

Міхав В.В.

Приватна установа «Університет науки, підприємництва та технологій»

Мелешко Є.В.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Якименко М.С.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Босько В.В.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Дідик О.К.

Центральноукраїнський національний технічний університет

СТРУКТУРНІ МОДЕЛІ СКЛАДНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

У статті проведено систематизацію, порівняльний аналіз та експериментальне дослідження структурних моделей складних мереж, що застосовуються в імітаційному моделюванні комп'ютерних і телекомунікаційних систем. Розглянуто класичні топологічні моделі Ерьюша-Реньї, Воттса-Строгаца, Барабаші-Альберт, стохастичну блок-модель і просторові графи як фундаментальні підходи до побудови мережеских структур. Визначено їхні переваги та обмеження щодо відтворення ключових властивостей складних систем: «малосвітності», високої кластеризації, степеневого розподілу ступенів вузлів і наявності кластерів. Окрему увагу приділено сучасним гібридним і генеративним моделям, що поєднують декілька характерних ознак одночасно: просторові обмеження, преференційне приєднання та тріадне замикання. Як показало дослідження, класичні мережескі моделі залишаються базою для аналітики й синтезу структури комп'ютерних та телекомунікаційних систем, однак моделювання сучасних телекомунікацій потребує комбінованих і домен-орієнтованих топологій. Найновіші моделі телекомунікаційних мереж представляють собою інтеграцію декількох структурних властивостей в одному генераторі, спеціалізовані топології та появу генеративних підходів до побудови «цифрових двійників» мереж. Практичну частину роботи присвячено експериментальному порівнянню трьох моделей: *Spatial Scale-Free with Triads*, *Clustered Overlay Network* та *Preferential Attachment with Triads and Aging*. Для кожної з них обчислено основні метрики мережі: середній ступінь, розподіл ступенів вузлів, середній локальний коефіцієнт кластеризації, глобальну транзитивність, кількість трикутників, середню довжину найкоротших шляхів та діаметр мережі, – що дало змогу оцінити рівень структурної складності. Показано, що модель *Spatial Scale-Free with Triads* забезпечує найбільш виражені властивості складної мережі, характерної для комп'ютерних та телекомунікаційних систем – високу кластеризацію, степеневий розподіл та короткі шляхи.

Ключові слова: складні мережі, безмасштабні мережі, просторові мережі, імітаційне моделювання, структурні моделі мереж, гібридні моделі мереж, кластеризація, тріадне замикання, генеративні моделі графів, цифровий двійник, комп'ютерні мережі, телекомунікаційні мережі.

Постановка проблеми. Моделювання сучасних комп'ютерних та телекомунікаційних систем вимагає генерації мережеских топологій, які одночасно відтворюють низку важливих властивостей складних мереж: «малосвітність» (small-world

феномен – короткі середні шляхи між вузлами), високу кластеризацію, степеневий розподіл ступенів вузлів і виражену кластеризацію, причому за наявності просторових обмежень і реалістичної поведінки протоколів та трафіку. Класичні

моделі генерації структури мереж, зокрема, Ерьоша-Реньї, Воттса-Строгаца, Барабаші-Альберт, стохастичні блок-моделі і просторові граfi, є фундаментом для аналізу та синтезу структури телекомунікаційних та комп'ютерних мереж, але переважно репрезентують лише частину необхідних ознак й рідко забезпечують їхнє поєднання в одній конструкції. Це обмежує адекватність імітацій, точність «цифрових двійників» мереж і валідність висновків щодо надійності, масштабованості та ефективності мережових рішень. Водночас нові прикладні домени (напр., HPC/DL-кластери, бездротові й операторські мережі) дедалі частіше потребують гібридних і домен-орієнтованих генераторів, здатних поєднувати просторові обмеження, преференційне приєднання та тріадне замикання. Нині бракує систематизованих порівнянь таких моделей між собою та з класичними підходами за уніфікованим набором метрик. Також бракує аргументованих критеріїв вибору топології для побудови «цифрових двійників» телекомунікаційних мереж. Таким чином задача дослідження та порівняльного аналізу структурних моделей складних мереж комп'ютерних та телекомунікаційних систем є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні комп'ютерні та телекомунікаційні системи еволюціонують у бік великомасштабних, динамічних та гетерогенних інфраструктур. Для прогнозування їхньої ефективності, стійкості й надійності критично важливе імітаційне моделювання, що поєднує структурні (топологічні) та поведінкові (протокольно-трафікові) моделі. Якісні симуляції мають відтворювати основні емпіричні ознаки складних мереж: «малосвітність», високу кластеризацію, гетерогенний (часто степеневий) розподіл ступенів вузлів, модульність та просторові (географічні) обмеження з'єднань за їх наявності [1-3].

