

УДК

**АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ
КОНСТРУКЦІЙ**

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ
КОНСТРУКЦИЙ**

**ANALYSIS OF EVALUATION'S METHODS OF THE RELIABILITY OF
REINFORCED CONCRETE STRUCTURES**

Хміль Р.Є., к.т.н., доц. (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів), **Титаренко Р.Ю., асп.** (Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів)

Хмил Р.Е., к.т.н., доц. (Национальный университет «Львовская политехника», г. Львов), **Титаренко Р.Ю., асп.** (Национальный университет «Львовская политехника», г. Львов)

Khmil R. Ye., candidate of technical sciences (Lviv Polytechnic National University, Lviv), **Tytarenko R. Yu., postgraduate** (Lviv Polytechnic National University, Lviv)

Наведено аналітичний огляд розвитку методів оцінки надійності залізобетонних конструкцій. Представлено відповідні концепції розрахунку такої оцінки, виведеної у ймовірнісних показниках безвідмовної роботи.

Приведен аналитический обзор развития методов оценки надежности железобетонных конструкций. Представлены соответствующие концепции расчета такой оценки, выведенной в вероятностных показателях безотказной работы.

Provides an analytical overview of methods for the evaluation of the reliability of reinforced concrete structures. Presented appropriate concepts of calculating such estimates, derived in probabilistic indicators of uptime performance.

Ключові слова:

Надійність, ймовірність безвідмовної роботи, залізобетонні конструкції.
Надежность, вероятность безотказной работы, железобетонные конструкции.
Reliability, probability of uptime performance, RC structures.

Вступ. У зв'язку із продовженням роботи по адаптації (гармонізації) в Україні нормативних документів в галузі будівництва - Єврокодів, проблема оцінки надійності будівельних конструкцій набула все більшого значення. Враховуючи, що фундаментальні засадничі фактори безпеки, експлуатаційної придатності і довговічності лежать в основі поняття «надійності» будівель і споруд (згідно Єврокоду EN 1990:2002 [1, 2]), дане питання слід розглядати ширше й детальніше при проектуванні конструкцій у нашій країні (тоді як на сьогоднішній день у нинішніх нормах проектування країн ЄС, Північної Америки, Австралії, Нової Зеландії, Японії та Китаю – ця проблема є ключовою).

Сучасне й найбільш поширене на сьогодні визначення надійності (згідно стандарту ISO 2394 [3]) наступне: «Надійність – здатність споруди чи її елемента виконувати задані функції протягом всього проектного строку експлуатації». В ДБН В.1.2-14-2009 [4] цей термін не значно відрізняється: «Надійність будівельного об'єкта – це властивість об'єкта виконувати задані функції протягом заданого проміжку часу». У вже згаданому EN 1990:2002 також додають наступне: «Надійність зазвичай представляється в ймовірнісних показниках». Останнє пояснюється дуже просто, адже визначення точного й адекватного показника ймовірності відмови, або ж безвідмовної роботи, тієї чи іншої конструктивної частини чи будівлі загалом, дає можливість значно зменшити вартість (фактор економічності), без зниження міцнісних й деформативних характеристик, а також діапазон розходження істинних таких характеристик на етапі виготовлення згаданих вище частин.

Постановка проблеми та мети роботи. Створюючи будівлю чи споруду, передбачають певний (теоретичний) рівень надійності її конструкцій та вузлів. Залежно від якості і характеристик окремих конструктивних елементів та їх монтажу початкова надійність трохи менша, ніж теоретична. З першого дня існування будівлі чи споруди в їх вузлах та конструкціях відбуваються зміни, які призводять до погіршення закладених у проекті характеристик і показників. Залежно від значущості та інтенсивності ці зміни бувають різні: одні спричиняють погіршення комфорту приміщень, інші – руйнування всієї споруди чи аварії; одні можна швидко усунути, інші взагалі неусувні; одні в часі перебігають повільно й безперервно, інші – випадково й безсистемно. Проте всі ці зміни через певний час порушують загальну роботоздатність системи. Таким чином, протягом усього терміну нормального функціонування будівлі чи споруди є ймовірність (можливість) виходу з ладу всієї будівлі або окремих її елементів. Чим така ймовірність менша, тим надійніша сама споруда.

