

УДК 517.11+519.92+539.3

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.260319.89.410

ОЦІНКА РЕСУРСУ КОНСТРУКЦІЇ З ТРІЩИНОЮ НОРМАЛЬНОГО РОЗРИВУ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОГО МОДЕЛЮВАННЯ

ВОЛЧОК Д. Л., канд. техн. наук, доц.

Кафедра будівельної механіки та опору матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, Дніпро, 49600, Україна, тел. +38 (056) 756-33-51, e-mail: Denys.L.Volchok@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7914-321X

Анотація. Розглядаються питання оптимального проектування конструкції (ОПК), що працює в умовах обмежень міцності, стійкості та жорсткості. Як додаткове обмеження розглядається можливість присутності тріщини в розтягнутому елементі. Запропоновано алгоритм розв'язання задачі методом динамічного програмування. Отримано чисельно-аналітичний розв'язок у вигляді рекурентних формул. Крім детермінованого розв'язання ОПК пропонується ситуація, коли існує тріщина нормального розриву. Величина розміру тріщини задається нечітким чином. Оцінюється вплив нечіткого завдання початкової довжини тріщини для окремого елементу конструкції на кількість циклів навантаження за умови неруйнування. Для ферми, що складається з чотирьох елементів в детермінованій постановці оцінено вплив наперед заданої точності розрахунку на збіжність процесу при розв'язанні задачі ОПК методом динамічного програмування. Для випадку достатньої наперед заданої точності для ферми виконано пошук впливу величини довжини тріщини на площі поперечних перетинів стержнів та об'єм конструкції. Проведено числові експерименти впливу нечіткого завдання довжини тріщини при різних значеннях розкиду для її модального значення на об'єм конструкції. **Висновок.** Збіжність розв'язання починається тоді, коли відносна похибка приблизно дорівнює 0,003. Побудовані залежності об'єму стержневої конструкції від довжини тріщини показують його значне зростання після величини довжини тріщини 15 см у детермінованій задачі. Дослідження показує принципову можливість використання теорії нечітких множин в задачах оптимального проектування шарнірно-стержневих систем. Як приклад, у процедурі було використано число з трикутною формою функції приналежності. Такі етапи, як фазифікація, оптимальне проектування і дефазифікація, дозволяють оцінити результат нечіткої задачі. Таким чином, у статті показано результат можливого значення об'єму для ситуації, коли модальне значення довжини тріщини становить 25 мм, а відхилення має область від 0 до 20 %.

Ключові слова: шарнірно-стержнева система; оптимальне проектування; динамічне програмування; нечітке моделювання; фазифікація; дефазифікація

ОЦЕНКА РЕСУРСА КОНСТРУКЦИИ С ТРЕЩИНОЙ НОРМАЛЬНОГО РАЗРЫВА НА ОСНОВЕ НЕЧЁТКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

ВОЛЧОК Д. Л., канд. техн. наук, доц.

Кафедра строительной механики и сопротивления материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днiпро, 49600, Украина, тел.+38 (056) 756-33-51, e-mail: Denys.L.Volchok@gmail.com, ORCIDID: 0000-0002-7914-321X

Аннотация. Рассматриваются вопросы оптимального проектирования конструкции (ОПК), работающей в условиях ограничений по прочности, устойчивости и жесткости. Как дополнительное ограничение рассматривается возможность присутствия трещины в растянутом элементе. Предложен алгоритм решения задачи методом динамического программирования. Получено численно-аналитическое решение в виде рекуррентных формул. Кроме детерминированного решения ОПК предлагается ситуация, когда существует трещина нормального разрыва. Величина размера трещины задается нечетким образом. Оценивается влияние нечеткого задания начальной длины трещины для отдельного элемента конструкции на количество циклов нагружения при неразрушении. Для фермы, состоящей из четырех элементов, в детерминированной постановке оценено влияние заранее заданной точности расчета на сходимость процесса при решении задачи ОПК методом динамического программирования. Для случая достаточной заранее заданной точности для фермы выполнен поиск влияния величины длины трещины на площади поперечных сечений стержней и объем конструкции. Проведены численные эксперименты влияния нечеткого задания длины трещины при различных значениях разброса для её модального значения на объем конструкции.

