

ИНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ СТЕРЖНІВ СТАЛЕВИХ КРОКВЯНИХ ФЕРМ

Пашинський В.А., д.т.н., професор,
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький
pva.kntu@gmail.com

Анотація. Запропонована методика оцінювання імовірностей відмови стержнів сталевих кроквяних ферм, яка базується на поданні характеристик міцності матеріалу та постійного навантаження у формі нормально розподілених випадкових величин, а снігового навантаження – у формі послідовності річних максимумів, описаної законом розподілу Гумбеля. Методика проілюстрована прикладом розрахунку стержнів кроквяних ферм при різних комбінаціях постійного та снігового навантаження, що дозволило проаналізувати залежність рівня надійності від рівня та структури завантаженості стержнів. Попри інженерну простоту, розроблена методика дозволяє адекватно урахувати характеристики навантажень, конструктивні особливості та строк служби ферм.

Ключові слова: сталеві ферми, випадкові навантаження, імовірність відмови.

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СТЕРЖНЕЙ СТАЛЬНЫХ СТРОПИЛЬНЫХ ФЕРМ

Пашинский В.А., д.т.н., профессор,
Центральноукраинский национальный технический университет, г. Кропивницкий
pva.kntu@gmail.com

Аннотация. Предложена методика оценки вероятностей отказа стержней стальных стропильных ферм, основанная на представлении характеристик прочности материала и постоянной нагрузки в форме нормально распределенных случайных величин, а снеговой нагрузки – в форме последовательности годовых максимумов, описанной законом распределения Гумбеля. Методика проиллюстрирована примером расчета стержней стропильных ферм при различных комбинациях постоянной и снеговой нагрузки, что позволило проанализировать зависимость уровня надежности от уровня и структуры загруженности стержней. Несмотря на инженерную простоту, разработанная методика позволяет адекватно учесть характеристики нагрузок, конструктивные особенности и срок службы ферм.

Ключевые слова: стальные фермы, случайные нагрузки, вероятность отказа

ENGINEERING ASSESSMENT METHOD OF RELIABILITY INDEXES OF STEEL TRUSSES BARS

Victor Pashinsky, Doctor of Engineering, Professor,
Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine
pva.kntu@gmail.com

Abstract. The simplest methods of evaluating reliability indicators of building structures elements based on the representation of the strength characteristics and stress in the form of random variables do not take into account the lifetime of the structure. Submission of variable loads in the

form of quasi-stationary random processes with actual distributions ordinates requires a fairly complex computational procedures.

The offered method of evaluating probabilities of failure of steel roof trusses rods is based on the representation of the characteristics of strength of the material and constant load in the form of normally distributed random variables and snow load – in the form of a sequence of annual maximums described by Gumbel distribution law. Such approach allows for a fairly simple formula to estimate reliability indexes considering design service life by switching from annual heights of the distribution of variable load to the maximum allocation for the entire service life.

The developed method is illustrated by an example of calculation of steel roof trusses rods in various combinations of permanent and snow load. The farms with parallel chords span of 24 meters are examined. Dependences of the level of reliability of rods in Bell (logarithm of the probability of failure with the sign «minus») on the level and structure of bars loads are analyzed. The level of reliability decreases with increasing utilization of the bearing capacity of rods and with the growth of variation coefficient of the reserve of load capacity. Despite the simplicity, the developed method can adequately take into account the characteristics of loads, design features and service life in the assessment of the reliability of farms rods.

Keywords: steel trusses, random loading, probability of failure.

Постановка проблеми. Управління надійністю будівельних конструкцій вимагає наявності простого інженерного методу оцінювання показників безвідмовності, в якості яких зазвичай використовують імовірність безвідмовної роботи або імовірність відмови протягом встановленого терміну експлуатації. До цього методу доцільно висунути такі вимоги: інформаційна забезпеченість, адекватне урахування випадкових властивостей характеристик міцності матеріалу та навантажень на конструкції, урахування часової мінливості змінних навантажень і терміну експлуатації конструкції при оцінюванні показників надійності, відсутність складних обчислювальних процедур.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Історично перший метод оцінювання імовірності безвідмовної роботи, запропонований О.Р. Ржаніциним [1], базувався на поданні несучої здатності та навантажень на конструкції у формі нормально розподілених випадкових величин. Важливим досягненням було уведення поняття випадкової величини резерву міцності, але подання навантажень у формі випадкових величин не дозволяло враховувати термін експлуатації конструкцій. Більш пізні розробки В.В. Болотіна [2] базуються на поданні змінних навантажень у формі випадкових процесів (як правило – стаціонарних) з нормальним законом розподілу ординати. Такий підхід забезпечує можливість явного урахування термінів експлуатації конструкцій, але не враховує особливостей реальних процесів змінних навантажень, розподіли ординати яких можуть принципово відрізнятися від нормального. Розробки [3] базуються на поданні кліматичних та інших змінних навантажень у формі квазістаціонарних випадкових процесів [4] з експериментально отриманими законами розподілу ординати, але необхідність реалізації досить складних обчислювальних процедур стримує їх практичне використання.