Класичні топологічні моделі формують каркас мережі: випадкові граfi Ерьоша-Реньї добре відтворюють малі відстані за достатньої щільності, але мають низьку кластеризацію [1]; модель «тісного світу» Воттса-Строгаца поєднує короткі шляхи з високою кластеризацією через випадкове «перемикання» ребер [2]; безмасштабна модель Барабаші-Альберт відтворює появу хабів і степеневого розподілу ступенів вузлів через зростання та преференційне приєднання [3]. Стохастична блок-модель явно моделює кластери [4], а просторові моделі (напр., Waxman) враховують фізичну метрику й затримки, роблячи топології реалістичними для транспортного рівня [5]. Утім, жодна

з цих моделей поодиночі не охоплює весь набір характеристик реальних телекомунікаційних та комп'ютерних мереж.

В останні роки при моделюванні складних мереж виник тренд на гібридні генеративні підходи, які одночасно забезпечують «малосвітність», безмасштабність, високу кластеризацію та просторові обмеження. Прикладом є параметризовані моделі соціальних/міських графів із керованою кластеризацією та степеневістю [6]. Паралельно розвиваються інженерні топології для дата-центрів і розподіленого навчання (напр., HammingMesh) з керованим балансом локальної/глобальної пропускної здатності [7, 8]. Інший важливий напрям сучасних досліджень – генеративні моделі графів з застосуванням штучного інтелекту (напр., GNN, автоенкодері, підходи), що використовуються для побудови мережових «цифрових двійників» і синтезу правдоподібних топологій і трафіку під задані метрики і сценарії [9-14].

На поведінковому рівні симулятори мереж (зокрема ns-3) надають реалізації WAN-маршрутизації (RIP/OSPF), ad-hoc протоколів (AODV, DSR, DSDV, OLSR), повнофункціональний стек TCP з сучасними алгоритмами керування перевантаженнями (CUBIC, BBR, DCTCP тощо) та моделі активного керування чергами (RED/PIE/CoDel) [15, 16]. Така екосистема дозволяє поєднувати симуляцію структури мережі з симуляцією транспортних протоколів та черг й досліджувати компроміси між пропускною здатністю, затримками, втратами, безпекою тощо. Найновіші моделі телекомунікаційних та комп'ютерних мереж представляють собою інтеграцію декількох структурних та поведінкових властивостей в одному генераторі.

На сьогоднішній день бракує систематизації та порівняльного аналізу нових гібридних моделей синтезу структури складних мереж для телекомунікаційних та комп'ютерних систем.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження й порівняльний експериментальний аналіз структурних моделей складних мереж для імітаційного моделювання комп'ютерних та телекомунікаційних систем. Для досягнення поставленої мети у роботі здійснено огляд класичних та сучасних підходів моделювання структури мереж, відібрано репрезентативні моделі для комп'ютерних та телекомунікаційних систем й проведено експерименти з обчисленням найголовніших метрик згенерованих мереж. Очікуваним результатом є визначення моделей, що найкраще відтворюють ознаки комп'ютерних та телекомунікаційних мереж,

а також формулювання практичних висновків щодо їх використання в симуляціях таких мереж.

Виклад основного матеріалу. Як показав аналіз останніх досліджень і публікацій, класичні моделі складних мереж залишаються фундаментом для аналізу й синтезу структури телекомунікаційних та комп'ютерних мереж, проте для симуляцій сучасних телекомунікацій потрібні комбіновані й домен-орієнтовані топології. Тільки гібридні моделі дозволяють реалізувати усі необхідні властивості структури комп'ютерних та телекомунікаційних мереж. Для створення якісних імітаційних моделей сучасних інформаційно-комунікаційних мереж корисними можуть бути гібридні просторово-преферентні моделі з тріадоутворенням [6, 17], моделі кластерно-ієрархічних оверлеїв [19-22] та моделі преференційного приєднання з тріадним замиканням і ефектом старіння вузлів [17-18]. Саме для цих трьох моделей було вирішено провести порівняльний експериментальний аналіз. У табл. 1 наведено результати оглядово-аналітичного порівняння класичних і гібридних моделей.