Ключевые слова: шарнирно-стержневая система; оптимальное проектирование; динамическое программирование; нечеткое моделирование; фазификація; дефазификація

ESTIMATION OF THE RESOURCE OF A STRUCTURE WITH THE TENSILE CRACK ON THE BASIS OF FUZZY SIMULATION

VOLCHOK D.L., *Cand. Sc.(Tech), Ass. Prof.*

Department of structural mechanics and strength of materials, State Higher Educational Institution "Prydnipravska State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernyshevskoho St., Dnipro 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 756-33-51, e-mail: Denys.L.Volchok@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7914-321X

Abstract. Statement and solution of the problem. The problems of optimal design of structure, which is operated under the constraints of strength, stability and rigidity are considered. As an additional restriction, the possibility of the crack presence in a stretched element is considered. With a small, compared with the yield strength, destructive stress, the construction element is in critical condition. So that, the calculation of strength can be carried out according to the well-known Irwin criterion of a linear destructive mechanics. An algorithm for solving the optimal design problem using dynamic programming is proposed. A numerical-analytical solution is obtained in the form of recurrent formulas. In addition to the deterministic optimal design solution there is a situation where a tensile crack in the rod of the truss is considered. The size of the crack is not clearly defined. The influence of the fuzzy problem of the initial crack length on the number of load cycles during non-destruction for separate elements of the structure is estimated. The truss consists of four elements in a deterministic formulation. The effect of a predetermined accuracy of calculation on the convergence of the process, when the optimal design problem is solved with using dynamic programming, is estimated. For the case of sufficient predetermined accuracy for the truss, a search was made for the influence of the length of the crack on the cross-sectional area of the rods and the volume of the structure. Numerical experiments of the influence of the fuzzy problem of the crack length for different values of the modal value spread on the volume of the structure are carried out. **Conclusion.** Convergence of the solution starts when relative error is approximately equal 0.003. Influence of crack length on the volume of rod structure shows its growing after the value of 15 cm in deterministic problem. Investigation shows the principle possibility of the theory of fuzzy sets using in problems of optimal design of hinged-rod systems. As an example, the fuzzy numbers with triangular form of membership function were used in the procedure. The stages such as fuzzification, optimal design and defuzzification let us estimate the result of fuzzy problem. So, the result of the possible value of volume for situation, when modal value of crack length is 25 mm and deviation has different domain, is shown in the article.

Keywords: *hinged-rod system; optimal design; dynamic programming; fuzzy simulation; fuzzification; defuzzification*

Вступ. Сучасний рівень розвитку механіки руйнування, теорії надійності дає змогу оцінити працездатність елементів конструкції з урахуванням невизначеності впливу силових факторів, геометричних і механічних характеристик, процесів розвитку макротріщини та довговічності. В механіці, як правило, розглядається невизначеність стохастичної природи. Але останнім часом, крім такої, з'явилась можливість уведення інших видів невизначеності, таких як нечіткість і неточність [7].

Нечіткість припускає опис вихідних параметрів за допомогою дескрипторів виду «приблизно», «близько до», «мабуть», «в інтервалі» та інше, а неточність - опис параметрів за допомогою інтервалів з їх неточними межами. Для роботи з такими об'єктами в самому кінці минулого сторіччя виник у математиці новий напрямок - теорія нечітких і неточних множин [6; 8] – методи «м'яких обчислень».

1. Детермінована задача оптимального проектування статично визначеної ферми.

Запишемо таку задачу ОПК пошуку об'єму та площ поперечних перерізів, у якій обмеженнями виступають умова жорсткості, міцності та стійкості:

$$(V^*, A^*) = \arg \left\{ \min_{A \in \Omega} V(A) \mid y_j(A) \leq [y] \leq y^{\max}; \sigma_i(A) \leq R_i^* \right\}$$
$$A = (A_1, A_2, \dots, A_n); \quad (1)$$

де:

V - об'єм пружної системи;

$A = (A_1, A_2, \dots, A_n)$;

- вектор, компоненти якого є площі перерізів;

y^{\max}

– максимальне значення переміщення вузла для випадку, коли перерізи стержнів розраховуються із умов міцності;

R_0 – розрахунковий опір;

φ – коефіцієнт повздовжнього згину;

n – число стержнів в фермі;

j - номер вузла, переміщення вертикальне (горизонтальне) якого обмежене величиною $[y]$.

