

УДК 539.3

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.170118.44.39

ПРОЕКТУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПРУЖИН МІНІМАЛЬНОЇ МАСИ ЗА ОБМЕЖЕННЯ НА ВЛАСНУ ЧАСТОТУ ПОЗДОВЖНИХ КОЛИВАНЬ В УМОВАХ ПОВНОЇ І НЕЧІТКОЇ ІНФОРМАЦІЇ

БАРАНЕНКО В. О.¹, *д-р техн. наук, проф.*,

ВОЛЧОК Д. Л.², *канд. техн. наук, доц.*,

ГРИГОРОВИЧ М. С.³, *студ.*

¹Кафедра 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) 756-34-22, e-mail: baranenko1941@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4658-1205

²Кафедра 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

³Кафедра 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) 756-34-22 e-mail: buro.grigorovych@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5539-7493

Анотація. *Постановка проблеми.* У багатьох виробках машинобудівної, залізничної, будівельної індустрії розповсюджені такі елементи як пружини. Вони призначені для накопичення або поглинання механічної енергії. Цим елементам різноманітних конструкцій і приладів приділялась і приділяється достатньо велика увага. Існує велика кількість публікацій в цій сфері, де розглядаються питання розрахунків та виготовлення. В той же час невелика кількість наукових праць присвячена питанням оптимального проектування, в яких оптимізація характеристик пружин за різними критеріями здійснюється за допомогою методів нелінійного програмування.

Ця стаття присвячена питанням оптимального проектування циліндричної пружини розтягання за критерієм ваги при обмеженні на власну частоту поздовжніх коливань. Формулюються прямі і двоїсті задачі оптимізації, реалізація яких здійснюється методом множників Лагранжа і необхідних умов існування екстремуму. *Мета статті* - розглянути оптимізаційні динамічні задачі проектування гвинтових циліндричних пружин в умовах повної і неповної інформації щодо вихідних даних. Провести аналіз впливу кількості активних звоїв пружини на оптимальні параметри проектування, а також вплив нечіткості завдання ваги і величини власної частоти поздовжніх коливань. *Висновок.* У результаті розв'язання прямої та двоїстої оптимізаційної динамічної задачі для гвинтової циліндричної пружини отримано, що залежність оптимальної ваги від заданої частоти власних поздовжніх коливань і числа активних звоїв є нелінійною функцією. Залежність оптимальної частоти власних коливань і діаметра дроту від заданої ваги також нелінійна. Отримано оцінки впливу нечіткого завдання вихідних даних на результат проекту - діаметр дроту матеріалу, з якого виготовлено пружину.

Ключові слова: *циліндрична пружина; оптимальне проектування; нечіткі множини*

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРУЖИН МИНИМАЛЬНОЙ МАССЫ ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ НА СОБСТВЕННУЮ ЧАСТОТУ ПРОДОЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ В УСЛОВИЯХ ПОЛНОЙ И НЕЧЕТКОЙ ИНФОРМАЦИИ

БАРАНЕНКО В. А.¹, *д-р техн. наук, проф.*,

ВОЛЧОК Д. Л.², *канд. техн. наук, доц.*,

ГРИГОРОВИЧ Н. С.³, *студ.*

¹Кафедра строительной механики и сопротивления материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (056) 756-34-22, e-mail: baranenko1941@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4658-1205

²Кафедра строительной механики и сопротивления материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (056) 756-33-51, e-mail: Denys.L.Volchok@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7914-321X

³Кафедра строительной механики и сопротивления материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, Днепро, 49600, Украина, тел. +38 (056) 756-34-22, e-mail: buro.grigorovych@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5539-7493

Аннотация. *Постановка проблемы.* Во многих изделиях машиностроительной, железнодорожной, строительной индустрии распространены такие упругие элементы как пружины. Они предназначены для накопления или поглощения механической энергии. Этим элементам различных конструкций и приборов

уделялось и уделяется достаточно большое внимание. Существует большое количество публикаций в этой сфере, где рассматриваются вопросы расчетов и изготовления. В то же время небольшое количество научных работ посвящено вопросам оптимального проектирования, в которых оптимизация характеристик пружин по различным критериям осуществляется с помощью методов нелинейного программирования.

