

ІМОВІРНІСНИЙ РОЗРАХУНОК СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ РАМ

Чичуліна К. В., Чичулін В. П.

ВСТУП

Однією з важливих задач, яка постає перед будівельною наукою, є зниження матеріалоемності, трудомісткості і вартості на етапах проектування, будівництва та експлуатації будівель та споруд у процесі забезпечення їх довговічності та надійності. Застосування в розрахунках будівельних конструкцій теорії надійності забезпечує сприятливі передумови для нормування розрахункових параметрів конструкцій на імовірнісній основі. Алгоритм розрахунків заснований на ймовірнісному підході. Цей розрахунок можна віднести до багатьох видів конструкцій, у тому числі до сталевих статично не визначених рам. Такі конструкції застосовуються в каркасах будівель та споруд різноманітного призначення. Відомо, що в сталевих статично не визначених конструкціях існують деякі резерви несучої здатності, не враховані під час проектування. Ці резерви існують за рахунок роботи системи у пластичній стадії з виникненням ряду шарнірів пластичності. Робота сталевих статично не визначених конструкцій також не вивчена в імовірнісній постановці з урахуванням випадкової природи міцності та навантаження, а також випадкового характеру відмов елементів. У зв'язку із цим розвиток методів імовірнісних розрахунків сталевих статично не визначених конструкцій, які можливо втілити в інженерну практику проектування, є задачею важливою і актуальною в умовах сьогодення.

Сталеві статично невизначені конструкції можуть використуватися в каркасах будівель різного призначення, робочих майданчиках, етажерках під технологічне обладнання тощо. Однією з найбільш важливих обставин аналізу роботи конструкцій є врахування пластичних властивостей матеріалу. Сьогодні досліджено теоретично та експериментально, що несуча здатність статично не визначених систем зберігається і після виникнення в її елементах пластичних деформацій.

Сучасні експериментальні дані показують, що метод граничної рівноваги дозволяє відносно достовірно оцінювати несучу здатність сталевих статично не визначених конструкцій. Особливості методу граничної рівноваги представлено в небагатьох джерелах¹.

Найбільш важливою властивістю об'єкта є безвідмовність², яка полягає у збереженні працездатності протягом заданого часу. Визначається як імовірність відмови за визначений проміжок часу $Q(t)$. Для даної роботи безвідмовність оцінюється за критерієм несучої здатності.

Розрахункові величини в будівельних конструкціях можна розподілити на дві основні групи. До першої групи відноситься узагальнена несуча здатність конструкції \tilde{R} , до другої групи відноситься узагальнене навантаження \tilde{F} . Відповідно до деяких літературних джерел³ умова безвідмовності має вигляд:

$$\tilde{S} = \tilde{R} - \tilde{F} > 0. \quad (1)$$

У даній постановці несуча здатність і навантаження конструкцій подаються як випадкові величини. Для роботи, що пропонується, вони підпорядковуються нормальним законам розподілу випадкових величин.

На даний час малодослідженими залишаються питання імовірнісного розрахунку сталевих статично невизначених конструкцій. В інженерній практиці відсутні методи і програми, які ураховують реальну роботу матеріалу, а також імовірнісні характеристики міцності і навантаження. Дослідження статично не визначених систем ускладнюються внаслідок перерозподілу зусиль після відмови окремих елементів. Моделі руйнування систем характеризуються складною розгалуженою структурою шляхів

¹ Cheng Y.M., Li D.Z., Li L., Sun Y.J., Baker R., Yang Y. Chapter 4 – System-Level “Limit equilibrium method based on an approximate lower bound method with a variable factor of safety that can consider residual strength”. *Computers and Geotechnics*. 2011. Vol. 38. No. 5. P. 623-637. DOI:10.1016/j.compgeo.2011.02.010.

² Huang G., Chen X., Yang Zh., Wu B. Exact analysis and reanalysis methods for structures with nonlinear boundary conditions. *Computers & Structures*. 2018. Vol. 198. P. 12–22. DOI: 10.1016/j.compstruc.2018.01.004.

³ Wang J. Chapter 4 – System-Level “Fail-Safe”. *Safety Theory and Control Technology of High-Speed Train Operation*. 2018. P. 125-144, DOI: 10.1016/B978-0-12-813304-0.00004-9.

відмов елементів, які в кінці перетворюють конструкцію на змінну систему. Для практичної оцінки надійності статично не визначених систем необхідно використовувати прості, але досить близькі до реальної роботи методи розрахунку. Одним із таких методів є імовірнісний метод граничної рівноваги.