Як видно з таблиці, гібридні моделі дозволяють реалізувати практично всі необхідні властивості складних мереж інформаційно-телекомунікаційних систем та мають значну перевагу над класичними моделями. Порівняльний аналіз показав, що гібридні просторово-преферентні моделі з тріадоутворенням (Spatial Scale-Free with Triads) найбільш відповідають характеристикам реальних мереж. Моделі преференційного приєднання з тріадним замиканням і ефектом старіння вузлів (Preferential Attachment with Triads and Aging) забезпечують кращу швидкість обміну інформацією, але формують надмірно ієрархічне ядро, що не завжди відповідає реальним мережам. Моделі кластерно-ієрархічних оверлеїв (Clustered Overlay Network) гірше симулюють ознаки складних мереж, проте зручні для моделювання багатоврівневих P2P-мереж або блокчейн-систем.

Також у даній роботі було реалізовано на мові програмування Python розглянуті гібридні моделі складних мереж для проведення порівняльного експерименту, результати якого представлені на рис. 1–3 та в табл. 2.

На рисунках наведено структуру згенерованих в експерименті мереж. Для експерименту було згенеровано мережі з 300 вузлами. Кольором на графі позначено ступені вузлів – кількість їх зв'язків з іншими вузлами. У Spatial Scale-Free with Triads кожен новий вузол під'єднується до існуючих з ймовірністю, що зростає зі ступенем поточного вузла та спадає з відстанню від нього. Після кожного приєднання з певною ймовірністю додається ще одне ребро до «друга друга» (тріадне замикання), посилюючи локальну кластеризацію. У Clustered Overlay Network вузли групуються в кластери; всередині – щільні зв'язки, між кластерами – розріджені. Обрані «шлюзові» вузли з'єднують кластери посиленними міжкластерними ребрами; додаткові рідкі перемички підвищують надійність і скорочують шляхи. У Preferential Attachment with Triads and Aging нові вузли приєд-

таються до існуючих з ймовірністю, що зростає зі ступенем поточного вузла та спадає з відстанню від нього. Після кожного приєднання з певною ймовірністю додається ще одне ребро до «друга друга» (тріадне замикання), посилюючи локальну кластеризацію. У Clustered Overlay Network вузли групуються в кластери; всередині – щільні зв'язки, між кластерами – розріджені. Обрані «шлюзові» вузли з'єднують кластери посиленними міжкластерними ребрами; додаткові рідкі перемички підвищують надійність і скорочують шляхи. У Preferential Attachment with Triads and Aging нові вузли приєд-

Таблиця 1

Порівняльний аналіз моделей складних мереж з точки зору відповідності ключовим ознакам комп'ютерних та телекомунікаційних мереж

№	Назва моделі	Ключові ознаки структури комп'ютерних та телекомунікаційних мереж				
		Small-world (короткі середні відстані)	Висока кластеризація (тріадне замикання)	Гетерогенний (часто степеневий) розподіл степенів вузлів	Модульність мережі (наявність підмереж)	Просторові обмеження зв'язків
1	Ерьоша-Реньї	+	–	–	–	–
2	Воттса-Строгаца	+	+	–	+/-	–
3	Барабаші-Альберт	+	+/-	+	–	–
4	Стохастична блок-модель	*	*	–	+/-	–
5	Просторові граfi	*	+/-	–	+/-	+
6	Spatial Scale-Free with Triads	+	+	+	+/-	+
7	Clustered Overlay	+/-	+/-	+/-	+	+/-
8	Preferential Attachment with Triads and Aging	+	+/-	+	*	*

Примітка: «*» – залежить від параметрів моделі та/або наявності додаткового механізму (можна додати або прибрати властивість); «+/-» – властивість помірно виражена або чутлива до конфігурації, її виникнення у моделі не гарантоване.