Данная работа посвящена вопросам оптимального проектирования цилиндрической пружины растяжения по критерию веса при ограничении на собственную частоту продольных колебаний. Формулируются прямые и двойственные задачи оптимизации, реализация которых осуществляется методом множителей Лагранжа и необходимых условий существования экстремума. **Цель статьи** - рассмотреть оптимизационные динамические задачи проектирования винтовых цилиндрических пружин в условиях полной и неполной информации о выходных данных. Провести анализ влияния количества активных витков пружины на оптимальные параметры проектирования, а также влияния нечеткости задания веса и величины собственной частоты продольных колебаний. **Вывод.** В результате решения прямой и двойственной оптимизационной динамической задачи для винтовой цилиндрической пружины получено, что зависимость оптимального веса от заданной частоты собственных продольных колебаний и числа активных витков является нелинейной функцией. Зависимость оптимальной частоты собственных колебаний и диаметра проволоки от заданного веса также является нелинейной. Получены оценки влияния нечеткого задания исходных данных на результат проекта - диаметр проволоки материала, из которого изготовлена пружина.

Ключевые слова: цилиндрическая пружина; оптимальное проектирование; нечеткие множества

DESIGNING CYLINDRICAL SPRINGS OF MINIMUM WEIGHT WITH RESTRICTION ON THE OWN FREQUENCY OF LONGITUDINAL OSCILLATIONS UNDER CONDITION OF FULL AND FUZZY INFORMATION

BARANENKO V. O.¹, *Dr. Sc(Tech), Prof.*,
VOLCHOK D. L.², *Cand. Sc.(Tech), Assoc. Prof.*,
HRYHOROVYCH M. S.³, *student*

¹Department of structural mechanics and strength of materials, State Higher Educational Establishment «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro 49600, Ukraine, phone +38 (056) 756-34-22, e-mail: baranenko1941@ukr.ne, ORCID ID: 0000-0002-4658-1205

²Department of structural mechanics and strength of materials, State Higher Educational Establishment «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro 49600, Ukraine, phone +38 (056) 756-33-51, e-mail: Denys.L.Volchok@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-7914-321X

³Department of structural mechanics and strength of materials, State Higher Educational Establishment «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», 24-a, Chernyshevskogo str., Dnipro 49600, Ukraine, phone +38 (056) 756-34-22, e-mail: buro.grigorovych@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5539-7493

Annotation. Formulation of the problem. Elastic elements such as springs are common in many products of the machine-building, railway, construction industry. They are designed to accumulate or absorb mechanical energy. These elements of various designs and devices have been and are being given enough attention. There is a large number of publications in this field, where questions of calculation and manufacturing are considered. At the same time, a small number of scientific papers are devoted to optimal design, in which the optimization of the characteristics of springs by various criteria is carried out using nonlinear programming methods.

This paper is devoted to the problems of optimal design of a cylindrical tension spring by the weight criterion, while its own frequency of longitudinal oscillations is limited. Direct and dual optimization problems are formulated. Realization is provided with the method of Lagrange multipliers and necessary conditions for the existence of an extremum. **Purpose of the article.** To consider optimization dynamic problems of design of helical cylindrical springs in conditions of complete and incomplete information about the output data. To analyze the influence of the number of active spring turns on the optimal design parameters, as well as the influence of the fuzzy information about weight setting and the value of the natural frequency of the longitudinal oscillations. **Conclusion.** As a result of solving the direct and dual optimizing dynamic problem for a helical spring it is found that the dependence of the optimal weight from the natural frequency of the intrinsic longitudinal oscillations and the number of active turns is a nonlinear function. The dependence of the optimum frequency of natural oscillations and the diameter of the wire from the given weight is also nonlinear. The estimation of the influence of the fuzzy initial data on the result of the project (the diameter of the wire of the spring) is obtained. The transformation of fuzzy numbers into deterministic ones is performed by the center method (defuzzification operation). Accounting of fuzzy information leads to increasing in the weight parameter and in the wire diameter parameter.

