

УДК 624.012.45

**РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПРОГОНОВИХ БУДОВ**

Здобувач Р. Б. Каплін

**CALCULATION OF RELIABILITY OF REINFORCED CONCRETE FLIGHT STRUCTURES**

Postgraduate student R. Kaplin

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.194.2020.230033>

***Анотація.** У статті розглянуто нову конструкцію сталезалізобетонної прогонової будови з використанням перфорованих металевих елементів та ефективної залізобетонної плити проїзної частини. На її базі сформовано розрахункову модель у скінченноелементній формі, побудованій в програмному комплексі SCAD-Office. В результаті розрахунків отримано компоненти напружено-деформованого стану (НДС) споруди. На основі отриманих результатів проведено розрахунок надійності споруди під впливом сучасних нормативних навантажень.*

***Ключові слова:** надійність, характеристика безпеки, коефіцієнти варіації, сталезалізобетон, прогонова будова, перфорована балка.*

***Abstract.** A large number of bridges are operated on the roads of Ukraine. The increase in the intensity and speed of traffic leads to qualitative changes in the operating conditions of bridge*

structures, which is characterized by a sharp increase in the number of cycles under load of bridge elements, and to the development of damage in them. For trouble-free operation and efficient use of bridge structures it is very important to have reliable estimates of the actual load capacity and resource, taking into account the loads, material quality, nature of the structure.

The solution of the problem in this statement is possible only on the basis of the theory of reliability. However, its application to specific assessments of durability and reliability of structures is associated with the solution of a set of issues: the identification of patterns of change of various parameters, the accumulation of reliable and easy to calculate statistics on loads and mechanical characteristics of materials, etc. It is necessary to know that the strength of the material (sample) of the structural element and the structure as a whole are completely different things. The article considers a new design of reinforced concrete girder structure, using perforated metal elements and an effective reinforced concrete slab of the carriageway. On its basis, a computational model in the form of a finite-element model built in the SCAD-Office software package is formed. As a result of calculations, the components of the stress-strain state of the structure are obtained. Based on the obtained results, the reliability of the structure was calculated under the influence of modern regulatory loads.

**Keywords:** reliability, safety characteristics, coefficients of variation, reinforced concrete, girder structure, perforated beam.

**Вступ.** Як відомо, надійність є комплексною властивістю, яка включає безвідмовність, довговічність і ремонтпридатність. Показник надійності – кількісна характеристика однієї або декількох властивостей, що складають надійність конструкції. До таких властивостей належать показники міцності при різних видах руйнування, стійкості, прогинів, кутів повороту, амплітуд коливань, виникнення та розкриття тріщин в залізобетоні, ступені корозії арматури [1]. Теорія надійності і довговічності автодорожніх мостів дозволяє вирішувати завдання визначення надійності і залишкового ресурсу прогонових будов у процесі експлуатації.

У даний час, згідно з вимогами нормативних документів, що діють в Україні, розрахунок будівельних конструкцій та основ виконується за методом граничних станів. Відповідно до них, вплив на споруду подають у вигляді якихось усереднених (найчастіше максимальних) детермінованих значень. Вплив можливої мінливості цих значень враховується шляхом введення різних коефіцієнтів. Насправді ж фактори, що впливають на НДС системи, є випадковими величинами: навантаження і впливи,

міцність і деформативність будівельних конструкцій. Таким чином, для вирішення завдань надійності будівель та споруд може бути застосований імовірнісний (стохастичний) підхід.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Модель оцінки надійності К. А. Корнелла сьогодні стала визнаним інструментом управління надійністю проєктованих конструкцій не тільки в країнах Європи в рамках Єврокодів, але і у всьому світі. Його узагальнення послужили базою для подальшого розвитку методу в роботах П. Тофт-Крістенсена, М. І. Бейкера і О. Дітлевсен, які подали концепцію визначення характеристики безпеки в найзагальнішому випадку.

Значний внесок у розвиток теорії надійності і довговічності будівельних конструкцій зробили вчені: Ржаніцин А. Н., Лантух-Лященко А. І. [1], Іосілевський Л. І., Пірадова К. А., Болотін В. В., Пічугін С. Ф., Перельмутер А. В. та ін.

