

Віктор Гнатюк^{1,2}, Левон Петросян¹

¹Державний університет «Київський
авіаційний інститут»

²Державний науково-дослідний інститут
технологій кібербезпеки та захисту інформації

МЕТРИКИ ОПЕРАЦІЙНОЇ РЕЗИЛЬЄНТНОСТІ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ НА ОСНОВІ NETWORK DIGITAL TWIN

Телекомунікаційні мережі є критичною інфраструктурою, стійкість якої визначає функціонування суспільства. За даними Світового банку (RDNA4), збитки телекомунікаційного сектору України становлять 2,24 млрд доларів [1]. Технологія Network Digital Twin (NDT) – віртуальне представлення мережевої інфраструктури, синхронізоване з визначеною частотою [2], – дозволяє моделювати поведінку мережі та оптимізувати рішення. Проте ефективне застосування NDT потребує формалізованих кількісних метрик резильєнтності.

Існуючі системи NMS/OSS фіксують поточний стан мережі, але не оцінюють структурну резильєнтність – здатність мережі протистояти збоєм та відновлюватися [3]. Сучасні дослідження пропонують часову декомпозицію резильєнтності (absorption–adaptation–recovery) [4], просторове моделювання покриття [5], CVaR-метрики хвостового ризику [6] та ймовірнісні графові моделі [7]. Водночас бракує уніфікованого набору метрик на рівні мережевої топології в контексті NDT.

Мета роботи – формалізація набору метрик операційної резильєнтності для інтеграції в архітектуру NDT та демонстрація їх працездатності.

На основі синтезу джерел [1]–[7] виділено шість метрик:

Доступність (Availability): $A = T_{up}/T_{total}$ – частка часу функціонування; $A \geq 0,99$ для магістральних вузлів [1].

Зв'язність (Connectivity): $C = P_{connected}/P_{total}$ – частка пар вузлів із наскрізним з'єднанням при частковій деградації [7].

Відмовостійкість (Fault Tolerance): $FT = 1 - |V_{critical}|/|V|$ – частка некритичних вузлів; $V_{critical}$ – точки артикуляції графа [6].

Час відновлення (Time-to-Recover): $TTR = (1/n)\sum(t_{restore_i} - t_{detect_i})$ – середній час усунення інциденту [1], [4].

Надлишковість (Redundancy): $R = (E - V + 1)/E$ – нормалізована цикломатична надлишковість зв'язного графа [7].

Енергетична автономність (Energy Autonomy): $EA = N_{\text{autonomous}}/N_{\text{total}}$
– частка базових станцій із резервним живленням ≥ 72 год [1], [3].

Працездатність метрик продемонстровано на гіпотетичній мережі із 7 вузлів та 7 ребер. Базові значення: $C_0=1,000$; $R_0=0,143$; $EA_0=0,286$; $FT_0=0,571$. Після руйнування хаба V6: $C'=0,667$; $R'=0,000$; $EA'=0,167$. Мінімальне відновлення (інтервенція A: +1 ребро) повертає C до 1,000, але R та EA не змінюються. ВВВ-модернізація (інтервенція B: +2 ребра та автономне живлення) дає $C_B=1,000$; $R_B=0,167$; $EA_B=0,500$. За вагами $w_C=0,50$; $w_R=0,20$; $w_{EA}=0,30$ пріоритетний бал B (0,300) перевищує бал A (0,167) на 80%, що підтверджує перевагу системного підходу.

Висновки. Запропоновано набір із шести формалізованих метрик операційної резильєнтності (A, C, FT, TTR, R, EA), адаптованих для NDT. Числовий приклад підтверджує обчислювальну працездатність та здатність метрик кількісно диференціювати варіанти відновлення. Перспективи – пілотна валідація на реальному сегменті мережі та калібрування порогових значень.

Список використаних джерел:

1. Ukraine Fourth Rapid Damage and Needs Assessment (RDNA4). Washington : World Bank, 2025.
2. Network Digital Twin Use Case Classification. Ver. 2.0. IOWN Global Forum, 2024. 84 p.
3. Ayers S., Birk T. Resilient Telecommunications Infrastructure. Washington : World Bank, 2024. 44 p.
4. Reifert R.-J., Roth S., Ahmad A. A., Sezgin A. Comeback Kid: Resilience for Mixed-Critical Wireless Network Resource Management // IEEE Trans. Veh. Technol. 2023. Vol. 72, no. 12. P. 16177–16194.
5. Liang Z., Li Y.-F. Holistic Resilience and Reliability Measures for Cellular Telecommunication Networks // Reliab. Eng. Syst. Saf. 2023. Vol. 237. Art. 109335.
6. Xue Z., Liang Z. Service Risk Evaluation of Telecommunication Core Network: A Perspective of Routing Resilience // Reliab. Eng. Syst. Saf. 2025. Vol. 255. Art. 110629.
7. Kuikka V., Rantanen H. Resilience of Multi-Layer Communication Networks // Sensors. 2023. Vol. 23, no. 1. Art. 86.