

© А.П. Шкут¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПРУЖНОГО ЕЛЕМЕНТА ГРОХОТА У СЕРЕДОВИЩІ SOLIDWORKS MOTION

© A. Shkut¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

SIMULATION THE SPRING ELEMENT OF A SCREEN IN THE SOLIDWORKS MOTION

Мета. Розробити методику моделювання пружного елемента грохоту використовуючи середовище SolidWorks Motion.

Методологія. Методика моделювання пружного елемента грохоту розроблена на базі програмного продукту Dassault Systèmes SolidWorks. Виведений математичний вираз який описує поведінку пружини вбудовану в SolidWorks Motion. Також, в цьому ж програмному продукті побудовані графіки, що відображають поведінку системи в якій використана модель пружини.

Результати: Грунтуючись на вивченні даних обчислювального дослідження, була розроблена математична модель пружини для використання в програмному продукті SolidWorks Motion. Виведений аналітичний вираз для критичного показника вертикального зусилля, що відповідає переходу пружини з верхньої позиції (пружина стиснення) до нижньої (пружина розтягнення). Досліджено просторові коливання пластини, яка опирається по периметру на чотири пружини. Виявлено, що пластина демонструє поведінку, аналогічну системі з трьома ступенями свободи. З метою зменшення відхилень було запропоновано використання горизонтальних пружин. Використовувана методологія була застосована для динамічного аналізу грохоту.

Наукова новизна. Визначено математичну модель пружини, закладену в програмному продукті SolidWorks Motion. Наведено вираз, який визначає величину критичного навантаження, що призведе до зміни положень пружини. Застосування моделі до реальної інженерної задачі – розрахунку динаміки грохоту.

Практичне значення. Рівняння, що описує стан пружини, може використовуватися під час розрахунків пружних елементів техніки методами SolidWorks Motion. Це особливо актуально при проектуванні механізмів та систем, де необхідно точно прогнозувати поведінку пружних елементів під час їхньої роботи. Використання програмних продуктів для моделювання дозволяє інженерам оптимізувати дизайн та перевірити різні сценарії навантажень без створення прототипів.

Ключові слова. *SolidWorks Motion, пружина, математична модель.*

Вступ. Під час проектування грохотів важливим етапом є підбір пружного елемента. Пружні елементи використовують для зменшення впливу на фундамент або несучі конструкції динамічних сил, створюваних вібраційним грохотом. Найчастіше в якості пружних елементів грохотів застосовують гвинтові пружини. Так, у грохоті ГВЧ-31С використовують 4 гвинтові пружини, розрахунок яких проводили так (рис. 1): визначили частоту вільних коливань

використовуючи частоту вимушених коливань, далі було вираховано необхідну жорсткість, що становила 67,5 Н/мм, і геометричні розміри:

- діаметр дроту d , мм – 16
- зовнішній діаметр D_1 , мм – 120
- жорсткість одного витка c_1 , Н/мм – 540
- кількість робочих витків $n = 8$,
- загальна висота 320 мм

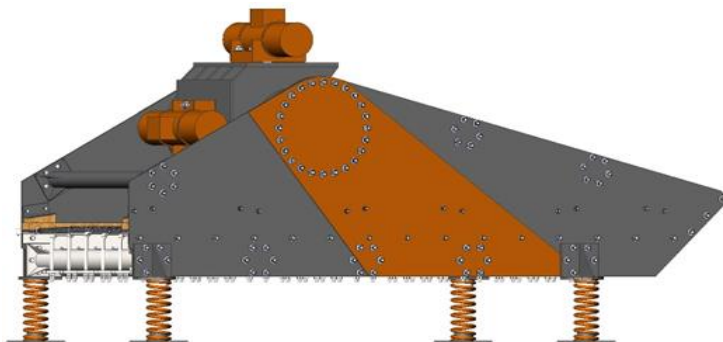


Рис. 1. Модель грохоту ГВЧ-31С

Згідно з класичним розрахунком пружних елементів грохотів, після визначення цих параметрів, необхідно провести розрахунок на міцність, метою якого є узгодження розрахункової жорсткості, геометричних розмірів пружних елементів та амплітуди коливань із допустимими напруженнями. Для проведення розрахунку на міцність використовували програмний пакет SolidWorks Simulation. Використовуючи розраховані раніше геометричні розміри, створено твердотільну модель пружини, яку далі проаналізовано методами SolidWorks Simulation [1, 2] (рис. 2).

