язання задачі про стійкість безмасштабних комп'ютерних мереж до випадкових та спрямованих атак. Розроблено узагальнену модель еволюції мережевого ансамблю в умовах дестабілізуючих загроз.

7. Досліджено статистичні закономірності мереж громадського транспорту чотирьох міст західного регіону України, здійснено адаптацію

методу ймовірнісного моделювання до вивчення їх топологічних властивостей. Встановлено, що мережі громадського транспорту є безмасштабними для  $L$ -простору та мережами тісного світу у  $R$ -просторі з відносно малим значенням найкоротшого шляху  $\langle l_{ij} \rangle$ .

### СПИСОК ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Пасічник В. В. Моделювання і візуалізація засобами PROCESSING комп'ютерних мереж / В. В. Пасічник, Н. М. Іванушак // Математичні машини і системи. – 2013. – № 1. – С. 118-126.
2. Іванушак Н. М. Моделювання розвитку структур комп'ютерних мереж / Н. М. Іванушак, В. В. Пасічник // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – № 3/2 (63). – С. 13-19.
3. Пасічник В. Еволюційне моделювання і візуалізація комп'ютерних мереж у середовищі PROCESSING / В. Пасічник, Н. Іванушак // Вісник НУ „Львівська політехніка”. – 2012. – № 732: Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – С. 147-156.
4. Пасічник В. В. Дослідження та моделювання складних мереж / В. В. Пасічник, Н. М. Іванушак // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – № 2/3(44). – С. 43-48.
5. Пасічник В. В. Моделювання складних мереж / В. В. Пасічник, Н. М. Іванушак // Вісник НУ „Львівська політехніка”. – 2010. – № 672 : Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – С. 120-128.
6. Пасічник В. В. Структуризація та динамічні властивості складних комп'ютерних мереж / В. В. Пасічник, Н. М. Іванушак // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – № 4/9 (46). – С. 16-21.
7. Пасічник В. В. Дослідження, моделювання та проектування складних мереж / В. В. Пасічник, Н. М. Іванушак // Вісник НУ „Львівська політехніка”. – 2010. – № 685 : Комп'ютерні системи проектування теорія і практика. – С. 3-12.
8. Пасічник В. В. Ймовірнісне моделювання процесів кластеризації комп'ютерних мереж / В. В. Пасічник, Н. М. Іванушак // Вісник НУ „Львівська політехніка”. – 2011. – № 699 : Інформаційні системи та мережі. – С. 204-212.
9. Пасічник В. В. Статистичні закономірності росту мереж громадського транспорту міст західного регіону України / В. В. Пасічник, Н. М. Іванушак // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2011. – № 6/4 (54). – С. 13-17.
10. Пасічник В. В. Дослідження статистики мереж громадського транспорту найбільших міст західного регіону України / В. В. Пасічник, Н. М. Іванушак // Вісник НУ „Львівська політехніка”. – 2011. – № 715 : Інформаційні системи та мережі. – С. 225-234.
11. Пасічник В. Дослідження еволюційної динаміки та статистичне моделювання комп'ютерних мереж / Пасічник В., Іванушак Н. // Вісник Тернопільського національного технічного університету. сер. Приладобудування