Keywords: cylindrical spring; optimal design; fuzzy sets

Вступ. У багатьох виробках машинобудівної, залізничної, будівельної індустрії розповсюджені такі пружні елементи як пружини. Вони призначені для накопичення або поглинання механічної енергії. Цим елементам різноманітних конструкцій і приладів приділялась і приділяється достатньо велика увага. На початку ХХ сторіччя були створені в ряді країн асоціації дослідників пружин. Існує велика кількість публікацій в усій сфері [1; 4; 8], де розглядаються питання розрахунків та виготовлення. В той же час невелика кількість наукових праць присвячена питанням оптимального проектування. Можна навести праці [2; 3; 6; 7], в яких оптимізація характеристик пружин за різними критеріями здійснюється за допомогою методів нелінійного програмування.

Стаття присвячена питанням оптимального проектування циліндричної пружини розтягання за критерієм ваги при обмеженні на власну частоту поздовжніх коливань. Сформульовано як прями, так і двоїсті задачі оптимізації, їх реалізація здійснюється методом множників Лагранжа і необхідних умов існування екстремуму. Отримано числові результати, які подаються в графічному вигляді. Показано вплив на результати оптимального проектування кількості робочих (активних) звоїв пружини. Приділяється увага на розрахунок оптимальних характеристик пружини в умовах, коли обмеження мають параметри, що описані нечітко. До них застосовується підхід з боку нечіткого моделювання. Теорія нечітких множин [5] дає можливість оцінювати результати розрахунку за наявності розмитих даних.

1. Об'єкт оптимізації

Циліндрична гвинтова пружина являє собою криволінійний стержень, вісь якого розташовується на поверхні циліндра по гвинтовій лінії. Основні характеристики таких механічних елементів - середній діаметр D , діаметри d дроту, з якого виготовляється пружина, довжина l осі робочої частки та кількість N активних звоїв. В технічних розрахунках кривизна

гвинта пружини характеризується відношенням $C = D/d$, яке називають індексом пружини. Під час конструювання пружини, яка працює на стиск-розтягнення, розраховують її напружено-деформований стан за найбільшим дотичним напруженням у перерізах звоїв. У випадку проектування пружин кручення розрахунки напружень виконуються за найбільшими нормальними напруженнями в перерізах звоїв.

У динамічних застосуваннях, щоб уникати явища резонансу, треба увести до розгляду таку умову: - частота власних коливань стискання пружини ω мусить бути не менше величини ω_0 . В математичному вигляді така умова має вираз [7]:

$$\omega = \frac{d}{2\pi D^2 N} \sqrt{\frac{Gg}{2\rho}} \geq \omega_0. \quad (1)$$

Тут уведено такі позначення: G - модуль зсуву, g - прискорення вільного падіння, ρ - щільність матеріалу дроту.

Задача проектування полягає в пошуку таких характеристик проекту як d^* і значення критерію мінімум ваги, тобто $W^* = \min W$ за заданої частоти ω_0 (пряма задача), і навпаки - знайти такі значення d^* , за яких власна частота поздовжніх коливань була б найбільшою за умови, що вага пружини задається, тобто $W = W_0$.

2. Основна частина

2.1. Задача 1 (пряма задача)

Задача проектування циліндричної пружини мінімальної ваги з урахуванням умов, щоб частота ω власних коливань її була рівною величині ω_0 , описується такою моделлю:

$$(W^*, d^*) = \arg \left\{ \min_{d^- \leq d \leq d^+} W(d) \mid \omega(d) = \omega_0 \right\}. \quad (2)$$

У співвідношення (1) уведено такі означення $W(d) = \alpha d^2$;

$$\alpha = 0.25(N + Q)\pi^2 D\rho; \quad (3)$$

$$\omega(d) = \gamma d; \quad \gamma = \frac{1}{2\pi D^2 N} \sqrt{\frac{Gg}{2\rho}}; \quad d > 0, \quad (4)$$

де Q - число неактивних звій; N - кількість активних звоїв пружини.

Обмежень можуть бути габарити пружини:

$$d + D \leq \bar{D}, \quad (5)$$

де D - діаметр пружини, G - модуль зсуву, ρ - густина, g - прискорення вільного падіння. Значення ω_0 , \bar{D} задаються.