Сучасним питанням надійності будівельних конструкцій, зокрема розрахункам надійності сталевих рам, загалом присвячено багато робіт. Запропоновано метод для ефективної оцінки надійності пружно-ідеально-пластичних конструкцій⁴. Граничний стан оцінюється з точки зору ймовірнісного множника. Навантаження оцінюються шляхом розв'язання серії завдань лінійного програмування, відповідей, що лежать в основі лінійної пружної моделі і самостійного розподілу напруг. Ефективність запропонованої процедури забезпечується простотою задачі математичного програмування, базові структурні моделі вирішуються на кожній ітерації, ефективність підмножина моделювання. Дійсність підходу забезпечується динамічною теорією пристосовності, яка ілюструється на приклад сталеві рами. У дослідженнях⁵ розглядаються система коефіцієнтів опору через аналіз надійності двох моментів сталевих рам під комбінованим навантаженням власної ваги та вітровим навантаженням. Рами розроблені з використанням нееластичного аналізу другого порядку, оцінюються їхні міцність та надійність. Розглянуто вплив на надійність системи коефіцієнта опору системи та коефіцієнта навантаження від вітру та власної ваги. Виявлені особливості методології проектування на основі надійності системи.

Розглядається питання вибору ефективної довжини балок для моделей рамних каркасів, широко використовуються сейсмічний опір системи, з метою мінімізації кількості дисперсії в конструкціях⁶. Оцінка була проведена за допомогою запропонованого рівняння з

⁴ Tabbuso P., M.J. Spence S., Palizzolo L., Pirrotta A., Kareem A. An efficient framework for the elasto-plastic reliability assessment of uncertain wind excited systems, *Structural Safety*. 2016. Vol. 58. P. 69–78. DOI: 10.1016/j.strusafe.2015.09.001.

⁵ Zhang H., R. Ellingwood B., J.R. Rasmussen K. System reliabilities in steel structural frame design by inelastic analysis, *Engineering Structures*. 2014. Vol. 58. P. 341–348. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.10.003.

⁶ Najafi L.H., Tehranizadeh M. Equation for achieving efficient length of link-beams in eccentrically braced frames and its reliability validation, *Journal of Constructional Steel Research*, 2017. Vol. 130. P. 53–64. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.11.020.

урахуванням різної висоти конструкцій, схильних до зміщення. Крім того, оцінка надійності рамних конструкцій проводиться відповідно до перевірки запропонованих рівнянь з урахуванням ймовірності відмови для кожної моделі. Відповідність ефективної довжини балки досягається на основі детермінованого аналізу за допомогою запропонованих рівнянь та імовірнісного аналізу. Досліджено потенційні обвалення металоконструкцій, руйнування з'єднань з урахуванням невизначеності властивостей матеріалу, таких як межа плинності, навантаження і модуль пружності. Балочні кінці оберталися були використані в якості членів-рівень граничних станів на прогресуюче обвалення. Моделювання конструкцій із трьома різними типами з'єднань проводилися після видалення однієї з колон. Криві нестійкості були отримані виходячи з імовірності перевищення заданого граничного стану для вертикального переміщення. Представлено алгоритм для надійності на основі сейсмічного проектування конструкцій, що включає наближені методи оцінки ефективності та структурної оптимізації⁷. Запропонований алгоритм дозволяє автоматичне проектування моментів опору сталевих рам із використанням критеріїв надійності. Такі критерії дозволяють встановлювати інженерні обмеження і отримувати будівельні конструкції поліпшених показників продуктивності і низької вартості. У даній роботі запропоновано спрощений підхід, який дозволяє швидко обчислити межу-стан середньої річної частоти без суттєвої втрати точності. Проблема оптимізації вирішується спеціально розробленим алгоритмом. Три- і дев'ятиповерхова сталева рама використовується для демонстрації ефективності запропонованої процедури, що призводить до оптимальної конструкції будівлі.

Імовірнісна втрата стійкості не визначених рам вивчається за допомогою стохастичного методу кінцевих елементів⁸. Статистика втрати стійкості пружних рам із випадковою початковою нелінійністю, невизначеними перерізами і властивостями матеріалу виводиться із статистики основних параметрів системи з використанням стохастичного методу кінцевих елементів.

⁷ Zacharenaki A. E., Fragiadakis M., Papadrakakis M. Reliability-based optimum seismic design of structures using simplified performance estimation methods, *Engineering Structures*. 2013. Vol.52, P. 707–717. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.03.007.

⁸ Lin S.C., Kam T.Y. Buckling failure probability of imperfect elastic frames”, *Computers & Structures*, 1992. Vol.44. No. 3. P. 515–524. DOI: 10.1016/0045-7949(92)90384.

