

І.В. Самоненко

Луцький національний технічний університет

**ЙМОВІРНІСНІ МОДЕЛІ ДЛЯ АНАЛІЗУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ
ДОВГОВІЧНОСТІ АРХІТЕКТУРНИХ ОБ'ЄКТІВ**

У статті розглянуто застосування ймовірнісних моделей для аналізу та прогнозування довговічності архітектурних об'єктів в умовах невизначеності експлуатаційних і матеріальних параметрів. Методологія дослідження ґрунтується на використанні моделей теорії надійності та аналізу часу до відмови, зокрема розподілів Вейбулла та логнормального розподілу, які широко застосовуються для опису процесів деградації будівельних матеріалів і конструкцій. У роботі використано синтетичні дані, змодельовані на основі емпіричних результатів попередніх досліджень довговічності бетонних і конструкційних матеріалів. Для оцінки ймовірності відмови та прогнозування строку служби архітектурних об'єктів застосовано методи структурної надійності та моделювання Монте-Карло. Отримані результати демонструють ефективність ймовірнісного підходу для кількісної оцінки ризиків деградації та дозволяють визначати очікуваний строк експлуатації з урахуванням варіабельності впливових факторів. Запропонований підхід може бути використаний як інструмент підтримки прийняття рішень у процесі проектування та оцінювання надійності архітектурних об'єктів.

Ключові слова: ймовірнісні моделі, довговічність архітектурних об'єктів, структурна надійність, розподіл Вейбулла, логнормальний розподіл, аналіз часу до відмови, моделювання Монте-Карло, прогнозування строку служби

I. V. Samonenko

**PROBABILISTIC MODELS FOR THE ANALYSIS AND PREDICTION OF THE
DURABILITY OF ARCHITECTURAL STRUCTURES**

This paper examines the application of probabilistic models for the analysis and prediction of the durability of architectural structures under uncertainty in material properties and operational conditions. The research methodology is based on reliability theory and time-to-failure analysis, with particular emphasis on the Weibull and lognormal distributions, which are widely used to describe degradation processes in building materials and structural systems. The study employs synthetic datasets generated on the basis of empirical results reported in previous investigations of the durability of concrete and structural materials. Structural reliability methods and Monte Carlo simulation are applied to estimate failure probabilities and to predict the service life of architectural objects. The results demonstrate the effectiveness of the probabilistic approach for quantitative assessment of degradation risks and enable the estimation of expected service life while accounting for the variability of influencing factors. The proposed methodology can be used as a decision-support tool in the design process and in the reliability assessment of architectural structures.

Keywords: probabilistic models, durability of architectural structures, structural reliability, Weibull distribution, lognormal distribution, time-to-failure analysis, Monte Carlo simulation, service life prediction

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. Проблема довговічності архітектурних об'єктів є однією з ключових у сучасній теорії та практиці будівництва, оскільки строк служби конструкцій визначає не лише економічну ефективність, але й безпеку експлуатації та сталість архітектурного середовища. Реальні умови експлуатації будівель характеризуються значною невизначеністю, зумовленою варіабельністю властивостей матеріалів, впливом кліматичних чинників, навантажень і процесів деградації, що унеможливає точне детерміністичне прогнозування їхнього ресурсу. У зв'язку з цим у сучасних дослідженнях усе більшого поширення набувають ймовірнісні підходи, які дозволяють кількісно враховувати випадковий характер процесів руйнування та старіння конструкцій [5].

Одним із найбільш поширених інструментів аналізу довговічності матеріалів і конструкцій є використання розподілу Вейбулла, який широко застосовується для моделювання часу до відмови та процесів втомного руйнування. У роботах [1; 6] показано, що параметри розподілу Вейбулла адекватно описують статистичні закономірності деградації матеріалів і дозволяють оцінювати ймовірність руйнування на різних етапах експлуатації. Модифікація параметрів цього розподілу, з урахуванням специфіки навантажень і умов експлуатації, дає змогу підвищити точність прогнозів довговічності, що є особливо важливим для складних архітектурних конструкцій [6].

