

УДК 69.059:005.8:004.942
UDC 69.059:005.8:004.942

DOI:10.33744/0365-8171-2026-119-249-261

ПІДХОДИ ТА ІНСТРУМЕНТАРІЙ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ СТАБІЛЬНОЇ ТА БЕЗПЕРЕРВНОЇ РОБОТИ СИСТЕМИ БУДІВЕЛЬНИХ ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖ

APPROACHES AND TOOLS FOR MODELING ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL MONITORING PROCESSES TO ENSURE STABLE AND CONTINUOUS OPERATION OF BUILDING ENGINEERING NETWORK SYSTEMS



Мартинюк Іван Юрійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерної графіки та дизайну, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, e-mail: ivan.martinyuk@gmail.com, тел.: +38(096) 068-00-29

<https://orcid.org/0000-0001-7957-2068>



Максим'юк Юрій Всеволодович, професор, доктор технічних наук, професор кафедри будівельної механіки, Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, Україна, e-mail: maksymiuk.iuv@knuba.edu.ua, тел. +38(067) 230-94-72

<https://orcid.org/0000-0002-5814-6227>



Кузьмінець Микола Петрович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедрою комп'ютерної, інженерної графіки та дизайну, Національний транспортний університет, м. Київ, Україна, e-mail: Kuzminetsmp@ukr.net, тел.: + +38(098) 360-08-12.

<https://orcid.org/0000-0002-9636-919X>

Анотація. Зростання складності будівельних інженерних мереж, інтеграція підсистем різного функціонального призначення та підвищення вимог до безперервності їх роботи обумовлюють необхідність формування науково обґрунтованої системи організаційно-технологічного спостереження. Ефективне управління експлуатацією мереж водопостачання, тепlopостачання, електропостачання та вентиляції потребує переходу від фрагментарного контролю окремих параметрів до комплексної моделі кількісного оцінювання функціональної стійкості. Методологічну основу становить інтеграція системного, функціонального та ризик-орієнтованого підходів, що дозволяє аналізувати інженерні мережі як цілісний техніко-організаційний комплекс із взаємопов'язаними елементами та ієрархією критичних параметрів. Формалізація процесів спостереження реалізується через побудову інтегрального показника стійкості, який визначається зваженим агрегуванням

нормованих експлуатаційних параметрів і забезпечує об'єктивність порівняльної оцінки різних ділянок мережі. Розрахунок імовірності безвідмовної роботи, інтенсивності відмов та інтегрального ризику дозволяє трансформувати технічні характеристики у вимірювані економічні критерії та формувати пріоритети технічного втручання. Застосування імітаційного моделювання забезпечує сценарний аналіз режимів експлуатації та прогнозування динаміки деградації обладнання за умов варіативного навантаження. Запропоновано інтегральний індекс експлуатаційної ефективності, що поєднує показники стійкості, ризику та стабільності режимів у єдину систему підтримки управлінських рішень. Інтеграція аналітичних моделей у цифрову інформаційну платформу створює завершений контур моніторингу, який забезпечує підвищення надійності функціонування, зниження аварійності, оптимізацію ресурсних витрат та довгострокову стабільність роботи систем будівельних інженерних мереж в умовах динамічного експлуатаційного середовища. Практична реалізація запропонованого інструментарію сприяє формуванню адаптивної моделі управління технічною інфраструктурою на засадах прогнозності, системності та економічної доцільності.

Ключові слова: організаційно-технологічне спостереження, інженерні мережі, інтегральний показник стійкості, моделювання процесів, імовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов, ризик-аналіз, імітаційне моделювання, цифрова платформа моніторингу, експлуатаційна ефективність, безперервність функціонування.

Вступ. Сучасні системи будівельних інженерних мереж характеризуються зростанням складності структури, підвищенням рівня інтеграції підсистем та посиленням вимог до безперервності їх функціонування. Забезпечення стабільної роботи мереж водопостачання, тепlopостачання, електропостачання та вентиляції набуває стратегічного значення для підтримання експлуатаційної надійності об'єктів інфраструктури. Традиційні методи технічного контролю, що базуються на періодичних перевірках окремих параметрів, не забезпечують системної оцінки динаміки стану мережі. У цих умовах актуальним є впровадження організаційно-технологічного спостереження, яке поєднує аналітичні моделі, ризик-орієнтовані методи оцінювання та цифрові інструменти моніторингу. Формалізація процесів спостереження дозволяє перейти до інтегрованої системи підтримки прийняття управлінських рішень і забезпечити довгострокову функціональну стійкість інженерних систем.

Метою роботи є розроблення методологічних підходів та інструментарію моделювання процесів організаційно-технологічного спостереження, спрямованих на забезпечення стабільної та безперервної роботи систем будівельних інженерних мереж, шляхом формалізації інтегральних показників стійкості, надійності та ризику, а також інтеграції аналітичних і імітаційних моделей у цифрове інформаційне середовище підтримки управлінських рішень.

Виклад основного матеріалу. Сучасна практика експлуатації будівельних об'єктів характеризується ускладненням структури інженерних мереж і зростанням вимог до їхньої надійності, енергоефективності та безперервності функціонування. У таких умовах організаційно-технологічне спостереження набуває стратегічного значення, оскільки забезпечує систематизований контроль технічного стану мереж водопостачання, тепlopостачання, електропостачання, вентиляції та інших підсистем. Моніторинг розглядається як безперервний цикл збору, аналізу й інтерпретації експлуатаційних параметрів із подальшим управлінським реагуванням.