Досліджено вплив варіації геометричної нелінійності, перетину і властивостей матеріалу на відмінності в стійкості і міцності. Імовірність відмови від нелінійності рам, що складаються з випадкових параметрів систем з урахуванням випадкових навантажень, розраховується у просторі завантаження. Визначені фактори, що впливають на надійність рами. З'ясовано, що секційні властивості, форми та величина геометричної нелінійності може зробити істотний вплив на надійність рами. Відмічають⁹, що проектування систем сталевих конструкцій на основі розширеного аналізу призводить до більш ефективного процесу проектування і забезпечує більш рівномірний рівень структурної надійності системи. Основною перешкодою для впровадження цього методу у практиці є очевидна складність у призначенні відповідного коефіцієнта опору конструктивних систем. Також було запропоновано ефективний чисельний метод визначення надійності на основі оптимізації конструкції сталевих рам¹⁰. У цій задачі цільова функція направлена на мінімізацію ваги всієї сталевої рами. Змінними у проектуванні є балки і колони поперечного перерізу, які розглядаються як дискретні змінні, так і обраний із комплекту широкої форми фланець сталевих профілів. Випадкові змінні відносяться до властивостей матеріалів і прикладених навантажень. Для аналізу поведінки сталеві рами використовується метод кінцевих елементів для каркасних конструкцій. Усі ймовірнісні обмеження відносяться до детермінованих обмежень. Це допомагає перетворити проблеми в детермінованій задачі оптимізації, яка може бути вирішена за допомогою стандартних алгоритмів оптимізації. Це дозволяє значно скоротити обчислювальні витрати для розв'язання вихідної задачі.

У роботі¹¹ представлені точні та ефективні чисельні процедури для оцінки надійності системи сталевих каркасів із напівжорсткими

⁹ W. Liu, J.R. Rasmussen K., Zhang H. Systems Reliability for 3D Steel Frames Subject to Gravity Loads, *Structures*, 2016. Vol. 8. P.2. P. 170-182. DOI: 10.1016/j.istruc.2016.06.002.

¹⁰ Le Linh A., Bui-Vinh T., Ho-Huu V., Nguyen-Thoi T. An efficient coupled numerical method for reliability-based design optimization of steel frames. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. Vol. 138. P. 389-400. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.08.002.

¹¹ Thai H.-T., Uy Br., Kang W.-H., Hicks S. System reliability evaluation of steel frames with semi-rigid connections, *Journal of Constructional Steel Research*. 2016. Vol.121, P. 29-39, DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.01.009.

сполученнями. Кінцева міцність і поведінка рами були передбачені за допомогою моделі пружно-пластичного шарніра. Досліджувалась чутливість надійності моделей. Моделювання за методом Монте-Карло було використано для оцінки ймовірності відмови і показника надійності системи. Розглядалися два приклади рамних конструкцій під комбінованим і вітровим навантаженням, розглянуто показники надійності системи міцності і працездатності до граничного стану оцінювалися за випадковістю навантаження, матеріалу і геометричних властивостей і напівтвердого з'єднання. Результати показали, що надійність рами дуже сильно залежить від напівтвердого з'єднання. Вплив різних послідовностей навантаження на детерміновану стійкість сталевих конструкцій (нееластичний діапазон) є добре вивченим явищем¹². Однак вплив різних послідовностей навантаження на надійність елементів та рами зі сталі не було спеціально вивчено в минулому. Результати дослідження показують важливість послідовності навантаження на рівні розкиду і неперевищення вірогідності опору. Розглядаються також потенційні врахування послідовності навантажування під час оцінки надійності сталевих рам.

1. Імовірнісний розрахунок методом станів

Розглянуті методи ймовірнісного розрахунку сталевих статично не визначених рам за умови різноманітних видів відмов елементів. Найбільш повно враховує хід руйнування конструкції метод перебору всіх можливих станів. Графічно метод станів представляється у вигляді орієнтованого графа. Вершини графа виражають стан, в якому знаходиться конструкція, а ребра представляють умовні ймовірності відмови відповідних елементів. Для обчислювання ймовірнісних характеристик графів-дерев використовуються методи математичної логіки. Імовірність відмови статично не визначених систем у цілому Q_s згідно із графом відмов представляється виразом логічного складання (диз'юнкції) всіх можливих (і-тих) шляхів (кон'юнкції) відмови перетинів q_{ij} :

$$Q_s = \bigvee_{i=1}^m \left(\bigwedge_{j=1}^n q_{ij} \right), \quad (2)$$

¹² Taras A., Huemer St., On the influence of the load sequence on the structural reliability of steel members and frames, *Structures*. 2015. Vol.4. P. 91-104. DOI: 10.1016/j.istruc.2015.10.007.

де m – загальна кількість шляхів (підграфів) відмов для даної конструкції; n – кількість j -х відмов перетинів, вхідних в i -й шлях.

Модель відмов рами у вигляді графу станів математично представляється у вигляді матриці безпосередніх зв'язків. Така матриця методом виключення вузлів перетворюється в матрицю повних зв'язків. Елемент матриці повних зв'язків аналітично виражає усі логічні зв'язки між входом і виходом графу станів.