Особливої уваги заслуговують залізобетонні конструкції (відповідно й правильне визначення їх надійності), оскільки залізобетон є одним з найбільш поширених конструктивних матеріалів для будівництва не лише в

Україні, а й у цілому світі. На українських теренах зведено багато будівель та споруд (більшість з них – збудовані понад 40 років тому) з даного матеріалу, і як наслідок, вони часто вже фізично й морально застарілі. Тому актуальним і раціональним вирішенням проблеми вартості нового будівництва є ефективне використання існуючих об'єктів або ж їх елементів після їх відновлення, підсилення або ж повної реконструкції. Тут й проявляється у повній мірі актуальність дослідження питання надійності підсилених залізобетонних конструкцій. При цьому слід брати до уваги використання різноманітних методів підсилення залізобетонних конструкцій, дії зовнішніх навантажень і впливів на конструкції під час робіт з підсилення. Для формування підходу до оцінки надійності таких конструкцій необхідно спочатку проаналізувати наявні підходи в оцінці надійності не пошкоджених конструкцій, безвідмовна експлуатація яких планується протягом заданного терміну.

Тенденції розвитку проблеми оцінки надійності залізобетонних конструкцій та аналіз досліджень. Становлення і розвиток базових основ забезпечення надійності та сучасне загальноприйняте трактування самого цього поняття в сфері будівництва пов'язується, в першу чергу, з роботами М.С. Стрелецького [7] й А.Р. Ржаніцина [8] (кінець сорокових років ХХ століття). У цих роботах був закладений «фундамент» сучасної теорії надійності будівель і споруд, а саме показана статистична природа міцності конструкцій і параметрів їх навантаження та доведено необхідність ймовірнісної оцінки робото здатності будівлі чи споруди.

Власне, самі ж ідеї статистичного підходу до оцінки міцності конструкцій були викладені в роботах М. Майера [5] та М.Ф.Хоціалова [6] наприкінці двадцятих років минулого століття. Саме А.Р. Ржаніциним були сформульовані принципові положення концепції безпеки споруди, що представляють собою базові засади усієї теорії надійності, як ймовірнісне вирішення наступної проблеми:

$$Z = \frac{R}{E} \geq 1 \quad (1)$$

в припущенні, що узагальнені опір окремого елемента R , навантаження E і резерв міцності Z є змінними випадкового характеру, мають нормальний розподіл і взаємно не корелюють (незалежні). Вирішенням цієї проблеми стала формула для визначення коефіцієнта запасу, названого А.Р. Ржаніциним «характеристикою безпеки»:

$$\gamma = \frac{\xi - 1}{\sqrt{A_r^2 \xi^2 + A_q^2}}, \quad (2)$$

де ξ – коефіцієнт запасу, який являє собою відношення середньої очікуваної несучої здатності до середнього очікуваного ефекту від навантаження (робочих напружень); A_q – коефіцієнт мінливості

навантаження (відношення стандарту навантаження до його середнього значення); A_r – коефіцієнт мінливості несучої здатності; γ – характеристика безпеки (інша назва – індекс надійності, коефіцієнт, що залежить від ймовірності руйнування (відмови) конструкції й призначається в залежності від наслідків такого можливого руйнування).

Пізніше цей підхід в науковій літературі отримав назву «метод другого моменту» («second-moment method») (ще одна назва – «метод двох моментів») і став основою проектування залізобетонних (й загалом будівельних) конструкцій заданої надійності. Перевагою такого підходу є його простота. Єдиним ж недоліком – обмеженість використання нормального закону в окремих випадках.

Наступні десять років після створення А.Р. Ржаніциним своєї концепції – період стрімкого розвитку теорії надійності конструкцій будівель й споруд, яка використовує основні принципи теорії ймовірностей і математичної статистики. З того часу дослідження надійності розвинулося у потужну окрему науку (цей розвиток не зупиняється й по сьогодні), спричинивши при цьому виникнення такого нового терміну як «надійнісне проектування».