Поряд із розподілом Вейбулла, у задачах аналізу строку служби широко застосовуються логнормальні моделі, які використовуються для опису даних виживання та часу до відмови в умовах асиметричних розподілів. Класичні дослідження з аналізу логнормальних даних виживання [3] заклали теоретичне підґрунтя для використання цього підходу у технічних системах, де деградаційні процеси накопичуються поступово. Логнормальний розподіл виявився особливо корисним для моделювання довготривалих процесів старіння будівельних матеріалів, що мають складну нелінійну природу.

Значна частина сучасних досліджень зосереджена на ймовірнісній оцінці довговічності бетонних і залізобетонних конструкцій як основних елементів архітектурних об'єктів. У працях [2; 4] розглядаються впливи циклічних температурних навантажень, механічних напружень і втомних процесів на строк служби бетонних конструкцій. Автори підкреслюють, що традиційні детерміністичні методи не дозволяють адекватно оцінити ризики відмови, тоді як ймовірнісні моделі забезпечують більш реалістичну оцінку надійності та довговічності з урахуванням випадковості зовнішніх і внутрішніх чинників.

Важливим напрямом сучасних досліджень є застосування методів структурної надійності, які поєднують ймовірнісні моделі матеріалів із математичним описом поведінки конструкцій у часі. Систематичні огляди методів структурної надійності [5] свідчать про ефективність використання ймовірнісних підходів для оцінки ризиків руйнування та оптимізації проєктних рішень. У межах цих підходів особливе місце займають методи моделювання Монте-Карло, які дозволяють відтворювати широкий спектр можливих сценаріїв деградації та отримувати статистичні оцінки строку служби конструкцій [7].

Попри значний обсяг наукових досліджень, більшість робіт зосереджена або на аналізі окремих матеріалів, або на конкретних типах конструкцій, тоді як комплексний підхід до прогнозування довговічності архітектурних об'єктів як цілісних систем залишається недостатньо розвиненим. Крім того, у наявних дослідженнях часто відсутнє порівняльне використання різних ймовірнісних моделей, що ускладнює вибір оптимального інструментарію для практичного застосування.

У зв'язку з цим актуальною є проблема розроблення та узагальнення ймовірнісного підходу до аналізу і прогнозування довговічності архітектурних об'єктів, який би поєднував моделі теорії надійності, аналіз часу до відмови та методи Монте-Карло. Такий підхід дозволяє не лише оцінювати очікуваний строк служби конструкцій, але й кількісно визначати рівень ризику деградації з урахуванням невизначеності матеріальних і експлуатаційних параметрів, що визначає наукову та практичну актуальність даного дослідження [1–7].

Мета і завдання дослідження. Метою даної статті є розроблення та застосування ймовірнісного підходу до аналізу й прогнозування довговічності архітектурних об'єктів з урахуванням невизначеності матеріальних властивостей, експлуатаційних умов і деградаційних процесів. Дослідження спрямоване на використання моделей теорії надійності та аналізу часу до відмови для кількісної оцінки строку служби конструкцій і ймовірності їхнього руйнування на різних етапах експлуатації. Особлива увага приділяється застосуванню розподілів Вейбулла та логнормального розподілу як базових ймовірнісних моделей, що широко використовуються для опису процесів старіння та втомного руйнування будівельних матеріалів і конструкцій [1; 3; 6].

Для досягнення поставленої мети у роботі передбачено розв'язання низки взаємопов'язаних завдань. Зокрема, здійснюється аналіз наукових підходів до ймовірнісного оцінювання довговічності архітектурних і будівельних конструкцій на основі сучасних методів структурної надійності [5]. Окремим завданням є дослідження можливостей застосування розподілу Вейбулла для моделювання процесів деградації матеріалів і визначення впливу його параметрів на прогнозований строк служби конструкцій [1; 6]. Також розглядається використання логнормальних моделей для аналізу даних часу до відмови в умовах накопичувального характеру пошкоджень [3].