Розглядалися крихкі і пластичні відмови конструкції. У випадку крихких відмов елемент виключається з роботи, а конструкція в цілому продовжує функціонувати. Пластична відмова припускає виникнення в перетині шарніру пластичності.

Загальна схема імовірного розрахунку методом станів приведена на рис. 1.



Рис. 1. План-схема розрахунку надійності рам методом перебору станів

Аналіз шляхів руйнування конструкції показав, що ймовірність відмови системи в цілому найчастіше чисельно наближається до ймовірності відмови за одним найбільш імовірним шляхом відмови перетинів. Значення ймовірності відмови системи значно менше ймовірності відмови до першого відмови перетинів рами. Метод перебору станів можливо використовувати для невеликих рам (<20 перетинів) у зв'язку з різким зростанням об'єму розрахунків. Для подолання труднощів щодо зростання розміру завдання пропонується метод розрахунку, побудований на використанні одного найбільш імовірного (істинного) механізму руйнування.

Відомо, що розподіл зусиль під час пластичного руйнування не залежить від історії навантаження та поведінки конструкції до її повного пластичного руйнування. Тому для розрахунку сталевих статично не визначених рам, виконаних із пружно-пластичного матеріалу, можливо розглядати фазу вичерпання несучої здатності конструкції, їх пластичне руйнування.

Наведене положення використовується в методі граничної рівноваги. У розрахунку приймаються такі передумови для використання методу граничної рівноваги:

- 1) прикладання навантаження належить до квазістатичного типу;
- 2) матеріал конструкцій ідеально пружно-пластичний і підпорядковується діаграмі Прандтля;
- 3) рівняння складаються для недеформованої схеми;
- 4) перетин елементів має ідеальну форму, тому зона пластичного шарніру обмежується крапкою;
- 5) основними діючими зусиллями є згинаючі моменти.

Розроблена процедура розрахунку надійності статично не визначених систем, в якій умови для шарнірів пластичності мають вигляд рівнянь гіперплощин в $(k + 1)$ – мірному гіперпросторі:

$$\sum_{j=1}^k M_{ij} \cdot x_j + q \cdot M_{i0} = M_{i,pl} \quad (i=1,2,\dots,n), \quad (3)$$

де $M_{i,pl}$ – граничний момент в i -му перетині; M_{ij} – момент в i -му перетині основної системи від зайвого невідомого $x_j = 1$; M_{i0} – момент в i -му перетині від зовнішніх навантажень q , параметр яких приймається $q = 1$.

Пересікання гіперплощин визначає вершину багатогранника умов, із неї розраховується максимальне значення навантаження q_{\max} . Із рішення $(k+1)$ лінійних рівнянь (4) та підстановкою у праву частину середніх граничних моментів $\bar{M}_{r,pl}$. Переходячи до області випадкових величин, маємо математичне очікування міцності рами в цілому:

$$\bar{q} = \sum_{r=1}^{k+1} \frac{A_{r,k+1}}{D} \cdot \bar{M}_{r,pl} = \sum_{r=1}^{k+1} \frac{A_{r,k+1}}{D} \cdot \mu_r \cdot \bar{M}_{o,pl}, \quad (4)$$

де D – визначник системи рівнянь; $A_{r,k+1}$ – алгебраїчне доповнення елементів $\bar{M}_{r,pl}$ визначника D ; $M_{o,pl}$ – середнє значення параметру граничного моменту рами; μ_r – складові частини вектору співвідношень граничних моментів рами; r – номер шарніру пластичності.

Стандарт міцності рами у просторі параметру навантаження визначиться:

$$\hat{q} = \sqrt{\sum_{r=1}^{k+1} \left(\sum_{r=1}^{k+1} \frac{A_{r,k+1}}{D} \cdot \hat{M}_{r,pl} \right)^2} = \rho_2 \cdot \hat{M}_{o,pl}. \quad (5)$$

Згідно з алгоритмом за складеною програмою були виконані розрахунки імовірності відмови тридцяти рам різноманітної конфігурації. Окремо призначено проектне, чи діюче навантаження. Розраховані імовірності відмови статично не визначених систем у цілому мають невелику розбіжність – від $3.99 \cdot 10^{-11}$ до $1.6 \cdot 10^{-16}$. Розрахунки виконані за мінливості міцності і навантаження 0,1 і 0,2 і відхилення розрахункових значень від середньої міцності і навантаження 3 і 5 стандартів відповідно. Це дається для ймовірності відмови окремого елемента значення $Q_{ісх} = 5,6 \cdot 10^{-8}$, запроєктованого згідно з нормами.

Оцінка надійності систем у цілому за одним механізмом руйнування чисельно виправдана, але дійсно існують механізми, які мають імовірність появи, близьку до найбільш імовірного механізму. Тому відповідальність елементів, вхідних до даних

механізмів, досить висока, і їх необхідно враховувати в імовірнісних розрахунках статично не визначених систем.

