

5. Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. – Cham: Springer, 2017. – С. 85–113.

УДК 004.056:621.396

ПРАКТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ 5G-МЕРЕЖ ДЛЯ СИСТЕМ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ (ІОТ)

Поштовий Д.О.

postovijdanilo@gmail.com

Черкаський державний фаховий бізнес-коледж

Ратайчук П.Є.

м. Черкаси, Україна

Стрімкий розвиток концепції Інтернету речей (ІоТ) вимагає створення надійної, масштабованої та енергоефективної мережевої інфраструктури. Традиційні мобільні мережі не завжди здатні впоратися з величезною кількістю одночасних підключень та забезпечити мінімальну затримку передачі даних, яка є критичною для таких сфер, як Smart City, Smart Industry та автономний транспорт. Впровадження мереж п'ятого покоління (5G) вирішує ці проблеми завдяки використанню новітніх технологій, таких як Massive MIMO, Network Slicing (мережеві зрізи) та Edge Computing (периферійні обчислення)[1]. Особливу увагу варто приділити технологіям доступу, спеціально розробленим для ІоТ, зокрема NB-IoT та LTE-M, які забезпечують високу енергоефективність пристроїв.

Метою даного дослідження є практичне моделювання 5G-мережі для підтримки великої кількості ІоТ-пристроїв та оцінка її ефективності за основними показниками якості обслуговування (QoS)[2].

Для проведення експерименту було обрано програмне середовище симуляції мереж NS-3 із використанням модулів 5G NR. Програмна реалізація моделі здійснювалася мовою C++ з підключенням спеціалізованих модулів, таких як nr-module для симуляції мережі п'ятого покоління та internet-module. Розроблена топологія мережі включає базову станцію (gNodeB), ядро мережі 5G

(5GC), сервер обробки даних та від 50 до 500 IoT-вузлів (UE), розташованих на площі 500×500 метрів. Моделювання відбувалося у частотному діапазоні 3.5 GHz зі смугою пропускання 100 MHz. Основний тип генерованого трафіку – телеметрія та короткі пакети сенсорних даних (Payload 64–256 байт) з інтервалом передачі від 1 до 10 секунд[2].

Для формалізації показників ефективності роботи мережі були використані наступні математичні моделі:

1. Пропускна здатність мережі (Throughput), що визначається як відношення сумарного обсягу прийнятих даних до часу симуляції.
2. Середня затримка передачі (Delay_avg).
3. Коефіцієнт успішної доставки пакетів (Packet Delivery Ratio, PDR).
4. Загальне енергоспоживання IoT-пристрою (E_{total}), яке є критичним показником для автономних сенсорів і складається з енергії передачі, прийому та режиму очікування.

Під час дослідження було проведено серію експериментів із базовим навантаженням (50 пристроїв), масштабуванням кількості вузлів до 500, інтенсивним трафіком (інтервал передачі 0.5 с) та впровадженням Edge Computing. Збір та обробка статистичних даних виконувалися шляхом їх експорту у формат CSV із подальшим аналізом та візуалізацією за допомогою мови програмування Python (бібліотеки pandas та matplotlib). Це дозволило побудувати наочні графіки залежності пропускної здатності та затримки від кількості активних вузлів [2, 3].

Аналіз отриманих результатів показав високу масштабованість 5G-мережі та здатність стабільно обслуговувати сотні IoT-пристроїв. Було встановлено, що середня затримка передачі становить менше 10–20 мс. Використання технології Edge Computing (перенесення обчислень на край мережі) дозволило додатково знизити затримку на 20–30%. Водночас, експериментальним шляхом було визначено критичний поріг навантаження: при перевищенні кількості у 400–500 активних IoT-пристроїв на одну базову станцію пропускна здатність починає знижуватися, а затримка різко зростає.

Таким чином, результати моделювання підтверджують високу ефективність використання 5G-мереж для розгортання масштабних IoT-систем. Для подальшої оптимізації роботи та запобігання перевантаженням рекомендується застосовувати механізми балансування навантаження між базовими станціями, використовувати мережеві зрізи (Network Slicing) для пріоритезації критичного трафіку та розширювати застосування периферійних обчислень (Edge Computing) [4].

Список використаних джерел:

1. *Кафедра інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського.*
URL: https://ice.nure.ua/wp-content/uploads/2024/01/57_Popovska-Ie.O.-Marchuk-V.S._Str.191-193.pdf (дата звернення: 08.03.2026).
2. ns-3 Manual – Manual. ns-3 | a discrete-event network simulator for internet systems.
URL: <https://www.nsnam.org/docs/release/3.35/manual/html/index.html> (дата звернення: 08.03.2026).
3. Management and Orchestration Standards for 5G. 3GPP – The Mobile Broadband Standard. URL: <https://www.3gpp.org/technologies/sa5-management-5g-h11> (дата звернення: 10.03.2026).
4. DSpace: ELAKPI: Репозитарій КПІ ім. Ігоря Сікорського.
URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/6b18d6b4-1f7c-471c-afef-0e6c244b3acc/content> (дата звернення: 11.03.2026).