

ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЖИВУЧОСТІ ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖ ЦИВІЛЬНИХ БУДІВЕЛЬ У КРИЗОВИХ УМОВАХ

Вінницький національний технічний університет

Анотація. Стаття присвячена теоретичним засадам та методичним підходам до оцінювання надійності та живучості інженерних мереж цивільних будівель в умовах кризових впливів. Розмежовано поняття «надійність» і «живучість». Запропоновано методикау стрес-тестування з введенням показника J_s та мінімального рівня функціонування (МРФ). Визначено нормативні K_g для основних систем та критичні вузли кожної з них.

Ключові слова: надійність, живучість, інженерні мережі, кризові умови, стрес-тестування, коефіцієнт готовності, МРФ, аварійне реагування.

Abstract. The article is devoted to the theoretical foundations and methodological approaches to assessing the reliability and survivability of engineering networks of civil buildings under crisis conditions. A distinction is drawn between 'reliability' and 'survivability'. A stress-testing methodology is proposed with the survivability index J_s and minimum functioning level (MFL). Normative availability coefficients K_g for the main systems and their critical nodes are determined.

Keywords: reliability, survivability, engineering networks, crisis conditions, stress testing, availability coefficient, minimum functioning level, emergency response.

Вступ

Надійність та живучість інженерних мереж цивільних будівель є критичними характеристиками, що визначають безперервність функціонування будівлі як системи в умовах нормальної експлуатації та в кризових ситуаціях. Досвід останніх років переконливо свідчить: пошкодження або вимушене відключення інженерних систем — систем електропостачання, теплопостачання, водопостачання, каналізації та газопостачання — призводить до значних соціальних, економічних та гуманітарних наслідків [1-5].

Особливої актуальності проблема набуває в умовах збройних конфліктів, масштабних природних катастроф або тривалих перебоїв в централізованих мережах постачання. В таких умовах поняття «надійність» у традиційному нормативному розумінні стає недостатнім — необхідно оперувати категорією «живучість», яка описує здатність системи зберігати мінімально необхідний рівень функціонування та відновлюватися після деструктивного впливу [2-5].

Метою статті є удосконалення теоретичних засад і методичного інструментарію для комплексного оцінювання надійності та живучості інженерних мереж цивільних будівель в умовах кризових впливів різної природи та інтенсивності.

Теоретичні засади: надійність і живучість

Надійність інженерної системи визначається як її властивість виконувати задані функції в нормальних умовах протягом необхідного часу. Основними показниками є: інтенсивність відмов λ [1/год], середній час напрацювання до відмови $MTTF$ [год], середній час відновлення $MTTR$ [год] та коефіцієнт готовності [1-5]:

$$K_g = \frac{MTTF}{(MTTF + MTTR)} \quad (1)$$

Живучість є якісно іншою характеристикою. Якщо надійність описує поведінку системи при випадкових поодиноких відмовах у межах проектних умов, то живучість визначає здатність системи

протистояти масштабним деструктивним впливам, що виходять за межі проектних припущень. Введемо показник живучості на основі [1-5]:

$$Ж_c = \int \Phi(t) dt / (MP\Phi \times T_k) \quad (2)$$

де $\Phi(t)$ — поточна функціональність системи (0–100%); $MP\Phi$ — мінімальний рівень функціонування, нижче якого система вважається недієздатною; T_k — тривалість кризового впливу. При $Ж_c \geq 1$ система є живучою в умовах розглянутого сценарію.

На рис. 1 наведено ієрархічну структуру надійності інженерних систем цивільної будівлі, що відображає ієрархію підсистем від окремих вузлів до загального показника надійності об'єкта.



Рис. 1. Ієрархічна структура надійності інженерних систем цивільної будівлі та МРФ

Методика оцінювання надійності інженерних систем

Розрахунок надійності для систем зі структурною схемою послідовного з'єднання n елементів виконується як добуток коефіцієнтів готовності [1-5]:

$$K_{g \text{ сум}} = \prod K_{gi} \quad (3)$$

Для паралельного резервування — за формулою:

$$K_{g \text{ резер}} = 1 - \prod (1 - K_{gi}) \quad (4)$$

Змішані схеми розраховуються покроково — спрощенням структури від елементів до системи в цілому [3-5].