2. Імовірнісний метод граничної рівноваги

Розроблено імовірнісний метод граничної рівноваги для оцінки надійності сталевих статично не визначених рам при пластичних відмовах елементів.

Згідно з рівнянням зовнішньої і внутрішньої віртуальної роботи ймовірність відмови для окремого і-го механізму руйнування має вигляд:

$$P(E_i) = P\left(\sum_{j=1}^m \tilde{P}_j \cdot f_j > \sum_{k=1}^n \tilde{M}_{pl,k} \cdot v_k\right) = P(\tilde{F}_i > \tilde{R}_i), \quad (6)$$

де P_j – значення j-го зовнішнього навантаження; $M_{pl,k}$ – пластичний момент у k-му перетині із пластичним шарніром; f_j, v_k – повороти чи переміщення вузлів і стержнів відповідно.

Для рами визначаються основні (елементарні) механізми руйнування:

$$l = j - k, \quad (7)$$

де j – кількість небезпечних перетинів; k – ступінь статичної невизначеності рами.

До числа основних механізмів руйнування належать балочні, зсувні (поверхові) і вузлові механізми. Аргументами в рівняннях рівноваги виявляються випадкові параметри навантаження і міцності. Далі з основних механізмів шляхом їх сполучення отримують комбіновані механізми. Ці механізми відображають багатогранність форм відмов конструкції, що розглядаються. Під час отримання комбінованих механізмів проводиться відбір найбільш імовірних (пропонується, $Q_i > Q_{np} = 10^{-30}$). Виключаються також ті механізми, в яких кількість шарнірів пластичності більше, ніж ступінь статичної невизначеності рами плюс один.

Згідно з кінематичною теоремою граничної рівноваги конструкція руйнується під час реалізації не менше, ніж однієї з подій E_i . Тому ймовірність відмови системи в цілому визначається:

$$Q_s = P(E_1) + P(E_2) + \dots - P(E_1 \wedge E_2). \quad (8)$$

Відмову одночасно двох механізмів $P(E_i \wedge E_j)$ необхідно розглядати з урахуванням кореляційного зв'язку в залежності від спільних пластичних шарнірів і навантажень. Коефіцієнт парної кореляції, що застосовується для цього, між i -м і j -м механізмами знаходиться як:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m A_{ik} \cdot A_{jk} \cdot \sigma_r^2 + \sum_{l=1}^n B_{il} \cdot B_{jl} \cdot \sigma_s^2}{\sigma_i \cdot \sigma_j}, \quad (9)$$

де A_{ik}, A_{jk} – віртуальні переміщення вузлів, відповідно, для i -го и j -го механізму в k -му перетині; σ_r, σ_s – середнє квадратичне відхилення (стандарт) відповідно до несучої здатності і навантаження; B_{il}, B_{jl} – віртуальні переміщення стержнів від l -го навантаження; σ_i, σ_j – стандарт резерву міцності для i -го та j -го механізмів руйнування.

Розрахунок імовірності відмови двох механізмів одночасно $P(E_k \wedge E_l)$ з урахуванням кореляційної залежності за умови нормального розподілу випадкових величин виконується за виразом:

$$Q_{kl} = (0.5 - \Phi(v_k)) \cdot (0.5 - \Phi(v_l)) \cdot \sqrt{1 - r_{kl}^2} \cdot \exp(r_{kl} \cdot v_k \cdot v_l), \quad (10)$$

де Φ – таблична функція Лапласа; β_k, β_l – характеристики безпеки замінюються на

$$v_k, v_l : v_k = \frac{\beta_k}{\sqrt{1 - r_{kl}^2}}, \quad v_l = \frac{\beta_l}{\sqrt{1 - r_{kl}^2}}.$$

Імовірнісний метод граничної рівноваги реалізовано під час розрахунку імовірності відмови статично не визначених систем

також методу узагальненої коваріації¹³ та методу PNET¹⁴. Усі ці методи в області малих ймовірностей дають близькі результати. Схема розрахунку імовірнісним методом граничної рівноваги приведена на рис. 2.