В задачі (1) змінними проектування є величина d , а d^* - є оптимальна товщина дроту, яка піде на її виготовлення, і відповідно вага пружини W^* . Фактором проектування може бути фіксована величина N .

2.2. Задача 2 (двоїста задача)

Сутність двоїстої задачі полягає в тому, щоб за заданою вагою W_0 , діаметром D і числом звоїв N знайти таке d^* , яке доставить максимум величини власних коливань. Математичний запис цієї задачі буде таким:

$$(\omega^*, d^*) = \arg \left\{ \max_d \omega(d) \mid W(d) = W_0 \right\}. \quad (6)$$

Розв'язки d^* у двоїстій і прямій задачі збігаються, якщо взяти $\omega_0 = \omega^*$ із задачі (6) або $W_0 = W^*$ із задачі (2).

2.3. Застосування математичного аналізу до розв'язання задач

Уведемо для задачі 1 таку функцію:

$$L = W + \lambda(\omega_0 - \omega) = \alpha d^2 + \lambda(\omega_0 - \gamma d), \quad (7)$$

де $\lambda \neq 0$ - множник Лагранжа.

Із необхідної умови екстремуму L маємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial d} = 2\alpha d - \lambda\gamma = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = -\gamma d + \omega_0 = 0 \end{array} \right. \quad (8)$$

Розв'язання системи (8) дає

$$d^* = \frac{\omega_0}{\gamma}; \quad \lambda = +\frac{2\alpha\omega_0}{\gamma^2}; \quad W^* = \alpha(d^*)^2; \quad (9)$$

Зауваження. Друга похідна $\frac{\partial^2 L}{\partial d^2} = 2\alpha > 0$, що відповідає операції мінімуму в оптимізаційній задачі (достатня умова існування екстремуму)

2.4. Розв'язання двоїстої задачі

Для (6) запишемо функцію Лагранжа:

$$L = \gamma d - \lambda(\alpha d^2 - W_0); \quad \lambda \neq 0. \quad (10)$$

За необхідними умовами екстремуму, маємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial d} = \gamma - 2\lambda\alpha d = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = \alpha d^2 - W_0 = 0 \end{array} \right. \quad (11)$$

У результаті розв'язання системи (11) отримаємо:

$$d^* = \sqrt{\frac{W_0}{\alpha}}; \quad \lambda = \frac{\gamma}{2\alpha d^*}; \quad \lambda > 0; \quad \alpha > 0; \\ \omega^* = \gamma d^*. \quad (12)$$

Зауваження. Достатня умова існування максимуму для цієї задачі виконується, тобто:

$$\frac{\partial^2 L}{\partial d^2} = -2\lambda\alpha < 0.$$

2.5. Числова ілюстрація оптимального проектування пружини за детермінованих даних

Для таких початкових даних:

$$G = 8 \cdot 10^4 \frac{\text{г}}{\text{мм}^2}; \quad D = 100 \text{мм}; \quad Q = 2,$$

$$\rho = 0.0078 \frac{\text{г}}{\text{мм}^3}; \quad g = 9806 \frac{\text{мм}}{\text{сек}^2}.$$

Для прямої і двоїстої задачі за формулами (8), (9), (11) виконано розрахунок оптимальних d^* , (мм); W^* , (г) та ω^* , (Гц). Геометрична інтерпретація результатів обчислень наведена на рисунках 1-4 за $N = 17$.

На рисунках 3 і 4 показано залежність оптимальних значень ω^* і d^* від заданого значення ваги пружини W_0 як результат розв'язання двоїстої задачі (6) за $N = 17$. Таким чином, при розв'язанні прямої і двоїстої величини оптимальних проектів

W^* , ω^* , d^* збільшуються відповідно до збільшення величин ω_0 і W_0 .