Теоретичною основою моделювання процесів спостереження є інтеграція системного, функціонального та ризик-орієнтованого підходів. Системний підхід дозволяє аналізувати інженерні мережі як комплекс взаємопов'язаних елементів із визначенням структурних і функціональних залежностей між ними. Функціональний аспект зосереджується на регламентації процедур контролю, діагностики та технічного обслуговування. Ризик-орієнтований компонент передбачає виявлення потенційно небезпечних зон, оцінювання імовірності відмов та визначення критичних параметрів, що впливають на стійкість функціонування системи.

Інструментальна база моделювання включає аналітичні, імітаційні та цифрові інформаційні моделі. Аналітичні моделі описують закономірності зміни технічних показників у часі та дозволяють встановлювати граничні стани експлуатації. Імітаційне моделювання забезпечує відтворення

поведінки мережі за варіативних режимів навантаження або аварійних впливів. Цифрові моделі інтегрують дані сенсорного контролю, результати технічних обстежень і статистику відмов, формуючи основу для прогнозної аналітики та оперативного прийняття управлінських рішень [1].

На рисунку 1 подано структуровану блок-схему, яка відображає послідовність основних етапів — від визначення цілей контролю та збору експлуатаційних даних до аналітичної обробки інформації, оцінювання ризиків і реалізації управлінських рішень із забезпеченням зворотного зв'язку.

Практичне впровадження зазначених підходів передбачає створення інтегрованих цифрових платформ, які забезпечують акумулювання та синхронізацію даних у реальному часі. Використання дистанційного контролю, інтелектуальних алгоритмів аналізу та концепції цифрового відображення інженерних систем дозволяє підвищити точність прогнозування та знизити імовірність аварійних ситуацій. Автоматизація процедур моніторингу мінімізує вплив суб'єктивних факторів і забезпечує оперативність реагування.



Рисунок 1 – Схема організаційно-технологічного моніторингу інженерних мереж

Джерело: розроблено автором на основі [1]

Figure 1 – Scheme of Organizational and Technological Monitoring of Engineering Networks

Source: developed by the author based on [1]

Комплексне поєднання методологічних підходів і сучасного інструментарію моделювання формує науково обґрунтовану основу для забезпечення стабільної та безперервної роботи систем будівельних інженерних мереж. Формалізація процесів спостереження сприяє підвищенню експлуатаційної надійності, оптимізації ресурсних витрат і забезпеченню довгострокової функціональної стійкості інфраструктурних об'єктів.

Формалізація параметрів стійкості функціонування інженерних мереж у межах організаційно-технологічного спостереження передбачає побудову узагальненого кількісного критерію, здатного

інтегрувати різномірні експлуатаційні показники в єдину аналітичну систему оцінювання [2]. Такий підхід забезпечує перехід від фрагментарного контролю окремих технічних параметрів до системного аналізу динаміки стану мережі як цілісного інженерного комплексу. Інтегральна оцінка дозволяє оперативно ідентифікувати зони зниження стабільності, встановлювати пріоритети технічного обслуговування та формувати превентивні управлінські рішення.

Базовим елементом моделі виступає інтегральний показник функціональної стійкості, який визначається як зважена сума нормованих параметрів:

$$S_f = \sum_{i=1}^n w_i \times x_i, \quad (1)$$

де w_i — ваговий коефіцієнт значущості i -го параметра ($\sum w_i=1$),
 x_i — нормоване значення відповідного показника.

Нормування здійснюється відносно допустимого інтервалу зміни параметра:

$$x_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (2)$$

де X_i — фактичне значення,
 X_{\min}, X_{\max} — гранично допустимі межі.

Для показників, зростання яких є негативним (наприклад, втрати ресурсу), використовується інверсна форма нормування.

Розрахунковий приклад. Для контрольної ділянки теплової мережі зафіксовано такі дані: тиск — 0,38 МПа (допустимо 0,30–0,45 МПа), температура — 62 °С (55–70 °С), електричне навантаження — 118 кВт (100–140 кВт), питомі втрати — 12 % (5–15 %). Вагові коефіцієнти відповідно: 0,30; 0,25; 0,25; 0,20.

Обчислення нормованих значень:

$$x_{\text{тиск}} = \frac{0,38 - 0,30}{0,45 - 0,30} = 0,53.$$

$$x_{\text{тем}} = \frac{62 - 55}{70 - 55} = 0,47.$$

$$x_{\text{навантаж}} = \frac{118 - 100}{140 - 100} = 0,45.$$

$$x_{\text{втрати}} = \frac{15 - 12}{15 - 5} = 0,30.$$

Інтегральний показник:

$$S_f = 0,30 \times 0,53 + 0,25 \times 0,47 + 0,25 \times 0,45 + 0,20 \times 0,30 = 0,45.$$

Отримане значення 0,45 свідчить про зниження рівня функціональної стійкості та необхідність коригувальних заходів.

У таблиці 1 наведено поетапний розрахунок інтегрального показника функціональної стійкості із деталізацією вагових коефіцієнтів, нормованих параметрів та їх внеску в узагальнений результат [3].

Таблиця 1 - Розрахунок інтегрального показника функціональної стійкості
Table 1 - Calculation of the Integral Indicator of Functional Stability

Параметр	Фактичне значення	Допустимий інтервал	Вага w_i	Нормоване x_i	Внесок $w_i x_i$
Тиск, МПа	0,38	0,30–0,45	0,30	0,53	0,159
Температура, °С	62	55–70	0,25	0,47	0,118
Навантаження, кВт	118	100–140	0,25	0,45	0,113
Питомі втрати, %	12	5–15	0,20	0,30	0,060
Разом	—	—	1,00	—	0,450

Джерело: розроблено автором на основі [3]
Source: developed by the author based on [3]

Оцінювання інтегральної стійкості доцільно доповнювати аналізом надійності окремих елементів мережі. Ймовірність безвідмовної роботи в часі визначається експоненційною залежністю:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (3)$$

де λ — інтенсивність відмов,
 t — час експлуатації.

