

*Апанасенко Я. А. магістр, Попов В. М., магістр, Пархоменко А. І., бакалавр,
Гуцул В. С., бакалавр, Манойленко О. П., доцент*

Київський національний університет технологій та дизайну

CAE-АНАЛІЗ СИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ МЕХАТРОННОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ НАКЛАДНОЇ КИШЕНІ

Анотація. Мехатронні системи відіграють ключову роль у сучасному машинобудуванні та автоматизації, забезпечуючи інтеграцію механіки, електроніки та інформаційних технологій. Ці системи здатні підвищити ефективність та точність у промислових процесах, таких як фальцювання країв накладних кишень на швейних напівавтоматах, де поряд з високою точністю роботи обладнання, механізми мають мати високий запас міцності. У статті розглядаються міцнісні характеристики мехатронних систем, а також застосування методів CAE-аналізу та кінцевих елементів для дослідження механічних напружень і деформацій. Особлива увага приділена ролі машинного навчання для автоматизації налаштувань систем і оптимізації роботи мехатронних пристроїв. Окремо розглянуто використання сучасних CAE-платформ, таких як SolidWorks Simulation, для моделювання силових параметрів, що дозволяє підвищити ефективність виробничих процесів та зменшити ризики поломок. Запропоновані методики досліджень забезпечують контроль надійності мехатронних систем, сприяють зниженню витрат на технічне обслуговування та попередженню можливих поломок в умовах інтенсивного виробництва.

Ключові слова: CAE-аналіз; силові параметри; фальцювання; кінцеві елементи (FEM); моделювання; оптимізація конструкції; накладна кишеня; фальцювання країв; міцнісні характеристики; механічні напруження; деформації; SolidWorks Simulation; силові параметри.

*Apanasenko Y. A., Popov V. M., Parkhomenko A. I., Hutsul V. S., Manoilenko O. P.
Kyiv National University of Technologies and Design*

CAE-ANALYSIS OF FORCE PARAMETERS IN A MECHATRONIC SYSTEM FOR FORMING A PATCH POCKET

Abstract. Mechatronic systems play a key role in modern mechanical engineering and automation by integrating mechanics, electronics, and information technology. These systems enhance efficiency and precision in industrial processes, such as the edge folding of pocket flaps on semi-automatic sewing machines, where, in addition to high precision, the mechanisms must also have a high safety margin. The article discusses the strength characteristics of mechatronic systems and the application of CAE analysis methods and finite element techniques to study mechanical stresses and deformations. Special attention is given to the role of machine learning for automating system settings and optimizing the performance of mechatronic devices. The use of modern CAE platforms, such as SolidWorks Simulation, is examined for modeling force parameters, which enhances production efficiency and reduces the risk of breakdowns. The proposed research methods ensure reliability control of mechatronic systems, contribute to reducing maintenance costs, and help prevent potential breakdowns under intensive production conditions.

Keywords: CAE analysis; force parameters; edge folding; finite element method (FEM); modeling; design optimization; pocket flap; edge folding; strength characteristics; mechanical stresses; deformations; SolidWorks Simulation; force parameters.

Вступ. Мехатронні системи є важливою складовою сучасного машинобудування та автоматизації, адже дозволяють ефективно поєднувати механіку, електроніку та інформаційні технології в єдиній інтегрованій системі. Ці системи забезпечують високий

рівень інтеграції та ефективності у різноманітних промислових процесах, де зростає потреба в точному аналізі та оптимізації силових параметрів [1–3]. Це особливо актуально у таких технологічних процесах, як фальцювання країв накладної кишені на швейних напіваавтоматах, де вимагається високий рівень точності та стабільності роботи [4]. Врахування динамічних навантажень є критично важливим для забезпечення безперебійної та стабільної роботи обладнання в цих умовах інтенсивного виробництва [1–3]. З цією метою застосовуються інтелектуальні сенсори, що використовуються для моніторингу температури, швидкості та сили притискання, забезпечують можливість контролю параметрів у реальному часі, що, в свою чергу, дозволяє уникнути перегріву пневматичних та електричних систем та своєчасно виявляти потребу в технічному обслуговуванні [5, 6].

