

УДК 624.014  
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2023.4\(493\).5](https://doi.org/10.15589/znp2023.4(493).5)

## PROPOSALS FOR DETERMINING THE PROBABILITY OF FACILITY FAILURE TAKING INTO ACCOUNT THE TIME PARAMETER

### ПРОПОЗИЦІЇ ВИЗНАЧЕННЯ ІМОВІРНОСТІ ВІДМОВИ ОБ'ЄКТУ З УРАХУВАННЯМ ЧАСОВОГО ПАРАМЕТРА

**Kseniia V. Chichulina**

Chichulinak@ukr.net

ORCID: 0000-0001-7448-0180

**Oleksa I. Shchur-Dunets**

oleksa2002o@gmail.com

ORCID: 0000-0001-9509-8212

**Omelian I. Shchur-Dunets**

omelian2004o@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6546-9606

**К. В. Чичуліна,**

канд. техн. наук, доцент

**О. І. Щур-Дунець,**

студент

**О. І. Щур-Дунець,**

студент

*National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava*

*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», м. Полтава*

**Abstract.** At the current stage of the development of probabilistic methods for calculating construction objects, there is a need, when determining their reliability, to take into account various factors that affect their operation (taking into account the frequency of occurrence of limit loads, the behavior of structures over time, taking into account the degree of loading). For many years, scientists from different countries have been engaged in research related to the theory of reliability of building structures. The main reason for its appearance is considered to be the need for practice, which is a natural and historically necessary process. Clarifying the frequency characteristics and degree of load of construction objects is an urgent problem that needs to be solved when obtaining their probabilistic characteristics. There is a need to determine the limits of application of the formula for determining the probability of object failure, taking into account the time parameter. On the basis of known formulas for obtaining the probability of failure taking into account time, the main goal is to determine the limit of the loading level of building structures and take into account the parameters of the effective frequency of random processes of loading building elements. The measure of reliability is the probability of failure-free operation for a given service life. The probabilistic approach is due to the fact that all geometric and deformation characteristics of structures, strength indicators, as well as all loads and influences on them are random values or random processes. The reliability of the structural element is characterized by the term "safety characteristic". The reliability method describes the probability of failure. In general, the article deals with the issue of determining the limit of permissible ratios of load and strength to obtain the probability of failure, taking into account the object's operating time parameter. As a result of the study, it was found that the zone of permissible states, taking into account the working time, is limited by the ratio of mathematical expectations of load and strength of 0.4 and less, as well as the safety characteristic of 4.6 and more.

**Key words:** probability of refuse; time parameter; description of safety; reliability.

**Анотація.** На сучасному етапі розвитку імовірнісних методів розрахунку будівельних об'єктів існує потреба, при визначенні їх надійності, врахування різних чинників, що впливають на їх роботу (врахування частоти виникнення граничних навантажень, поведінки конструкцій у часі з урахуванням ступеню завантаження). Протягом багатьох років науковці різних країн займаються дослідженнями, пов'язаними з теорією надійності будівельних конструкцій. Головною причиною її появи вважають потребу в практиці, що являє собою закономірний та історично необхідний процес. Уточнення частотних характеристик та ступеню навантаження будівельних об'єктів є актуальною проблемою, яка потребує вирішення при отриманні їх імовірнісних характеристик. існує необхідність визначення меж застосування формули визначення імовірності відмови об'єкту з урахуванням параметра часу. На підставі відомих формул для отримання імовірності відмови з урахуванням часу головною ціллю є визначення межі рівня завантаження будівельних конструкцій та врахування параметрів ефективної частоти випадкових процесів завантаження елементів будівлі. Мірою надійності виступає імовірність безвід-

мовної роботи за заданий строк служби. Імовірнісний підхід обумовлений тим, що усі геометричні й деформаційні характеристики конструкцій, показники міцності, а також усі навантаження та впливи на неї виявляються випадковими величинами або випадковими процесами. Надійність елементу конструкції характеризується терміном «характеристика безпеки». Метод визначення надійності, описує імовірність відмови. Загалом в статті вирішується питання щодо визначення межі допустимих співвідношень навантаження і міцності для отримання імовірності відмови з урахуванням параметра часу роботи об'єкта. В результаті дослідження було виявлено, що зона допустимих станів з урахуванням часу роботи обмежується співвідношенням математичних очікувань навантаження та міцності 0,4 і менше, а також характеристикою безпеки 4,6 і більше.