Середній напрацювання до відмови:

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda}, \quad (4)$$

Якщо $\lambda=0,0015$ год⁻¹, тоді

$$T_{cp} = \frac{1}{0,0015} = 666,7 \text{ год.}$$

Для горизонту 200 год:

$$P(200) = e^{-0,0015 \times 200} = e^{-0,3} \approx 0,74.$$

Отже, імовірність безвідмовної роботи становить 74 %, що нижче нормативного рівня 80 %, і вимагає перегляду інтервалів технічного обслуговування.

На рисунку 2 відображено графічну залежність ймовірності безвідмовної роботи від часу експлуатації, що ілюструє динаміку зниження надійності елементів інженерної мережі [4].

Графічна інтерпретація демонструє експоненційне зниження надійності, що підкреслює необхідність превентивної стратегії управління ресурсом обладнання.

Для аналізу стабільності режимів роботи використовується коефіцієнт варіації навантаження:

$$V = \frac{\sigma}{\mu}, \quad (5)$$

де μ — середнє значення навантаження, σ — стандартне відхилення.

За умови $\mu=120$ кВт та $\sigma=18$ кВт:

$$V = \frac{18}{120} = 0,15..$$

Значення 0,15 свідчить про відносно стабільний режим функціонування; перевищення 0,25 вказувало б на ризик прискореної деградації елементів мережі [5].

На рисунку 3 представлено часові коливання навантаження мережі та визначення коефіцієнта варіації як індикатора стабільності режимів функціонування.

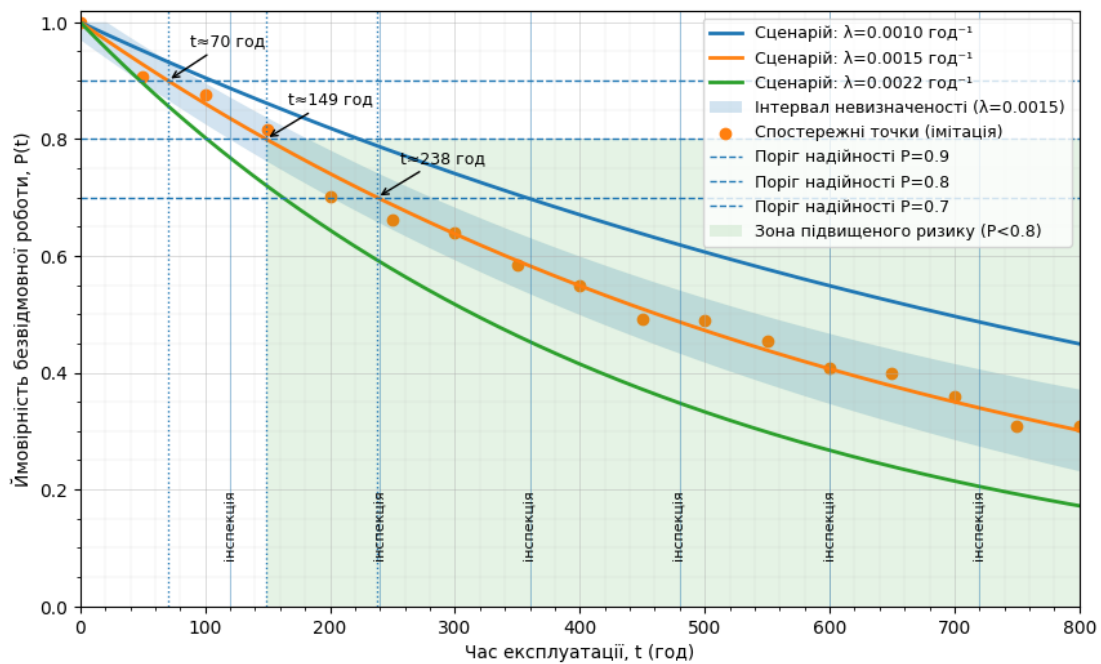


Рисунок 2 – Графік залежності ймовірності безвідмовної роботи $P(t)$ від часу експлуатації
Джерело: розроблено автором на основі [4]

Figure 2 – Graph of the Dependence of the Probability of Failure-Free Operation $P(t)$ on Operating Time

Source: developed by the author based on [4]