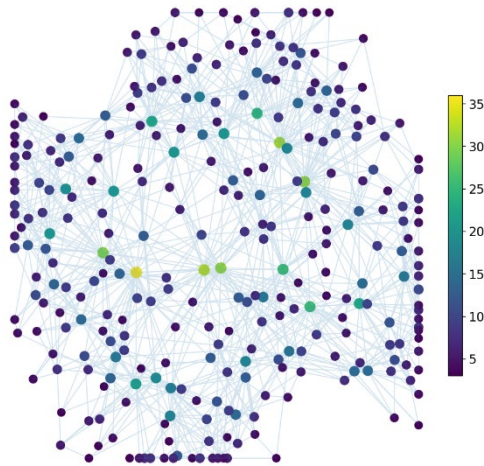


Рис. 1. Граф мережі Spatial Scale-Free with Triads

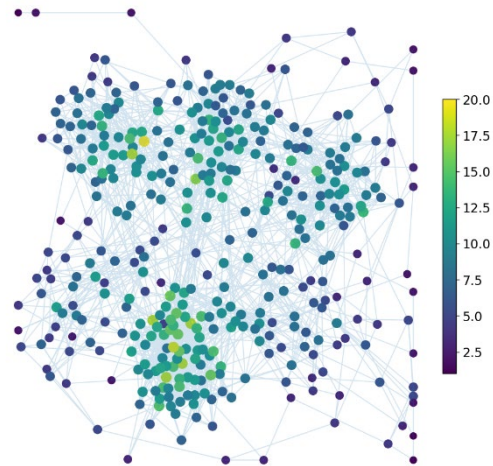


Рис. 2. Граф мережі Clustered Overlay

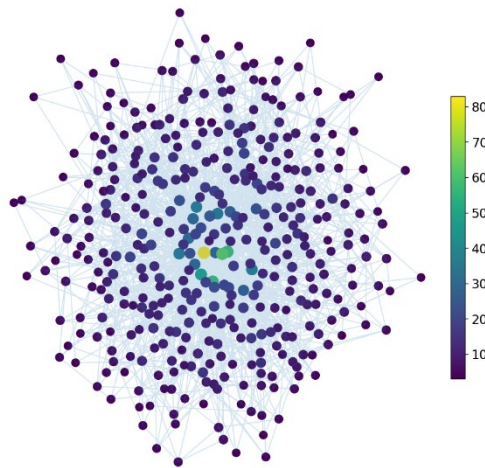


Рис. 3. Граф мережі Preferential Attachment with Triads and Aging

Таблиця 2

Порівняння властивостей згенерованих в ході експерименту мереж

№	Метрика	Мережа Spatial Scale-Free with Triads	Мережа Clustered Overlay	Мережа Preferential Attachment with Triads and Aging
1	Діаметр мережі D	6	9	5
2	Середній ступінь вузлів k_{avr}	7.95	6.49	8.09
3	Середній локальний коефіцієнт кластеризації C	0.289	0.089	0.193
4	Глобальна транзитивність T	0.191	0.096	0.114
5	Кількість трикутників k_t	841	215	705
6	Середня довжина найкоротших шляхів ASP	3.22	3.80	2.76
7	Розподіл ступенів (якість «хвоста») та наявність вузлів-хабів (k – ступень вузла)	Важкий хвіст; хаби помірні (k до ~36)	Обмежений хвіст; без виражених хабів	Дуже важкий хвіст; супер-хаби (k до 76)

нуються переважно до високостепеневих вузлів, але привабливість старих вузлів згасає з часом. Після кожного ребра з деякою ймовірністю створюється триадне замикання, що збільшує кластеризацію; у підсумку одержуємо безмасштабність

із контрольованою «молодістю» ядра мережі. У табл. 2 наведено порівняння одержаних властивостей згенерованих мереж.

Як видно з таблиці Spatial Scale-Free with Triads має найвищу кластеризацію ($C=0.289$)

і транзитивність ($N=0.191$) при збереженні «мало-світовості» ($ASP=3.22$, $D=6$). Є виражені, але не екстремальні хаби. Тому вона добре відтворює реалістичну топологію з просторовими обмеженнями та локальними кластерами. Clustered Overlay Network має найнижчу щільність ($k_{avr}=6.49$), низьку кластеризацію ($C=0.089$) й довгі шляхи ($ASP=3.80$, $D=9$). Розподіл ступенів без важких хвостів. Таким чином ця модель придатна для моделювання модульності/шлюзів (напр., P2P-мереж, блокчейну), але гірше відповідає ознакам звичайних інформаційно-телекомунікаційних мереж. Preferential Attachment with Triads & Aging має найкоротші шляхи ($ASP=2.76$, $D=5$) та найбільший k_{avr} . Помірна кластеризація ($C=0.193$). Яскраво виражені супер-хаби (k до 76) – висока швидкість дифузії, але потенційно надмірна ієрархічність і вразливість до таргетованих атак.

Таким чином для симуляції комп'ютерних і телекомунікаційних мереж найкраще підходить модель Spatial Scale-Free with Triads – так як має високі кластерність і транзитивність при малому діаметрі мережі. Для швидких дифузійних процесів та overlay-сервісів без географії оптимальна Preferential Attachment with Triads and Aging – у неї мінімальні ASP , D та важкий хвіст розподілу ступенів вузлів, що забезпечує швидке розповсюдження даних. Для сценаріїв із керованою модульністю та шлюзами (напр., сегментовані IoT-мережі, блокчейн) доречна модель Clustered Overlay, але для звичайної інформаційно-телекомунікаційної мережі вона гірша за попередні, тому що має нижчу кластеризацію й довгі шляхи між вузлами.

