

УДК 681.51:621.865.8

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2026-28-3

Бартков М. С., ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-9206-365X>

Хмельницький національний університет, м. Хмельницький, Україна

## РОЗРОБКА ТА КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО СТЕНДА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВАКУУМНИХ ЗАХОПЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

*Стаття присвячена вирішенню актуальної науково-практичної задачі створення спеціалізованого дослідницького обладнання для потреб робототехніки легкої промисловості. Об'єктом розробки є автоматизований мехатронний стенд, призначений для моделювання процесів маніпулювання гнучкими плоскими деталями. У роботі детально описано конструкцію стенда, який реалізує метод вакуумного захоплення. Проведено аналіз кінематичної схеми установки, що базується на прецизійних гвинтових передачах для створення контрольованого зусилля відриву. Обґрунтовано архітектуру пневматичної системи зі стабілізацією розрідження через ресивер. Розкрито особливості побудови двоконтурної системи керування на базі мікроконтролерів, що забезпечує синхронізацію механічного руху та високошвидкісного збору даних. Наведено методику проведення багатofакторного експерименту для визначення оптимальних геометричних параметрів вакуумних присосок.*

**Ключові слова:** *робототехніка, експериментальний стенд, вакуумний захват, мехатроніка, пневматична схема, автоматизація, взуттєва промисловість, Arduino.*

**Вступ.** Сучасний розвиток засобів автоматизації у легкій промисловості вимагає створення нових типів маніпуляційних систем, здатних працювати з "незручними" об'єктами. Деталі верху взуття, виготовлені з натуральної шкіри або полімерних матеріалів, мають складну морфологію поверхні, змінну та низьку жорсткість. Це робить використання стандартних вакуумних захватів неефективним без попереднього адаптування їх параметрів. Існуюча проблема полягає у відсутності інструментарію для точного вимірювання сил зчеплення присоски з матеріалом у динаміці. Статичні методи не враховують швидкість падіння вакууму при контакті з шорсткою поверхнею, що є критичним фактором при високошвидкісному сортуванні деталей. Для вирішення цієї проблеми та реалізації запатентованого способу орієнтованої подачі деталей [1] авторами було розроблено унікальний автоматизований стенд. Метою даної статті є детальний технічний опис конструкції, принципу дії та методики використання цього обладнання.

**Постановка проблеми.** Головним викликом при автоматизації переміщення деталей верху взуття є забезпечення надійності їх захоплення. Найбільш поширеним типом робочих органів для таких задач є вакуумні присоски. Однак ефективність їх роботи напряму залежить від герметичності контакту з поверхнею деталі. Наявність природної шорсткості, ворсистості та мікропористості, що характерно для поверхонь плоских деталей взуття, призводить до виникнення неконтрольованих витоків повітря (підосу) через зону контакту. Теоретичні розрахунки, що використовуються для ідеальних поверхонь, не дозволяють з достатньою точністю спрогнозувати силу утримання для таких складних матеріалів. Це призводить до необхідності проведення великої кількості натурних експериментів. Використання існуючих ручних приладів для таких досліджень є неефективним через низьку точність, неможливість фіксації швидкоплинних динамічних процесів та вплив суб'єктивного фактора оператора. Тому актуальним завданням є розробка автоматизованого інструментарію, який дозволив би комплексно досліджувати взаємодію вакуумних захватів з різними матеріалами.

**Аналіз останніх досліджень.** Питання взаємодії пневматичних систем з матеріалами розглянуті в багатьох наукових працях. Дослідники зазначають, що сила зчеплення вакуумного захвату є функцією не лише від рівня розрідження, але й від площі плями контакту та аеродинамічного опору матеріалу. В існуючих публікаціях описано різноманітні методики тестування, проте більшість із них орієнтовані на статичні випробування. Водночас, у реальних виробничих умовах відрив деталі часто відбувається в динаміці – при прискоренні маніпулятора. Відсутність доступних автоматизованих стендів, здатних моделювати такі умови та синхронно реєструвати параметри тиску і сили, стримує розробку адаптивних захватних пристроїв.

**Формулювання цілей статті.** Метою роботи є опис конструкції та принципу дії розробленого автоматизованого експериментального стенда, призначеного для визначення

оптимальних геометричних параметрів вакуумних присосок шляхом дослідження динаміки їх взаємодії з поверхнями взуттєвих матеріалів.