У зв'язку з цими вимогами зростає роль методів CAE-аналізу для дослідження динамічних характеристик та оптимізації роботи мехатронних систем [7, 8]. Завдяки застосуванню таких методів стає можливим досягнення високої надійності та довговічності компонентів систем. Особливо важливою є можливість моделювання різних параметрів, таких як навантаження та тертя між робочими поверхнями, циклічність навантажень, що дозволяє запобігти поломкам і підвищити ефективність роботи мехатронних пристроїв [6, 7]. Останнім часом значно розширились можливості вивчення цих систем завдяки застосуванню новітніх методів моделювання та оптимізації, що забезпечують точний аналіз силових параметрів і термодинамічних характеристик [3, 8–11].

Додатково, однією з ключових розробок у сфері мехатроніки є використання кінцевих елементів для аналізу механічних напружень і деформацій, що дозволяє не лише точніше розраховувати сили, що діють на компоненти мехатронної системи [7–11], але й оптимізувати конструкцію системи, забезпечуючи рівномірний розподіл навантажень під час фальцювання [4]. Це важливо для запобігання деформацій матеріалу та забезпечення високої якості кінцевого продукту.

Не менш важливим напрямом є розробка сенсорних систем для контролю навантаження та вібрацій у мехатронних системах [3]. Вібраційні сенсори використовуються для виявлення відхилень від нормальної роботи та прогнозування потреби в технічному обслуговуванні, що дозволяє своєчасно усувати несправності та знижувати ризик аварій. Це сприяє збільшенню ефективності роботи системи та підвищенню її надійності [6, 9]. Інтеграція таких технологій у процеси фальцювання країв матеріалів накладної кишені дає змогу забезпечити високу якість технологічного процесу та надійність мехатронних пристроїв автоматизованого обладнання швейного виробництва. Аналіз силових параметрів і термодинамічних характеристик [3] допомагає знижувати ймовірність дефектів при обробці різних матеріалів та підвищувати якість кінцевого продукту.

Сучасні інтегровані CAE-платформи є важливими інструментами для дослідження та оптимізації мехатронних систем [12–15], що особливо важливо для процесів, які вимагають точного аналізу силових параметрів, таких як фальцювання. Ці платформи поєднують численні методи моделювання, аналізу та оптимізації, що дозволяє здійснювати всебічний підхід до розробки, аналізу та вдосконалення механічних систем. Наприклад, платформа ANSYS дозволяє не лише проводити розрахунки методом кінцевих елементів (FEM), але й здійснювати теплові, вібраційні й термічні аналізи, що є надзвичайно важливим для аналізу складних процесів, таких як фальцювання, де температурні та механічні навантаження мають важливу роль [4].

Такі потужні платформи, як COMSOL Multiphysics, Siemens NX, SolidWorks та ін. також використовуються для моделювання складних взаємодій між різними фізичними

явищами, що дозволяє отримати точні результати для розрахунку силових параметрів. Це дає змогу більш ефективно аналізувати конструкцію мехатронної системи та знижувати ймовірність поломок, а також оптимізувати використання ресурсів і час на технічне обслуговування [2, 6, 8]. Інтеграція таких платформ забезпечує не лише точний аналіз силових параметрів, але й полегшує прийняття рішень у реальному часі, що значно підвищує ефективність проєктування та аналіз мехатронних систем.

Таким чином, застосування сучасних CAE-платформ та інтеграція інтелектуальних сенсорів у мехатронні системи дозволяє значно покращити процеси проєктування, аналізу та оптимізації таких систем. В цей же час комплексне використання цих програмних інструментів забезпечує всебічний підхід до аналізу механізмів і конструкцій, що підвищує їх ефективність, безпеку та надійність в експлуатації. Це дозволяє виявити потенційні проблеми на етапі проєктування та оптимізувати конструкції для досягнення кращих експлуатаційних характеристик.