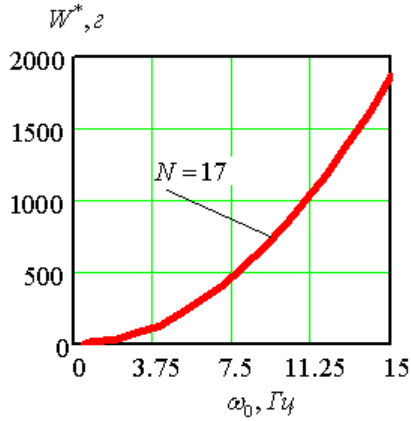


Рис. 1. Залежність мінімальної ваги пружини W^* від величини частоти власних коливань ω_0 (пряма задача)

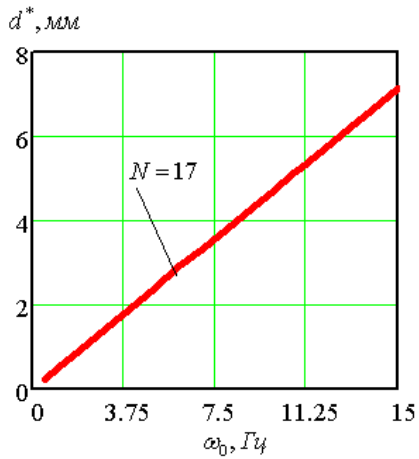


Рис. 2. Графік залежності параметра оптимального проекту - значення діаметра дроту d^* від частоти власних коливань ω_0 (пряма задача)

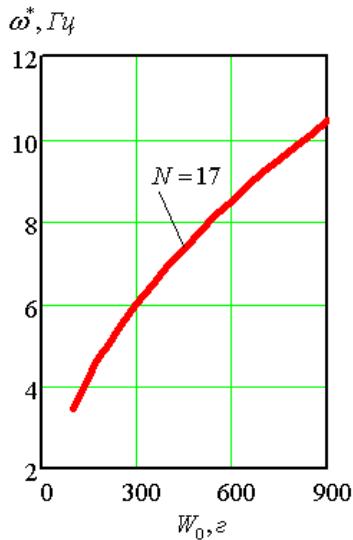


Рис. 3. Графік залежності $\omega^* - W_0$ (двоїста задача)

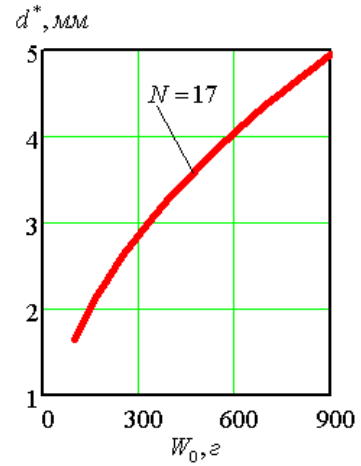


Рис. 4. Графік залежності $d^* - W_0$ (двоїста задача)

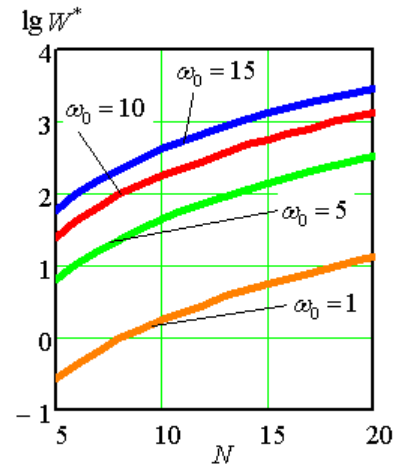


Рис. 5. Графік залежності оптимальної ваги від числа робочих зовів пружини (пряма задача)

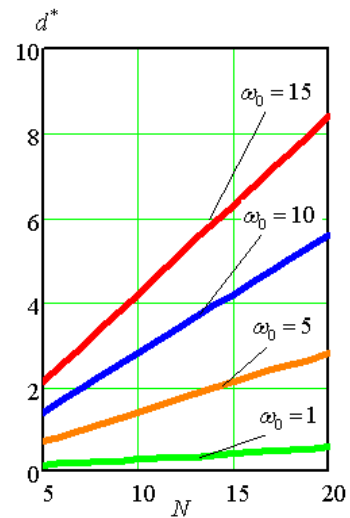


Рис. 6. Залежність параметра проекту - d^* від числа звоїв пружини і частоти ω_0 (пряма задача)