**Загальна концепція та компонування станда.** Розроблений стенд являє собою настільний лабораторний комплекс, що поєднує механічну, пневматичну та електронну підсистеми. Його загальний вигляд представлено на рис. 1.

Установка змонтована на жорсткій основі з композитного матеріалу, що гасить вібрації від роботи двигунів. Компонування є симетричним відносно центральної осі, де розміщено вузол фіксації зразка (13). Основна ідея конструкції полягає у моделюванні "змагання" двох присосок (10 і 11). У реальному технологічному процесі сортування деталь затискається між двома захоплювальними органами, і після їх синхронного розведення залишається на тому, де сила присмоктування вища (тобто на поверхні з меншою шорсткістю). Фізична суть цього явища базується на різниці ефективних площ контакту: на гладкій стороні ущільнювальна юбка присоски забезпечує кращу герметизацію, мінімізуючи витоки повітря, що призводить до глибшого вакууму. Натомість, на ворсистій або шорсткій стороні нерівності на поверхні деталі створюють в зоні контакту з присоскою підсмоктування повітря в порожнині присоски, що знижує силу утримання. Спроектований стенд дозволяє не лише моделювати цю ситуацію, але й кількісно оцінити величину «селективності» захоплення – різницю сил утримання  $F$ . Це дає змогу експериментально підібрати такі параметри пневматичної системи (діаметр дроселя, швидкість відкачки), за яких ця різниця буде максимальною, що гарантує безпомилкове сортування деталей у промислових умовах. Загальний вигляд реалізованої установки з позначенням основних вузлів наведено на рис. 1.

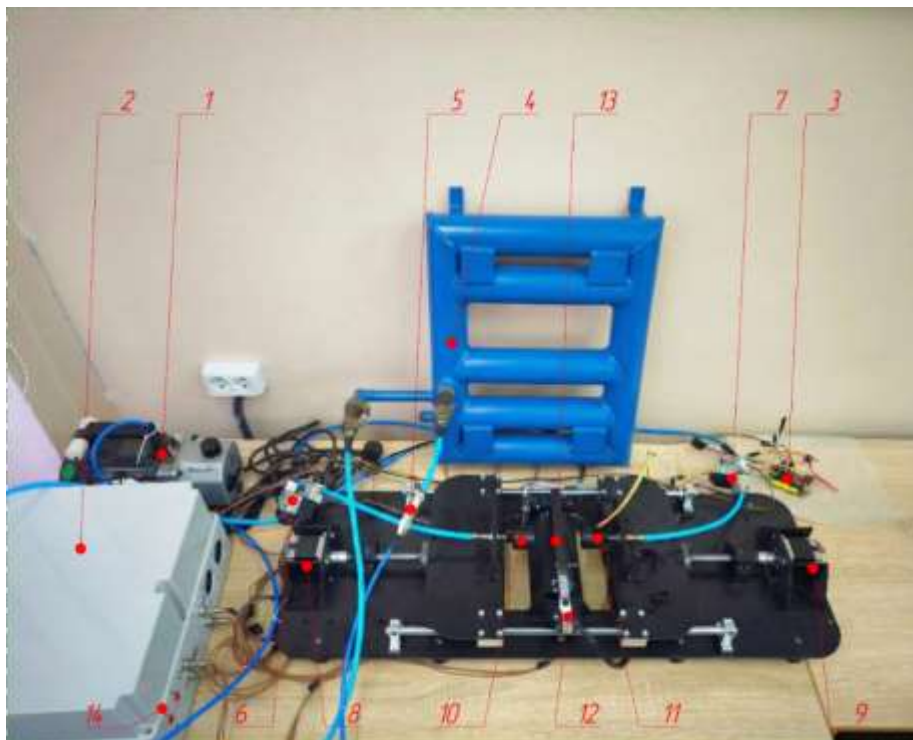


Рисунок 1 – Загальний вигляд та компонування автоматизованого станда: 1 – вакуумний насос; 2 – блок керування (Arduino Mega); 3 – блок збору даних (Arduino Uno); 4 – ресивер; 5 – зворотний клапан; 6, 7 – електромагнітні клапани; 8, 9 – крокові двигуни; 10, 11 – присоски з датчиками; 12 – тензодатчик; 13 – зона фіксації зразка; 14 – панель оператора

**Аналіз кінематичної схеми.** Механічна частина станда відповідає за створення навантаження на розрив або зсув. Кінематична схема (рис. 2) розроблена з урахуванням вимог до точності позиціонування та стабільності швидкості.