У межах дослідження передбачається проведення ймовірнісної оцінки довговічності бетонних та конструкційних елементів архітектурних об'єктів з урахуванням циклічних навантажень і температурних впливів, що суттєво впливають на процеси втомного руйнування [2; 4]. Окрему увагу приділено застосуванню методів моделювання Монте-Карло для оцінки ймовірності відмови та отримання статистичних характеристик строку служби за різних сценаріїв експлуатації [7]. Завершальним завданням є формування узагальненого підходу до прогнозування довговічності архітектурних об'єктів, який може бути використаний як інструмент підтримки прийняття рішень у процесі проєктування, оцінювання надійності та планування експлуатації будівель [5].

Матеріали та методи. Методологія дослідження ґрунтується на застосуванні ймовірнісних моделей теорії надійності для аналізу та прогнозування довговічності архітектурних об'єктів в умовах невизначеності матеріальних властивостей і експлуатаційних впливів. У роботі використано поєднання узагальнених емпіричних результатів попередніх досліджень та синтетичних даних, що дозволяє моделювати процеси деградації конструкцій за контрольованих умов. Параметри моделей формувалися на основі статистичних характеристик, наведених у наукових публікаціях, присвячених довговічності будівельних матеріалів і конструкцій [1; 2; 4].

Синтетичні набори даних генерувалися з метою моделювання часу до відмови архітектурних конструкцій з урахуванням варіабельності фізико-механічних властивостей матеріалів, навантажень і впливу зовнішнього середовища. Такий підхід широко використовується в дослідженнях структурної надійності, оскільки дозволяє врахувати випадковий характер деградаційних процесів і оцінити можливі сценарії розвитку пошкоджень у часі [5]. Моделювання здійснювалося для типових архітектурних конструктивних елементів, зокрема бетонних і залізобетонних компонентів, довговічність яких є критично важливою для безпеки та експлуатаційної надійності будівель [2; 4].

Для аналізу довговічності в роботі застосовувалися моделі аналізу часу до відмови, зокрема розподіл Вейбулла як один із найбільш універсальних інструментів опису процесів руйнування та старіння матеріалів. Параметри розподілу Вейбулла використовувалися для моделювання різних стадій деградації, що дозволяє описувати як початкові дефекти, так і накопичення втомних пошкоджень у процесі експлуатації [1; 6]. Аналіз чутливості параметрів розподілу давав змогу оцінити їхній вплив на прогнозований строк служби та ймовірність відмови конструкцій.

Поряд із розподілом Вейбулла у дослідженні застосовувався логнормальний розподіл, який використовується для опису довготривалих процесів деградації з накопичувальним характером пошкоджень. Логнормальні моделі є особливо доцільними для аналізу даних виживання у випадках, коли час до відмови визначається сумарним впливом багатьох незалежних випадкових чинників [3]. Використання двох типів ймовірнісних розподілів дозволило здійснити порівняльний аналіз їхньої адекватності для прогнозування довговічності архітектурних об'єктів.

Для кількісної оцінки ймовірності відмови та отримання статистичних характеристик строку служби використовувалися методи структурної надійності та чисельне моделювання на основі методу Монте-Карло. Застосування цього методу дозволяє багаторазово відтворювати випадкові реалізації параметрів матеріалів і навантажень, формуючи розподіли часу до руйнування та криві надійності [7]. Такий підхід забезпечує можливість оцінювання не лише середнього очікуваного строку служби, але й ризику передчасної відмови конструкцій.

Запропонований у роботі комплекс методів дозволив поєднати аналітичні ймовірнісні моделі з чисельним моделюванням, що створює надійну основу для прогнозування довговічності архітектурних об'єктів. Отримані результати можуть бути використані для підтримки прийняття рішень у процесі проектування, оцінювання залишкового ресурсу та планування експлуатації будівель з урахуванням рівня ризику деградації [5].