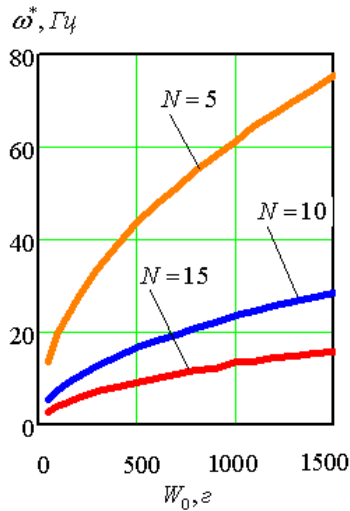


Рис. 7. Залежність максимального значення частоти власних коливань пружини ω^* від заданої ваги W^* для різного числа звоїв N пружини (двоїста задача)

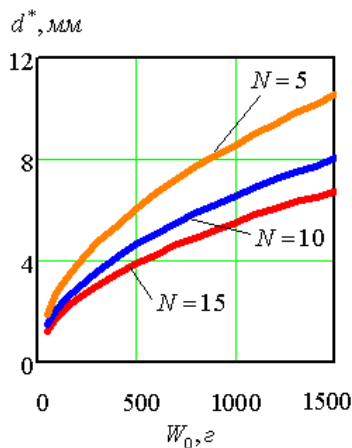


Рис. 8. Залежність параметра проекту - оптимального значення діаметра звоїв пружини від заданої ваги W^* для різного числа звоїв N пружини (двоїста задача)

На прикладі розв'язання прямої (2) та двоїстої (6) задач розглянуто питання впливу числа активних звоїв пружини на величини W^* , ω^* , d^* (рис. 5-8). Із розрахунків видно (рис. 5-6), що вага W^* і діаметр дроту d^* збільшуються від збільшення числа N і величини ω_0 (пряма задача). Для двоїстої - збільшення частоти ω^* і діаметра дроту d^* від збільшення ваги W_0 (рис. 7-8).

У випадку прямої задачі збільшення числа звоїв і значень власних частот пружини викликає значне збільшення ваги і діаметра.

Із цих рисунків видно, що частота ω^* і d^* збільшуються від збільшення числа N і W_0 .

2.6. Нечітке завдання величини ω_0

Розглянемо наступну інформаційну ситуацію відносно завдання частоти власних коливань пружини:

а) нехай величина ω_0 набирає значення "близьке до числа m_ω ";

б) нехай величина ω_0 набирає значення "трохи більше ніж m_ω , або дорівнює...";

в) нехай величина ω_0 набирає значення "трохи більше ніж m_ω ".

Для опису нечіткої величини ω_0 використаємо функцію належності трикутного виду $\mu_\Omega(x)$ з носієм $\omega_0(a, m_\omega, b)_\Delta$. Через Ω позначено нечітку множину величини ω_0 :

$$\mu_\Omega(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{m-a}, & 0 \leq x < m \\ \frac{b-x}{b-m}, & m < x \leq b \\ 1, & x = m; 0 \leq \mu \leq 1. \end{cases} \quad (13)$$

Нехай, для визначеності, для першої інформаційної ситуації $m_\omega = 5$; $a = 4.5$; $b = 5.5$, число звоїв дорівнює 10, а число дискретів інтервалу $[0,1]$ дорівнює M . У числових розрахунках приймалось $M = 10$. Дотримуючись означення (13), побудуємо нечітку множину Ω значень частот (етап нечіткого моделювання - фазифікація):

$$\Omega = \sum_{i=0}^{10} \frac{\mu_i}{a_i} + \sum_{i=11}^{2M} \frac{\mu_i}{b_i}, \quad (14)$$

в якому $\mu_i = i\Delta\mu$; $\bar{\mu}_i = 2M - i$; $\Delta\mu = \frac{1}{M}$;
 $a_i = m_\omega \mu_i + a(1 - \mu_i)$; $b_i = m_\omega \mu_i + b(1 - \mu_i)$,