У роботах [1, 3] автор подає основні етапи на шляху розвитку та впровадження ідей надійності в будівельне проєктування. В роботі [2] розглянуті основні концепції розрахунків надійності за нормативними документами Єврокод.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Мета роботи – розрахунок надійності ефективних конструкцій сталезалізобетонних прогонових будов мостів.

Об'єкт дослідження – ефективні конструкції сталезалізобетонних прогонових будов мостів.

Завдання дослідження. Розрахунок надійності сталезалізобетонної прогонової будови нового типу. Для вирішення поставленого завдання була побудована розрахункова модель запропонованої конструкції з її подальшим розрахунком на сучасні рухомі навантаження та отриманням необхідних компонентів НДС.

Предмет дослідження – створення полегшених сталезалізобетонних прогонових будов мостів нового типу з використанням перфорованих металевих балок та ефективної залізобетонної плити.

**Основна частина дослідження.** Розрахунки надійності, згідно з діючими нормами проектування мостів [4, 5, 6], мають стохастичний характер. Імовірнісні розрахунки за критерієм надійності мають на меті пошук оптимального проекту при заданому рівні безпеки. Критерієм приймається характеристика безпеки  $\beta$ . Для елемента, що проектується, необхідно перевіряти виконання нерівності (1)

$$\beta \geq \beta_{nom}, \quad (1)$$

де  $\beta_{nom}$  – прописане нормативними документами [1] мінімальне значення характеристики безпеки;  $\beta$  – значення характеристики безпеки, отримане в результаті розрахунків.

Значення характеристики безпеки обчислюється виразом (2)

$$\beta = \frac{\gamma_0 - 1}{\sqrt{V_R^2 \gamma_0^2 + V_Q^2}}, \quad (2)$$

де  $\gamma_0$  – узагальнений коефіцієнт запасу, тобто статичне середнє значення реального коефіцієнта запасу;  $V_R$  і  $V_Q$  – коефіцієнти

варіації опору  $R$  і навантаження  $Q$  відповідно.

Узагальнений коефіцієнт запасу знаходимо за формулою (3)

$$\gamma_0 = \frac{\mu_R}{\mu_Q}. \quad (3)$$

Математичні очікування статичного середнього узагальненого опору елемента і статичного середнього узагальненого навантаження елемента, за умови нормального розподілу, визначаються за формулами (4) та (5)

$$\mu_R = \frac{R_n}{(1 - 1.64V_R)}, \quad (4)$$

$$\mu_Q = \frac{Q_n}{(1 + 1.64V_Q)}, \quad (5)$$

де  $R_n$  – значення несучої здатності;  $Q_n$  – значення навантаження конструкції;

$V_R$  і  $V_Q$  – коефіцієнти варіації опору  $R$  і навантаження  $Q$  відповідно.

Значення коефіцієнтів варіації були прийняті відповідно до нормативних документів [1]. Необхідні для обчислень коефіцієнти варіації рухомих і постійних навантажень наведені в табл. 1–5 [2].

Що ж стосується узагальнених коефіцієнтів варіації опору, то вони вираховуються за даними таблиць за формулою (6)

$$V = \sqrt{\sum_1^n V_i^2 + \sum_1^n V_i^2 V_j^2}, \quad i, j=1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

де  $n$  – кількість випадкових змінних.

За отриманими значеннями характеристики безпеки  $\beta$  можна визначити надійність перерізу за формулою (7)

$$p_f = \Phi(-\beta). \quad (7)$$

Таблиця 1

Коефіцієнти варіації  $V_Q$  тимчасових рухомих навантажень А-15

Тип навантаження	Випадок застосування	Коефіцієнти варіації $V_Q$
Тандем	У розрахунках елементів проїзної частини мостів	0,17
	У розрахунках решти елементів мостів	0,17 при $\lambda < 30$ м 0,07 при $\lambda \geq 30$ м
Рівномірно-розподілене навантаження	У всіх розрахунках конструкцій мостів на вертикальні і горизонтальні дії від рухомого навантаження	0,24