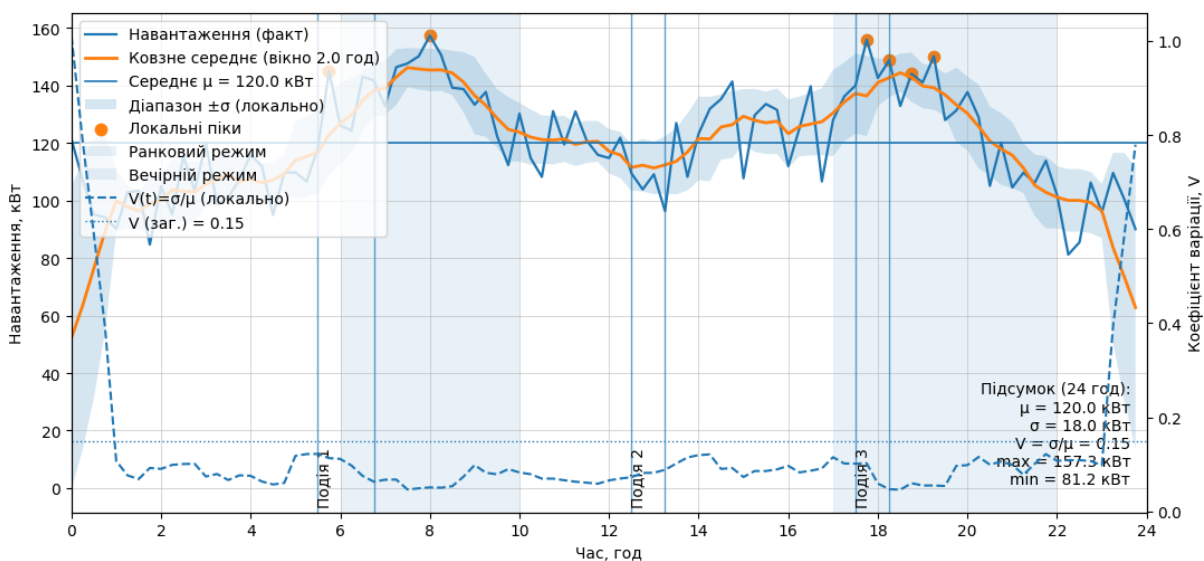


Рисунок 3 – Графік часових коливань навантаження та визначення коефіцієнта варіації
Джерело: розроблено автором на основі [5]

Figure 3 – Graph of Load Fluctuations Over Time and Determination of the Coefficient of Variation
Source: developed by the author based on [5]

Поєднання інтегральної оцінки S_f , показника надійності $P(t)$ та коефіцієнта варіації V формує узгоджену систему кількісних критеріїв організаційно-технологічного моніторингу. Отримані

результати забезпечують обґрунтоване планування технічного обслуговування, оптимізацію режимів експлуатації та підтримання безперервності функціонування інженерних мереж.

Імітаційне моделювання режимів експлуатації інженерних мереж є логічним розвитком аналітичної формалізації, оскільки дозволяє відтворити поведінку системи в умовах змінного навантаження, структурних збурень та аварійних впливів. Якщо інтегральні показники відображають поточний стан, то імітаційні моделі дають можливість оцінити траєкторію розвитку подій у часі та кількісно визначити рівень ризику відмов [6]. У межах організаційно-технологічного спостереження це створює основу для сценарного прогнозування та адаптивного управління.

Формалізація ризику відмов окремого елемента або вузла мережі доцільно здійснювати через інтегральний показник ризику:

$$R = P_f \times C, \quad (6)$$

де P_f — імовірність відмови,

C — величина наслідків (економічних, технологічних або соціальних втрат).

Імовірність відмови визначається як доповнення до ймовірності безвідмовної роботи:

$$P_f = 1 - P(t), \quad (7)$$

Розрахунковий приклад. Якщо для вузла розподілу теплової мережі за горизонту 300 год експлуатації отримано $P(t)=0,70$, тоді:

$$P_f = 1 - 0,70 = 0,30.$$

За умови, що потенційні втрати при відмові оцінюються у 250 тис. грн, інтегральний ризик становитиме:

$$R = 0,30 \times 250000 = 75000 \text{ грн.}$$

Отримане значення може використовуватися як критерій пріоритезації ремонтних заходів або резервування потужностей.

Узагальнення розрахункових показників імовірності відмов, величини наслідків та інтегрального ризику для ключових елементів інженерної мережі доцільно представити у таблиці 2, що забезпечує можливість їх порівняльного аналізу та ранжування за рівнем критичності [7].

Таблиця 2 - Оцінювання ризику відмов ключових елементів мережі

Table 2 - Assessment of Failure Risk of Key Network Elements

Елемент мережі	$P(t)$	P_f	Наслідки, грн	Ризик R, грн
Насосний агрегат	0,74	0,26	180 000	46 800
Теплообмінник	0,70	0,30	250 000	75 000
Електрощит керування	0,82	0,18	120 000	21 600

Джерело: розроблено автором на основі [7]

Source: developed by the author based on [7]

Ранжування за величиною R демонструє, що найбільш критичним є теплообмінник, що обґрунтовує доцільність посиленого моніторингу або модернізації цього вузла.

На рисунку 4 представлено діаграму порівняльної оцінки інтегрального ризику відмов елементів мережі, що дозволяє візуально ідентифікувати найбільш критичні вузли системи.