Постановка задачі. Сучасні мехатронні системи для автоматизації технологічних процесів напівавтоматів потребують детального дослідження їх силових характеристик для забезпечення надійності та довговічності роботи при інтенсивних умовах експлуатації. Конструкція та кінематичні характеристики механізму Durkopp-Adler 804 (Німеччина) частково досліджені [4], проте відсутність аналізу силових характеристик його складових обмежує можливість повної оцінки надійності конструкції при максимальних навантаженнях. Задача дослідження полягає у визначенні напружень у кінематичних парах та деталях механізму за максимальних навантажень, що є критично важливим для підвищення ефективності та забезпечення безперервної експлуатації обладнання.

Основні завдання дослідження:

Розробити силову модель механізму фальцювання накладної кишені, визначивши зусилля захвату, напруження у кінематичних парах та міцність деталей при робочому тиску 0,8 МПа.

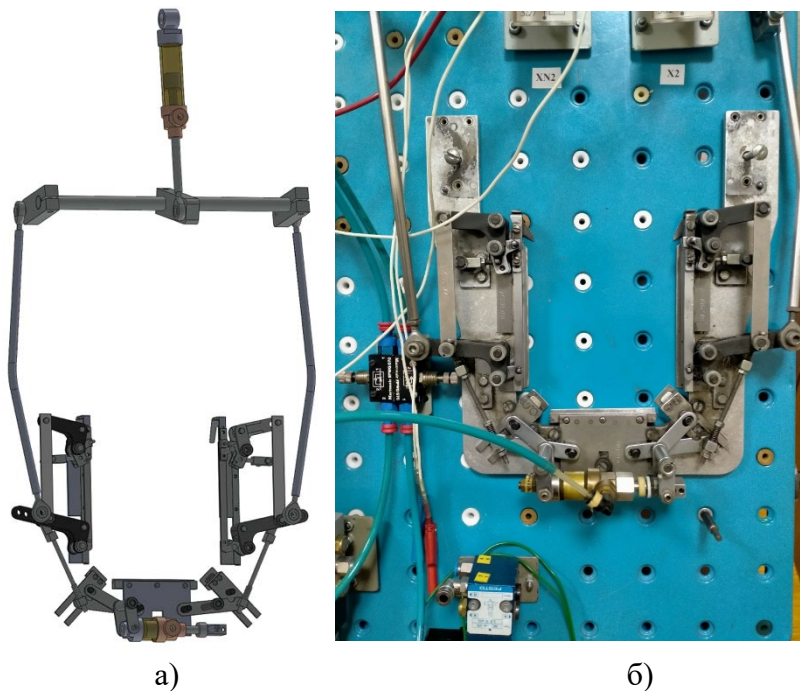
1. Провести комп'ютерне моделювання та силовий аналіз у SolidWorks для оцінки динамічних параметрів конструкції (напруження, переміщення, деформації, коефіцієнт запасу міцності) з метою оцінки її надійності та довговічності.

2. Аналіз дозволить оцінити ефективність та економічну доцільність конструкції у реальних умовах експлуатації.

Проведений аналіз дозволить зробити висновок щодо ефективності та доцільності використання запропонованої конструкції механізму з точки зору надійності і міцності у реальних умовах інтенсивної експлуатації.

Результати дослідження. Для виконання поставлених задач розробленої конструкції механізму формування накладної кишені використано систему SolidWorks (рис. 1а), яка повністю відповідає реальній конструкції механізму фальцювання напівавтомата Durkopp-Adler 804 (Німеччина) (рис. 1б).

Кінематичний та динамічний аналіз механізму фальцювання накладної кишені вимагає значень вхідних параметрів, таких як швидкість ланок, їх маса, момент інерції, розташування центру мас тощо. Оскільки конструкція механізму визначена ланками, запозиченими від іншого виробу, використання аналітичних або експериментальних методів для визначення масо-інерційних параметрів є трудомістким і потребує багато часу. Тому масо-інерційні параметри визначаються через побудову 3D моделі та використання команди «Mass Properties» у SolidWorks. Результати обчислень наведені в таблиці 1. Значення моменту інерції деталі вказано відносно площини, в якій деталь здійснює рух. Отримані результати таблиці 1 будуть корисні при аналітичних розрахунках основаних методах теорії механізмів і машин.



Джерело розроблено авторами.