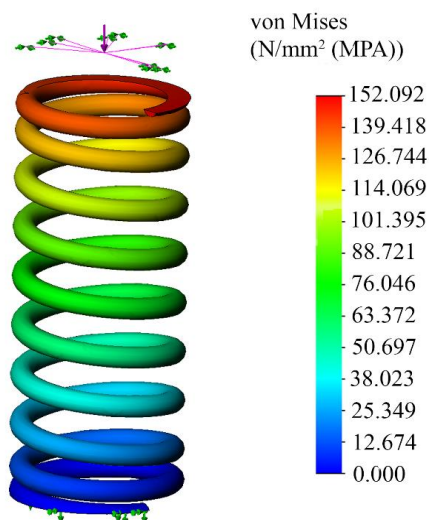


Рис. 2. Статичний розрахунок пружного елемента методами SolidWorks Simulation

Отримані переміщення відповідають діаграмі навантаження пружини, та складають 151,997 мм при прикладеній силі 9,65 кН.

Таким чином було проведено статичний аналіз пружного елемента грохоту ГВЧ-31С. Далі для проведення динамічного розрахунку пружин та грохоту, необхідно провести розрахунки в програмному комплексі SolidWorks Motion.

Основна частина. Для подальшого проведення розрахунків у середовищі SolidWorks Motion необхідно правильно моделювати пружні елементи. У розділах «Довідка» та «Навчальні посібники», які входять до складу програмного забезпечення SolidWork, відсутній опис математичних моделей пружних елементів, які використовуються в середовищі SolidWorks Motion. При моделюванні задається тільки два параметри: жорсткість пружини і її вільна довжина. Це ускладнює вивчення коливальних процесів, які протікають в технічних об'єктах, зокрема при дослідженні поведінки грохота, оскільки невідоме рівняння, яке описує стан пружини.

Для дослідження моделі пружини закладеної в програмі необхідно розробити методику моделювання коливальних процесів в середовищі SolidWorks Motion. На першому етапі розробки методики на основі аналізу результатів обчислювального експерименту необхідно отримати математичну модель пружини, яка використовується в програмному комплексі SolidWorks Motion [3].

Розглянемо поведінку механічної системи представленої на рисунку 3, що складається з двох кубиків масою $M = 7,8$ кг кожен.

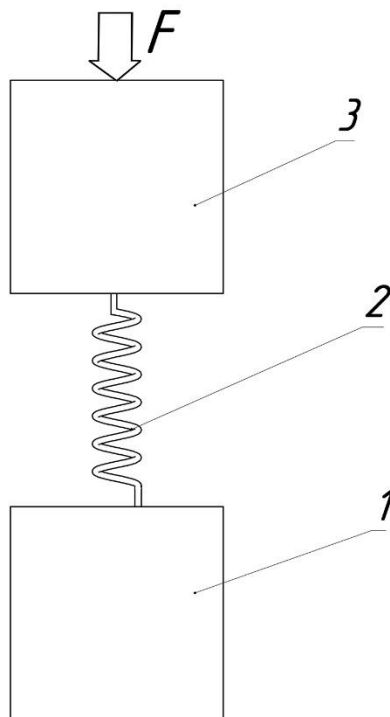


Рис. 3. Механічна система складається з двох кубиків і пружини

Нижній куб 1 нерухомий та верхній 3 має можливість лише вертикального переміщення, між собою вони поєднані пружиною SolidWorks Motion. В програмі задані наступні характеристики пружини: жорсткість k дорівнює 100 Н/мм, довжина $l = 100$ мм та величина демфера $C = 0,1$ Н·с/мм. Система приводиться до руху під дією сили тяжіння, коли пружина 2 починає стискатись від ваги куба 3. Другий силовий фактор в системі це постійна миттєво прикладена вертикально вниз змушуюча сила F , яка діє на рухомий куб 3. Проведена серія обчислювальних експериментів, коли постійна сила F дорівнює 1000 Н, 2000 Н, 3000 Н, 4000 Н, 5000 Н, 5500 Н, 6000 Н, 7000 Н.