Мета роботи полягає в розробленні інженерного методу оцінювання імовірностей безвідмовної роботи елементів сталевих конструкцій з урахуванням терміну їх експлуатації та в апробації цього методу на прикладах розрахунку стержнів сталевих кроквяних ферм.

Об'єктом дослідження є сталеві кроквяні ферми з паралельними поясами прольотом 24 м для виробничої будівлі класу відповідальності СС 1 зі строком служби 60 років. Геометрична схема ферми зображена на рисунку 1. Експериментальне проектування ферм виконане згідно з вимогами ДБН [5, 6]. З метою охоплення досить широкого діапазону можливих зусиль в стержнях і різних співвідношень постійного та снігового навантажень розглянуто три типи покрівель (холодна із сталевого профільованого настилу, легка утеплена на основі профільованого настилу та плит з мінеральної вати, важка по збірних залізобетонних плитах) та снігове навантаження для шести снігових районів за ДБН [5]. Результуючі граничні розрахункові значення зосереджених навантажень у вузли ферм наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – План експериментального проектування

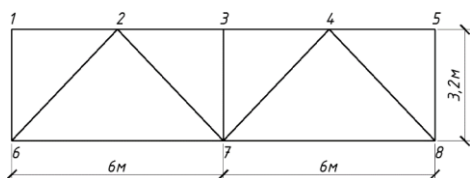


Рис. 1. Геометрична схема кроквяної ферми (ліва половина)

Тип покрівлі та її вага в КПа	Вузлові навантаження в кН для снігових районів						
	1	2	3	4	5	6	
Легка холодна	0,42	22,5	26,3	30,0	33,8	37,5	41,3
Легка утеплена	1,20	36,6	40,3	44,1	47,8	51,5	55,3
Важка утеплена	3,90	85,2	88,9	92,7	96,4	100,1	103,9

На вказані навантаження запроєктовано 18 кроквяних ферм, для кожної з яких у середовищі Microsoft Excel підібрані перерізи семи стержнів (усього 126 перерізів) згідно з вимогами ДБН [6] щодо міцності, стійкості та граничної гнучкості. Результатом перевірки міцності чи стійкості кожного стержня є коефіцієнт використання несучої здатності, який відображає рівень завантаження стержня. На рисунках 2 і 3 наведено розподіл кількості стержнів за значеннями коефіцієнта використання, а також межі змін коефіцієнтів використання для кожного з семи стержнів ферми, зображеної на рисунку 1.

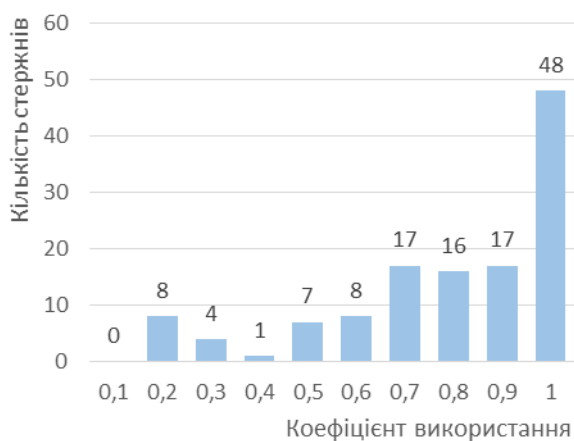


Рис. 2. Гістограма розподілу коефіцієнтів використання несучої здатності стержнів