Рис. 1. Конструкція механізму для фальцювання країв матеріалу напівавтомата Durkopp-Adler 804: а – 3D модель механізму, б – експериментальна установка для дослідження мехатронної системи

Таблиця 1

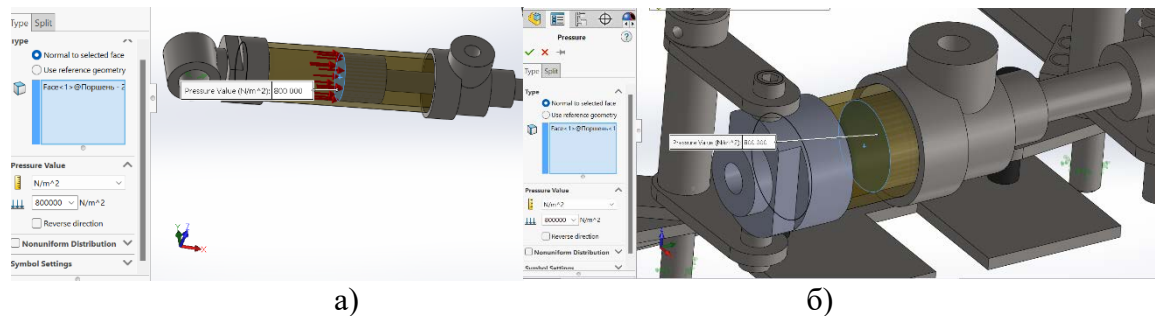
Масо-інерційні параметри ланок механізму

№ п/п	Ланка	Координати центра мас, мм			Маса, кг	Момент інерції, кг·м ²
		X	Y	Z		
1	Коромисло двохплече 40x20	2,82	11,93	7,2	0,048	$8,03 \cdot 10^{-8}$
2	Шатун 100	50,25	10	0	0,02	$9,2 \cdot 10^{-23}$
3	Коромисло 10	0	2,85	0	0,008	$1,71 \cdot 10^{-24}$
4	Коромисло 3х плече 20x40x62	23,7	2,2	0,5	0,096	$1,48 \cdot 10^{-7}$
5	Коромисло 2х-плече 20x16	3,5	2,3	0	0,0134	$1,38 \cdot 10^{-8}$
6	Коромисло регульоване	0	14,5	0	0,0124	$1,58 \cdot 10^{-6}$
7	Шатун	4,3	0	1,8	0,026	$1,13 \cdot 10^{-9}$
8	Шатун-100	2,5	31	0	0,02	$1,21 \cdot 10^{-6}$
9	Коромисло 2х плече	2,6	3,2	4,7	0,034	$1,13 \cdot 10^{-9}$
10	Прихват-шатун	49,2	3,2	4,7	0,075	$2,66 \cdot 10^{-5}$
11	Коромисло 2х плече	32,2	0	0	0,015	$1,25 \cdot 10^{-7}$
12	Прихват кутовий	30,2	6,9	2,18	0,027	-
13	Прихват нижній	94,1	14,5	4,1	0,062	-
14	Шатун з сферичними головками	16,8	11,2	15,4	0,041	$1,06 \cdot 10^{-5}$

Джерело: авторська розробка.

Для оцінки зусиль у пневмоприводах та визначення напружень в деталях механізму застосовано програмне забезпечення SolidWorks Simulation. Цей додаток здійснює комплексний аналіз напруженого та деформованого стану твердих тіл, а також