тобто:

$$\Omega = \frac{0}{4.5} + \frac{0.1}{4.55} + \frac{0.2}{4.60} + \frac{0.3}{4.65} + \frac{0.4}{4.70} + \frac{0.5}{4.75} + \frac{0.6}{4.80} + \frac{0.7}{4.85} + \frac{0.8}{4.9} + \frac{0.9}{4.95} + \frac{1}{5.00} + \frac{0.9}{5.05} + \frac{0.8}{5.10} + \frac{0.7}{5.15} + \frac{0.6}{5.20} + \frac{0.5}{5.25} + \frac{0.4}{5.30} + \frac{0.3}{5.35} + \frac{0.2}{5.40} + \frac{0.1}{5.45} + \frac{0}{5.50}. \quad (15)$$

Для елементів a_i , b_i множини (15) обчислюються значення W^* і d^* за формулою (9), отримуємо такі множини W^*_{fuzzy} та d^*_{fuzzy} (етап нечіткого моделювання - розрахунок (аналіз)):

$$W^*_{fuzzy} = \frac{0}{36.71} + \frac{0.1}{37.54} + \frac{0.2}{38.36} + \frac{0.3}{39.20} + \frac{0.4}{40.05} + \frac{0.5}{40.91} + \frac{0.6}{41.77} + \frac{0.7}{42.65} + \frac{0.8}{43.53} + \frac{0.9}{44.43} + \frac{1}{45.33} + \frac{0.9}{46.24} + \frac{0.8}{47.15} + \frac{0.7}{48.09} + \frac{0.6}{49.03} + \frac{0.5}{49.97} + \frac{0.4}{50.93} + \frac{0.3}{51.89} + \frac{0.2}{52.87} + \frac{0.1}{53.85} + \frac{0}{54.84}.$$

$$d^*_{fuzzy} = \frac{0}{1.261} + \frac{0.1}{1.275} + \frac{0.2}{1.289} + \frac{0.3}{1.303} + \frac{0.4}{1.317} + \frac{0.5}{1.331} + \frac{0.6}{1.345} + \frac{0.7}{1.359} + \frac{0.8}{1.373} + \frac{0.9}{1.387} + \frac{1}{1.401} + \frac{0.9}{1.415} + \frac{0.8}{1.429} + \frac{0.7}{1.443} + \frac{0.6}{1.457} + \frac{0.5}{1.475} + \frac{0.4}{1.485} + \frac{0.3}{1.499} + \frac{0.2}{1.513} + \frac{0.1}{1.527} + \frac{0}{1.541}.$$

Перетворення нечітких чисел W^*_{fuzzy} і d^*_{fuzzy} на детерміновані виконується за методом центру [5] (операція дефазифікації):

$$W^*_{def} = \frac{\sum_{i=1}^{21} \mu_i W_i}{\sum_{i=1}^{21} \mu_i} = 46.34,$$

$$d^*_{def} = \frac{\sum_{i=1}^{21} \mu_i d_i}{\sum_{i=1}^{21} \mu_i} = 1.42$$

Порівняння отриманих результатів із розв'язками $W^*_{det} = 45.33$ і $d^*_{det} = 1.40$ за детермінованого значення $\omega_0 = 5$ дає такі похибки:

$$\varepsilon_W = \frac{|W^*_{def} - W^*_{det}|}{W^*_{det}} 100\% = 2.24\%;$$

$$\varepsilon_d = \frac{|d^*_{def} - d^*_{det}|}{d^*_{det}} 100\% = 1.43\%,$$

тобто урахування нечіткості спричинює збільшення на 2.24% параметра W^*_{det} і на 1.43% параметра d^*_{det} .

Висновки. В результаті розв'язання прямої та двоїстої оптимізаційної динамічної задачі для гвинтової циліндричної пружини отримано, що залежність оптимальної ваги від заданої частоти власних поздовжніх коливань і числа активних звоїв є нелінійною.

Залежність оптимальної частоти власних коливань і діаметра дроту від заданої ваги є нелінійною. Отримано оцінки впливу нечіткого завдання вихідних даних W_0 , ω_0 на результати проекту. Зі збільшенням власної частоти коливань ω_0 (пряма задача) реакція оптимального значення ваги W^* пружини на збільшення кількості звоїв стає більш чутливою (вага значно зростає).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. Т. 3 / В. И. Анурьев. – 8-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 2001. – 864 с.