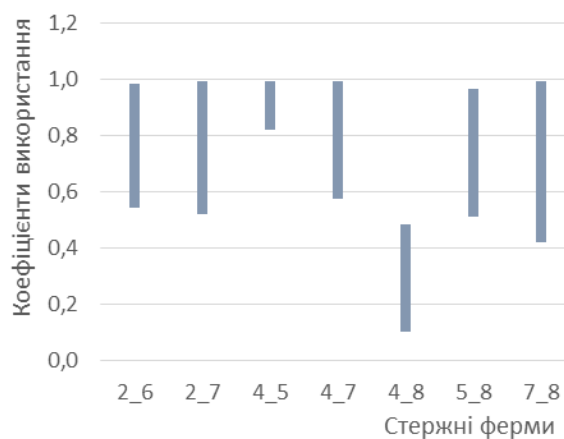


Рис. 3. Межі змін коефіцієнтів використання несучої здатності стержнів

З рисунків 2 і 3 видно, що для половини стержнів коефіцієнти використання несучої здатності приймають значення в межах від 0,8 до 1,0. Запас у межах 20% відповідає кроку сортаменту прокатних кутників, а тому є ознакою практично повного використання несучої здатності прокатних профілів. Такі значення характерні для верхнього поясу (стержень 4-5) та частково – для усіх інших стержнів, окрім розтягнутого розкосу 4-8, переріз якого в усіх випадках був прийнятий з мінімально допустимого профілю. Менші за 0,8 значення коефіцієнта використання для нижнього поясу та стержнів ґратки обумовлені підбором стержнів з умови граничної гнучкості при невеликих навантаженнях на ферми.

Методика оцінювання показників надійності базується на введеному О.Р. Ржаніциним [1] понятті резерву міцності, який з огляду на різний характер роботи та відмов стержнів (руйнування при розтягу чи втрата стійкості при стиску) нижче будемо називати резервом несучої здатності. Він є випадковою величиною, яка визначається з урахуванням випадкового характеру межі текучості сталі, постійного та снігового навантаження на покрівлю. Межа текучості сталі та постійне навантаження вважаються нормально розподіленими випадковими величинами, а річні максимуми снігового навантаження описуються подвійним експоненціальним розподілом Гумбеля [7]. Геометричні характеристики поперечного перерізу та коефіцієнт стійкості при стиску вважаються детермінованими величинами. Математичне сподівання, стандарт і коефіцієнт асиметрії резерву несучої здатності визначаються за формулами:

$$M = A\phi M_R - \alpha_{II} M_{II} - \alpha_C (M_C + 0,78 S_C \ln T); \quad (1)$$

$$S = \sqrt{(A\phi S_R)^2 + (\alpha_{II} S_{II})^2 + (\alpha_C S_C)^2}; \quad (2)$$

$$A = -(\alpha_C S_C A_C)^3 / S^3 = -\frac{1,48}{S^3} (\alpha_C S_C)^3, \quad (3)$$

де M_R і S_R – середнє значення й стандарт межі текучості сталі;

M_{II} і S_{II} – середнє значення й стандарт постійного навантаження;

M_C і S_C – середнє значення й стандарт річних максимумів ваги снігового покриву;

α_{II} і α_C – коефіцієнти впливу постійного та снігового навантаження, які забезпечують перехід від навантаження на $1m^2$ покрівлі до зусилля в стержні ферми;

$\ln T$ – натуральний логарифм строку служби конструкції;

ϕ – коефіцієнт стійкості за [6], який для розтягнутого стержня дорівнює одиниці.

Остання формула (3) отримана з урахуванням коефіцієнта асиметрії розподілу Гумбеля $A_C=1,14$. Значення $\ln T$ у формулі (1) забезпечує перехід від розподілу річного максимуму снігового навантаження до розподілу максимуму за строк служби конструкції T згідно з відомою властивістю закону розподілу Гумбеля [7]. Таким чином враховується строк служби при оцінюванні показників надійності елемента конструкції.

Розподіл резерву несучої здатності має вигляд, проміжний між симетричним розподілом Гауса та асиметричним законом розподілу Гумбеля з коефіцієнтом асиметрії $A=1,14$. В роботі [8] запропоновано використання комбінованого розподілу Гумбеля-Гауса, яким можна описати довільні розподіли зі значеннями коефіцієнта асиметрії $-1,14 \leq A \leq +1,14$. При характерних для резерву несучої здатності значеннях коефіцієнта асиметрії $-1,14 \leq A \leq 0$ інтегральна функція цього розподілу набирає вигляду, більш простого порівняно з [8]:

$$F(x) = 1 - C \exp \left[-\exp \left(\frac{x - M}{0,78 S} - 0,577 \right) \right] + (1 - C) F_n(x), \quad (4)$$

де M , S , A – математичне сподівання (1), стандарт (2) та коефіцієнт асиметрії (3) резерву несучої здатності елемента;

$F_n(x)$ – функція нормального розподілу з параметрами (1), (2);

$C = 0,8775 \cdot |A|$ – ваговий коефіцієнт.