- та інформаційно-вимірювальні технології. – 2012. – Т. 66. – № 2. – С.151-164.
- 12.Пасічник В. В. Моделювання процесів кластеризації комп'ютерних мереж та дослідження їх топологічних властивостей / В. В. Пасічник, Н. М. Іванушак // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво : Міжвузівський збірник. – Луцьк, 2011. – Вип. 4. – С. 145-150.
  - 13.Пасічник В. В. Імітаційне моделювання процесу росту локальних комп'ютерних мереж / В. В. Пасічник, Н. М. Іванушак // Вісник Хмельницького національного університету. – 2010. – № 5. – С. 238-245.
  - 14.Виклюк Я. Моделювання системи надання туристичних послуг споживачеві на основі спінових моделей Ізінга / Я. Виклюк, Н. Іванушак // Вісник НУ „Львівська політехніка”. – 2010. – № 663 : Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – С. 258-262.
  - 15.Виклюк Я. І. Методологія еконофізики як основа інформаційних систем розвитку та автоматизації соціально-економічних структур / Я. І. Виклюк, Н. М. Іванушак // Вісник НУ „Львівська політехніка”. – 2009. – № 653 : Інформаційні системи та мережі. – С. 61-70.
  - 16.Виклюк Я. І. Еконофізика як складова інформаційних систем автоматизації соціально–економічних структур / Я. І. Виклюк, Н. М. Іванушак // Науковий вісник Чернівецького університету. – 2008. – Вип. 423 : Фізика. Електроніка. Тематичний випуск «Комп'ютерні системи та компоненти». – С. 130-137.
  - 17.Алгоритм і програмне забезпечення оптимізації технічних параметрів фотодетекторів / Г. І. Воробець, С. Л. Воропаєва, Ю. Г. Добровольський, Н. М. Іванушак // Науковий вісник Чернівецького університету. – 2009. – Вип. 446 : Комп'ютерні системи та компоненти. – С. 112-116.
  - 18.Виклюк Я. І. Застосування семантичних мереж на основі спінових моделей Ізінга для оптимізації систем підтримки прийняття рішень / Я. І. Виклюк, Н. М. Іванушак // Науковий вісник Чернівецького університету. Комп'ютерні системи та компоненти. – 2009. – Вип. 479. – С. 98-102.
  - 19.Пасічник В. В. Моделювання динаміки росту інтернету / В. В. Пасічник, Н. М. Іванушак // Матеріали 4-ї Міжнар. наук.-техн. конф. „Комп'ютерні науки та інформаційні технології” (CSIT-2009). – Львів, 2009. – С. 337-340.
  - 20.Виклюк Я. І. Моделювання системи надання послуг на основі спінових моделей Ізінга (на прикладі туристичної галузі обслуговування) / Я. І. Виклюк, Н. М. Іванушак // Матеріали 4-ї Міжнар. наук.-техн. конф. „Комп'ютерні науки та інформаційні технології” (CSIT-2009). – Львів, 2009. – С. 390-393.
  - 21.Пасічник В. В. Динаміка росту Інтернету та його кореляційні властивості / В. В. Пасічник, Н. М. Іванушак // Матеріали V міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих науковців «Інформатика та комп'ютерні технології». – Донецьк, 2009. – С. 443-450.
  - 22.Іванушак Н. М. Моделювання та структуризація складних комп'ютерних мереж / Н. М. Іванушак, В. В. Пасічник // Матеріали VI міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих науковців «Інформатика та комп'ютерні технології». – Донецьк, 2010. – С. 431-439.

23. Пасічник В. В. Дослідження структури та динаміки складних мереж / В. В. Пасічник, Н. М. Іванушак // Матеріали ІV міжнар. конф. молодих вчених «Комп'ютерні науки та інженерія 2010». – Львів, 2010. – С. 58-59.
24. Іванушак Н. М. Дослідження та моделювання процесів кластеризації комп'ютерних мереж / Н. М. Іванушак // Матеріали міжнар. наук.-техн. конф. „Системний аналіз та інформаційні технології” (SAIT-2011). – Київ, 2011. – С. 255.
25. Пасічник В. В. Дослідження та моделювання структурного росту комп'ютерних мереж / В. В. Пасічник, Н. М. Іванушак // Матеріали I Всеукр. школи-семінару молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології». – Тернопіль, 2011. – С. 36-38.
26. Пасічник В. В. Дослідження та моделювання процесів кластеризації комп'ютерних мереж / В. В. Пасічник, Н. М. Іванушак // Матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. «Інформаційні процеси і технології. Інформатика-2011». – Севастополь, 2011. – С. 80-83.
27. Пасічник В. В. Дослідження комп'ютерних мереж та моделювання їх фрактального росту / В. В. Пасічник, Н. М. Іванушак // Матеріали Першої Міжнар. наук.-техн. конф. «Обчислювальний інтелект» (OI-2011). – Черкаси, 2011. – С. 221-222.
28. Пасічник В. В. Генерація комп'ютерної мережі для заданого закону розподілу ступенів вершин / В. В. Пасічник, Н. М. Іванушак // Матеріали I Всеукр. наук.-практ. конф. «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки». – Чернівці, 2011. – С. 142-146.
29. Пасічник В. Прогнозування поведінки комп'ютерних мереж при зміні їх структурних властивостей / В. В. Пасічник, Н. М. Іванушак // Тези доп. Одинадцятої міжнар. наук.-техн. конф. «Контроль і управління в складних системах» (КУСС-2012). – Вінниця, 2012. – С. 57.
30. Пасічник В. В. Моделювання та візуалізація структури комп'ютерних мереж у середовищі PROCESSING / В. В. Пасічник, Н. М. Іванушак // Матеріали Междунар. науч. молодежної школи «Системы и средства искусственного интеллекта» (ССИИ-2012), –п. Кацивели, АР Крым, 2012. – С. 53-56.

## АНОТАЦІЇ

**Іванушак Н.М. Математичні моделі розвитку структур комп'ютерних мереж.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Національний університет „Львівська політехніка”, Львів, 2013.

Об'єктом досліджень є комп'ютерні мережі, процеси еволюційної динаміки яких описані на основі понять статистичної фізики комплексних мереж. Проведено дослідження їх топології, структури, ієрархічної організації і

локальних властивостей з використанням і обґрунтуванням нових методів і алгоритмів моделювання росту і структури комп'ютерних мереж.