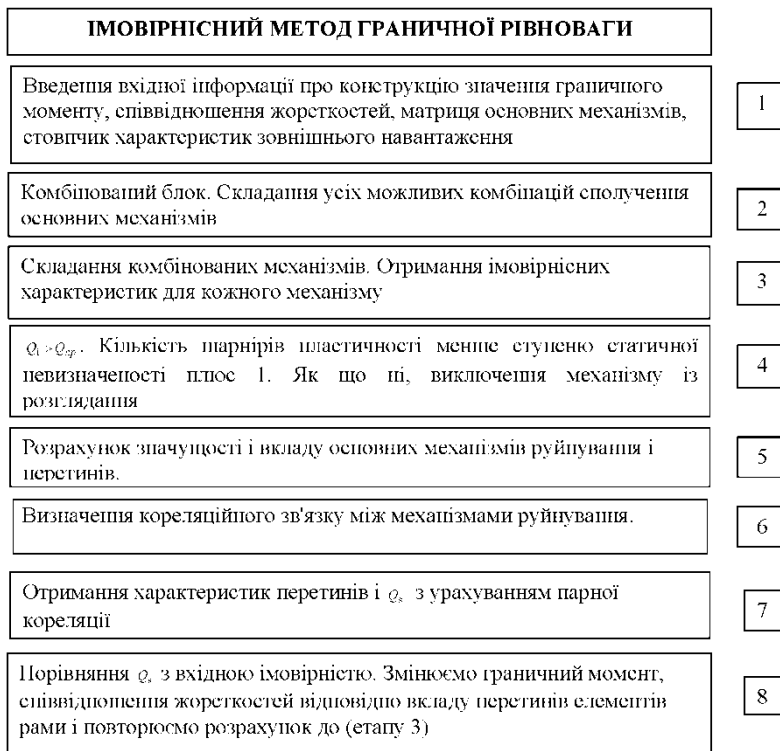


Рис. 2. Блок-схема розрахунку ймовірнісного методу граничної рівноваги

Одним із факторів, які впливають на несучу здатність елементів статично не визначених систем, є поздовжня сила. Така сила

¹³ Fan W., Yang P., Ang A. H-S., Li Z. Analysis of complex system reliability with correlated random vectors, *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2016, Vol. 45. P. 61–69. DOI: 10.1016/j.probengmech.2016.03.004.

¹⁴ Ditlevsen O., Madsen H.O. Structural reliability methods. *Technical University of Denmark maritime engineering*. 2003. 323 p.

враховується в імовірнісний метод граничної рівноваги для стиснуто-зігнутих стержнів як частка у граничному згинаючому моменті:

$$M_{pl,n} = \left[1 - \left(\frac{N}{N_{pl}} \right)^j \right] \cdot M_{pl} = m_k \cdot M_{pl}, \quad (11)$$

де j – показник ступеню, для двотавру рівний 1.5; N – повздовжня сила в елементі; N_{pl} – пластична несуча здатність стиснутого елемента; M_{pl} – пластичний згинаючий момент для даного елемента.

Коефіцієнт умов роботи m_k враховує вплив повздовжньої сили в стиснуто-зігнутих елементах, попередньо його приймають рівним 0.85.

Для отримання можливості впливати на статично невизначені системи без зниження її працездатності необхідно використовувати таку характеристику, як вклад i -го елемента в надійність конструкції у цілому R_s , він знаходиться як:

$$B_i = R_i \cdot \xi_i = R_i \cdot \frac{dR_s}{dR_i} = Q_s - Q_{s1}, \quad (12)$$

де ξ_i – значущість i -го елемента; Q_{s1} – імовірність відмови системи при надійності окремого елемента $R_i = 1$.

У роботі показано, що ефективно використовувати визначення вкладу окремих основних механізмів руйнування, а не окремих небезпечних перетинів.

Для врахування статистичної природи міцності і навантаження пропонується вводити в розрахунок сталевих статично невизначених рам коефіцієнт надійності γ_s . Коефіцієнт надійності знаходиться таким чином:

$$\gamma_s = \frac{M_{o(pl)}}{M_{o(VMPR)}}, \quad (13)$$

де $M_{o,(pl)}$ – граничний момент, отриманий із пружно-пластичного розрахунку рами; $M_{o,(vmpr)}$ – граничний момент, отриманий за імовірнісним методом граничної рівноваги.

Використовувати γ_s можна під час підбору перетинів елементів сталевих рам як коефіцієнт умов роботи. Під час розрахунку з урахуванням однопараметричного навантаження до тридцяти рам отримані коефіцієнти 1.2-1.4. Їх можливе використання забезпечить значну економію матеріалу.

Для практичного використання в інженерних розрахунках сталевих статично не визначених рам рекомендується коефіцієнт $\gamma_s = 1.1$. Його введення не вимагає додаткових розрахунків надійності рам. Використання більших коефіцієнтів потребує розрахунків згідно з розробленим методом.

Для врахування випадкової природи діючих на конструкцію зовнішніх факторів в імовірнісному методі граничної рівноваги використовується критерій багатопараметричного навантаження. Кожне навантаження подається як випадковий параметр. Для комбінованого механізму сумарне навантаження складається згідно із правилами складання випадкових величин з обов'язковим урахуванням кореляційних зв'язків між навантаженнями.

Імовірнісний розрахунок завершується рівнянням імовірності відмови системи в цілому Q_s і ймовірності відмови одного перетину Q_{icx} , запроєктованого згідно з нормами.