Проведений дослід показав, що система з двох кубиків на пружині поводить себе як динамічна система в механіці під час моделювання руху маси з нелінійною силою відновлення і може бути описана нелінійним диференціальним рівнянням з нульовими початковими умовами

$$M \cdot \ddot{x} + c \cdot \dot{x} + k(x - l \cdot \text{sgn}(x)) = F, \quad (1)$$

де M – маса рухомого куба, кг; x – пружне переміщення вільного кінця пружини, мм; c – характеристика демфера, Н·с/мм; k – коефіцієнт жорсткості пружини, Н/мм; l – вільна довжина пружини, мм; F – змушуюча сила, Н.

Рівняння 1 являє собою диференціальне рівняння другого порядку відносно функції $x(t)$, грає ключову роль у численних аналізах динамічних систем [4]. Такі рівняння враховують не лише прямий зв'язок зміни стану системи, але і інтегральні, диференційні аспекти, що дозволяють моделювати взаємодії в системах більшої складності. В контексті дослідження динамічної поведінки системи, рівняння цього типу дозволяють аналізувати, як система реагує на різноманітні зовнішні впливи та коливання початкових умов. Важливо, що рішення таких диференціальних рівнянь може допомогти в ідентифікації стійкості системи, її часових характеристик та резонансних явищ.

Розглянемо, яким чином кожен член рівняння може описувати фізичну реальність руху куба:

- інерційна складова ($M \cdot \ddot{x}$) – інерційний член, що відповідає за динаміку кубика в просторі. Він пов'язує масу $M \cdot \ddot{x}$ об'єкта з його прискоренням \ddot{x} під час вертикального руху куба.

- демпфувальна складова ($c \cdot \dot{x}$) – представляє силу, пропорційну швидкості та спрямовану проти руху об'єкта. Демпфірування моделює внутрішнє тертя в пружині або опір повітря

- пружна складова ($k(x - l \cdot \text{sgn}(x))$) – моделює нелінійну силу пружності, пропорційну зміщенню від рівноважного положення, яка містить функцію знака для врахування асиметрії або специфічної нелінійності.

- зовнішні сили (F) – представляє будь-який зовнішній вплив на систему.

Запропоноване рівняння вводить додаткові аспекти: демпфірування, нелінійність у відновлювальній силі та зовнішній вплив, що дає змогу точніше описати реальні системи та дослідити динамічні моделі, закладені в програмі SolidWorks Motion.

На рисунку 4 а, б зображено епюри переміщень рухомого кубика (для аналізу переміщень обрано точку в центрі тяжіння кубика), які було побудовано під час проведення досліджень. На рисунку 4, а відображено переміщення кубика під час впливу миттєво прикладеної збурювальної сили $F = 5000$ Н, а на рисунку 4, б – переміщення кубика за $F = 5500$ Н.