Серед послідовників вищезгаданих першовідкривачів «надійності» будівель та споруд варто відзначити такі імена як В.В. Болотін [9] та В.Д. Райзер [10], які відзначилися ще й як прикладні науковці з дослідження надійності в проектуванні залізобетонних й інших конструкцій. Той же В.В. Болотін, виходячи зі своїх фундаментальних досліджень, у своїх працях описав наступні взаємопов'язані наукові принципи (власне, за твердженнями самого В.В. Болотіна, тут відбувся так званий перехід «від елементарних методів теорії ймовірностей до методів теорії випадкових функцій»):

- зовнішні впливи на будь-яку будівельну конструкцію та її поведінку в процесі експлуатації є випадковими процесами, які протікають й змінюються в часі;
- надійність ототожнюється із ймовірністю знаходження параметрів конструкції в деякій допустимій області, викид параметрів з цієї області трактується як відмова;
- відмова конструкції являється наслідком поступового накопичення пошкоджень.

Початком періоду бурхливого розвитку теорії надійності будівельних конструкцій (насамперед – залізобетонних) в країнах Європи та Північної Америки можна вважати роботу К.А. Корнелла 1969 року [11] (ним виведений так званий «індекс безпеки», завдяки чому стало можливим визначення надійності конструкцій й при інших законах розподілу випадкових величин).

Варто також додати, що у 1982 році А.Р. Ржаніциним видано навчальний посібник з курсу будівельної механіки [12], в якому детально описується методика розрахунку надійності конструкцій будівель та споруд.

Подальший розвиток теорії надійності пов'язаний з працями таких західних вчених як Фрейденталь [13], Баслер [14], Тофт-Крістенсен і Бейкер

[15], Дітлевсен й Медсен [16]. Найбільш сучасні їх послідовники – Фебер [17], Лоу [18], Зхенг [19], Дюпрат [20] та багато інших, праці яких стосуються забезпечення надійності залізобетонних балкових конструкцій, мостових великопролітних конструкцій, плит, колон, збірних конструкцій, плоских рам і просторових каркасів, сейсмічної надійності, надійності конструкцій, що перебувають під впливом агресивних середовищ, будівель й споруд в цілому і т.д.

В незалежній Україні багато наукових робіт присвячено проблемам оцінки надійності сталевих і сталезалізобетонних конструкцій (полтавська «школа» професора С.Ф. Пічугіна [21]) та загальним принципам і проблемам розвитку теорії надійності (професор А.І. Лантух-Лященко [22]).

Цікава також для проектування надійності робота Голіцкі [23], в якій продемонстровано, що альтернативні комбінації впливів на споруду (на відміну від базових) при перевірці граничних станів можуть призвести до достатньо великих коливань у зміні рівня надійності всієї споруди в залежності від співвідношення цих впливів у загальне навантаження.

Основні методи оцінки надійності. Головним завданням і метою абсолютно всіх вчених було і є розвиток та вдосконалення принципів оптимальної оцінки надійності конструкцій будівель та споруд у функції часу, за рахунок визначання різноманітними засобами й методами ймовірності безвідмовної роботи.

В процесі розвитку теорії надійності будівель та споруд, станом на даний час, існує достатньо багато методів визначення ймовірності безвідмовної роботи залізобетонних конструкцій, які дозволяють визначати межі її області для випадкових змінних, що розподілені не по нормальному закону (на відміну від вищезгаданого «методу двох моментів»). Серед цих методів варто виокремити основні, які у своїй монографії сформулював В.Д. Райзер [10]:

- *Метод «гарячих точок».* Тут місцева наближена апроксимація розподілу вихідних величин здійснюється в так званій «гарячій точці» – точці підгонки. Ця апроксимація має виконуватися на межі області відмови в точці з максимальною щільністю розподілу всіх вихідних величин, так як в околицях даної точки зосереджені найбільш ймовірні їх сполучення.

В даному випадку розглядається наступний алгоритм знаходження ймовірності безвідмовної роботи конструкції. Нехай x_1, x_2, \dots, x_n – вихідні випадкові величини з відомими інтегральними $F_{x,i}$ і диференціальними $f_{x,i}$ функціями розподілення. Межа області безвідмовної роботи тут задана наступним рівнянням [10]:

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0. \quad (3)$$

На першій ітерації (на межі області $g=0$) довільно обирається згадана вище точка підгонки (x_1, x_2, \dots, x_n) . Після визначення її координат та перевірки умови безвідмовної роботи, обчислюється ймовірність безвідмовної роботи.