Висновки. У роботі здійснено дослідження та порівняльний експеримент структурних моделей складних мереж для імітаційного моделювання комп'ютерних і телекомунікаційних систем. Результати дослідження дозволяють зробити наступні узагальнення:

1. Класичні структурні моделі мереж, зокрема, Ерьоша-Реньї, Воттса-Строгаца, Барабаші-Альберт, стохастичні блок-моделі і просторові граfi, залишаються фундаментальною основою для синтезу базових властивостей складних мереж, проте жодна не відтворює повного набору ознак, необхідних для моделювання комп'ютерних та телекомунікаційних мереж.

2. Сучасні гібридні моделі мереж демонструють істотне наближення до структури реальних комп'ютерних та телекомунікаційних мереж, зокрема, моделі Spatial Scale-Free with Triads, Clustered Overlay Network та Preferential Attachment with Triads and Aging мають високий рівень реалістичності.

3. Проведено порівняльний експеримент гібридних моделей складних мереж, який показав, що модель Spatial Scale-Free with Triads є найкращою для імітаційного моделювання типових комп'ютерних і телекомунікаційних мереж, тоді як моделі Clustered Overlay Network та Preferential Attachment with Triads and Aging доцільніші для специфічних сценаріїв, зокрема, P2P-, блокчейн- і оверлей-мереж, а також сегментованих IoT-систем (перша модель забезпечує керовану модульність, а друга – симуляцію середовища з швидкими дифузійними процесами).

Отже, дослідження показало, що найбільш ефективними для загального випадку моделювання комп'ютерних та телекомунікаційних мереж є гібридні просторово-преферентні мережі з тріадоутворенням, які забезпечують баланс між структурною складністю та обчислювальною простотою.

Подальші напрями розвитку роботи передбачають розширення аналізу на адаптивні моделі з динамічною топологією та розробку імітаційного середовища з підтримкою багаторівневого аналізу складних мереж.

Список літератури:

1. Erdős P., Rényi A. On Random Graphs I. Publicationes Mathematicae Debrecen. 1959. Vol. 6, No. 3-4. P. 290-297. DOI: 10.5486/PMD.1959.6.3-4.12.
2. Watts D. J., Strogatz S. H. Collective dynamics of “small-world” networks. *Nature*. 1998. Vol. 393. P. 440-442. DOI: 10.1038/30918.
3. Barabási A.-L., Albert R. Emergence of Scaling in Random Networks. *Science*. 1999. Vol. 286, No. 5439. P. 509-512. DOI: 10.1126/science.286.5439.509.
4. Holland P. W., Laskey K. B., Leinhardt S. Stochastic blockmodels: First steps. *Social Networks*. 1983. Vol. 5, No. 2. P. 109-137. DOI: 10.1016/0378-8733(83)90021-7.
5. Waxman B. M. Routing of multipoint connections. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 1988. Vol. 6, No. 9. P. 1617-1622. DOI: 10.1109/49.12889.
6. Licciardi Jr. A. N., Monteiro L. H. A. A network model of social contacts with small-world and scale-free features, tunable connectivity and geographic restrictions. *Mathematical Biosciences and Engineering*. 2024. Vol. 21(4). P. 4801-4813. DOI: 10.3934/mbe.2024211.