Імовірності відмови та безвідмовної роботи елемента визначаються через закон розподілу Гумбеля-Гауса (4) за формулами:

$$V = F(0); \quad P = 1 - V = 1 - F(0). \quad (5)$$

Описана методика розрахунку реалізована в середовищі Microsoft Excel у вигляді розрахункової таблиці з формулами (1)...(5), вписаними у відповідні комірки. Автоматизація розрахунків дозволила без значних витрат часу оцінити імовірності відмови усіх 126 запроєктованих стержнів ферм та провести подальший аналіз отриманих результатів.

Імовірності відмови стержнів сталевих кроквяних ферм обчислені за описаною методикою при вихідних даних, представлених в таблиці 2. Середні значення та стандарти розподілів межі текучості сталі та постійного навантаження оцінені за відомими з літератури коефіцієнтами варіації та розрахунковими значеннями з [5, 6], а статистичні характеристики послідовностей річних максимумів снігового навантаження – за результатами снігомірних зйомок на метеостанціях, що відносяться до кожного з шести снігових районів [5]. Коефіцієнти впливу навантажень встановлені за результатами статичного розрахунку ферми, а геометричні характеристики перерізів та коефіцієнти стійкості стиснутих стержнів – за результатами виконаних проектних розрахунків цих стержнів.

Таблиця 2 – Статистичні характеристики розрахункових параметрів

Розрахункові параметри		Значення параметрів		
		розрахункове	середнє	стандарт
Постійне навантаження від покрівлі, кПа	легкої холодної	0,42	0,40	0,010
	легкої утепленої	1,20	1,03	0,087
	важкої утепленої	3,90	3,32	0,289
Снігове навантаження, кПа	для 1 району	0,83	0,198	0,125
	для 2 району	1,04	0,304	0,197
	для 3 району	1,25	0,380	0,221
	для 4 району	1,46	0,468	0,253
	для 5 району	1,66	0,543	0,347
	для 6 району	1,87	0,643	0,394
Межа текучості сталі С 245, МПа		240	330	29,7

Отримані імовірності відмови можуть відрізнятися на декілька порядків, тому для зручності подальшого узагальнюючого аналізу вони перераховані в белли [2]:

$$\beta = -\log(V), \quad (6)$$

які по суті представляють собою кількість нулів перед значимою частиною величини імовірності відмови.

Розподіл стержнів за значеннями рівня надійності (6), а також межі змін рівня надійності кожного з семи стержнів ферми при різних комбінаціях постійного та снігового навантаження наведено на рисунках 4 і 5. З рисунка 4 видно, що переважна кількість стержнів має рівень надійності від 2 до 5 белл, що відповідає імовірності відмови в межах від 1×10^{-2} до 1×10^{-5} . Рисунок 5 показує, що найвищий рівень надійності має розтягнутий розкіс 4-8, який в усіх випадках був підібраний з мінімального профілю і тому має найнижчі коефіцієнти використання (рис. 3). Рівень надійності усіх інших стержнів змінюється в досить широких межах (на три порядки) залежно від їх коефіцієнта використання та інших факторів впливу.