**Ключові слова:** ймовірність відмови; часовий параметр; характеристика безпеки; надійність.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

На сучасному етапі розвитку імовірнісних методів розрахунку будівельних об'єктів існує потреба, при визначенні їх надійності, врахування різних чинників, що впливають на їх роботу. А саме, врахування частоти виникнення граничних навантажень, поведінки конструкцій у часі з урахуванням ступеню завантаження.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Міжнародні стандарти [1, 2] акцентують, що обчислена ймовірність відмови повинна бути розглянута як абстрактний параметр, який використовується для розробки узгоджених принципів та стандартів, як на національному, так і міжнародному рівнях. Наведені в рекомендаційному додатку В [3], показники надійності в Україні не мають прив'язки до інших нормативних документів. Вимоги до методу розрахунку граничних станів не вказують конкретних значень  $R_{ex}$  чи  $R_{ex}$ , проте ця залежність враховується за допомогою коефіцієнтів чутливості  $\alpha_E$  та  $\alpha_R$ , на відміну від [2]. Згідно з [2], цільові рівні надійності його проектування повинні бути встановлені на національному рівні, ці вимоги враховують соціально-економічний потенціал суспільства та готовність інвестувати у безпеку життєдіяльності. Цей метод оцінки може вплинути на ваш індекс якості життя LQI (англ. Life Quality Index). Оновлена версія міжнародного стандарту [4] демонструє, як за допомогою концепції LQI можна описати наміри суспільства інвестувати в покращення здоров'я та безпеки людей у різних секторах. Вимоги, які діють в Україні щодо нормування доцільних рівнів надійності та значень  $R_{ex}$  і  $R_{ex}$  [3], очевидно, необхідно перевірити та надати обґрунтування, про це свідчить нещодавно прийнятий нормативний документ [5]. Але у ньому, так як і в Єврокодах, відсутні стандарти для оцінки конструкцій, що знаходяться в експлуатації. Очікується, що в майбутніх версіях Єврокодів, які будуть розроблені, буде враховано питання оцінки та перевірки існуючих конструкцій. З метою уніфікації правил оцінки існуючих конструкцій з основами та вимогами Єврокодів можна використовувати міжнародний стандарт [6].

Зокрема, в роботі [7] досліджено підхід фізичного синтезу до глобального аналізу надійності

фактичних інженерних конструкцій. В дослідженні [8] проведено серію оглядів розвитку та досягнень щодо відповідних явищ і передових досліджень, пов'язаних з оцінкою втомного руйнування, яке часто виникає в механічних конструкціях, особливо в компонентах, які отримують пряме циклічне навантаження, наприклад, морські споруди, автомобілі, критична інфраструктура, резервуари, турбіни, ядерні реактори та елементи, які працюють в екстремальних умовах. Також авторами було запропоновано методологію прогнозування появи тріщин у корозійних конструкціях на основі теорії фізики руйнування [9]. Результати досліджень у галузі надійності будівельних конструкцій наведено у працях Є. А. Єгорова, Р.І. Кінаша, А.В. Перельмутера, С.Ф. Пічугіна, В.Г. Пошивача, М.В. Савицького, О.В. Семко, та інших. Наукові роботи С.Ф. Пічугіна [10] присвячені розробці методів розрахунку металевих конструкцій за критерієм несучої здатності. Розвиток існуючих основ теорії надійності та імовірнісного розрахунку конкретних конструкцій, врахування особливостей різноманітних впливів на ці конструкції, пов'язані з такими іменами як С.Ф. Пічугін, А.В. Перельмутер, В.А. Пашинський та інші [11,12].

### ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Уточнення частотних характеристик та ступеню навантаження будівельних об'єктів є актуальною проблемою, яка потребує вирішення при отриманні їх імовірнісних характеристик. Загалом, існує необхідність визначення меж застосування формули визначення імовірності відмови об'єкту з урахуванням параметра часу.

### МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

На підставі відомих формул для отримання імовірності відмови з урахуванням часу головною ціллю є визначення межі рівня завантаження будівельних конструкцій та врахування параметрів ефективної частоти випадкових процесів завантаження елементів будівлі.

### МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

У статті застосовуються методики теоретичного узагальнення, системного аналізу, акумуляції

існуючого досвіду оцінки надійності конструкцій. Об'єктом роботи є пошук меж застосування формули визначення імовірності відмови об'єкту з урахуванням параметра часу.

**ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ**

В проведеному дослідженні мірою надійності виступає імовірність безвідмовної роботи за заданий строк служби. Імовірнісний підхід обумовлений тим, що всі геометричні й деформаційні характеристики конструкцій, показники міцності, а також усі навантаження та впливи на неї виявляються випадковими величинами або випадковими процесами.

Надійність елементу конструкції характеризується терміном «характеристика безпеки». Метод визначення надійності, описує імовірність відмови. Якщо припустити, що криві розподілу навантажень і несучої здатності підпорядковуються нормальному закону (рис. 1, а), то загальну умову безвідмовної роботи можна записати в такому вигляді:

$$Y = R - S \geq 0, \tag{1}$$

де  $R$  – розрахунковий параметр несучої здатності;  $S$  – розрахунковий параметр навантаження.

Треба зауважити, що при нормальних розподіленнях і розподілення їх різниці буде нормальним.

Метод визначення надійності (імовірності того, що резерв міцності буде додатнім) включає наступні кроки:

- першими визначаються математичні очікування та стандарти випадкових величин зусиль  $(\bar{S}, \hat{S})$ , що виникають у елементі конструкції;
- наступним етапом знаходимо відповідні характеристики несучої здатності  $(\bar{R}, \hat{R})$ ;
- визначається резерв міцності  $(Y)$ ;
- знаходимо математичне очікування  $(\bar{Y})$  та стандарт резерву міцності  $(\hat{Y})$ :

$$\bar{Y} = \bar{R} - \bar{S}, \tag{2}$$

$$\hat{Y} = \sqrt{\hat{R}^2 + \hat{S}^2}; \tag{3}$$

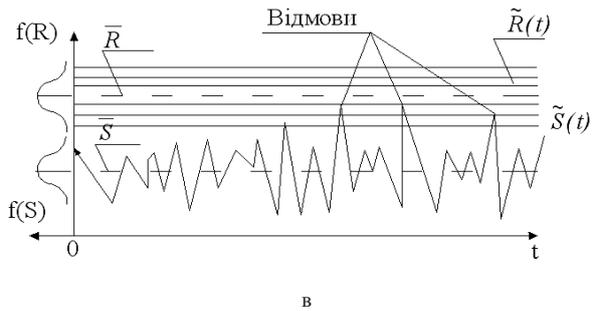
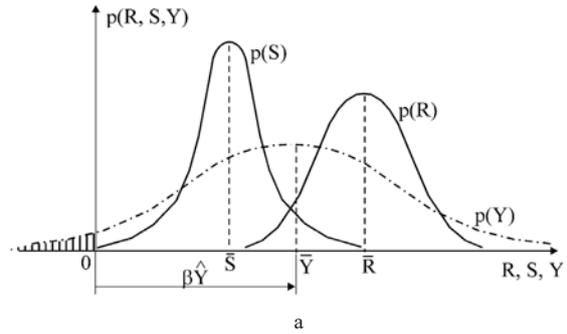
– визначимо кількість стандартів, на величину яких, середнє значення розподілу  $Y$  відрізняється від значення  $Y = 0$ , тобто знаходимо «характеристику безпеки»:

$$\beta = \frac{\bar{Y}}{\hat{Y}} = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{\hat{R}^2 + \hat{S}^2}}; \tag{4}$$

– останнім кроком є визначення імовірності відмови при нормальному розподілі несучої здатності та навантажень:

$$Q = \int_{-\infty}^0 p(Y)dY = 0,5 - \Phi(\beta_y), \tag{5}$$

де  $p(Y)$  – щільність розподілення резерву міцності;  $\Phi(\beta_y)$  – функція Лапласа.