Результати та обговорення. У межах проведеного дослідження ймовірнісні моделі дозволили кількісно оцінити довговічність основних конструктивних матеріалів архітектурних об'єктів та проаналізувати ризики їх деградації в часі. Отримані результати підтверджують доцільність використання розподілів теорії надійності для прогнозування строку служби конструкцій в умовах експлуатаційної невизначеності.

Для аналізу довговічності сталевих конструкцій було застосовано розподіл Вейбулла, який широко використовується для моделювання втомних процесів і часу до відмови. Побудовані криві ймовірності відмови $F(t)$ для різних режимів навантаження наведено на рис. 1

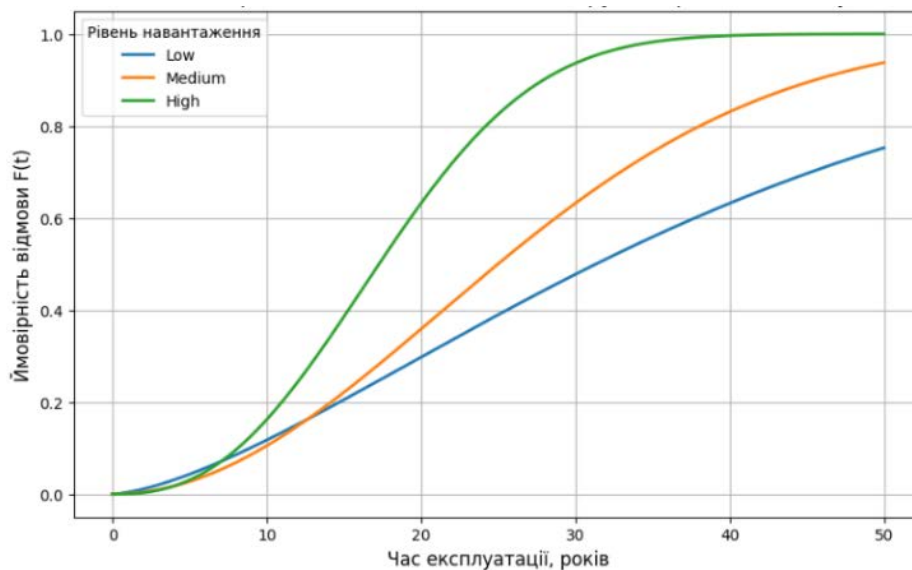


Рис. 1. Ймовірність відмови сталевих конструкцій (розподіл Вейбулла)

Як видно з графіка, за низьких навантажень імовірність відмови зростає поступово, що відповідає повільному накопиченню пошкоджень у матеріалі. Водночас за середніх і високих рівнів навантаження спостерігається значно прискорене зростання ймовірності відмови, що свідчить про інтенсифікацію втомних процесів і зменшення прогнозованого строку служби конструкцій. Така поведінка узгоджується з фізичною природою деградації сталі та підтверджує адекватність використання Вейбулівських моделей для аналізу довговічності сталевих елементів архітектурних об'єктів.

Додатковий аналіз функції небезпеки $h(t)$, наведений на Рис. 2, показав монотонне зростання ризику відмови зі збільшенням часу експлуатації. Для конструкцій, що працюють за високих навантажень, крива функції небезпеки має значно крутіший характер, що вказує на прискорене досягнення граничних станів. Це дозволяє зробити висновок, що хоча сталь характеризується високою надійністю та передбачуваністю експлуатаційних характеристик, її довговічність суттєво залежить від режимів навантаження, які мають враховуватися при прогнозуванні строку служби архітектурних об'єктів.