7. Hoefler T., et al. HammingMesh: A Network Topology for Large-Scale Deep Learning. *Communications of the ACM*. 2024. Vol. 67(12). P. 97–105. DOI: 10.1145/3623490.
8. Kim J., Dally W.J., Scott S., Abts D. Technology-Driven, Highly-Scalable Dragonfly Topology. *International Symposium on Computer Architecture*. 2008. P. 77–88. DOI: 10.1109/ISCA.2008.19.
9. Vignac C., Krawczuk I., Siraudin A., Wang B., Cevher V., Frossard P. DiGress: Discrete Denoising Diffusion for Graph Generation. *arXiv preprint*. 2022. DOI: 10.48550/arXiv.2209.14734.
10. Li M., Su X., Ma R., Jiang T., Li Z., Quek T.Q.S. CGGM: A conditional graph generation model with adaptive sparsity for node anomaly detection in IoT networks. *Digital Communications and Networks*. 2025. DOI: 10.1016/j.dcan.2025.05.013.
11. Guo X., Zhao L. A Systematic Survey on Deep Generative Models for Graph Generation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2023. Vol. 45(5). P. 5370–5390. DOI: 10.1109/TPAMI.2022.3214832.
12. Demelius Y., et al. Generative AI-Empowered Network Digital Twins: Architecture, Technologies, and Applications. *ACM Computing Surveys*. 2025. Vol. 57(6), No. 157. P. 1–43. DOI: 10.1145/3711682.
13. Hakiri A., et al. A comprehensive survey on digital twin for future networks. *Computer Networks*. 2024. Vol. 244(18). Article 110350. DOI: 10.1016/j.comnet.2024.110350.
14. Muhammad K., David T., Nassisid G., Farus T. Integrating Generative AI with Network Digital Twins for Enhanced Network Operations. *arXiv preprint*. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2406.17112.
15. TCP models in ns-3. ns-3 Network Simulator: Documentation. 2011–2025. URL: <https://www.nsnam.org/docs/models/html/tcp.html>
16. Jain V., Henderson R.T., Shravya K.S., Tahiliani M.P. Data Center TCP in ns-3: Implementation, Validation and Evaluation. *Proceedings of the 2020 Workshop on ns-3 (WNS3 '20)*. 2020. P. 67–72. DOI: 10.1145/3389400.3389405.
17. Holme P., Kim B.J. Growing scale-free networks with tunable clustering. *Physical Review E*. 2002. Vol. 65, 026107. DOI: 10.1103/PhysRevE.65.026107.
18. Dorogovtsev S.N., Mendes J.F.F. Evolution of networks with aging of sites. *Physical Review E*. 2000. Vol. 62, P. 1842–1845. DOI: 10.1103/PhysRevE.62.1842.
19. Stoica I., Morris R., Karger D., Kaashoek M. F., Balakrishnan H. Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for Internet applications. *SIGCOMM '01*. 2001. P. 149–160. DOI: 10.1145/383059.383071.
20. Maymounkov P., Mazieres D. Kademlia: A peer-to-peer information system based on the XOR metric. *Springer, Berlin, Heidelberg*. 2002. P. 53–65. DOI: 10.1007/3-540-45748-8_5.
21. Decker C., Wattenhofer R. Information propagation in the Bitcoin network. *IEEE P2P 2013*. 2013. P. 1–10. DOI: 10.1109/P2P.2013.6688704.
22. Gencer A.E., Basu S., Eyal I., van Renesse R., Sirer E.G. Decentralization in Bitcoin and Ethereum Networks. *Financial Cryptography and Data Security*. 2018. P. 439–457. DOI: 10.48550/arXiv.1801.03998.

Mikhav V.V., Meleshko Ye.V., Yakymenko M.S., Bosko V.V., Didyk O. K. STRUCTURAL MODELS OF COMPLEX NETWORKS FOR SIMULATION MODELING OF COMPUTER AND TELECOMMUNICATION SYSTEMS

The article presents a systematization, comparative analysis, and experimental study of structural models of complex networks used in the simulation modeling of computer and telecommunication systems. Classical topological models – Erdős-Rényi, Watts-Strogatz, Barabási-Albert, the stochastic block model, and spatial graphs – are examined as foundational approaches to constructing network structures. Their advantages and limitations are identified with respect to reproducing key properties of complex systems: small-worldness, high clustering, power-law degree distributions, and the presence of communities. Special attention is paid to modern hybrid and generative models combining spatial constraints, preferential attachment, and triadic closure. The study demonstrates that while classical models remain the basis, contemporary telecommunications require combined, domain-oriented topologies. Recent approaches integrate multiple structural properties and employ generative methods to build network “digital twins”. The practical part compares three models: Spatial Scale-Free with Triads, Clustered Overlay Network, and Preferential Attachment with Triads and Aging. For each, standard metrics were computed – average degree and its distribution, local and global clustering, triangle count, average shortest path, and diameter – enabling an assessment of structural complexity. The results show that the Spatial Scale-Free with Triads model most strongly exhibits complex-network properties – high clustering, a power-law degree distribution, and short path lengths – characteristic of computer and telecommunication systems.

Key words: complex networks, scale-free networks, spatial networks, simulation modeling, structural network models, hybrid network models, clustering, triadic closure, generative graph models, digital twin, computer networks, telecommunications networks.

Дата надходження статті: 04.11.2025

Дата прийняття статті: 21.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025