**Рис. 1.** Визначення ймовірності відмови будівельних конструкцій: а – класичний підхід; б – оцінювання надійності у техніці випадкових величин; в – відмови елемента при навантаженні у формі випадкового процесу

Загальна умова безвідмовної роботи, але вже з урахуванням фактору часу виглядає таким чином:

$$\tilde{Y}(t) = \tilde{R}(t) - \tilde{S}(t) > 0, \tag{6}$$

де  $\tilde{R}(t)$  – несуча здатність конструкції, яка відповідає граничному стану за міцністю;

$\tilde{S}(t)$  – найбільше значення зусилля (напруження) в конструкції, яке визначається через зовнішнє навантаження;

$\tilde{Y}(t)$  – резерв міцності (резерв несучої здатності).

Новий етап в теорії надійності дає більш точніше формулювання поняття міри надійності в застосуванні до будівельних конструкцій. В такому підході знаходження надійності розподіли є довільними. Випадкові процеси руйнування конструкції обумовлюють виникнення змін її внутрішніх властивостей, які погіршуються з часом.

В загальному вигляді функцію резерву несучої здатності, яка залежить в першу чергу від часового параметру можна представити наступним чином:

$$\tilde{Y} = Y(t; \tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_n). \quad (7)$$

Якщо розглядати визначення надійності в техніці випадкових величин при умові безвідмовності елемента (6), можна спочатку розглядати ці параметри без обліку часу. Таке уявлення доречно при дії навантажень, мало змінних у часі (постійних і деяких технологічних) або тих, що мають одноразовий характер.

Зону допустимих станів складає множина, для кожного елемента котрої виконується наведена нерівність:

$$\Omega = \{Y : y = (r - s) \geq 0\}.$$

У координатах  $R=S$  область  $\Omega$  має трикутну форму та розташовується вище прямої  $R=S$  (рис. 1, б).

В даному випадку імовірність безвідмовної роботи дорівнює:

$$P = \int_{\Omega} f(Y) dY. \quad (8)$$

В [4] відмовою елемента вважається перехід резерву несучої здатності до від'ємної області. Необхідно відмітити, що кількість викидів випадкового процесу  $\tilde{Y}(t)$  до від'ємної області дає оцінку ймовірності відмови (рис.1, в), яку було представлено в такому вигляді:

$$Q(t) = \frac{\omega_g \cdot f_y(\beta) \cdot t}{\beta_{\omega} \cdot \sqrt{2\pi}}, \quad (9)$$

де  $\omega_g$  – ефективна частота розподілення ординати випадкового процесу  $\tilde{Y}(t)$ ;

$f_y(\beta)$  – щільність розподілення ординати випадкового процесу  $\tilde{Y}(t)$ ;

$t$  – наробіток елемента;

$\beta_{\omega}$  – коефіцієнт широкосмуговості випадкового процесу  $\tilde{Y}(t)$ .

Коефіцієнт широкосмуговості випадкового процесу  $\tilde{Y}(t)$ , який враховує спектр частот реальних навантажень можна записати у наступному вигляді:

$$\beta_{\omega} = \frac{\beta_i \sqrt{1+k^2}}{k}, \quad (10)$$

де  $k = \frac{\hat{S}}{\hat{R}}$  – співвідношення стандартів;

$\beta_i$  – коефіцієнт широкосмуговості випадкового процесу навантаження.

У випадку, коли навантаження та міцність відповідають нормальному закону розподілення, ймовірність відмови визначається за спрощеною формулою, яка набуває такого вигляду:

$$Q(t) = \omega_g \cdot t \frac{\exp(-0,5\beta^2)}{2\pi \cdot \beta_{\omega}}. \quad (11)$$

Для того, щоб визначити зону допустимих станів з урахуванням часу роботи розраховуємо параметри, що характеризують надійність об'єкту.