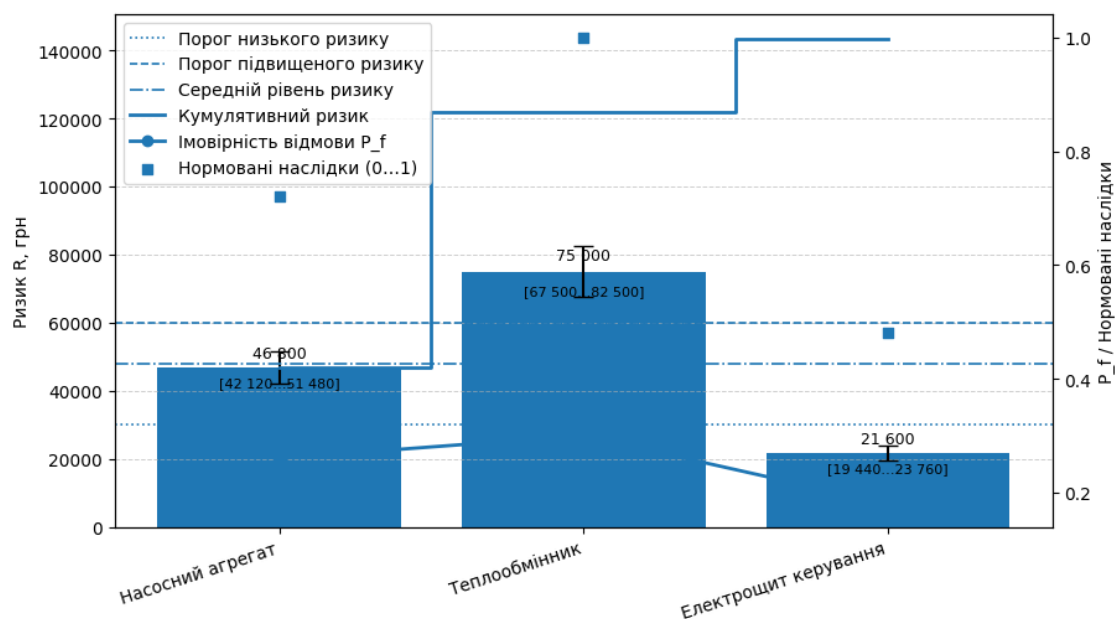


Рисунок 4 – Діаграма порівняльної оцінки інтегрального ризику відмов елементів мережі
Джерело: розроблено автором на основі [8]

Figure 4 – Comparative Diagram of the Integral Failure Risk Assessment of Network Elements
Source: developed by the author based on [8]

Сценарний аналіз передбачає моделювання декількох режимів експлуатації: стабільного, перевантаженого та аварійного. У межах імітаційної моделі змінними параметрами виступають інтенсивність відмов, коефіцієнт варіації навантаження та тривалість міжсервісних інтервалів. Моделювання показує, що при збільшенні коефіцієнта варіації навантаження з 0,15 до 0,28 інтенсивність відмов умовно зростає з 0,0015 до 0,0022 год⁻¹, що призводить до скорочення середнього напрацювання до відмови приблизно на 32 %. Це підтверджує прямий зв'язок між нестабільністю режимів та деградацією обладнання.

На рисунку 5 відображено графік зміни рівня ризику при різних сценаріях навантаження, який демонструє динамічну залежність критичності функціонування мережі від режимів експлуатації.

Аналіз кривих показує, що перевантажений режим формує нелінійне зростання ризику, тоді як стабільний режим характеризується відносно пологим трендом. Аварійний сценарій демонструє різке збільшення значення R, що перевищує допустимі порогові рівні вже на ранніх етапах експлуатації [9].

Для інтеграції результатів імітаційного моделювання в систему управління доцільно застосовувати матрицю «ймовірність–наслідки», яка дозволяє класифікувати події за рівнями критичності (низький, середній, високий ризик). Такий підхід забезпечує трансформацію аналітичних результатів у конкретні управлінські рішення: резервування обладнання, корекцію режимів, перегляд графіків технічного обслуговування або впровадження додаткових засобів контролю.

Імітаційне моделювання режимів експлуатації та оцінювання ризиків формує динамічний контур організаційно-технологічного спостереження. Воно дозволяє не лише фіксувати поточний стан мережі, а й прогнозувати потенційні відхилення, визначати економічно обґрунтовані пріоритети втручання та забезпечувати безперервність функціонування інженерних систем в умовах змінного навантаження.

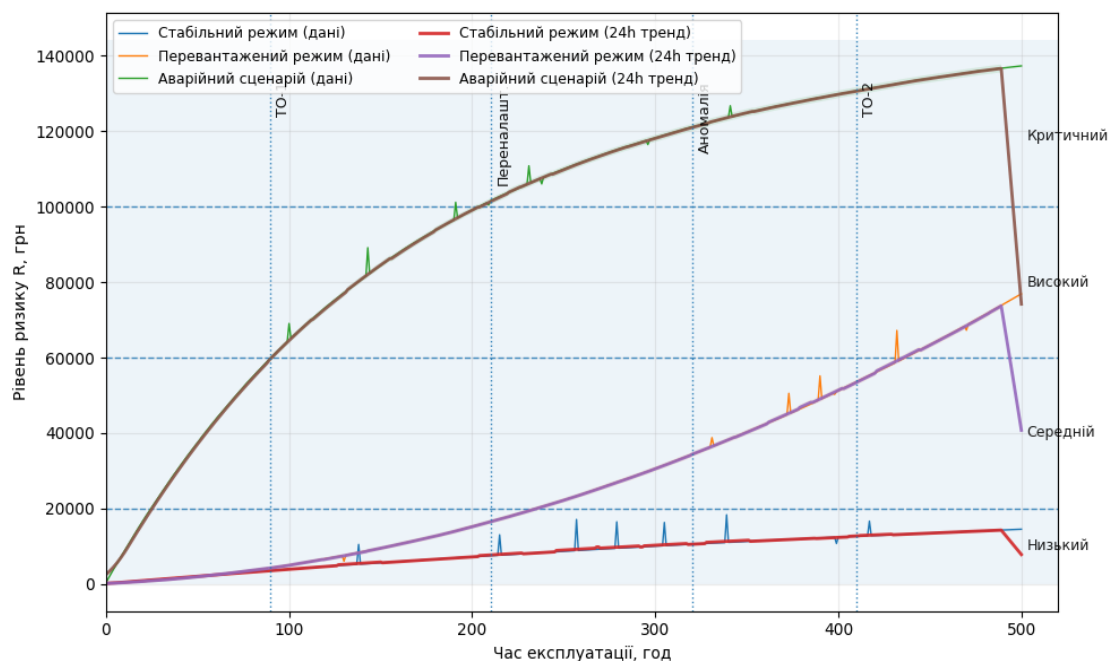


Рисунок 5 – Графік зміни рівня ризику при варіативних сценаріях навантаження
Джерело: розроблено автором на основі [9]