Таблиця 2

Коефіцієнти варіації  $V_Q$  постійних навантажень і впливів

Навантаження і впливи	Позначення чинника	Коефіцієнти варіації $V_Q$
Власна вага	$g1$	0,033
Ексцентриситет точки фіксації сили попереднього напруження	$e_n$	0,0167
Навантаження ваги проїзної частини і тротуарів автодорожніх мостів	$g2$	0,170
Вплив повзучості бетону	$g3$	0,030

Таблиця 3

Коефіцієнти варіації  $V_R$  геометричних характеристик поперечного перерізу елемента

Геометричні характеристики	Позначення чинника	Коефіцієнти варіації $V_R$
Площа поперечного перерізу елемента	$A_{red}$	0,0237
Момент опору поперечного перерізу елемента	$W_{red}$	0,0229

Таблиця 4

Коефіцієнти варіації  $V_R$  арматури залізобетонних елементів

Клас арматури	AI–AIII	AIV–AV	AVI	AtIV	AtV	AtVI	AIIIв
Коефіцієнти варіації $V_R$	0,07	0,09	0,04	0,08	0,07	0,08	0,06

Таблиця 5

Коефіцієнти варіації  $V_R$  міцності бетону

$R_{b,28}$ , МПа	10	20	30	40	50	60	70	80
При натуральному твердінні	0,159	0,129	0,105	0,082	0,066	0,054	0,051	0,051
При тепловій обробці	0,121	0,111	0,094	0,090	0,078	0,066	0,055	0,052

Вважається, що запроєктований за діючими нормами елемент буде мати необхідний рівень безпеки не менше  $\beta=3,77$ , а надійність за першою групою граничних станів матиме значення не менше  $p_f=0,0001$ .

Апарат, наведений вище, дає змогу встановити дійсні чисельні показники надійності елементів конструкцій, що проектуються. Особливо це стосується конструкцій, побудованих з використанням методів прямого проектування, заснованого на енергетичних критеріях раціоналізації, розвинених в роботах [7, 8]. У зв'язку з цим у даній роботі розглянуто раціональну конструкцію сталезалізобетонної прогонової будови [9] з наперед заданими

жорсткісними характеристиками та мінімальною витратою матеріалів.

Наведемо приклад визначення проектної надійності ефективної полегшеної модульної конструкції балково-розрізної сталезалізобетонної прогонової будови мосту [9]. Конструкція являє собою просторову систему, що складається з чотирьох металевих блоків коробчастого перетину і включена в роботу за допомогою системи зсувних зв'язків залізобетонної плити проїзної частини товщиною 0,18 м (рис. 1). Прогон склав 13,7 м. Ширина мосту 10,08 м. Габарит проїзної частини 7 м. Відстань між осями суміжних блоків 2,4 м. Тротуари по 1,5 м.

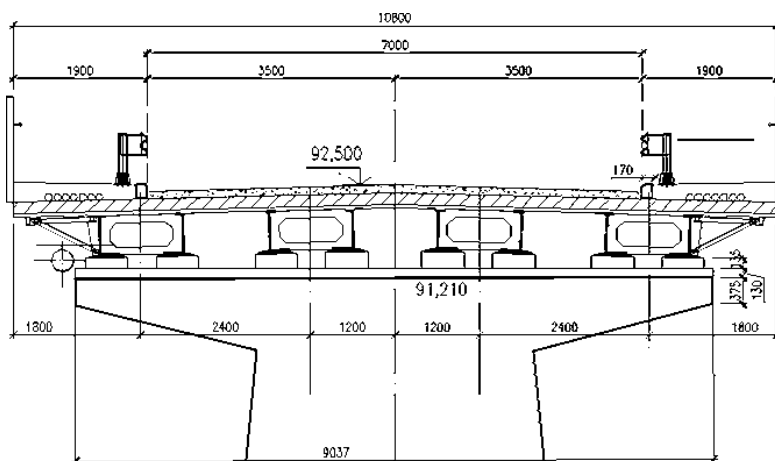


Рис. 1. Запропонована конструкція прогонової будови

Металеві блоки (рис. 2) виконані з листових перфорованих елементів, виготовлених за безвідходною технологією. Висота блока 0,8 м. Ширина блока 1,2 м. До складу блока входять дві головні балки,

дванадцять поперечних діафрагм і нижня пластина. Товщини головних балок прийняті 0,008 м, діафрагм – 0,006 м, нижньої пластини – 0,03 м.