Переміщення в ШСС j вузла (обмеження по жорсткості) визначаються за формулою Мора:

$$y_j = \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{A_i}; D_i = \frac{N_i \bar{N}_i l_i}{E}, \quad (2)$$

де N_i, \bar{N}_i - зусилля в i -ому стержні відповідно від дії зовнішнього навантаження P і одиничного навантаження, прикладеного в j -ому вузлі.

$$\sigma_i = \frac{|N_i|}{A_i}; R_i^* = \begin{cases} R_0, N_i > 0 \\ \varphi R_0, N_i < 0 \end{cases}. \quad (3)$$

Як бачимо з (3), обмеження на міцність працюють для розтягнутих стержнів і на стійкість для стиснутих стержнів.

2. Модель руйнування розтягнутого елемента за наявності тріщини.

Припущення про можливість нормального функціонування силової конструкції за наявності тріщини спричинило розвиток методів розрахунку на тріщиностійкість та живучість. За невеликих, порівняно з границею текучості, руйнівних напружень елемент конструкції перебуває в критичному стані. І тому розрахунок на міцність можна вести за відомим критерієм Ірвіна лінійної механіки руйнування:

$$K \leq K_{IC}, \quad (4)$$

де K - коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН), а K_{IC} - його критичне значення - в'язкість руйнування за плоского деформування. У крихкому стані за допомогою коефіцієнта K_{IC} зв'язують руйнівне навантаження і критичну довжину a_* тріщини таким співвідношенням $K = K_{IC}$. Коефіцієнт КІН подається виразом [5]:

$$K(a) = \sigma \sqrt{\pi a} Y(\lambda); Y(\lambda) = 1.12; \lambda = \frac{a}{b} < 0.7,$$

де a - характерний розмір (довжина) тріщини; σ - параметр навантаження - значення нормального напруження; $Y(\lambda)$ - функція геометрії тріщини; b - ширина полоси з поперечною тріщиною за осьового розтягнення.

Полоса (рис. 1) розглядається як елемент конструкції, з крайовою поперечною тріщиною нормального розриву, що розтягнута силами, які еквівалентні нормальним напруженням σ^{\max} і σ^{\min} в межах одного циклу. За дії змінного навантаження сталий ріст тріщини описується рівнянням Периса [5]:

$$\frac{da}{dN} = f(a, \sigma), \quad (5)$$

де N - число циклів навантаження.

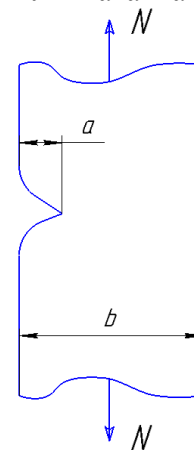


Рис. 1. Полоса з крайовою поперечною тріщиною нормального розриву / Fig. 1. Band with boundary transverse crack of normal rupture

Умова відмови, що означає перехід конструкції в непрацездатність, має вигляд $a|_{N=N^*} = a_*$, де N^* - число циклів навантаження (ресурс конструкції), за яке тріщина збільшить свою довжину від $a_0 = a|_{N=0}$ до a_* . Розв'язання диференціального рівняння (5) з урахуванням граничних умов дає

$$N^* = \frac{2}{\beta(2-n)} (\sqrt{a^{2-n}} - \sqrt{a_0^{2-n}}), \beta = A(1.12\sqrt{\pi}\Delta\sigma)^n, \quad (6)$$

де n, A - емпіричні коефіцієнти. Критична довжина тріщини подається таким виразом:

$$a_* = \left(\frac{K_{IC}}{1.12\sqrt{\pi\sigma_{\max}}} \right)^2 \quad (7)$$

3. Визначення області допустимих розв'язків у задачі ОПК.