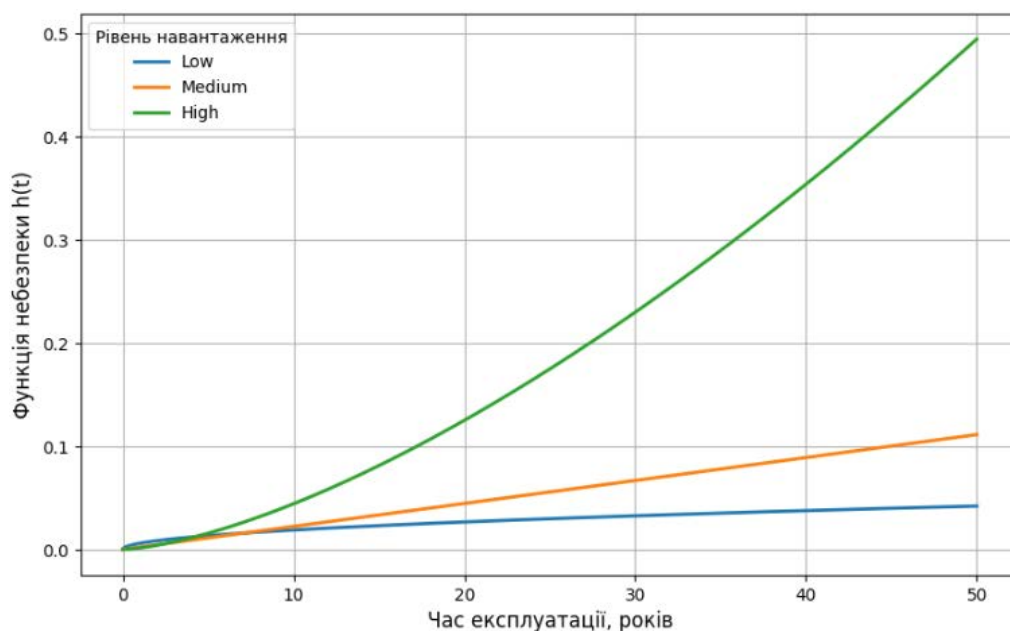


Рис. 2. Функція небезпеки сталевих конструкцій $h(t)$

Для бетонних конструкцій було використано експоненціальну модель часу до відмови, що є доцільною для опису довготривалих деградаційних процесів. Кількісні результати моделювання наведено в Таблиці 1, де подано значення інтенсивності відмов λ та середній час до появи тріщин для різних кліматичних умов.

Табл. 1.

Дані дослідження зносу бетонних конструкцій за різних кліматичних умов

Умови експлуатації	Температура (°C)	Вологість (%)	λ (інтенсивність відмов)	Середній час до тріщиноутворення (роки)
Помірний клімат	+10 ... +25	50 – 70	0.045	22.2
Вологий клімат	+5 ... +20	80 – 90	0.060	16.7
Холодний клімат	-5 ... +15	60 – 80	0.075	13.3

Аналіз таблиці показує, що в помірному кліматі бетонні конструкції демонструють найвищу прогнозовану довговічність, тоді як у холодному кліматі, де мають місце цикли заморожування–відтавання, інтенсивність деградації є максимальною.

Залежність ймовірності відмови бетонних конструкцій від часу може бути описана експоненціальною функцією, наведеною у формулі (1), параметри якої визначаються інтенсивністю відмов

$$P(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

де $P(t)$ – ймовірність відмови до моменту часу t ; λ – інтенсивність відмов. Зростання значень λ при переході від помірного до холодного клімату свідчить про істотний вплив зовнішніх середовищних факторів на довговічність бетону.

Для комплексної оцінки довговічності архітектурних об'єктів було проведено порівняльний аналіз сталевих, бетонних і дерев'яних конструкцій на основі змодельованих імовірнісних розподілів строку служби. Отримані результати показали, що сталеві конструкції характеризуються найвищими значеннями індексу надійності та найменшою варіативністю експлуатаційних характеристик, що робить їх найбільш передбачуваними з точки зору довговічності. Бетонні конструкції займають проміжне положення, демонструючи прийнятний строк служби за умови врахування кліматичних впливів. Деревина, навпаки, характеризується високою варіабельністю терміну служби, що обмежує її застосування в архітектурних об'єктах з підвищеними вимогами до довговічності.