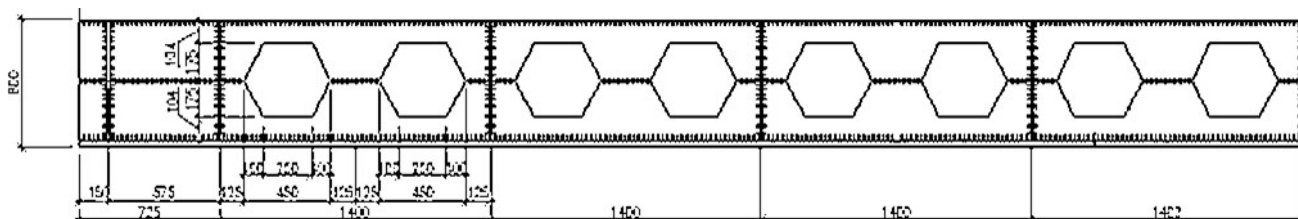


Рис. 2. Конструкція металевого блока

З метою визначення компонентів напружено-деформованого стану позначеної конструкції в програмному комплексі SCAD-Office була створена скінченноелементна модель середнього прогону моста

(рис. 3). Модель складається з оболонок нульової гауссової кривизни та стрижнів. Як навантаження прийнято власну вагу конструкції прогонової будови і дві схеми рухомих навантажень А-15 та НК-100.

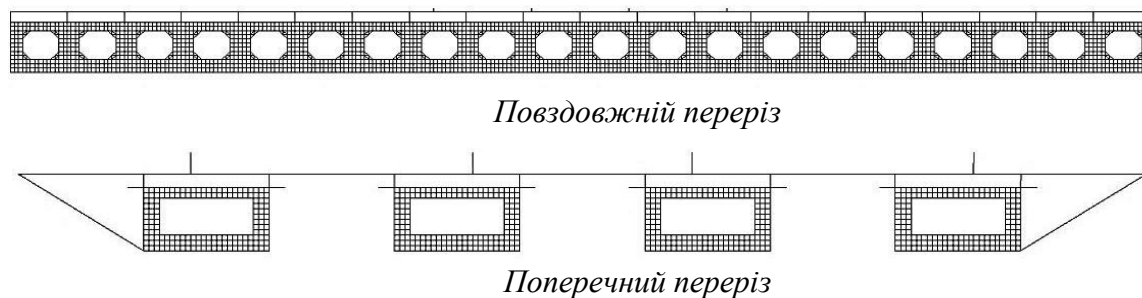


Рис. 3. Скінченноелементна модель прогонової будови

Як вихідні параметри, необхідні для розрахунку чисельних показників надійності, прийнято:

- значення нормальних і дотичних напружень;
- значення допустимих нормальних і дотичних напружень;
- значення коефіцієнтів варіації навантажень;
- значення коефіцієнтів варіації матеріалів.

Щоб отримати значення допустимих нормальних і дотичних напружень, використовувалася енергетична теорія граничного напруженого стану (Губера-Мізеса-Генки). Відповідно до цієї теорії

значення допустимих нормальних і дотичних напружень можна отримати, використовуючи головні напруження (8)

$$\begin{cases} 2\sigma^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \\ 6\tau_{don}^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \end{cases} \quad (8)$$

де за  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  було прийнято значення головних напружень  $s_1, s_2, s_3$ , отримані в результаті комп'ютерного моделювання.

Необхідні для розрахунків дані наведено в табл. 6–7.

Результати розрахунків наведено у табл. 8.