Ефективна частота для нормального стаціонарного випадкового процесу:

–  $\omega_k = 71$  один/год. для режимів роботи крана 4К-6К (взьмемо цей випадок як найпоширеніший);

–  $\bar{\sigma} = 1$ ;  $V_{\bar{\sigma}} = 0,1$  – числові характеристики межі міцності сталі (межа міцності задається відносно 1).

–  $\bar{q} = \bar{\sigma} \cdot a$ ;  $V_q = 0,2$  – числові характеристики навантаження.

–  $a$  – відношення математичного очікування навантаження до математичного очікування міцності (величина задається).

Наступним кроком визначимо характеристики резерву несучої здатності:

– математичне очікування несучої здатності  $\bar{R} = 1$ ;

– стандарт несучої здатності  $\hat{R} = 0,1 \cdot 1 = 0,1$ ;

– математичне очікування навантаження  $\bar{S} = \bar{R} \cdot a$ ;

– стандарт навантаження  $\hat{S} = 0,2 \cdot a$ ;

– математичне очікування резерву міцності  $\bar{Y} = 1 - a$ ;

– стандарт резерву міцності  $\hat{Y} = \sqrt{0,1^2 + (0,2a)^2}$ ;

– характеристика безпеки  $\beta = \frac{1-a}{\sqrt{0,1^2 + (0,2a)^2}}$ .

Для того, щоб розрахувати імовірність відмови з урахуванням параметру часу, визначимо:

а) ефективну частоту ВП (випадкового процесу) резерву несучої здатності  $\hat{Y}(t)$ :

$$\omega_g = \frac{\omega_k \cdot \hat{S}}{\hat{Y}} = \frac{71 \cdot 0,2a}{\sqrt{0,1^2 + (0,2a)^2}} = \frac{14,2a}{\sqrt{0,1^2 + (0,2a)^2}} \text{ (один./год.)};$$

б) коефіцієнт широкосмуговості (10):

$$\beta_{\omega} = \frac{3 \cdot \sqrt{1+4a^2}}{2a}, \text{ де } k = \frac{\hat{S}}{\hat{R}} = \frac{0,2a}{0,1} = 2a;$$

3 – коефіцієнт широкосмуговості навантаження.

в) імовірність відмови за термін роботи  $t$  (задаєть від 0 до 50 років) (9):

$$Q(t) = \frac{14,2a}{\sqrt{0,1^2 + (0,2a)^2}} \cdot e^{\left[-0,5 \left(\frac{1-a}{\sqrt{0,1^2 + (0,2a)^2}}\right)^2\right]} \cdot (\text{роки}) \cdot 8 \cdot 3 \cdot 365$$

$$2 \cdot 3 \cdot 14 \cdot \frac{3 \cdot \sqrt{1+4a^2}}{2a}$$

Якщо проаналізувати отримані чисельні значення ймовірностей відмови з урахуванням параметру часу (рис. 2) та (табл. 1) можна відмітити, що зона допустимих станів з урахуванням часу роботи обмежується співвідношенням математичних очікувань навантаження і міцності 0,4 і менше та характеристикою безпеки 4,6 і більше. Врахування часу для будівельних конструкцій з великим терміном експлуатації обмежує значення характеристик безпеки за нижньою межею біля 5 років (рис. 2).