Виконані розрахунки сталевих статично невизначених рам із реальним та пропорціональним навантаженням у пружній та пружно-пластичній стадії. За імовірнісним методом граничної рівноваги розраховано 30 рам різного призначення і конфігурації (одно-, двох-, трьохповерхові, одно-, двох-, трьохпролітні). Рами завантажені діючими чи проектними навантаженнями. Відбувалось порівняння згинаючих граничних моментів, які приходяться на одиничну жорсткість.

За результатами обчислення було підтверджено, що введення пружно-пластичного розрахунку у практику проектування статично не визначених систем дозволяє урахувати у середньому 10% резерву несучої здатності рам у порівнюванні із пружним розрахунком. Розрахунок імовірнісним методом граничної рівноваги під час порівняння ймовірності відмови рами з імовірністю відмови одного елемента до першого дозволяє урахувати додатково у середньому 20-25% резерву несучої

здатності. Розрахунок імовірнісним методом надає такі результати в порівнянні із пружно-пластичним розрахунком.

За розробленою методикою визначення значущості, вкладу і питомого вкладу окремих основних механізмів руйнування були проведені розрахунки тридцяти рам. За результатами складені діаграми питомих вкладів окремих основних механізмів. Під час дослідження діаграм можна відмітити, що питомі вклади в цілому розподіляються нерівномірно для більшості рам. Розкид вкладів різних елементів (10-30% за величиною несучої здатності) відкриває можливе поле діяльності з їх порівняння й урахування при цьому виникаючих резервів конструкцій. На діаграмах питомих вкладів для більшості рам виділяються один або два (частіше один) елементарних механізми, які складають основу найбільш імовірного механізму.

Розбіжність питомих вкладів окремих перетинів у надійність рами в цілому досягає в середньому 10% і наближається до питомих вкладів окремих основних механізмів руйнування.

ВИСНОВКИ

Дана робота присвячена розвитку імовірнісного розрахунку статично не визначених сталевих рам різного призначення і конфігурації. Розрахунок проведено з урахуванням реальної роботи матеріалу і навантаження. Основні результати роботи полягають у таких пунктах:

1) розроблена методика оцінки надійності статично не визначених систем методом перебору станів. У даному методі використовуються графоаналітичні перетворювання і враховуються пластичні і крихкі відмови елементів;

2) для отримання нижньої оцінки ймовірності відмови конструкції в цілому запропоновано метод розрахунку. Даний метод використовує найбільш імовірний механізм руйнування на основі методу граничної рівноваги;

3) запропонований логіко-імовірнісний метод обчислення ймовірності відмови системи, яка враховує всі моделі руйнування конструкції;

4) для визначення ймовірності відмови сталевих статично не визначених систем розроблений імовірнісний метод граничної рівноваги. В обчисленнях ураховується різноманітність форм відмов конструкції і кореляційний зв'язок між механізмами руйнування. Також здійснюється порівняння ймовірності відмови системи з імовірністю відмови одного елемента, запроєктованого згідно з нормами.

Розроблено алгоритм оцінки значущості, вкладу і питомого вкладу окремих основних механізмів руйнування і небезпечних перетинів елементів статично не визначених сталевих рам у надійність системи в цілому.

Запропоновано метод визначення коефіцієнту надійності для статично не визначених систем γ_s під час однопараметричного та багатопараметричного навантаження конструкцій. Даний метод ураховує випадкові характеристики міцності і навантаження. Згідно з імовірнісним методом граничної рівноваги розраховані коефіцієнти γ_s до 30-ти рам, що дорівнюють 1.2-1.4. Використання γ_s дасть економію матеріалу 5-20%. У практичних розрахунках сталевих статично не визначених систем рекомендується застосовувати $\gamma_s = 1.1$.

АНОТАЦІЯ

Мета роботи складається з розроблення методики й імовірнісного розрахунку та оцінки параметрів надійності сталевих статично не визначених рам та рекомендацій до зниження їх матеріалоемності шляхом регулювання запасів несучої здатності елементів.

Розроблено метод оцінки параметрів надійності сталевих статично не визначених рам методом розгляду усіх працездатних становищ. Використано логіко-імовірнісні методи дослідження стохастичних характеристик роботи статично не визначених систем. Отримано методику оцінки ймовірності відмови статично не визначених систем на основі методу граничної рівноваги з урахуванням кореляції окремих схем руйнування. Запропоновано метод розрахунку значущості і вкладу окремих елементів рам та їх впливу на ймовірність відмови системи в цілому. Пропонується практичний метод проектування сталевих статично не визначених рам із використанням коефіцієнту надійності сталевих статично не визначених конструкцій γ_s . Наукова новизна роботи полягає в розробленні схеми визначення ймовірності відмови рам методом оцінки робочої ємності. Зокрема, розглядаються крихкі і пластичні відмови перерізи рами. Виявлені алгоритми розрахунку ймовірності відмови сталевих рам імовірнісним методом граничної рівноваги. Визначені показники значущості окремих елементів сталевих рам. Представлений чисельний експеримент з розробленими програмами на ПЕОМ для оцінки ймовірності відмови сталевих рам різних

перерізів. Запропонований до використання коефіцієнт надійності сталевих статично не визначених конструкцій γ_s .