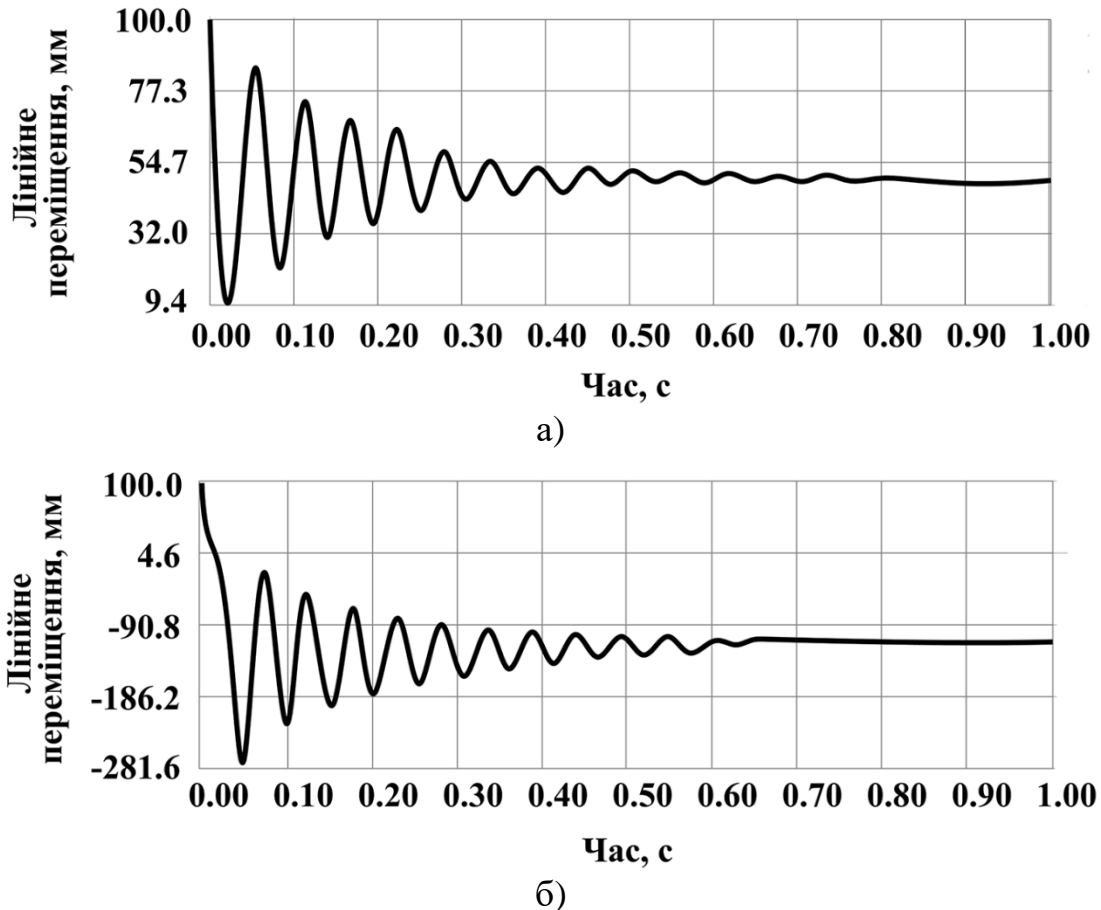


Рис. 4. Епюри переміщень рухомого кубика для різних F

Порівняння графіків на рисунку 4 показує, що положення рівноваги кубика стрибком змінюється з координати 54,7 (див. рис. 4, а) на координату 90,8 мм (див. рис. 4, б), відповідно можна зробити висновок, що система змінила положення рівноваги за умови додання збурювальної сили F , що перевищує 5000 Н.

Уведемо позначення критичної сили $F_{кр}$ – сила, за якої система втрачає стійкість і відбувається зміна положення рівноваги. Звідси можна дійти висновку, що поведінка такої системи аналогічна поведінці арки Мізеса. Система має три положення рівноваги, що відображено на рисунку 5 (початок координат вибрано збігається з фіксованим кінцем пружини):

Позиція 1 – Пружина у вільному стані, без прикладення навантаження має довжину l .

Позиція 2 – Стійке положення при постійній миттєво прикладеній вертикально вгору змушуючій силі F та локально стійке положення при прикладеній силі вертикально вниз, до величини сили $F_{кр}$. При цьому x – це

пружне переміщення вільного кінця пружини, а A – це значення амплітуди переміщень.

Позиція 3 – Нестійке положення, коли змушуюча сила F дорівнює/або більше $F_{кр}$.

Позиція 4 – Нижнє стійке положення для сил, прикладених донизу, і локально стійке до сил $F_{кр}$, спрямованих вгору.