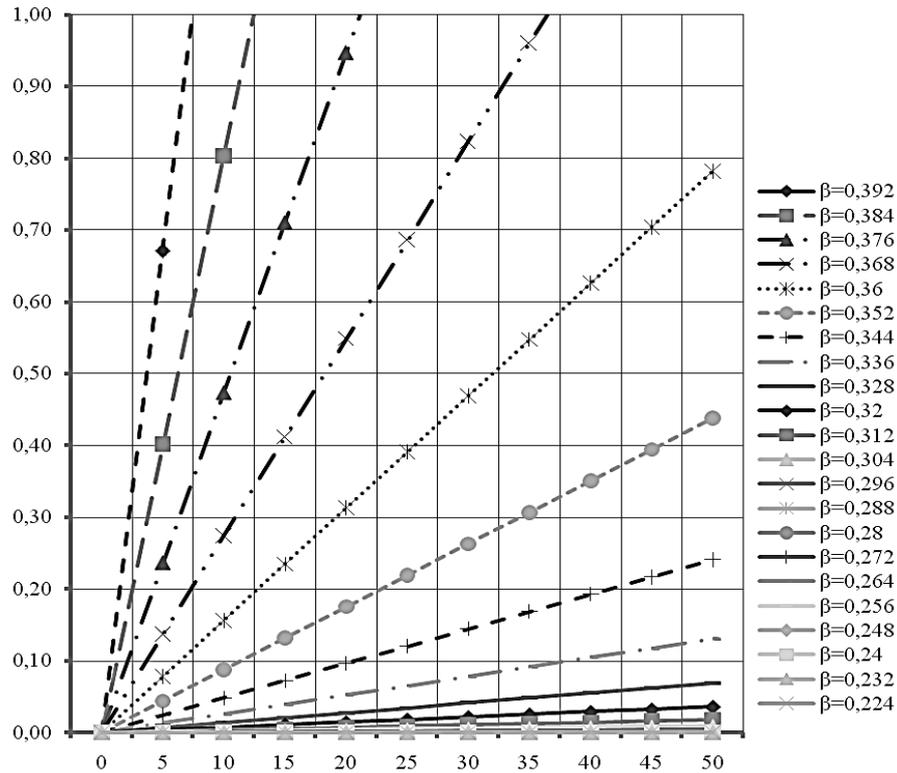


Рис. 2. Графік залежностей імовірності відмови від років експлуатації конструкції

Таблиця 1. Визначення імовірнісних характеристик об'єкта з урахуванням параметру часу

a	β	Роки експлуатації											
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
0,4	4,69	0	1,102E+00	2,204E+00	3,306E+00	4,408E+00	5,510E+00	6,613E+00	7,715E+00	8,817E+00	9,919E+00	1,102E+01	
0,392	4,78	0	6,709E-01	1,342E+00	2,013E+00	2,684E+00	3,354E+00	4,025E+00	4,696E+00	5,367E+00	6,038E+00	6,709E+00	
0,384	4,89	0	4,019E-01	8,037E-01	1,206E+00	1,607E+00	2,009E+00	2,411E+00	2,813E+00	3,215E+00	3,617E+00	4,019E+00	
0,376	4,99	0	2,368E-01	4,736E-01	7,104E-01	9,472E-01	1,184E+00	1,421E+00	1,658E+00	1,894E+00	2,131E+00	2,368E+00	
0,368	5,09	0	1,372E-01	2,744E-01	4,117E-01	5,489E-01	6,861E-01	8,233E-01	9,605E-01	1,098E+00	1,235E+00	1,372E+00	
0,36	5,19	0	7,818E-02	1,564E-01	2,345E-01	3,127E-01	3,909E-01	4,691E-01	5,473E-01	6,254E-01	7,036E-01	7,818E-01	
0,352	5,30	0	4,378E-02	8,757E-02	1,313E-01	1,751E-01	2,189E-01	2,627E-01	3,065E-01	3,503E-01	3,940E-01	4,378E-01	
0,344	5,40	0	2,410E-02	4,819E-02	7,229E-02	9,638E-02	1,205E-01	1,446E-01	1,687E-01	1,928E-01	2,169E-01	2,410E-01	
0,336	5,51	0	1,303E-02	2,606E-02	3,909E-02	5,212E-02	6,515E-02	7,817E-02	9,120E-02	1,042E-01	1,173E-01	1,303E-01	
0,328	5,62	0	6,921E-03	1,384E-02	2,076E-02	2,768E-02	3,460E-02	4,152E-02	4,844E-02	5,537E-02	6,229E-02	6,921E-02	