Figure 5 – Graph of Changes in Risk Level Under Variable Load Scenarios
Source: developed by the author based on [9]

Аналітико-цифровий інструментарій підтримки управлінських рішень у системі організаційно-технологічного спостереження формує завершальний контур інтеграції розрахункових показників, імітаційних сценаріїв та експлуатаційних даних у єдине інформаційне середовище. Його призначення полягає не лише в акумулюванні даних моніторингу, а й у трансформації масиву вимірювань у керовані індикатори ефективності, що дозволяють оперативно коригувати режими функціонування інженерних мереж. Такий підхід реалізується через створення цифрової платформи, яка поєднує сенсорні дані, розрахункові моделі та алгоритми прогнозу аналітики.

Базовим інструментом цифрової підтримки є агрегований індекс експлуатаційної ефективності, який інтегрує показники стійкості, ризику та ресурсної оптимальності. Узагальнену форму такого індексу доцільно представити як:

$$E_{int} = \alpha S_f + \beta(1 - P_f) + \gamma(1 - V), \quad (8)$$

де S_f — інтегральний показник функціональної стійкості, P_f — імовірність відмови, V — коефіцієнт варіації навантаження, α, β, γ — вагові коефіцієнти ($\alpha + \beta + \gamma = 1$).

Розрахунковий приклад. Нехай $S_f=0,45$, $P_f=0,30$, $V=0,15$. За умов ваг $\alpha=0,4$, $\beta=0,35$, $\gamma=0,25$:

$$E_{int} = 0,4 \times 0,45 + 0,35 \times (1 - 0,30) + 0,25 \times (1 - 0,15).$$

$$E_{int} = 0,18 + 0,245 + 0,2125 = 0,6375.$$

Отримане значення 0,64 може трактуватися як середній рівень експлуатаційної ефективності, що вимагає оптимізації окремих параметрів, але не свідчить про критичний стан системи.

Цифрова платформа моніторингу дозволяє візуалізувати динаміку інтегрального індексу в часовому розрізі та визначати тренди деградації або стабілізації режимів.

На рисунку 6 представлено графічну інтерпретацію динаміки інтегрального індексу експлуатаційної ефективності E_{int} у часовому розрізі, що дозволяє оцінити тенденції зміни стану інженерної мережі та своєчасно ідентифікувати моменти зниження функціональної стабільності [10].

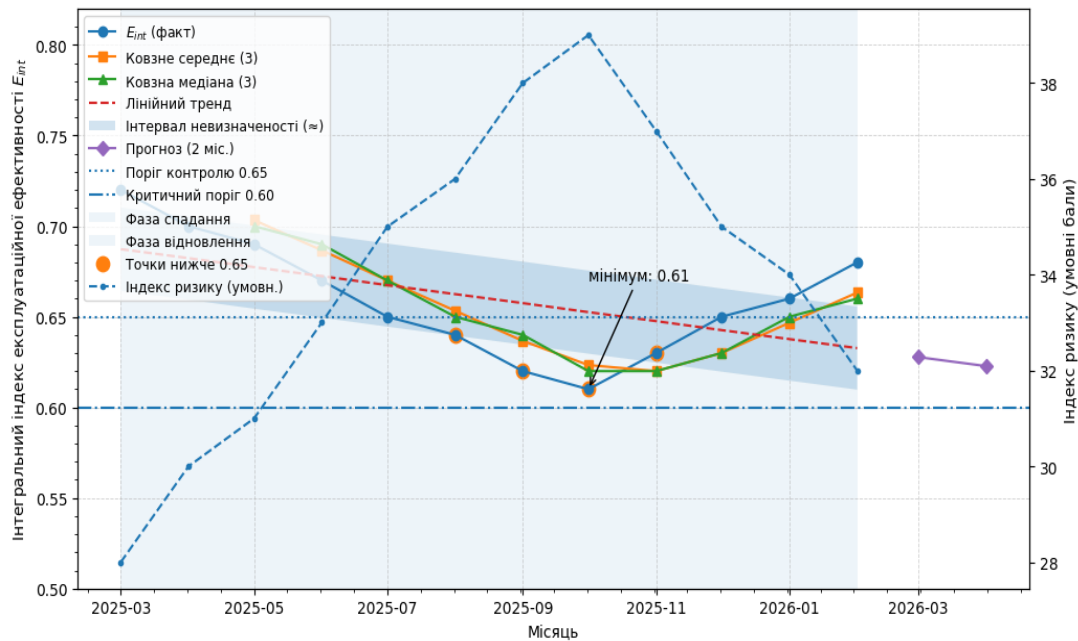


Рисунок 6 – Графік динаміки інтегрального індексу експлуатаційної ефективності E_{int}

Джерело: розроблено автором на основі [10]

Figure 6 – Graph of the Dynamics of the Integral Operational Efficiency Index E_{int}

Source: developed by the author based on [10]

Аналіз тренду дозволяє встановити точки перегину, що сигналізують про необхідність управлінського втручання. Зниження індексу нижче встановленого порогового значення (наприклад, 0,60) може автоматично ініціювати процедуру перевірки відповідного вузла або запуск алгоритму прогнозного технічного обслуговування [11].