Практичне значення роботи складається з більш повного врахування реальної роботи конструкцій і ймовірнісної природи міцності та навантаження, застосування коефіцієнту надійності. Виявлені можливості отримання більш економічних рам під час проектування нових, а також реконструкції існуючих будівель та споруд. На основі запропонованої методики складені алгоритми і розроблені програми на ПЕОМ для ймовірнісного розрахунку сталевих статично не визначених рам різноманітного призначення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Cheng Y.M., Li D.Z., Li L., Sun Y.J., Baker R., Yang Y. Chapter 4 – System-Level “Limit equilibrium method based on an approximate lower bound method with a variable factor of safety that can consider residual strength”. *Computers and Geotechnics*. 2011. Vol. 38. No. 5. P. 623–637. DOI:10.1016/j.compgeo.2011.02.010.

2. Huang G., Chen X., Yang Zh., Wu B. Exact analysis and reanalysis methods for structures with nonlinear boundary conditions. *Computers & Structures*. 2018. Vol. 198. P. 12–22. DOI: 10.1016/j.compstruc.2018.01.004.

3. Wang J. Chapter 4 – System-Level “Fail-Safe”. *Safety Theory and Control Technology of High-Speed Train Operation*. 2018. P. 125–144. DOI: 10.1016/B978-0-12-813304-0.00004-9.

4. Tabbuso P., M.J. Spence S., Palizzolo L., Pirrotta A., Kareem A. An efficient framework for the elasto-plastic reliability assessment of uncertain wind excited systems, *Structural Safety*. 2016. Vol. 58. P. 69–78. DOI: 10.1016/j.strusafe.2015.09.001.

5. Zhang H., R. Ellingwood B., J.R. Rasmussen K. System reliabilities in steel structural frame design by inelastic analysis, *Engineering Structures*. 2014. Vol.58. P. 341–348. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.10.003.

6. Najafi L.H., Tehranizadeh M. Equation for achieving efficient length of link-beams in eccentrically braced frames and its reliability validation. *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. Vol. 130. P. 53–64. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.11.020.

7. Park J., Kim J. Fragility analysis of steel moment frames with various seismic connections subjected to sudden loss of a column. *Engineering Structures*. 2010. Vol. 32. No. 6. P. 1547–1555. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.02.003.

8. Zacharenaki A. E., Fragiadakis M., Papadrakakis M. Reliability-based optimum seismic design of structures using simplified

performance estimation methods, *Engineering Structures*. 2013. Vol. 52, P. 707–717. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.03.007.

9. Lin S.C., Kam T.Y. Buckling failure probability of imperfect elastic frames”. *Computers & Structures*, 1992. Vol. 44. No. 3. P. 515–524. DOI: 10.1016/0045-7949(92)90384.

10. W. Liu, J.R. Rasmussen K., Zhang H. Systems Reliability for 3D Steel Frames Subject to Gravity Loads. *Structures*. 2016. Vol. 8. P. 170–182. DOI: 10.1016/j.istruc.2016.06.002.

11. Le Linh A., Bui-Vinh T., Ho-Huu V., Nguyen-Thoi T. An efficient coupled numerical method for reliability-based design optimization of steel frames, *Journal of Constructional Steel Research*. 2017. Vol. 138. P. 389–400. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.08.002.

12. Thai H.-T., Uy Br., Kang W.-H., Hicks S. System reliability evaluation of steel frames with semi-rigid connections, *Journal of Constructional Steel Research*. 2016. Vol.121. P. 29–39. DOI: 10.1016/j.jcsr.2016.01.009.

13. Taras A., Huemer St., On the influence of the load sequence on the structural reliability of steel members and frames, *Structures*. 2015. Vol. 4. P. 91–104. DOI: 10.1016/j.istruc.2015.10.007.

14. Fan W., Yang P., Ang A. H-S., Li Z. Analysis of complex system reliability with correlated random vectors. *Probabilistic Engineering Mechanics*. 2016. Vol. 45. P. 61–69. DOI: 10.1016/j.probengmech.2016.03.004.

15. Ditlevsen O., Madsen H.O. Structural reliability methods. *Technical University of Denmark maritime engineering*. 2003. 323 p.

Information about authors:

Chichulina K. V.,

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Economics,
Entrepreneurship and Marketing
National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”
24, Pershotravneviy, Poltava, 36011, Ukraine

Chichulin V. P.,

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Metal,
Wood and Plastic Constructions
National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”
24, Pershotravneviy, Poltava, 36011, Ukraine