У результаті синтезу обмежень задачі ОПК ферми (1) та нових обмежень (4), отриманих із моделі неруйнування розтягнутого елемента, визначимо область допустимих розв'язків. З умови міцності для i -го елемента маємо:

$$\sigma_i = \frac{|N_i|}{A_i} \leq R_i^* \rightarrow A_i^0 = \frac{|N_i|}{R_i^*} \quad (8)$$

З умови неруйнування маємо:

$$1.12 \frac{|N_i|}{A_i} \sqrt{\pi a_0} \leq K_{IC} \rightarrow A_i^* = 1.12 \frac{|N_i|}{K_{IC}} \sqrt{\pi a_0} \quad (9)$$

Область Ω_i допустимого розв'язку

$$\Omega_i = \{A_i \mid A_i \geq A_i^- = \max(A_i^0, A_i^*)\} \quad (10)$$

Пошук $\{A_i\}$; $i = 1, 2, \dots, n$ виконується за допомогою методу динамічного програмування при виконанні умови жорсткості [1; 3].

4. Метод динамічного програмування.

Уведемо до розгляду функцію Беллмана

$$f_i(d_i) = \min_{A_i, A_{i+1}, \dots, A_n} \sum_{j=i}^n l_j A_j \quad (11)$$

- мінімальне значення об'єму ШСС в припущенні, що процес пошуку $\{A_i^{opt}\}$; $j = i, i+1, \dots, n$ починається з елемента $j=i$ і закінчується елементом $j=n$. Аргументом цієї функції є величина «ресурсу» d_i , яка пов'язана зі змінною проектування A_i таким співвідношенням

$$d_i = \sum_{j=i}^n D_j / A_j; \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad 0 \leq d_i \leq [y]. \quad (12)$$

Із означення (12) випливає

$$d_i = \frac{D_i}{A_i} + \sum_{j=i+1}^n D_j / A_j \rightarrow d_i = \frac{D_i}{A_i} + d_{i+1}$$

звідки маємо:

$$d_{i+1} = d_i - \frac{D_i}{A_i} \quad (13)$$

За означення (11) з урахуванням (13) побудуємо на основі принципу Беллмана [3] таке рівняння:

$$f_i(d_i) = \min_{A_i} \left[l_i A_i + \min_{A_{i+1}, A_{i+2}, \dots, A_n} \sum_{j=i+1}^n l_j A_j \right] \rightarrow$$

$$f_i(d_i) = \min_{A_i} [l_i A_i + f_{i+1}(d_{i+1})]$$

$$i = n-1, n-2, \dots, 1; \quad d_1 = [y]; \quad f_{n+1}(d_{n+1}) \equiv 0 \quad (14)$$

Вираз (14) є основним функціональним рівнянням методу динамічного програмування. За термінологією цього методу d_i^- є змінна стану, A_i^- є змінною керування.

За роботою (5) наведено аналітично-числову процедуру динамічного програмування, яка побудована на основі послідовних наближень.

Для $i=n$ із означень (12) і (13) маємо:

$$d_n = D_n / A_n; \quad A_n = D_n / d_n \quad (15)$$

$$f_n(d_n) = \min_{A_n} l_n A_n = l_n D_n / d_n \quad (16)$$

Розглянемо випадок, коли $i = n-1$. Рівняння (14) для цього випадку перепишемо у вигляді:

$$f_{n-1}(d_{n-1}) = \min_{A_{n-1}} [l_{n-1} A_{n-1} + f_n(d_n)];$$

$$d_n = d_{n-1} - D_{n-1} / A_{n-1} \quad (17)$$

Рівняння (17) з урахуванням означення (16) буде таким:

$$f_{n-1}(d_{n-1}) = \min_{A_{n-1}} \left[l_{n-1} A_{n-1} + \frac{l_n D_n}{d_{n-1} - D_{n-1} / A_{n-1}} \right]$$

Виконуючи далі аналогічні дії для $i = n-2, n-3, \dots, 1$ методом математичної індукції отримаємо таке рівняння:

$$f_i(d_i) = \min_{A_i} H(A_i), \quad (18)$$

де:

$$H(A_i) = l_i A_i + T_i + \frac{D_n l_n}{d_i - S_i^* - D_n / A_i};$$

$$T_i = \sum_{j=i}^{n-1} l_j A_j \text{ для } i = 1, 2, \dots, n-2;$$

$$S_i^* = \begin{cases} \sum_{j=i}^{n-1} D_j / A_j^* \text{ для } i = 1, 2, \dots, n-2; \\ 0, \text{ для } i = n-1. \end{cases}$$