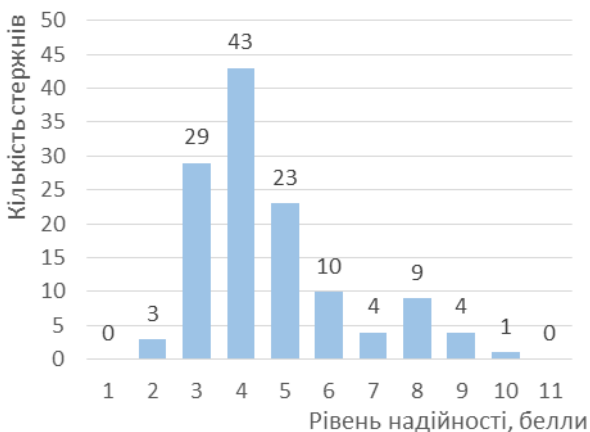


Рис. 4. Гістограма розподілу рівня надійності стержнів ферм

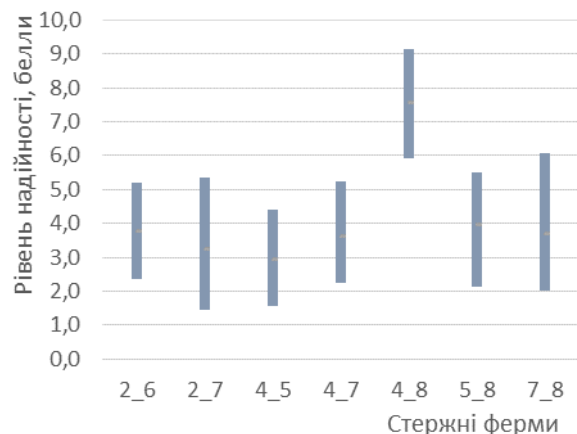


Рис. 5. Межі змін рівня надійності стержнів ферм

Рівень надійності стержнів ферм залежить від багатьох факторів, але найбільш вираженими є залежності від коефіцієнта використання несучої здатності стержня та від коефіцієнта варіації резерву несучої здатності, які й зображені на рисунку 6. Попри "розмитість" цих залежностей, яка пояснюється впливом інших факторів, на графіках явно відображається тенденція до зниження рівня надійності при збільшенні коефіцієнта використання несучої здатності стержня та при зростанні мінливості розрахункових параметрів, яка відображається коефіцієнтом варіації резерву несучої здатності.

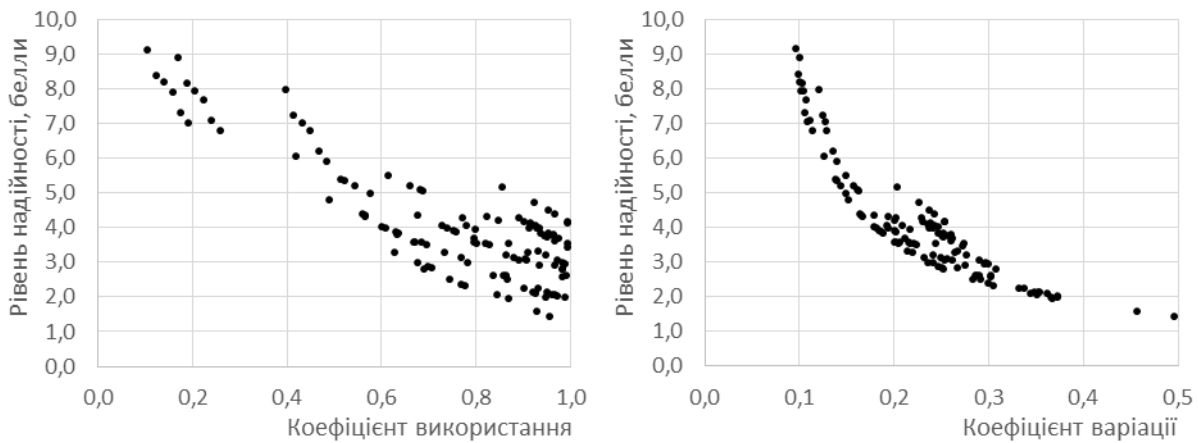


Рис. 6. Залежності показника надійності від визначальних факторів

Досвід виконання розрахунків показав простоту реалізації та можливість використання розробленої методики для оцінювання рівня надійності елементів сталевих несучих конструкцій різних видів.

Висновки та перспективи подальших досліджень:

1. Розроблена методика є достатньо простою для практичного інженерного використання, але забезпечує оцінювання показників надійності елементів сталевих конструкцій з урахуванням їх строку служби та випадкового характеру розрахункових параметрів.
2. Аналіз стержнів сталевих кроквяних ферм при дії різних комбінацій постійного та снігового навантаження показав, що їх рівень надійності зменшується при зростанні коефіцієнта використання несучої здатності стержнів та при зростанні коефіцієнта варіації резерву несучої здатності.
3. Розроблена методика рекомендується для практичного використання при імовірнісному оцінюванні показників надійності сталевих конструкцій під дією постійних та змінних навантажень.

Література

1. Ржаницин А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А.Р. Ржаницин. – М.: Стройиздат, 1978. – 240 с.
2. Болотин В.В. Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений / В.В. Болотин. – М.: Стройиздат, 1982. – 352 с.
3. Пічугін С.Ф. Розрахунок Надійності будівельних конструкцій: монографія / С.Ф.Пічугін. – Полтава: ТОВ "АСМІ", 2016. – 520 с.
4. Пашинський В.А. Атмосферні навантаження на будівельні конструкції для території України / В.А. Пашинський. – К.: УкрНДІпроектстальконструкція, 1999. – 195 с.
5. ДБН В.1.2-2:2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Навантаження і впливи. Норми проектування. – К.: Мінбуд України, 2007 – 59 с.
6. ДБН В.2.6-163-2010. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 220 с.
7. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений / Э. Гумбель. – М.: Мир. – 1965. – 450 с.
8. Пашинський В.А. Методологія нормування навантажень на будівельні конструкції. – Автореф. дис... докт. техн. наук: 05.23.01 / ПДТУ. – Полтава, 1999. – 33 с.

Стаття надійшла 6.04.2017