Визначення нормативних показників K_g для основних інженерних систем цивільних будівель виконано на основі статистичного аналізу показників надійності відповідного обладнання та трубопровідних систем.

Результати наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Узагальнені рекомендовані показники надійності та МРФ основних інженерних систем цивільних будівель

| Система | Kг (рекомендовано) | МРФ, % | MTTF, год | Критичні вузли |
|-------------------|-----------------------|--------|-----------|--------------------|
| Електропостачання | 0,995 | 30 | 8 760 | ВРП, ввідна панель |
| Водопостачання | 0,990 | 40 | 4 380 | Насосна станція |
| Теплопостачання | 0,985 | 50 | 4 015 | ІТП, котельня |
| Каналізація | 0,999 | 60 | 8 000 | Насоси, колектор |
| Газопостачання | 0,997 | 0 | 7 500 | ГРП, запірні арм. |

Визначення критичних вузлів здійснюється методом аналізу видів і наслідків відмов (FMEA — Failure Mode and Effects Analysis). Для кожного вузла оцінюється: імовірність відмови, критичність наслідків (за шкалою 1–10) та можливість виявлення відмови до її настання. Вузли з добутком цих коефіцієнтів понад 100 відносяться до критичних [1-3].

Методика стрес-тестування та оцінювання живучості

Методика стрес-тестування передбачає розробку сценаріїв кризового впливу трьох рівнів: помірний (відключення одного джерела живлення, тривалість до 24 год), тяжкий (пошкодження ключового вузла, тривалість 24–72 год) та катастрофічний (комплексне ураження, тривалість понад 72 год). Для кожного сценарію розраховується функція деградації $\Phi(t)$ та показник живучості Жс [4, 5].

На рис. 2 показано орієнтовану динаміку функціональності основних інженерних систем цивільної будівлі при важкому кризовому сценарії тривалістю 16 годин з подальшим відновленням. Видно суттєві відмінності між системами: електропостачання демонструє найглибше падіння функціональності (до 30%), тоді як каналізаційна система зберігає значно вищий рівень завдяки гравітаційному принципу роботи.