Із необхідних умов існування екстремуму визначимо шуканий переріз A_i :

$$A_i^0 = (D_{ik} + \sqrt{l_n D_{nk} D_{ik} / l_i}) / a_i^*; i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (19)$$

$$A_n^0 = D_{nk} / d_n.$$

Оптимальний розв'язок при цьому формулюється як

$$A_i^{opt} = \begin{cases} A_i^0, & A_i^0 > A_i^- \\ A_i^-, & A_i^0 \leq A_i^- \end{cases} \quad (20)$$

5. Числова ілюстрація оцінки ресурсу елемента конструкції з тріщиною.

Нехай матеріал елемента конструкції в прикладі виготовлено із сталі А514, має

$$\sigma_T = 700 \text{ Н / мм}^2$$

характеристики

$$K_{IC} = 5300 \text{ Н} \cdot \text{мм}^{3/2}$$

Параметри циклу

$$\sigma_{max} = 320 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$$

навантаження нехай будуть

$$\sigma_{min} = 175 \frac{\text{Н}}{\text{мм}^2}$$

. За роботою [4] візьмемо експериментальні значення емпіричних коефіцієнтів $A = 3.553 \cdot 10^{-13}$ та $n = 2.95$.

Нехай величина довжини тріщини задається як «приблизно» дорівнює 7,6 мм. Фазифікація цього висловлювання здійснюється на основі функції належності трикутного виду [2].

Розглянемо три випадки завдання нечіткого числа:

$$a_0(6.1; 7.6; 9.1)_\Delta, a_0(7; 7.6; 8.5)_\Delta, a_0(7.4; 7.6; 8)_\Delta$$

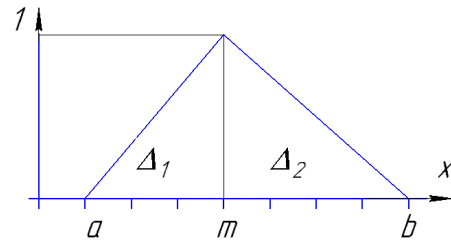


Рис. 2. Інформаційна гранула нечіткої величини, розподілена за трикутним законом / Fig. 2. Information granule of fuzzy value, distributed by triangular law

Використовуючи (6), (7) знайдемо відповідні нечіткі числа - кількість циклів навантаження:

$$N(95741; 81889; 71570)_\Delta$$

$$N(86901; 81889; 75374)_\Delta$$

$$N(83493; 81889; 78860)_\Delta$$

Етап дефазифікації нечітких чисел [7] дозволяє отримати прогнозовані значення кількості циклів відповідно $N^{def} = 80271$, $N^{def} = 81513$, $N^{def} = 81532$ та порівняти їх із числом циклів, отриманим при детермінованому (чіткому) значенні довжини тріщини $N = 81889$. Таким чином, розбіжність із детермінованим значенням складає від 0.4 до 2 %.

6. Числова ілюстрація оптимального проектування ферми.

Розглянемо чотири-елементну статично визначену ферму, схема якої наведена на рисунку 2. Основні геометричні

характеристики ферми будуть: $l_1 = 1000\sqrt{2}$

$$\text{мм, } l_2 = l_3 = 1000 \text{ мм, } l_4 = 500\sqrt{2} \text{ мм.}$$

Навантаження на ферму буде $P_1 = 4$ кН.

$P_2 = 4$ кН. Для подальших розрахунків

$$\text{візьмемо модуль пружності } E = 207 \frac{\text{кН}}{\text{мм}^2},$$

$$\text{розрахунковий опір } R_0 = 0.15 \frac{\text{кН}}{\text{мм}^2}, \varphi = 0.6,$$

$$\text{початкову площу перерізів } A_i \approx 100 \text{ мм}^2;$$

$$i = 1, 2, \dots, n; n = 4; j = 1;$$

Допустиме переміщення $[u]_{\text{доп}} = 1.6$; та
 максимальне переміщення $u_{\text{макс}} = 3.41$;