В роботі розглянуто модель і сформульовано правила структурування складних комп'ютерних мереж з використанням апарату теорії графів. Адекватність опису моделлю реальної структури проілюстровано шляхом генерації стохастичного графа з використанням статистичних характеристик реальних комп'ютерних мереж, таких як «BV-Star & FoxNet», «Кабельне телебачення міста» і «DSS-Group» в м. Чернівцях.

На основі емпіричних даних, а також методу генерації мережі для заданого закону розподілу ступенів вершин мережі, здійснено моделювання в середовищі «Processing», зроблено порівняльний аналіз і систематизацію основних характеристик. Проаналізовано вплив статистичних характеристик мереж на структуру і властивості стохастичних моделей графів, які їх зображають.

Запропоновані в роботі алгоритми моделювання використано для рішення задачі про стійкість комп'ютерних мереж до хакерських атак та розповсюдження комп'ютерних вірусів.

*Ключові слова:* комп'ютерні мережі, теорія комплексних мереж, математичне моделювання, стохастичний граф, розподіл ступенів вершин.

**Иванущак Н.М. Математические модели развития структур компьютерных сетей. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Национальный университет “Львовская политехника”, Львов, 2013.

Объектом исследований являются компьютерные сети, процессы эволюционной динамики которых описаны на основе понятий статистической физики комплексных сетей. Проведено исследование их топологии, структуры, иерархической организации и локальных свойств. Компьютерные сети не являются статичными, они развиваются в пространстве, поэтому для понимания динамики их развития, необходимо знать принципы их эволюции. С этой точки зрения, в работе был использован и обоснован выбор новых методов и алгоритмов для моделирования роста и структуры компьютерных сетей.

В работе рассмотрена модель и сформулированы правила структурирования сложных компьютерных сетей с использованием аппарата теории графов. Работа алгоритма моделирования, адекватность описания модели реальной структуры проиллюстрирована путем генерации стохастического графа с использованием статистических характеристик реальных компьютерных сетей, таких как «BV-Star & FoxNet», «Кабельное телевидение города» и «DSS-Group» в г. Черновцы.

На основе эмпирических данных, а также метода генерации сети для заданного закона распределения степеней вершин сети, осуществлено моделирование в среде «Processing», сделан сравнительный анализ и систематизация основных характеристик. Проанализировано влияние

статистических характеристик сетей на структуру и свойства соответствующих стохастических графов. Осуществлено прогнозирование эволюционной динамики развития и становления реальных компьютерных сетей на последующие годы.

Проведенные оценки, использованные алгоритмы моделирования и обоснованность применения математического аппарата позволяют сделать вывод о точности и адекватности рассматриваемой модели к реальным структурам. Предложенные в работе алгоритмы построения сценариев атак использованы для оценки уязвимости смоделированных стохастических графов и решения задачи об устойчивости компьютерных сетей к случайным и направленным атакам и распространения компьютерных вирусов в них. Разработана обобщенная модель эволюции сетевого ансамбля в условиях дестабилизирующих угроз. Осуществлены построение и исследование структур опорных сетей для эффективного решения широкого спектра задач устойчивости практически значимых сетевых конструкций.

*Ключевые слова:* компьютерные сети, теория комплексных сетей, математическое моделирование, стохастический граф, распределение степеней вершин.

**Ivanushchak N.M. Mathematical models of the structures of computer networks.** – Manuscript.

Dissertation for the Degree of Candidate of Science in Technical Sciences in Speciality: 01.05.02 – Mathematical Modeling and Numerical Methods. – Lviv Polytechnic National University. – Lviv, 2013.

The object of research is computer systems, the processes of evolutionary dynamics of them are described on the basis of the concept of statistical physics of complex networks. There was studied their topology, structure, hierarchical organization, and the local properties with using and justifying of new methods and algorithms of modelling of growth and structure of computer networks.

There was considered the model and formulated rules of structuring of complex computer networks using the apparatus of graph theory. The adequacy description of the real structure by the model is illustrated by the generation of stochastic graph using the statistical characteristics of real computer network, such as “BV-Star & FoxNet”, “City Cable Television” and “DSS-Group” in Chernivtsi.

On the basis of empirical data and the original method of network generation by the detected laws of degree distribution of nodes there was performed network modeling in the environment «Processing», made comparative analysis and systematization of the main characteristics. There was analyzed the influence of the statistical characteristics of networks on the structure and properties of stochastic graph models that represent them.

The proposed algorithms of modeling used to solve the problem of the stability of computer networks to hacker attacks and the distribution of computer viruses.

*Keywords:* computer networks, complex network theory, mathematical modeling, stochastic graph, degree distribution of vertex.

Підписано до друку 29.08.2013. Формат 60 × 84/16.  
Папір офсетний. Друк різнографічний. Ум.-друк. Арк. 0,9.  
Обл.-вид. арк.. 0,9. Тираж 100. Зам. А-029п.  
Видавництво та друкарня Чернівецького національного університету  
58012, Чернівці, вул. Коцюбинського, 2  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №891 від 08.04.2002 р.