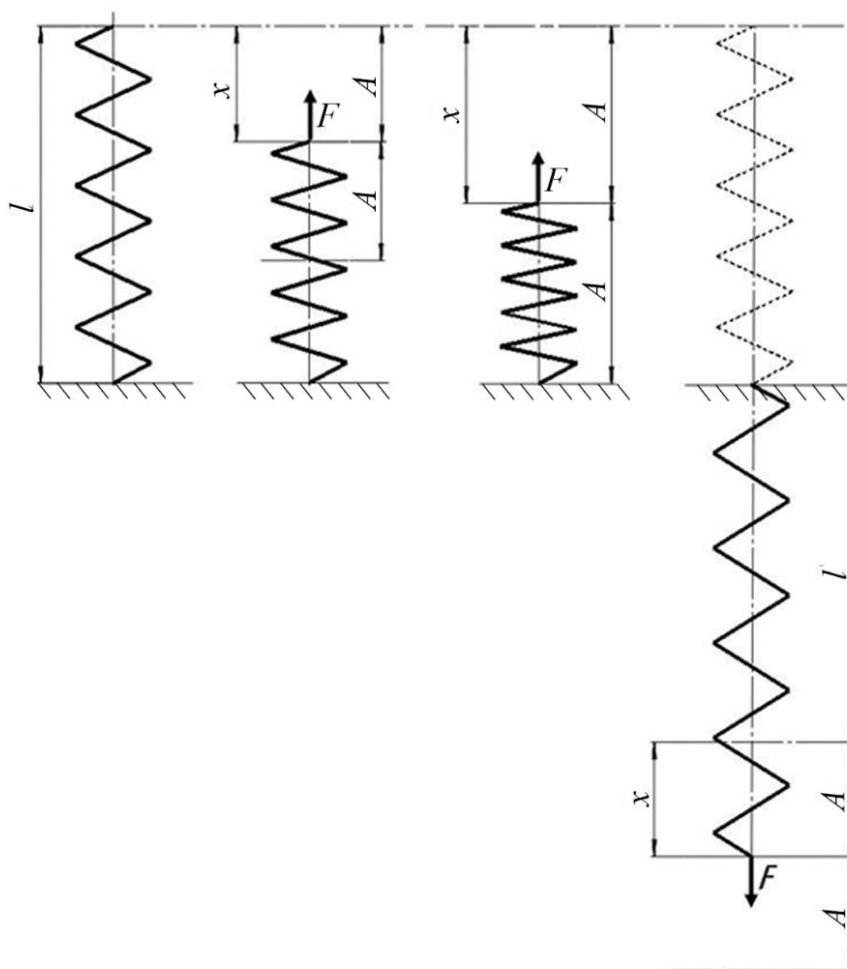


Рис. 5. Положення пружини

Експериментально визначено, що для цієї системи критична сила $F_{кр}$ перебуває в діапазоні від 5000 Н до 5500 Н. З рівняння 1 запишемо формулу, яка дасть змогу аналітично визначати величину критичного зусилля для системи:

$$F_{кр} = \frac{l \cdot k}{2}. \quad (2)$$

Отже, на першому етапі розробки методики моделювання пружного елемента в SolidWorks Motion для аналізу коливальних систем визначено рівняння закладене в моделі пружини та виявлено, що пружина має декілька положень рівноваги.

На другому етапі розробки методики використовуємо отриманий результат для аналізу поведінки коливання пластини, яка знаходиться в рівновазі на чотирьох пружинах (рис. 6) [5].

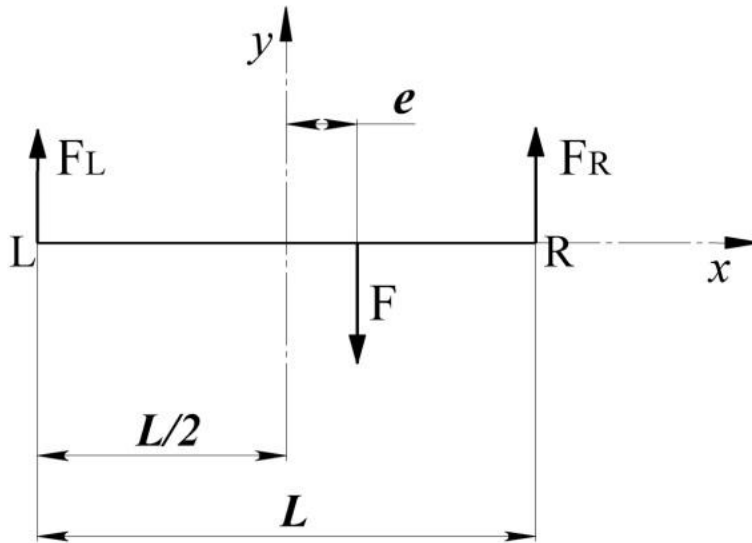


Рис. 6. Розрахункова схема пластини: L – довжина пластини, F_L и F_R – реакції лівої і правої пружини, e – ексцентриситет сили F

З аналізу рівнянь рівноваги пластини випливає, що:

$$F_L = F(0,5 - \varepsilon), \quad (3)$$

$$F_R = F(0,5 + \varepsilon), \quad (4)$$

де ε – безрозмірне значення ексцентриситету, що дорівнює:

$$\varepsilon = \frac{e}{L}. \quad (5)$$

З формули (2) випливає, що перескок пружин можливий за умови:

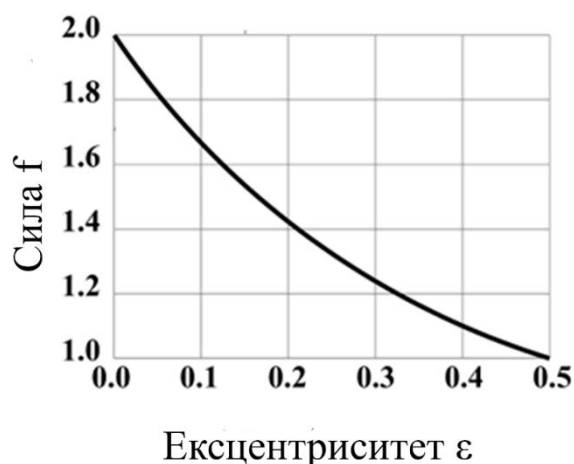
$$F_R = lk = F(0,5 + \varepsilon). \quad (6)$$

Позначимо безрозмірну силу:

$$f = \frac{F}{lk}. \quad (7)$$

Тоді залежність між f і ε можна записати у вигляді (8) і зобразити на графіку (рис. 7).

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{0,5 + \varepsilon}. \quad (8)$$

Рис. 7. Залежність між параметрами f і ε

На рис. 8 показана епюра переміщень крайніх точок пластини (ліві точки – т.1 на рис. 9 та праві точки – т.2 на рис. 9) для значень $\varepsilon = 0,224$, $f = 0,65$, $F = 8105$ Н (де $f_{кр} = 0,69$, $F_{кр} = 8610$ Н) і положення пластини після 5 секунд (рис. 9).