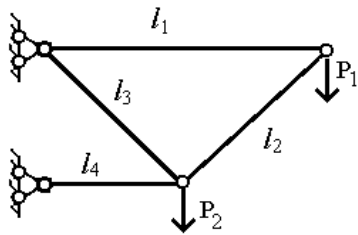


Рис. 3. Схема ШСС / Fig. 3. Scheme of the ShSS

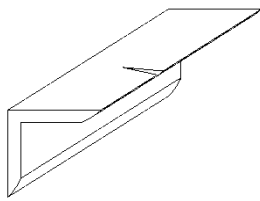


Рис. 4. Кутник із тріщиною / Fig. 4. Corner with a crack

6.1. Детермінований випадок. Збіжність процедури.

Для оцінювання достатньої точності розрахунків ШСС (рис. 3) за пропонуваним підходом оптимальний проект (об'єм та площа перерізів) від заданої наперед точності розв'язку для випадку конструкції без крайової тріщини нормального розриву наведено на рисунках 5 та 6, із яких видно, що процес наближення за функціоналом V^{opt} і розв'язком A_i^{opt} ; $i = \overline{1, 4}$ майже однаковий, що робить пропонувану процедуру достовірною. Для подальших розрахунків вибирається точність $\varepsilon = 10^{-9}$.

6.2. Оптимальне проектування за наявності тріщини довжиною a_0 .

Нехай ферма має крайову тріщину нормального розриву довжиною a_0 в розтягнутому елементі l_3 (рис. 3, 4). В такому випадку до умов жорсткості, міцності та стійкості додається умова неруйнування конструкції. Залишаючи геометричні, механічні параметри ферми та навантаження незмінними, обчислимо оптимальний об'єм конструкції залежно від a_0 (рис. 7). Пошук виконано при

$K_{IC} = 5300 \text{ H} \cdot \text{мм}^{3/2}$. Як бачимо, об'єм від величини довжини тріщини починає зростати відносно оптимального проекту без тріщини $V_{\text{макс}}^* = 519805$.

Аналізуючи зміну оптимального значення площ перерізів (рис. 8) бачимо, що з деякого моменту величина оптимальної площі третього стержня починає зростати, а величини площ інших стержнів зменшуватись відносно розв'язання оптимального проекту без тріщини $A_{1\text{макс}}^0 = 79.23$, $A_{2\text{макс}}^0 = 112.05$, $A_{3\text{макс}}^0 = 158$, $A_{4\text{макс}}^0 = 194.08$. Пояснити це можна тим, що починає впливати на результат умова жорсткості.

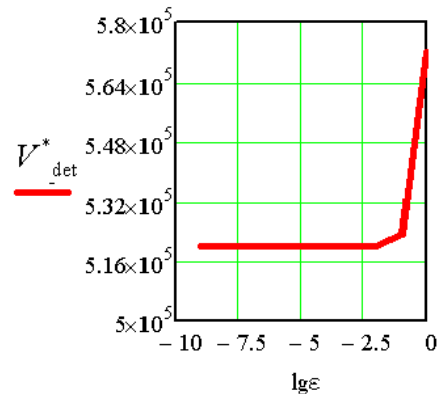


Рис. 5. Збіжність об'єму V_{det}^* від заданої точності ε / Fig. 5. Convergence of the volume V_{det}^* from the given accuracy ε

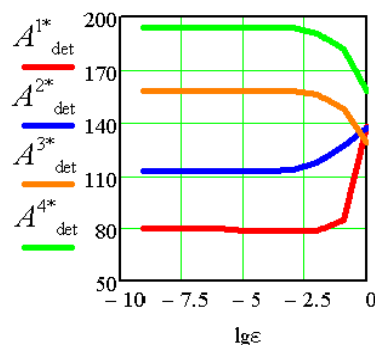


Рис. 6. Збіжність площ перерізів стержнів A_{det}^{1*} , A_{det}^{2*} , A_{det}^{3*} , A_{det}^{4*} від заданої точності ε / Fig. 6. Convergence of the cross-sectional areas of the rods A_{det}^{1*} , A_{det}^{2*} , A_{det}^{3*} , A_{det}^{4*} from the given accuracy ε