У таблиці 3 наведено узагальнену матрицю прийняття управлінських рішень, яка поєднує значення інтегрального індексу експлуатаційної ефективності та рівень ризику відмов, формуючи обґрунтовану основу для визначення пріоритетності технічних і організаційних заходів.

Додатковим інструментом цифрової аналітики є прогнозування ресурсу елементів мережі на основі трендової моделі. У спрощеному вигляді залишковий ресурс можна визначити як:

$$T_{зал} = \frac{S_{crit} - S_{fact}}{k_{deg}}, \quad (9)$$

де S_{crit} — критичний рівень показника стійкості,

S_{fact} — поточне значення,

k_{deg} — коефіцієнт швидкості деградації.

Наприклад, якщо критичний рівень прийнято 0,30, поточний — 0,45, а швидкість зниження становить 0,01 за місяць, то:

$$T_{\text{зал}} = \frac{0,45 - 0,30}{0,01} = 15 \text{ місяців.}$$

Це дозволяє планувати модернізацію або заміну обладнання з урахуванням фактичної динаміки стану.

Таблиця 3 – Матриця прийняття управлінських рішень за рівнем ефективності та ризику
Table 3 – Decision-Making Matrix Based on Efficiency and Risk Levels

E_{int}	Ризик R	Рівень стану	Управлінське рішення
> 0,75	Низький	Стабільний	Плановий моніторинг
0,60–0,75	Середній	Контрольований	Поглиблена діагностика
< 0,60	Високий	Критичний	Негайне технічне втручання

Джерело: розроблено автором на основі [11]

Source: developed by the author based on [11]

Аналітико-цифровий інструментарій забезпечує завершення циклу організаційно-технологічного спостереження: від збору та обробки даних до формування кількісно обґрунтованих управлінських рішень. Інтеграція розрахункових моделей, ризик-аналізу та цифрової візуалізації дозволяє підвищити прозорість управління, мінімізувати ймовірність аварій та забезпечити стабільну і безперервну роботу систем будівельних інженерних мереж у довгостроковій перспективі [12].

Висновки. Проведене дослідження дозволило сформувавши цілісну методологічну основу моделювання процесів організаційно-технологічного спостереження за функціонуванням систем будівельних інженерних мереж. У межах викладу було обґрунтовано необхідність переходу від фрагментарного контролю окремих технічних параметрів до інтегрованої системи кількісної оцінки, яка поєднує показники стійкості, надійності, ризику та варіативності експлуатаційних режимів.

Запропонований підхід базується на формалізації інтегрального показника функціональної стійкості, що дозволяє агрегувати різноманітні параметри в єдину аналітичну шкалу та забезпечити об'єктивність порівняльної оцінки різних ділянок мережі. Поєднання нормування показників із розрахунком імовірності безвідмовної роботи створює підґрунтя для кількісного визначення технічного ресурсу обладнання та прогнозування моментів потенційної деградації.

Імітаційне моделювання режимів експлуатації розширює аналітичну базу за рахунок врахування сценарної варіативності та впливу нестабільних навантажень на інтенсивність відмов. Оцінювання ризику як добутку імовірності відмови на величину можливих наслідків дозволяє трансформувати технічні показники у вимірювані економічні критерії, що підвищує обґрунтованість управлінських рішень і забезпечує раціональний розподіл ресурсів.

Інтеграція розрахункових моделей у цифрове інформаційне середовище формує завершений контур підтримки прийняття рішень. Використання агрегованих індексів ефективності, матриць оцінювання стану та прогнозування залишкового ресурсу забезпечує перехід до адаптивної моделі управління, в якій моніторинг виступає не лише засобом фіксації відхилень, а інструментом стратегічного планування розвитку інженерної інфраструктури.

Загалом поєднання системного підходу, математичної формалізації, імітаційного аналізу та цифрової аналітики формує науково обґрунтовану концепцію забезпечення стабільної та безперервної роботи будівельних інженерних мереж. Реалізація запропонованого інструментарію сприяє підвищенню експлуатаційної надійності, зниженню аварійності, оптимізації витрат на технічне обслуговування та створенню умов для довгострокової стійкості функціонування інженерних систем у динамічному середовищі.

Список посилань

1. Grieves M., Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems // Kahlen F.-J., Flumerfelt S., Alves A. (eds.). *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Cham: Springer, 2017. P. 85–113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
2. Cinelli M., Spada M., Kim W., Zhang Y., Burgherr P. MCDA Index Tool: an interactive software to develop indices and rankings // *Environment Systems and Decisions*. — 2020. — Vol. 1. — P. 82–109. — DOI: 10.1007/s10669-020-09784-X.
3. Saaty T. L. Decision making for leaders: the analytic hierarchy process for decisions in a complex world. 2nd ed. Pittsburgh: *RWS Publications*, 2008. 315 p. ISBN 978-0-9620317-8-6.
4. Rausand M., Høyland A. System reliability theory: models, statistical methods, and applications. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004. 636 p.
5. Теорія ймовірностей. [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О.В. Барабаш, А.П. Мусієнко, О.В. Свинчук. – Електронні текстові дані (1 файл: 3705 Кбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 193 с.
6. Banks J., Carson J. S., Nelson B. L., Nicol D. M. Discrete-event system simulation. 5th ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2010. 640 p. ISBN 978-0-13-606212-7.
7. Aven T. Risk analysis: assessing uncertainties beyond expected values and probabilities. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015. 192 p. ISBN 978-1-118-90504-5.
8. Modarres M., Kaminskiy M., Krivtsov V. Reliability engineering and risk analysis: a practical guide. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2017. 515 p. ISBN 978-1-4987-6001-2.
9. Law A. M. Simulation modeling and analysis. 5th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015. 744 p. ISBN 978-0-07-340132-4.
10. Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006. Vol. 20, No. 7. — P. 1483–1510. — DOI: 10.1016/j.ymsp.2005.09.012.
11. Hopkin P. Fundamentals of risk management: understanding, evaluating and implementing effective risk management. 4th ed. — London: Kogan Page, 2018. — 456 p. — ISBN 978-0-7494-8357-2.
12. Si X.-S., Wang W., Hu C.-H., Zhou D.-H. Remaining useful life estimation — A review on the statistical data driven approaches. *European Journal of Operational Research*. 2011. Vol. 213, No. 1. — P. 1–14. — DOI: 10.1016/j.ejor.2010.11.018.