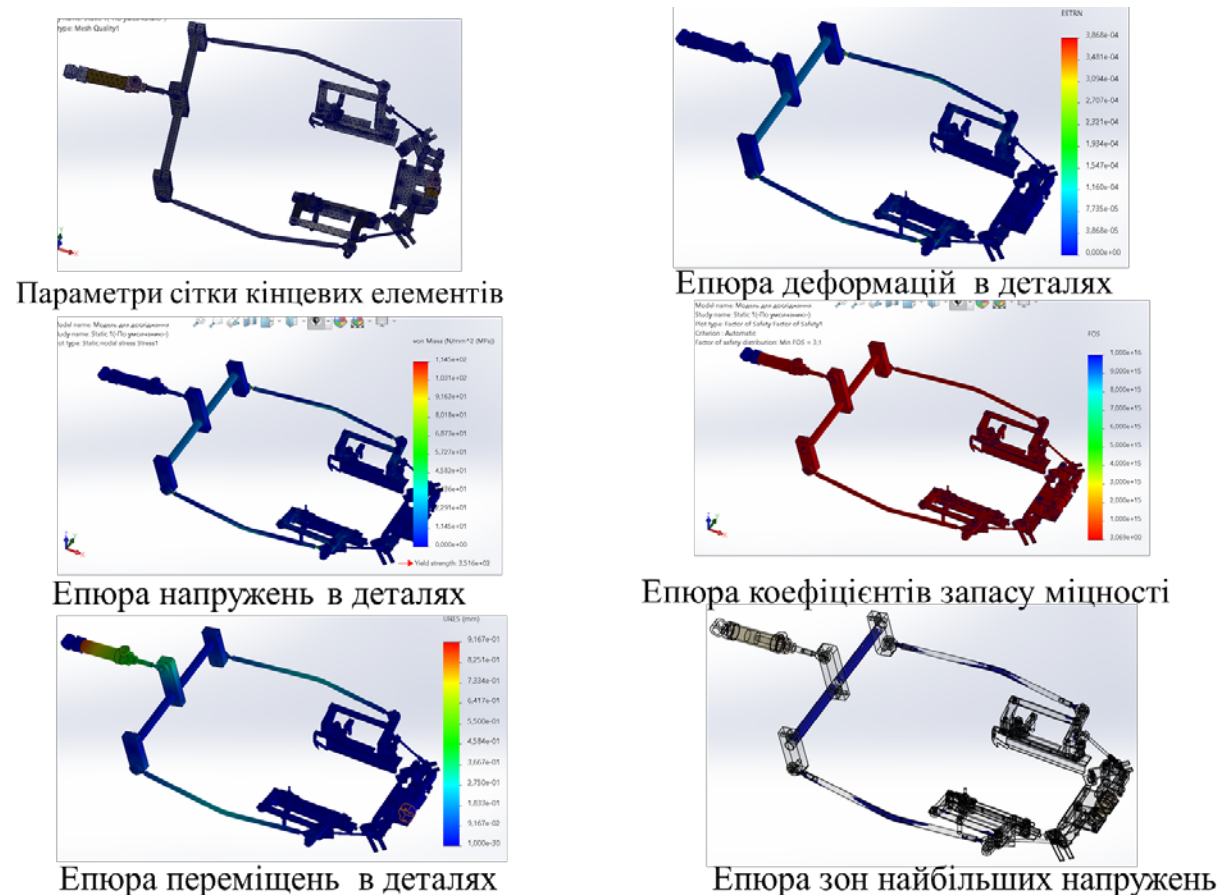
досліджує теплообмін в тілах методом кінцевих елементів. З цієї метою було обране навантаження 0,8 МПа на поршні в пневмоциліндрах (рис. 2, а, б),



Джерело розроблено авторами.

Рис. 2. Параметри навантаження пневмоциліндрів механізму для фальцювання країв матеріалу напівавтомата Durkopp-Adler 804: а – пневмоциліндр бокових приватів; б – пневмоциліндр передніх прихватів

Отримані результати дослідження: 3D епюри напружень, переміщень, деформацій, а також значення коефіцієнта запасу міцності деталей механізму представлені на рис. 3. Максимальні значення напружень, переміщень, деформацій та мінімальне значення коефіцієнта запасу міцності наведено в таблиці 2.



Джерело розроблено авторами.

Рис. 3. Епюри навантажень в механізмі фальцювання накладних кишень напівавтомата Durkopp-Adler 804 (Джерело розроблено авторами)

Таблиця 2

Значення динамічних параметрів

Переміщення $\Delta_{\max}$, мм	Напруження $\sigma_{\max}$, МПа	Коефіцієнт запасу міцності $k_{\min}$	Деформацій $\epsilon_{\max}$, мм
0,91	114,5	3,07	$3,87 \cdot 10^{-4}$

Джерело: авторська розробка.