Ітерації тут необхідно виконувати до того часу, поки обрана в черговий раз точка підгонки не виявиться «гарячою точкою».

Перевагою даного методу є його універсальність і простота алгоритму. Недолік методу полягає в тому, що функція g , що визначає область відмови, повинна бути всюди диференційною. Також можна відзначити певну складність в оцінці точності розрахунку;

- *Метод статистичних випробувань*. Для оцінки ймовірності відмови в даному випадку виконується достатньо велике число статистичних випробувань по схемі Бернуллі (на кожному випробуванні утворюються випадкові реалізації усіх вихідних випадкових величин). Частота появи відмови v тут розглядається як оцінка її ймовірності P_f [10]:

$$v = \frac{k}{m} \approx P_f, \quad (4)$$

де k – число відмов; m – загальне число випробувань.

Метод є надзвичайно простий і універсальний, проте він потребує обов'язкового аналізу наближення оцінки v до шуканої ймовірності P_f , яка в свою чергу залежить від числа випробувань m .

Найбільш поширені методи такого аналізу базуються на таких граничних теоремах:

- Бернуллі, яка стверджує, що при $m \rightarrow \infty$, $v \rightarrow P_f$, а також має асимптотично нормальне розподілення;
- Хінчіна, яка стверджує, що середні частоти v при $m \rightarrow \infty$ прагнуть до її математичного очікування;
- Ліндсберга-Леві, яка стверджує, що середні значення частоти v мають асимптотично нормальне розподілення.

Детальний алгоритм визначення частоти відмов і побудови гістограми функції резерву міцності наведений у вже згаданій монографії В.Д. Райзера [10].

Загалом, метод статистичних випробувань з достатньою точністю дозволяє визначити ймовірність відмови залізобетонних конструкцій.

Перевагою даного методу є його простота і універсальність. Недоліком ж є те, що при оцінці малих ймовірностей P_f із задовільною достовірністю може знадобитися значне число випробувань.

- *Метод Монте-Карло* та його різноманітні модифікації. Є найбільш ефективним і широко застосовуваним (дає менший розкид оцінки ймовірності відмови роботи конструкції в порівнянні з попередніми методами), проте, й найбільш складним, методом статистичного моделювання. Він заснований на одержанні великої кількості реалізацій стохастичного (випадкового) процесу, який формується у такий спосіб, щоб його ймовірнісні характеристики збігалися з аналогічними величинами задачі, яку потрібно розв'язати (яскравий приклад використання методу Монте-Карло для оцінки надійності конструкцій – робота Мельчерса і Ахаммеда [24]).

В даному випадку інтеграл P_f можна записати наступним чином [10]:

$$\bar{P}_f \approx \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m F_R Q_i \quad (5)$$

де m – число випробувань.

На кожному випробуванні по щільності ймовірностей величини Q моделюється її реалізація Q_i й визначається значення функції розподілення величини R при аргументі Q . Потім визначається середнє з цих значень по усім проведеним випробуванням.

Перевагою даного методу є його простота і підвищена ефективність в порівнянні з методом оцінки ймовірності по частоті (менша потреба в часі на автоматизований розрахунок).

Недоліком методу є те, що в багатомірному випадку одна із функцій розподілення величин R і Q повинна бути наперед задана. Крім того, аналіз точності і достовірності результату тут необхідно виконувати з використанням асимптотичних розподілень отриманої оцінки, а не шуканої ймовірності як у попередньому методі. Для цього використовуються більш складні і менш ефективні відомі процедури.

Відомо також декілька модифікацій методу Монте-Карло [10], в яких ефективність методу зростає за рахунок зменшення дисперсії оцінки.

Висновки. В даній публікації зібрано й проаналізовано основні методи й підходи до оцінки надійності залізобетонних конструкцій – від двадцятих років минулого століття й до сьогодні. Така оцінка виражається, зазвичай, в ймовірнісних показниках безвідмовної роботи.

Розвиток теорії надійності не зупиняється: досліджується надійність сучасних видів конструкцій будівель та споруд (в тому числі і при різноманітних впливах на них), впроваджуються все нові й нові методи її оцінки і т.д.