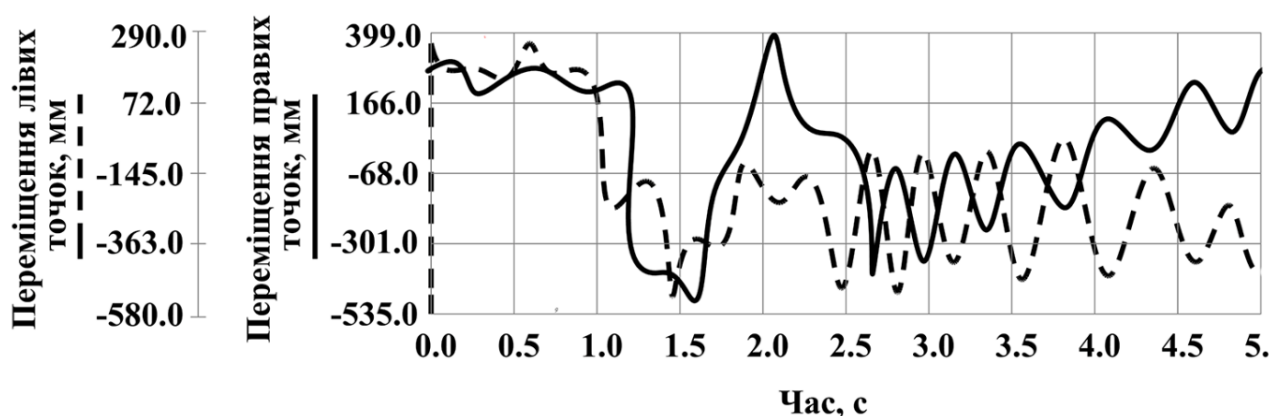


Рис. 8. Епюра переміщень крайніх точок пластини

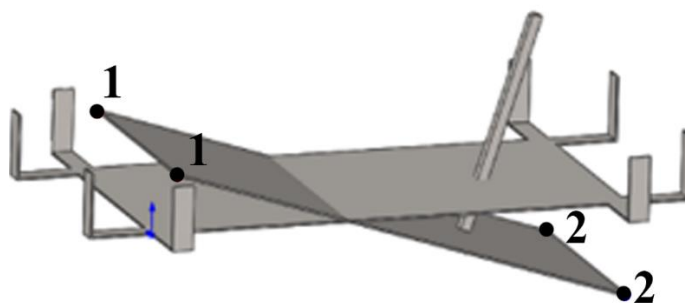
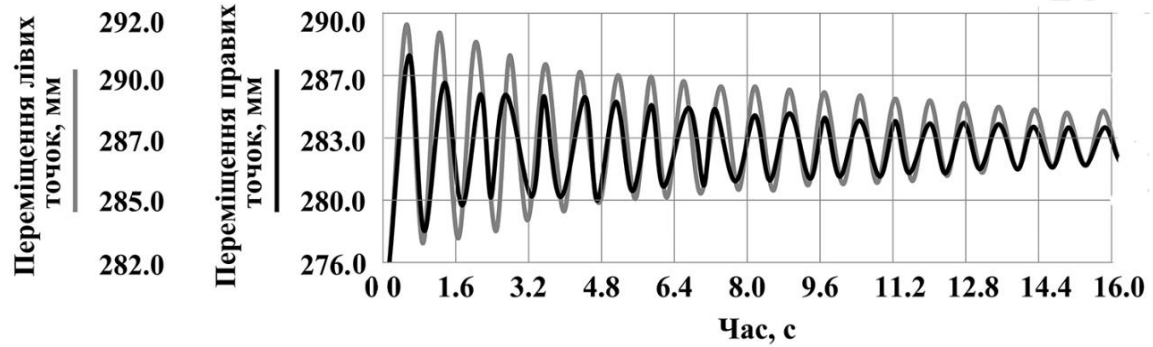


Рис. 9. Положення пластини після п'яти секунд

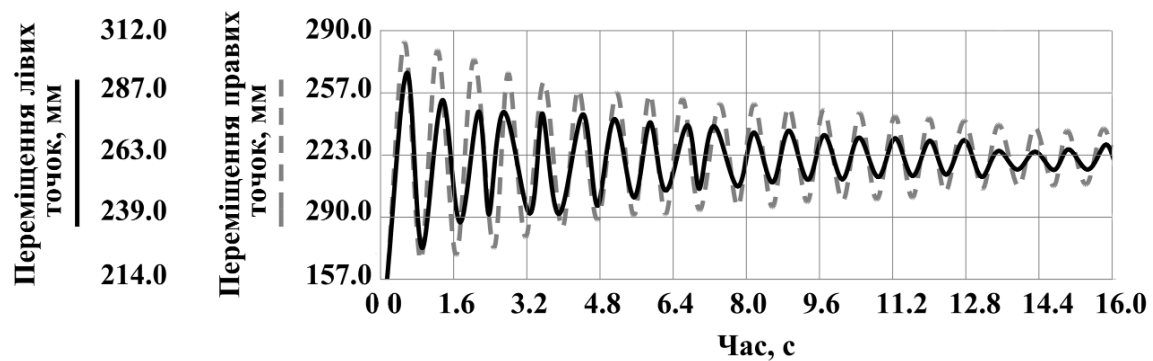
З аналізу рисунку 8, робимо висновок, що пластина на пружинах поводитья як система з трьома ступенями свободи: вертикальні поступальні, поворотні (що відповідають за галопування) і горизонтальні поступальні; і відбувається перескок правих пружин незважаючи на те, що прикладена сила менше

критичної. Для зменшення поперечних переміщень застосовані горизонтальні пружини.

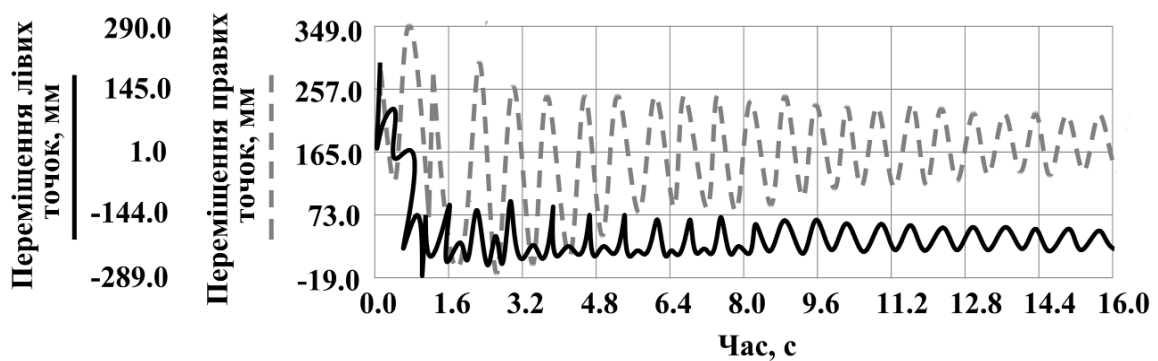
Після установки поздовжніх горизонтальних пружин поведінку системи відповідає отриманому вище аналітичного результату, що можна спостерігати на графіках на рисунку 10.