Рушійним елементом є крокові двигуни (поз. 1 на схемі, NEMA 23). Вибір крокових двигунів замість колекторних обумовлений необхідністю точного програмного керування переміщенням без використання складних систем зворотного зв'язку по положенню. Обертальний момент передається через пружну муфту (2) на ходовий гвинт (4). Пара "гвинт-гайка" (5) перетворює обертання у поступальний рух каретки з присоскою (6).

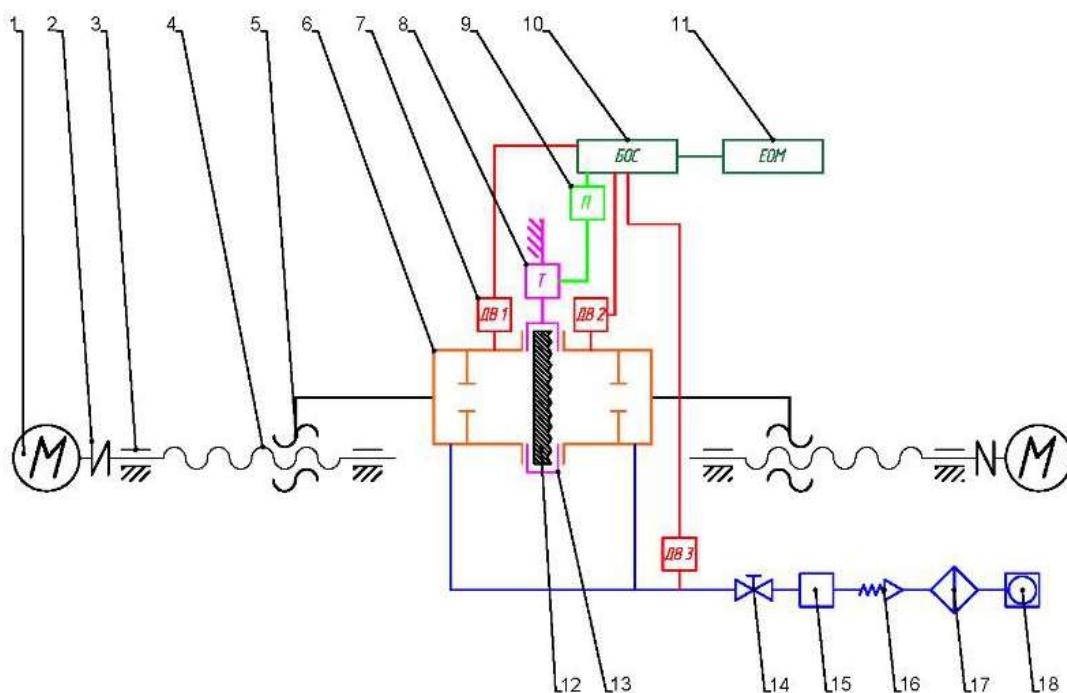


Рисунок 2 – Принципова кінематико-пневматична схема станда: 1 – кроковий двигун (привід); 2 – пружна муфта; 3 – підшипниковий вузол; 4 – ходовий гвинт; 5 – гайка передачі; 6 – вакуумна присоска; 7 – датчики вакууму (ДВ1, ДВ2 – у камерах присосок, ДВ3 – у магістралі); 8 – тензометричний датчик сили (Т); 9 – підсилювач сигналу тензодатчика (П); 10 – блок обробки сигналів (БОС / Arduino Uno); 11 – електронна обчислювальна машина (ЕОМ / ПК); 12 – досліджувана деталь; 13 – рамка фіксації зразка; 14 – електромагнітний клапан; 15 – ресивер; 16 – зворотний клапан; 17 – фільтр очистки повітря; 18 – вакуумний насос

### Інженерне обґрунтування використання гвинтової передачі:

1. Високе зусилля: Гвинтова передача працює як силовий редуктор. Це дозволяє компактним двигунам створювати осьове зусилля до 200 Н, що необхідно для відриву потужних вакуумних присосок великого діаметра.