Станом на даний час виконано дуже багато робіт по дослідженню надійності залізобетонних конструкцій, а також загальних методів й принципів забезпечення надійності будівель і споруд [17, 18, 19, 20, 21], проте ефективних методів її оцінки для підсилених залізобетонних конструкцій не було розроблено як в Україні, так і за кордоном. Саме тому, метою та головною задачею авторів у подальшій науковій роботі буде знаходження та впровадження оптимального методу оцінки надійності підсилених різноманітними способами залізобетонних конструкцій, базованого на ймовірнісному розрахунку і, відповідно, знаходженні показника ймовірності безвідмовної роботи таких конструкцій.

1. ДСТУ – Н Б EN 1990:2008 Єврокод. Основи проектування конструкцій (EN 1990:2002, IDT). МінрегіонУкраїни, К.:2008. 2. EN 1990:2002 Eurocode- Basis of structural design. European Committee for Standardization. Brussels: 2003. 3. ISO

2394:1998. General principles on reliability for structures. 2nd ed. Geneve, Switzerland: ISO, 1998. **4.** ДБН В.1.2-14-2009 Загальні принципи забезпечення надійності та безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. –Мінрегіонбуд України, К.:2009. **5.** Mayer M. Die Sicherheit der Bauwerke und ihre Berechnung nach Granz kräften statt nach zulässigen Spannungen. Springer Verlag, Berlin, 1926. **6.** Хоциалов Н.Ф. Запасы прочности. Строительная промышленность, №10. – М.: 1929. **7.** Стрелецкий Н.С. Основы статистического учета коэффициента запаса прочности сооружений. М. Стройиздат, М.: 1947. **8.** Ржаницын А.Р. Применение статистических методов в расчетах сооружений на прочность и безопасность. – Строительная промышленность. № 6. – М.: 1952. **9.** Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. – Стройиздат М.: 1971. **10.** Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании. – М.: изд-во АСВ, 1998. **11.** Cornell, C.A. A Probability Based Structural Code, ACI-Journal No. 12, Vol. 66, 1969, p.p. 974-985. **12.** Ржаницын А.Р. Строительная механика. – М.:Высш. школа, 1982. **13.** Freudenthal F.M. Safety, reliability and structural design. J. of Structural Div. Proc. ASCE, 87 ST3, 1961. **14.** Basler, E. Untersuchungen über den Sicherheitsbegriff von Bauwerken, Schweitzer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik, 4, 1961. **15.** Thoft-Christensen, P. and Baker, M.J., Structural Reliability Theory and Its Applications. Springer Verlag: 1982. **16.** Ditlevsen O., Madsen H.O. Structural Reliability Methods. – John &Wiley Sons Ltd, Chichester, 1996. **17.** Faber M.H. Basics of Structural Reliability.Swiss Federal Institute of Technology ETH, Zürich, Switzerland, 2002. **18.** Low H.Y, Hao H. Reliability analysis of reinforced concrete slabs under explosive loading / STRUCTURAL SAFETY. – Singapore, 2001. – p. 157-178. **19.** Zhang S.F, Zhang C.H, Chen X. Effect of statistical correlation between ply mechanical properties on reliability of fibre reinforced plastic composite structures / JOURNAL OF COMPOSITE MATERIALS. – London, 2015. – p. 2935-2945. **20.** Duprat F. Reliability of RC beams under chloride-ingress / CONSTRUCTION AND BUILDING MATERIALS. – Kidlington, 2007.–p. 1605-1616. **21.** Пічугін С.Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий / Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2011. – 455 с. **22.** Лантух-Лященко А.І. Концепция надежности в Еврокоде / Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика, №6. – Київ, 2014. – С. 79-88. **23.** Gulvanessian H., Holicky M. Eurocodes: using reliability analysis to combine action effects / PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS-STRUCTURES AND BUILDINGS. – London, 2005. – p. 243-252. **24.** Melchers R.E., Ahammed M. A fast approximate method for parameter sensitivity estimation in Monte Carlo structural reliability / COMPUTERS & STRUCTURES. – Kidlington, 2004. – p. 55-61.