APPROACHES AND TOOLS FOR MODELING ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL MONITORING PROCESSES TO ENSURE STABLE AND CONTINUOUS OPERATION OF BUILDING ENGINEERING NETWORK SYSTEMS

Martyniuk Ivan Yu., PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Engineering Graphics and Design, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: ivan.martinyuk@gmail.com, tel. +38(096) 068-00-29, <https://orcid.org/0000-0001-7957-2068>

Maksymiuk Yurii V., Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Structural Mechanics, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine, e-mail: maksymiuk.iuv@knuba.edu.ua, tel. +38(067) 230-94-72, <https://orcid.org/0000-0002-5814-6227>

Kuzminets Mykola P., Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computer Engineering Graphics and Design, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: Kuzminecmp@ukr.net, tel. +38(098) 360-08-12, <https://orcid.org/0000-0002-9636-919X>

Abstract. The increasing complexity of building engineering networks, integration of subsystems with different functional purposes, and growing requirements for uninterrupted operation necessitate the development of a scientifically grounded system of organizational and technological monitoring. Effective management of water supply, heat supply, power supply, and ventilation networks requires a transition from fragmented control of individual parameters to a comprehensive model for quantitative assessment of functional stability. The methodological framework is based on the integration of systemic, functional, and risk-oriented approaches, enabling the analysis of engineering networks as an integrated technical and organizational complex with interrelated elements and a hierarchy of critical parameters.

Formalization of monitoring processes is implemented through the construction of an integral stability indicator determined by weighted aggregation of normalized operational parameters, ensuring objectivity in comparative assessment of different network sections. Calculation of the probability of failure-free operation, failure rate, and integral risk makes it possible to transform technical characteristics into measurable economic criteria and to establish priorities for technical intervention. The application of simulation modeling provides scenario-based analysis of operating modes and forecasting of equipment degradation dynamics under variable load conditions.

An integral operational efficiency index combining stability indicators, failure probability, and load variability into a unified decision-support system is proposed. Integration of analytical models into a digital information platform forms a comprehensive monitoring loop that enhances operational reliability, reduces accident rates, optimizes maintenance costs, and ensures long-term stability of building engineering network systems under dynamic operating conditions. Practical implementation of the proposed tools contributes to the formation of an adaptive infrastructure management model based on predictability, systemic coordination, and economic feasibility.

Keywords: organizational and technological monitoring, engineering networks, integral stability indicator, process modeling, probability of failure-free operation, failure rate, risk analysis, simulation modeling, digital monitoring platform, operational efficiency, continuity of operation.

References

1. Grieves M., Vickers J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In: Kahlen F.-J., Flumerfelt S., Alves A. (eds.). *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Cham: Springer, 2017. P. 85–113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4.
2. Cinelli M., Spada M., Kim W., Zhang Y., Burgherr P. MCDA Index Tool: an interactive software to develop indices and rankings. *Environment Systems and Decisions*. 2020. Vol. 40. P. 82–109. DOI: 10.1007/s10669-020-09784-X.
3. Saaty T. L. *Decision Making for Leaders: The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World*. 2nd ed. Pittsburgh: RWS Publications, 2008. 315 p. ISBN 978-0-9620317-8-6.
4. Rausand M., Høyland A. *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications*. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004. 636 p.
5. Barabash O. V., Musiienko A. P., Svychnuk O. V. *Probability Theory: Study Guide for Students of Specialty 121 “Software Engineering”* [Electronic resource]. Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2021. 193 p. [in Ukrainian]
6. Banks J., Carson J. S., Nelson B. L., Nicol D. M. *Discrete-Event System Simulation*. 5th ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2010. 640 p. ISBN 978-0-13-606212-7.
7. Aven T. *Risk Analysis: Assessing Uncertainties Beyond Expected Values and Probabilities*. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015. 192 p. ISBN 978-1-118-90504-5.
8. Modarres M., Kaminskiy M., Krivtsov V. *Reliability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2017. 515 p. ISBN 978-1-4987-6001-2.
9. Law A. M. *Simulation Modeling and Analysis*. 5th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2015. 744 p. ISBN 978-0-07-340132-4.
10. Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006. Vol. 20, No. 7. P. 1483–1510. DOI: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012.
11. Hopkin P. *Fundamentals of Risk Management: Understanding, Evaluating and Implementing Effective Risk Management*. 4th ed. London: Kogan Page, 2018. 456 p. ISBN 978-0-7494-8357-2.
12. Si X.-S., Wang W., Hu C.-H., Zhou D.-H. Remaining useful life estimation — a review on the statistical data-driven approaches. *European Journal of Operational Research*. 2011. Vol. 213, No. 1. P. 1–14. DOI: 10.1016/j.ejor.2010.11.018.

Дата надходження до редакції 08.02.2026.

Дата прийняття статті після рецензування 03.03.2026.