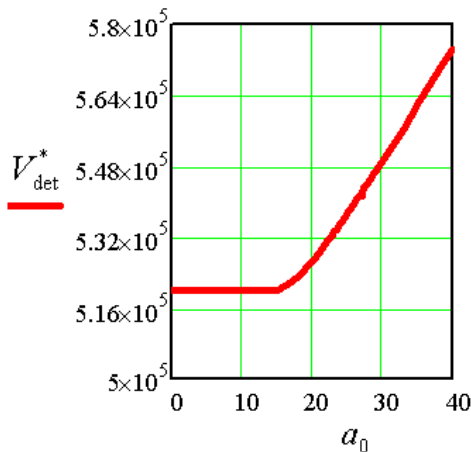


Рис. 7. Вплив довжини тріщини a_0 , (мм) на характеристику оптимального проекту V^*_{det} , (мм³) / Fig. 7. Effect of the crack length a_0 , (mm) on the characteristic of the optimal project V^*_{det} , (mm³)

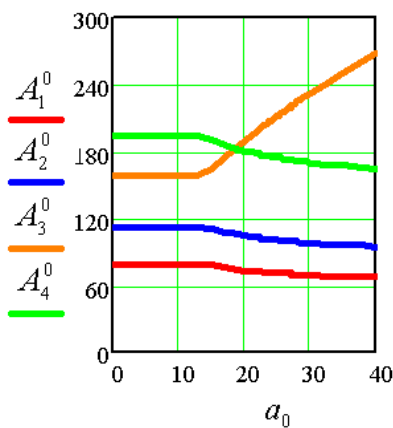


Рис. 8. Вплив довжини тріщини a_0 , (мм) на характеристики оптимального проекту – площі перерізів (мм²) / Fig. 8. Effect of crack length a_0 , (mm) on the characteristics of the optimal project – section area (mm²)

6.3. Нечітке моделювання ШСС із тріщиною.

Нехай величина довжини крайової тріщини в третьому стрижні ферми подано нечітким чином із функцією належності трикутного виду (рис. 2) і її мода дорівнює $a_{det} = 25$ мм. Розкид нечіткої величини для чотирьох експериментів наведено в таблиці 1.

Проводячи етапи фазифікації, оптимізації та дефазифікації, отримуємо величини оптимального об'єму в (табл.). Як бачимо, з ростом невизначеності зростає і дефазифікована величина об'єму конструкції V^*_{def} . Графа $\Delta_{V^*_{def}}\%$ таблиці показує відсоток відхилення отриманого об'єму від об'єму у

випадку без тріщини. Графічні подання результатів приведемо на рисунку 9 ($V^*_{det} = 537\,248$ мм³ за модального значення довжини тріщини $a_{det} = 25$ мм).

Таблиця

Вплив нечіткого завдання довжини тріщини на об'єм ферми / Influence of fuzzy length problem cracks on the volume of the farm

№	$\Delta\%$	a , мм	b , мм	V_{Δ}^{fuz} , мм ³	V^*_{def} , мм ³
1	0	0	0	(0; 537248; 0)	537248
2	0.5	24.875	25.125	(536959; 537248; 537538)	537248
3	1	24.75	25.25	(536671; 537248; 537829)	537249
4	5	23.75	26.25	(534399; 537248; 540181)	537269
5	10	22.5	27.5	(531658; 537248; 543179)	537333
6	15	21.25	28.75	(529055; 537248; 546225)	537444
7	20	20	30	(526631; 537248; 549309)	537609

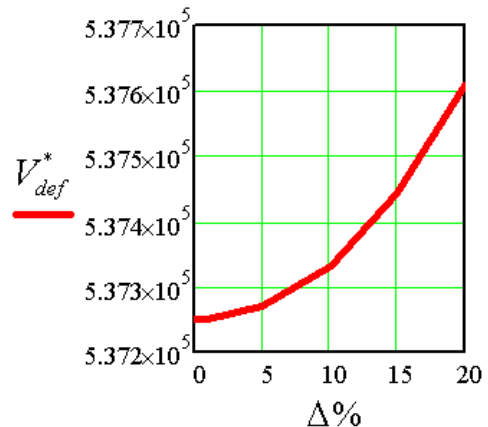


Рис. 9. Графічна інтерпретація впливу нечіткого завдання довжини тріщини на величину оптимального об'єму матеріалу чотирьох елементів ферми / Fig. 9. Graphic interpretation of the effect of fuzzy problem of crack length on the value of the optimal volume of material of four elements of the farm

Висновки. Показано принципову можливість використання теорії нечітких множин у задачах оптимального проектування ШСС. Отримано результати

можливого значення об'єму для випадку, коли можлива присутність тріщини з модальним значенням довжини $a_{det} = 25$ мм для різних випадків збільшення нечіткості.