Таким чином, результати дослідження демонструють, що ймовірнісні моделі дозволяють не лише прогнозувати очікуваний строк служби архітектурних об'єктів, але й кількісно оцінювати ризики передчасної деградації за різних умов експлуатації. Поєднання моделей Вейбулла, експоненціального розподілу та показників теорії надійності створює ефективний інструментарій для аналізу довговічності та може бути використане при оцінюванні життєвого циклу архітектурних об'єктів.

Висновки. Проведене дослідження продемонструвало ефективність застосування ймовірнісних моделей для аналізу та прогнозування довговічності архітектурних об'єктів в умовах експлуатаційної невизначеності. Отримані результати підтверджують, що використання моделей теорії надійності дозволяє кількісно описувати процеси деградації конструкцій і оцінювати ризики їх відмови протягом життєвого циклу будівель.

Застосування розподілу Вейбулла для аналізу сталевих конструктивних елементів дало змогу адекватно відобразити характер втомного руйнування та встановити залежність ймовірності відмови від часу експлуатації й рівня навантаження. Аналіз функцій небезпеки та надійності показав, що сталеві конструкції характеризуються високою передбачуваністю експлуатаційних характеристик, однак потребують ретельного врахування навантажувальних режимів при прогнозуванні строку служби архітектурних об'єктів.

Для бетонних конструкцій експоненціальна модель часу до відмови дозволила виявити істотний вплив кліматичних факторів на швидкість деградації та очікуваний строк експлуатації. Отримані значення інтенсивності відмов підтвердили, що цикли заморожування–відтавання, підвищена вологість і температурні коливання суттєво знижують довговічність бетонних елементів, що має враховуватися при оцінюванні надійності архітектурних об'єктів у різних кліматичних зонах.

Порівняльний аналіз сталевих, бетонних і дерев'яних конструкцій показав, що сталь забезпечує найвищі показники довговічності та стабільності експлуатаційних характеристик, тоді як бетон є доцільним матеріалом для конструкцій середньої відповідальності за умови врахування кліматичних впливів. Деревина, з огляду на високу варіабельність строку служби, може застосовуватися переважно в архітектурних об'єктах з обмеженими навантаженнями та контрольованими умовами експлуатації. Загалом отримані результати підтверджують, що ймовірнісні підходи є ефективним інструментом прогнозування довговічності архітектурних об'єктів і можуть бути використані для підтримки прийняття рішень у процесі проектування, оцінювання залишкового ресурсу та планування експлуатації будівель з урахуванням рівня ризику деградації.

Список літератури

1. Li L., Zhang Y., Wang H., et al. Method based on Weibull distribution for strength and durability analysis of materials // Engineering Fracture Mechanics. 2021. Vol. 256. Art. 107964. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2021.107964.

2. Tao C., Liu Y., Chen Z., et al. Reliability of compressive fatigue strength of concrete structures under temperature cycles // *Advances in Civil Engineering*. 2024. Vol. 2024. Art. 8852631. DOI: 10.1155/2024/8852631.
3. Gupta R. C., Akman H. O. Analysis of lognormal survival data // *Mathematical Biosciences*. 1997. Vol. 139, no. 2. P. 103–115. DOI: 10.1016/S0025-5564(96)00133-2.
4. Verma S. K., Bhaduria S. S., Akhtar S. Probabilistic assessment of service life of concrete structures // *Chinese Journal of Engineering*. 2014. Vol. 2014. Art. 648438. DOI: 10.1155/2014/648438.
5. Shittu A. A., Kolawole J. T., Oladimeji O., et al. A systematic review of structural reliability methods // *Metals*. 2020. Vol. 11, no. 1. Art. 50. DOI: 10.3390/met11010050.
6. Fakoor H., Ghasemi M., Gandomkar A. A modification in Weibull parameters to achieve a more accurate fatigue reliability analysis // *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13, no. 1. Art. 17537. DOI: 10.1038/s41598-023-44907-9.
7. Tytarenko R. Probabilistic analysis of structural reliability: a review of Monte Carlo based approaches // *Visnyk of Lviv Polytechnic National University*. 2023. Vol. 5, no. 2. P. 48–54. DOI: 10.23939/jtbp2023.02.048.