Таблиця 6

Сумарні значення напружень в елементах конструкції

Напруження, кН/м <sup>2</sup>	Елементи конструкції	
	Залізобетонна плита	Металева частина
N <sub>x</sub>	7706,16	590917,64
N <sub>y</sub>	6553,20	536105,04
τ <sub>xy</sub>	2839,22	298857,66
s <sub>1</sub>	20442,94	454923,92
s <sub>2</sub>	0	0
s <sub>3</sub>	42069,45	998377,58

Таблиця 7

Значення допустимих нормальних та дотичних напружень в елементах

Напруження, кН/м <sup>2</sup>	Залізобетонна плита	Металева частина
$\sigma$	36441,51	865731,06
$\tau$	21035,26	499844,95

Таблиця 8

Результати розрахунків

Елемент конструкції	Керуючий параметр	$\gamma_0$	$B$	$p_f$
Залізобетонна плита	$N_x$	8,839	6,918	1
	$N_y$	10,394	7,119	1
	$\tau_{xy}$	13,851	7,391	1
Металева частина	$N_x$	2,739	3,849	0,99994
	$N_y$	3,019	4,221	0,99999
	$\tau_{xy}$	3,066	4,279	1

Як видно з таблиці, отримані значення характеристики надійності перевищують рекомендовані.

**Висновки:**

1. У роботі наведено методику визначення надійності елементів нової ефективнопрогонової будови мостових конструкцій, де як вихідні параметри, необхідні для розрахунку чисельних показників надійності, прийнято значення нормальних і дотичних напружень, які отримано шляхом скінченноелементного

моделювання конструктиву в ПК Scad-Office.

2. Як об'єкт дослідження прийнято нову ефективну полегшену модульну конструкцію балково-розрізної сталезалізобетонної прогонової будови мосту, отриманої на базі експлуатації принципів прямого проектування.

3. Результати оцінки надійності запропонованого конструктивного рішення прогонової будови підтверджують його позитивність і репрезентативність для подальшого дослідження та вдосконалення.

**Список використаних джерел**

- Лантух-Лященко А. И. Развитие идей надежности в строительной области. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2015. Вип. 1. С. 2–8.
- Лантух-Лященко А. И. Концепция надежности в еврокоде. *Мости та тунелі: теорія, дослідження, практика*. 2014. № 6. 8 с.
- Мости: конструкції та надійність / Й. Й. Лучко, П. М. Коваль, М. М. Корнеєв, А. І. Лантух-Лященко, М. Р. Хархаліс; за ред. В. В. Панасюка і Й. Й. Лучка. Львів: Каменяр, 2005. 989 с.
- ДБН В.2.3-22:2009. Споруди транспорту. Мости та труби. Основні вимоги проектування. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 73 с.
- ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд будівельних конструкцій та основ. Київ: Мінрегіонбуд України, 2009. 42 с.
- ДСТУ-Н Б.В.2.3-23:2013. Настанова з оцінювання і прогнозування технічного стану автодорожніх мостів. Київ: Мінрегіон України, 2013. 49 с.

7. Шмуклер В. С., Клімов Ю. А., Бурак Н. П. Каркасні системи полегшеного типу. Харків: Золоті сторінки, 2008. 336 с.

8. Rational Design of Structural Building Systems / V. Babaev, I. Ievzerov, S. Evel, A. Lantoukh-Liashchenko, V. Shevetovsky, O. Shimanovskyi, V. Shmukler, M. Sukhonos. DOM publishers, Berlin/Germany. (2019). 384 p. URL: <https://dom-publishers.com/collections/handbuch-und-planungshilfe/products/rational-design-for-structural-building-systems>.

9. Efficient construction of the motorway and highway bridge superstructure (experimental studies) / V. Babaev, M. Bekker, V. Shmukler, S. Bugaevskiy, R. Kaplin, Y. Krul. Matec of Web Conferences, 02003 (2017).

---

---

Каплін Роман Борисович, завідувач сектору лабораторії будівельно-технічних досліджень Національного наукового центру «Інститут судових експертиз ім. Засл. проф. М. С. Бокаріуса», здобувач кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова.  
E-mail: cc33cc22@ukr.net.

Roman Kaplin, head of the sector of the of construction and technical research laboratory of the National Research Center «Hon. Prof. M.S. Bokarius Kharkiv Research Institute of Forensic Examinations», postgraduate student, Building Structures department, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.  
E-mail: cc33cc22@ukr.net.

Статтю прийнято 30.11.2020 р.