Висновки. Силовий аналіз механізму для фальцювання накладних карманів напівавтомата Durkopp-Adler 804 показав, що навантаження в кінематичних парах та ланках механізму не перевищують допустимих значень для використовуваних матеріалів, що підтверджує достатній коефіцієнт довговічності та надійності механізму, з мінімальним значенням $k_{\min}=3,07$. Невелика величина робочих ходів прихватів ($S_1=18$ мм) і переміщень поршнів пневмоприводів ($S_1=40$ мм та $S_2=15$ мм), а також короткий час спрацювання ($t=1$ с), сприяють низьким значенням прискорень (максимальне кутове прискорення $\epsilon=4,4$ с⁻² та лінійне $0,12$ м/с²). Завдяки малій масі ланок це і призводить до мінімальних динамічних навантажень.

Аналіз найбільш навантаженої деталі механізму показав високий коефіцієнт запасу міцності ($k=3,07$) та відносно низькі значення напружень ($\sigma_{\max}=114,5$ МПа) по всьому об'єму деталей механізму. Це свідчить про достатню міцність та надійність конструкції механізму при заданих параметрах навантаження.

Отримані результати таблиці 1 будуть корисні при аналітичних розрахунках оснований методах теорії механізмів і машин.

Список використаної літератури

1. Богуславський В. В., Зайцев О. С. Мехатронні системи: принципи проектування та практичні застосування. Київ: Наукова думка, 2019. 245 с.
2. Петров С. І. Методи і моделі САЕ-аналізу у мехатронних системах. *Технологічний вісник*. 2020. № 4. С. 15–22.
3. Байда С. М., Карпова О. А. Аналіз термодинамічних параметрів мехатронних систем. *Вісник інженерних наук*. 2021. № 6. С. 33–40.
4. Волощук Я. Б., Апанасенко Я. А., Маноїленко О. П. Дослідження силових навантажень схвату для формування кишені автомату Durkopp-Adler 804. *Мехатронні системи: інновації та інжиніринг: тези доповідей VIII Міжнародної наук.-практ. конф.* Київ: КНУТД, 2024. С. 53–54.
5. Johnson, R. A., Roberts, T. J. (2021). *Finite Element Analysis in Mechanical Design: A Practical Guide*. Springer. 389 p.
6. Ковальчук І. І. Сенсори в мехатронних системах: нові розробки та методи контролю. *Промислова автоматика і робототехніка*. 2022. № 1. С. 45–54.
7. Slavov, S., Konsulova-Bakalova, M. (2019). Optimizing Weight of Housing Elements of Two-stage Reducer by Using the Topology Management Optimization Capabilities Integrated in SOLIDWORKS: A Case Study. *Machines*, 7, 9. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines7010009>.
8. Lee, J., Suh, S. (2021). Machine Learning Approaches for Optimization in Mechatronic Systems. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, Vol. 15, No. 3, P. 200–217.
9. Горбунов М. Д. Використання методів кінцевих елементів у конструюванні мехатронних пристроїв. *Прикладна механіка і технічна фізика*. 2023. № 3. С. 18–25.
10. Smith, L. M. (2020). *Smart Sensors for Mechatronic Applications*. IEEE Press. 328 p.
11. Головін А. В. Силові параметри у мехатронних системах: розрахунок і оптимізація. Харків: Технічний університет, 2020. 192 с.
12. Zhao, W. (2021). *Analysis of Vibration in Mechatronic Systems for Precision Control*. Elsevier. 284 p.
13. Wehrle, E., Palomba, I., Vidoni, R. (2021). Modeling, Design and Optimization of Flexible Mechanical Systems. *Appl. Sci.*, 11, 7124. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11157124>.
14. Маноїленко О. П., Шурхал Ю. С., Заяць Я. А. Розробка та дослідження схвату зі складним рухом губок. *Мехатронні системи: інновації та інжиніринг: тези доповідей IV Міжнародної науково-практичної конференції*, м. Київ, 22 жовтня 2020 р. Відп. за вип. Г. І. Хімичева, В. М. Дворжак. Київ: КНУТД, 2020. С. 98–99.
15. Фещенко А. С. Дослідження та розробка захватних пристроїв маніпуляторів: дипломна магістерська робота за спеціальністю 131 Прикладна механіка (наук. кер. О. П. Маноїленко; рец. В. М. Дворжак). Київ: КНУТД, 2022. 72 с.