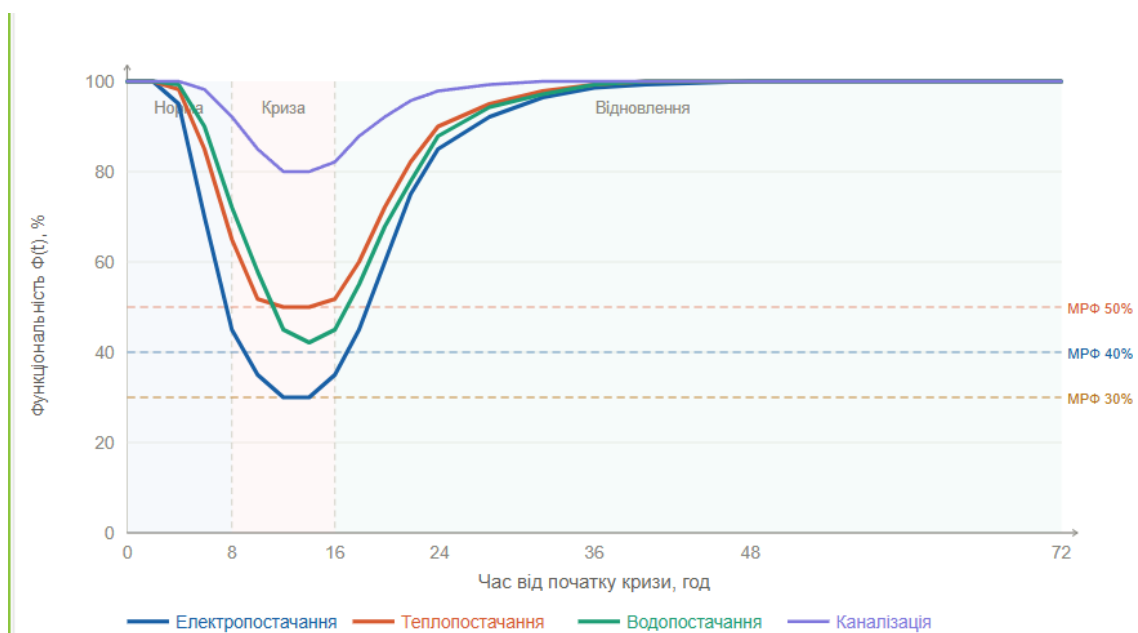


Рис. 2. Орієнтовна динаміка функціональності $\Phi(t)$ інженерних систем цивільної будівлі при кризовому впливі

Заходи підвищення живучості та практичні рекомендації

На підставі проведеного аналізу можна сформулювати ієрархію заходів підвищення живучості. Перший рівень — структурне резервування критичних вузлів: резервні дизельні генератори (забезпечують 72 год автономної роботи), запасні ємності технічної та питної води (на 72 год), резервні насосні агрегати. Другий рівень — організаційні заходи: плани аварійного реагування, навчання

персоналу, встановлення пріоритетів відновлення систем. Третій рівень — технологічне підсилення: прокладання дублюючих трубопроводів, кабельних трас, встановлення байпасів на критичних ділянках [2, 5].

Важливим інструментом є цифровий двійник інженерних систем — комп'ютерна імітаційна модель, що в режимі реального часу відображає стан мереж, дозволяє прогнозувати відмови та моделювати сценарії ліквідації аварій. Впровадження цифрового двійника скорочує час реагування на позаштатні ситуації в середньому на 35–45% [1-4].

Висновки

Запропонована методика дозволяє комплексно оцінити як традиційну надійність (через K_g та МТТФ), так і живучість (через показник Жс та функцію деградації $\Phi(t)$) інженерних мереж цивільних будівель. Встановлено нормативні значення K_g для п'яти основних систем та визначено їх МРФ. Показано, що для більшості цивільних будівель без спеціальних заходів резервування показник живучості Жс при тяжкому сценарії не перевищує 0,65–0,75, тобто системи не є живучими. Запропонований комплекс заходів дозволяє підвищити Жс до 1,15–1,35, що відповідає критерію живучості. Результати призначені для застосування при проектуванні, реконструкції та аварійному відновленні об'єктів цивільної інфраструктури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Cimellaro G. P., Reinhorn A. M., Bruneau M. Framework for Analytical Quantification of Disaster Resilience. *Engineering Structures*. 2010. Vol. 32. No. 11. P. 3639–3649. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.08.008
2. Bruneau M., Chang S. E., Eguchi R. T. et al. A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra*. 2003. Vol. 19. No. 4. P. 733–752. DOI: 10.1193/1.1623497
3. Pescaroli G., Alexander D. Critical Infrastructure, Panarchies and the Vulnerability Paths of Cascading Disasters. *Natural Hazards*. 2016. Vol. 82. No. 1. P. 175–192. DOI: 10.1007/s11069-016-2186-3
4. Argyroudis S. A., Mitoulis S. A., Chatzi E. et al. Digital technologies can enhance climate resilience of critical infrastructure. *Climate Risk Management*. 2022. Vol. 35. Article 100387. DOI: 10.1016/j.crm.2021.100387
5. Cheng Y., Elsayed E. A., Chen X. Random Multi Hazard Resilience Modeling of Engineered Systems and Critical Infrastructure. *Reliability Engineering and System Safety*. 2021. Vol. 209. Article 107453. DOI: 10.1016/j.ress.2021.107453

Джеджула В'ячеслав Васильович - доктор економічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, e-mail: djedjula@vntu.edu.ua

Тимковський Олег Валентинович – здобувач освітньо-наукового ступеня «доктор філософії», Вінницький національний технічний університет