Для детермінованої постановки задачі отримано залежність впливу величини

довжини тріщини на оптимальні значення площ поперечних перерізів ШСС та оптимального об'єму за умови виконання обмежень на жорсткість, міцність, стійкість та неруйнування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бараненко В. А. Динамическое программирование и последовательные приближения / В. А. Бараненко // Придніпровський науковий журнал. Фізико-математичні науки. – № 112. – 1998. – С. 38–44.
2. Бараненко В. А. Нечітке моделювання в оптимальному проектуванні шарнірно-стержневих систем / В. А. Бараненко, Д. Л. Волчок // Опір матеріалів і теорія споруд. – Вип. 100. – Київ. – 2018. – С. 71–93.
3. Прикладные задачи динамического программирования / Р. Беллман, С. Дрейфус. Под редакцией А. А. Первозванского. – Москва : Наука, 1965. – 460 с.
4. Партон В. З. Механика разрушения. От теории к практике : монография / [Партон В. З.]. – Москва : Наука, 1990 – 240 с.
5. Broek D. Elementary Engineering Fracture Mechanics / [D. Broek] // Alphen aan den Rijn, Sijthoff & Noordhoff, 1978. – XIII. – 437 p.
6. Kaufmann A. Introduction à la théorie des sous-ensembles flous : à l'usage des ingénieurs: (Fuzzy sets theory) / [A. Kaufmann]. – Paris : Masson et C-іe, 1977. – 235 p.
7. Liu B. Theory and practice of Uncertain programming / B. Liu. – Berlin, Springer-Verlag, 2009. – 201 p.
8. Pawlak Z. Rough sets : Theoretical Aspects of Reasoning about Data / Z. Pawlak // Kluwer Academic Publishers. – Dordrecht, 1991. – 224 p.

REFERENCES

1. Baranenko V.A. *Dinamicheskoe programmirovaniye I posledovatelnyye priblizheniya* [Dynamic programming and sequential approximations]. *Pridniprovs'kij naukovij zhurnal. Fiziko-matematichni nauki* [Prydniprovsky scientific journal. Physics and Mathematics]. No. 112, 1998, pp. 38–44 (in Russian).
2. Baranenko V.A. and Volchok D.L. *Nechitke modelyuvannya v opty'mal'nomu proektuvanni sharnirno-sterzhnevuy`x sy'stem* [Fuzzy simulation in optimal design of hinge-rod systems]. *Opir materialiv i teoriya sporud* [Strength of Materials and Theory of Structures]. Kyiv, vyp. 100, 2018, pp. 71–93 (in Ukrainian).
3. Bellman R. and Dreyfus S. *Prikladnyye zadachi dinamicheskogo programmirovaniya* [Applied problems of dynamic programming]. Edited by A.A. Pervozvanskyi. Moscow : Nauka Publ., 1965, 460 p. (in Russian).
4. Parton V.Z. *Mehanika razrusheniya. Ot teorii k praktike* [Fracture mechanics. From theory to practice.]. Moscow : Nauka Publ., 1990, 240 p. (in Russian).
5. Broek D. Elementary Engineering Fracture Mechanics. Alphen aan den Rijn, Sijthoff & Noordhoff, 1978. XIII, 437 p.
6. Kaufmann A. Introduction à la théorie des sous-ensembles flous : à l'usage des ingénieurs: (Fuzzy sets theory) Paris : Masson et C-іe, 1977, 235 p.
7. Liu B. Theory and practice of Uncertain programming, Berlin, Springer-Verlag, 2009, 201 p.
8. Pawlak Z. Rough sets : Theoretical Aspects of Reasoning about Data. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1991, 224 p.

Надійшла до редакції: 21.02.2019 р.