2. Бараненко В. А. Оптимальное проектирование цилиндрических пружин в условиях нечёткой информации / В. А. Бараненко, М. В. Иванец, С. Н. Чаплыгина // Вісник Запорізького національного університету. Фізико-математичні науки : зб. наук. ст. – Запоріжжя, 2015. – № 3. – С. 23–27.
3. Маркина М. В. Нахождение паретовского множества многоэкстремальных задач / М. В. Маркина // Прикладные проблемы прочности и пластичности : всесоюз. межвуз. сб. / Горьков. гос. ун-т. – Горький, 1982. – С. 137–143. – (Исследование и оптимизация конструкций).
4. Пономарев С. Д. Расчет упругих элементов машин и приборов / С. Д. Пономарев, Л. Е. Андреева. – Москва : Машиностроение, 1980. – 326 с.
5. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечёткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский ; пер. с польск. И. Д. Рудинского. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2008. – 383 с.
6. Belegundu Ashok D. A study of mathematical programming methods for structural optimization. Part II: Numerical Results / Ashok D. Belegundu, Jasbir S. Arora // International journal for numerical methods in engineering. – 1995. – Vol. 21, iss. 9. – P. 1601–1623.
7. Haug Edward J. Applied Optimal Design: Mechanical and Structural Systems / Edward J. Haug, Jasbir. S. Arora – New York : Wiley-Interscience, 1979. – 520 p.
8. Shigley J. E. Mechanical engineering design / J. E. Shigley – 3rd Ed. – New York : McGraw-Hill, 1977. – 695 p.

REFERENCES

1. Anur'ev V.I. *Spravochnik konstruktora-mashinostroitel'ya: v 3 tomakh* [Reference book of the machine-builder designer: in 3 volumes]. Ed 8, Moskva: Mashinostroenie, 2001, no. 3, 864 p. (in Russian)
2. Baranenko V.A., Ivanec M.V. and Chaplygina S.N. *Optimal'noe proektirovanie cilindricheskix pruzhin v usloviyax nechetkoj informacii* [Optimal design of cylindrical springs under conditions of fuzzy information] *Zbirnyk naukovykh prats fizyko-matematychni nauky №3* [Collection of scientific Physics and Mathematics works no. 3]. Zaporizhzhya, 2015, pp. 23 – 27 (in Russian)
3. Markina M.V. *Naxozhdenie paretovskogo mnozhestva mnogoekstremal'nyx zadach* [Finding a Pareto set of multi-extremum problems] *Prikladnye problemy prochnosti i plastichnosti: vsesojuz. mezhvuz. sb.* [Applied problems of durability and plasticity: All-Union Interuniversity Collection]. *Issledovanie i optimizaciya konstrukcij* [Investigation and optimization of structures]. Gor'kij, 1982, pp. 137 – 143 (in Russian)
4. Ponomarev S.D. and Andreeva L.E. *Raschet uprugix elementov mashin i priborov* [Calculation of elastic elements of machines and instruments]. Moskva: Mir, 1980, 326 p. (in Russian)
5. Rutkovskaya D., Pilinskij M. and Rutkovskij L. *Nejronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy* [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. Moskva: Goryachaya liniya-Telekom. 2008, 383 p. (in Russian)
6. Belegundu Ashok D. and Jasbir S. Arora *A study of mathematical programming methods for structural optimization. Part II: Numerical Results*. International journal for numerical methods in engineering. 1995, vol. 21, iss. 9, pp. 1601–1623.
7. Haug Edward J. and Jasbir. S. Arora *Applied Optimal Design: Mechanical and Structural Systems*. New York: Wiley-Interscience, 1979, 520 p.
8. Shigley J. E. *Mechanical engineering design*. 3rd Ed. New York: McGraw-Hill, 1977, 695 p.

Рецензент: Єгоров Є. А., д-р техн. наук, проф.

Надійшла до редколегії: 20.12.2017 р.