0,32	5,73	0	3,611E-03	7,221E-03	1,083E-02	1,444E-02	1,805E-02	2,166E-02	2,527E-02	2,888E-02	3,249E-02	3,611E-02	
0,312	5,84	0	1,850E-03	3,700E-03	5,549E-03	7,399E-03	9,249E-03	1,110E-02	1,295E-02	1,480E-02	1,665E-02	1,850E-02	
0,304	5,95	0	9,306E-04	1,861E-03	2,792E-03	3,722E-03	4,653E-03	5,584E-03	6,514E-03	7,445E-03	8,375E-03	9,306E-03	
0,296	6,06	0	4,597E-04	9,194E-04	1,379E-03	1,839E-03	2,298E-03	2,758E-03	3,218E-03	3,677E-03	4,137E-03	4,597E-03	
0,288	6,17	0	2,229E-04	4,459E-04	6,688E-04	8,917E-04	1,115E-03	1,338E-03	1,561E-03	1,783E-03	2,006E-03	2,229E-03	
0,28	6,28	0	1,062E-04	2,123E-04	3,185E-04	4,246E-04	5,308E-04	6,369E-04	7,431E-04	8,492E-04	9,554E-04	1,062E-03	
0,272	6,39	0	4,963E-05	9,925E-05	1,489E-04	1,985E-04	2,481E-04	2,978E-04	3,474E-04	3,970E-04	4,466E-04	4,963E-04	
0,264	6,51	0	2,278E-05	4,556E-05	6,835E-05	9,113E-05	1,139E-04	1,367E-04	1,595E-04	1,823E-04	2,050E-04	2,278E-04	
0,256	6,62	0	1,027E-05	2,054E-05	3,081E-05	4,108E-05	5,135E-05	6,162E-05	7,189E-05	8,216E-05	9,243E-05	1,027E-04	
0,248	6,74	0	4,547E-06	9,094E-06	1,364E-05	1,819E-05	2,274E-05	2,728E-05	3,183E-05	3,638E-05	4,092E-05	4,547E-05	
0,24	6,85	0	1,978E-06	3,956E-06	5,934E-06	7,912E-06	9,890E-06	1,187E-05	1,385E-05	1,582E-05	1,780E-05	1,978E-05	
0,232	6,97	0	8,454E-07	1,691E-06	2,536E-06	3,381E-06	4,227E-06	5,072E-06	5,918E-06	6,763E-06	7,608E-06	8,454E-06	
0,224	7,08	0	3,551E-07	7,102E-07	1,065E-06	1,420E-06	1,775E-06	2,131E-06	2,486E-06	2,841E-06	3,196E-06	3,551E-06	

**ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ**

Отже, спираючись на результати проведеного дослідження можна стверджувати що дійсно вирішення проблеми уточнення частотних характеристик та ступеню навантаження будівельних об'єктів є безперечно важливою проблематикою. Розрахунок меж застосування формули визначення імовірності відмови об'єкту з урахуванням параметра часу набуває все більшої доцільності в сучасних умовах. Авторами були

визначенні межі рівня завантаження будівельних конструкцій та враховані параметри ефективної частоти випадкових процесів завантаження елементів будівлі.

**ВИСНОВКИ**

В результаті проведеного дослідження було виявлено, що зона допустимих станів з урахуванням часу роботи обмежується співвідношенням математичних очікувань навантаження та міцності 0,4 і менше, а також характеристикою безпеки 4,6 і більше.

**REFERENCES**

- [1] ISO 2394:1998. (1998) General principles on reliability of structures. International Organization for Standardization. ISO, Geneva, Switzerland. 73 p.
- [2] EN 1990. (2002) Basis of Structural Design – Brussels: Eurocode European Committee for Standardization. 89 p.
- [3] DBN V.1.2-14:2018. (2018) Systema zabezpechennia nadiinosti ta bezpeky budivelnikh ob'ektiv. Zahalni pryntsy. [A system for ensuring the reliability and safety of construction objects. General principles]. K.: Ministerstvo rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy. 67 p.
- [4] ISO 2394: 2015. (2015) General principles on reliability of structures. ISO, Geneva, Switzerland. 111 p.
- [5] DBN V.1.2-6:2022. (2022) Osnovni vymohy do budivel i sporud. Mekhanichniy opir ta stiiikist. [Basic requirements for buildings and structures. Mechanical resistance and stability]. K.: Ministerstvo rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy. 56 p.
- [6] ISO 13822. (2010) Basis for design of structures –Assessment of existing structures. ISO, Geneva, Switzerland. 50 p.
- [7] Zhou, H., Li, J. (2020) Physical synthesis method for global reliability analysis of engineering structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 140. 106652. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106652>
- [8] Fajri, A. et al. [2021] Fatigue Analysis of Engineering Structures: State of Development and Achievement. *Procedia Structural Integrity*. Vol. 33. pp. 19–26. URL: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.10.004>
- [9] Mulenga, K. et al. (2022) Time-dependent reliability assessment of corroded metal structures based on Physics of Failure (PoF): with a case study of cast iron pipe. *Engineering Failure Analysis*. 106710. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106710>
- [10] Pichuhin, S., Perelmuter, A. (2023) Deiaki osoblyvosti rozrakhunku nadiinosti poskodzhenykh stalevykh konstrukttsii. [Some features of calculating the reliability of damaged steel structures]. *Nauka ta budivnytstvo*. URL: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2023-3>.
- [11] Pichugin, S. (2019) Scientific School «Reliability of Building structures»: new results and perspectives. *Zb. nauk. Prats (haluz. mashynobuduvannia, budivnytstvo)*. no. 2 (53). Poltava: PolNTU, 2019. pp. 5–12. URL: <https://doi.org/10.26906/znp.2019.53.1880>.
- [12] Pichugin, S. (2020) Statystychni kharakterystyky mitsnosti materialiv budivelnikh konstrukttsii. [Statistical characteristics of strength of building construction materials]. *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainського institutu stalevykh konstrukttsii imeni V.M.Shymanovskoho*. K.: Vyd-vo «Stal», 2020. no. 25-26. pp. 58–80.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

- [1] ISO 2394:1998. (1998) General principles on reliability of structures. International Organization for Standardization. ISO, Geneva, Switzerland. 73 p.
- [2] EN 1990. (2002) Basis of Structural Design – Brussels: Eurocode European Committee for Standardization. 89 p.
- [3] ДБН В.1.2-14:2018. (2018) Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи. К.: Міністерство розвитку громад та територій України. 67 с.
- [4] ISO 2394: 2015. (2015) General principles on reliability of structures. ISO, Geneva, Switzerland. 111 p.
- [5] ДБН В.1.2-6:2022. (2022) Основні вимоги до будівель і споруд. Механічний опір та стійкість. К.: Міністерство розвитку громад та територій України. 56 с.
- [6] ISO 13822. (2010) Basis for design of structures –Assessment of existing structures. ISO, Geneva, Switzerland. 50 p.
- [7] Zhou, H., Li, J. (2020) Physical synthesis method for global reliability analysis of engineering structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*. Vol. 140. P. 106652. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.106652>
- [8] Fajri, A. et al. [2021] Fatigue Analysis of Engineering Structures: State of Development and Achievement. *Procedia Structural Integrity*. Vol. 33. P. 19–26. URL: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.10.004>
- [9] Mulenga, K. et al. (2022) Time-dependent reliability assessment of corroded metal structures based on Physics of Failure (PoF): with a case study of cast iron pipe. *Engineering Failure Analysis*. P. 106710. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106710>
- [10] Пічугін, С., Перельмутер, А. (2023) Деякі особливості розрахунку надійності пошкоджених сталевих конструкцій. *Наука та будівництво*. URL: <https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2023-3>.

- [11] Pichugin, S. (2019) Scientific School «Reliability of Building structures»: new results and perspectives. *Зб. наук. Праць (галуз. машинобудування, будівництво)*. Вип. 2 (53). Полтава: ПолтНТУ, 2019. С.5–12. URL: <https://doi.org/10.26906/znr.2019.53.1880>.
- [12] Пічугін, С.Ф. (2020) Статистичні характеристики міцності матеріалів будівельних конструкцій. *Збірник наукових праць Українського інституту сталевих конструкцій імені В.М.Шимановського*. К.: Вид-во «Сталь», 2020. Вип. 25-26. С. 58–80.

---

© Чичуліна К. В., Щур-Дунець О.І., Щур-Дунець О.І.  
Дата надходження статті до редакції: 09.10.2023  
Дата затвердження статті до друку: 03.11.2023