а)



б)



в)

Рис. 10. Епюра переміщень крайніх точок пластины з урахуванням поздовжніх горизонтальних пружин:

а) $F = 810$ Н; б) $F = 8610$ Н; в) $F = 17220$ Н

Розроблена методика моделювання пружного елемента застосована при динамічному аналізі процесів, що протікають при роботі грохоту (див. рис.1) [6].

Висновки. На основі аналізу результатів обчислювального експерименту отримано математичну модель пружини, яка використовується в програмному середовищі SolidWorks Motion. Знайдено аналітичний вираз для критичного значення вертикальної сили, відповідне перескоку пружини з верхнього положення (пружина стиснення) до нижнього (пружина розтягування).

Досліджено просторові коливання пластини опертої по краях на чотири пружини. Встановлено, що пластина поводить себе як система з трьома ступенями свободи. Для зменшення поперечних переміщень запропоновано застосування горизонтальних пружин.

Розроблена методика застосована при динамічному аналізі грохоту.

Перелік посилань

1. Nedelcu, D., Gillich, G. R., Bloju, A., & Padurean, I. (2020). The kinematic and kinetostatic study of the shaker mechanism with SolidWorks Motion. *Journal of Physics: Conference Series*, 1426(1), 012025.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1426/1/012025>
2. Pandzic, A., Hodzic, D., & Hajro, I. (2018). Development of Integrated Intelligent CAD System for Design of Cylindrical Helical Compression Valve Springs. *DAAAM Proceedings*, 0665–0673.
<https://doi.org/10.2507/29th.daaam.proceedings.096>
3. Saric, I., Muratovic, E., Muminovic, A., Muminovic, A. J., Colic, M., Delic, M., Pervan, N., & Mesic, E. (2021). Integrated Intelligent CAD System for Interactive Design, Analysis and Prototyping of Compression and Torsion Springs. *Applied Sciences*, 12(1), 353.
<https://doi.org/10.3390/app12010353>
4. Parovik, R. (2020). Mathematical Modeling of Linear Fractional Oscillators. *Mathematics*, 8(11), 1879.
<https://doi.org/10.3390/math8111879>
5. Zabolotnyi, K., & Shkut, A. (2019). Calculation of modernized screen design. *Collection of abstracts of the 14th International Forum of Students and Young Scientists «Widening our horizons»*, Dnipro, 250–252
6. Заболотний, К.С., Жупієв, О.Л., & Шкут, А.П. (2020). Обґрунтування методики моделювання та розробка технічного проекту модернізованої конструкції грохота типу ГВЧ-31С. *Потураївські читання: Матеріали XVIII міжнародної наук.-технічної конф., м. Дніпро*, 3–5.

ABSTRACT

Purpose. Develop a methodology for modeling the elastic element of a screen using the SolidWorks Motion environment.

The methods. The methodology for modeling the elastic element of the screen was developed on the basis of the Dassault Systèmes SolidWorks software product. The mathematical expression that describes the behavior of the spring built into SolidWorks Motion is derived. Also, in the same software product, graphs are built that reflect the behavior of the system in which the spring model is used.

Findings. Based on the study of the computational experiment data, a mathematical model of the spring was developed for use in the SolidWorks Motion software product. An analytical expression for the critical vertical force corresponding to the transition of the spring from the upper position (compression spring) to the lower position (tensile spring) is obtained. The spatial vibrations of a plate supported by four springs along its perimeter are investigated. It was found that the plate exhibits

behavior similar to a system with three degrees of freedom. In order to reduce the deviations, the use of horizontal springs was proposed. The methodology used was applied to the dynamic analysis of the screen.

The originality. The mathematical model of the spring, which is embedded in the SolidWorks Motion software product, is determined. An expression is given that determines the value of the critical load, which will lead to a change in the position of the spring.

Practical implementation. The equation that describes the state of a spring can be used when calculating elastic elements of machinery using SolidWorks Motion methods. This is especially relevant when designing mechanisms and systems where it is necessary to accurately predict the behavior of elastic elements during their operation. The use of simulation software allows engineers to optimize designs and test various load scenarios without creating prototypes.

Keywords: *SolidWorks Motion, spring, mathematical model.*