2. Самогальмування: Завдяки куту підйому різьби, передача є самогальмівною. Це означає, що при знеструмленні двигунів каретки не роз'їдуться під дією пружності матеріалу чи залишкового вакууму. Це критично важливо для проведення статичних випробувань на "повзучість".

3. Плавність ходу: На відміну від пневмоциліндрів, гвинтова передача забезпечує ідеально рівномірний рух без ривків, що дозволяє отримувати чисті графіки з тензодатчика без інерційних шумів.

Архітектура пневматичної системи. Пневматична підсистема (сині лінії на схемі) відповідає за створення, стабілізацію та розподіл вакууму. Джерелом розрідження є пластинчато-роторний насос (18). Оскільки насоси такого типу створюють пульсуючий потік, у систему інтегровано ресивер (15) об'ємом 2 літри.

Функції ресивера:

- Згладжування пульсацій тиску (стабілізація рівня вакууму).
- Створення буферного об'єму для забезпечення режиму "ударного вакууму" – миттєвої подачі максимального розрідження в момент відкриття клапанів, що імітує реальну роботу швидкодіючих роботів.

Керування потоками здійснюється електромагнітними клапанами (14) прямої дії. Система вимірювання тиску: Стенд оснащено розгалуженою системою сенсорів. Датчик ДВ3 вимірює тиск у загальній магістралі (вхідний потенціал), тоді як датчики ДВ1 та ДВ2 встановлені безпосередньо в камерах присосок.

**Електронна система керування та збору даних.** Для забезпечення автономності та високої швидкодії було розроблено двоконтурну систему керування, структура якої наведена на рисунку 3.

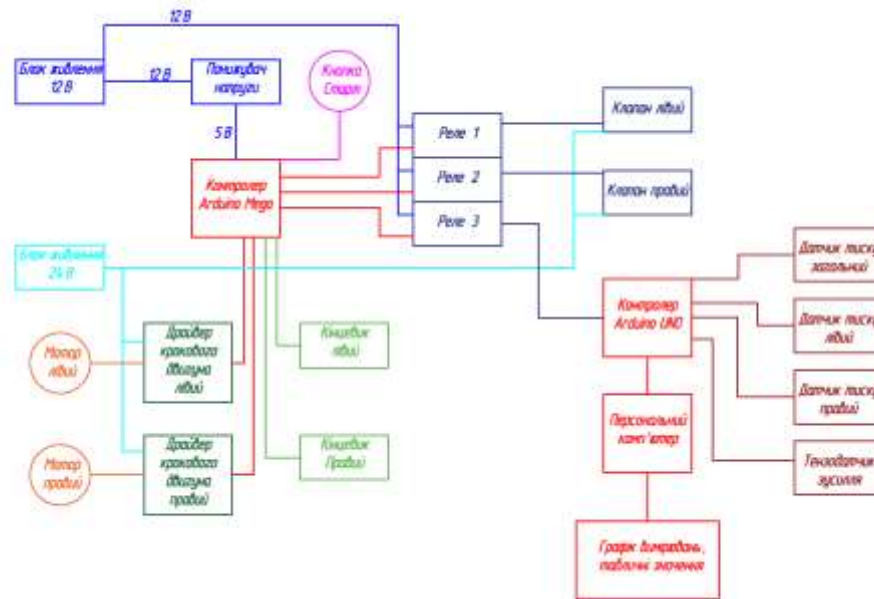


Рисунок 3 – Блок-схема електричних з'єднань.

Система розділена на два рівні:

**Рівень керування:** Реалізований на мікроконтролері Arduino Mega. Цей контролер відповідає за логіку роботи механізмів. Він генерує послідовності імпульсів для драйверів двигунів (забезпечуючи синхронний або роздільний рух кареток) та керує релейним модулем, який комутує силові клапани.

**Рівень вимірювання:** Реалізований на мікроконтролері Arduino Uno. Його задача – безперервне опитування датчиків. Arduino Uno зчитує аналогові сигнали з датчиків тиску та цифровий сигнал з підсилювача тензодатчика HX711.

**Синхронізація:** Між контролерами реалізовано апаратний інтерфейс синхронізації. Коли Arduino Mega починає активну фазу експерименту (відкриває вакуум або вмикає двигуни), вона подає логічний сигнал на вхід переривання Arduino Uno. Це ініціює запис даних. Такий підхід гарантує, що часова шкала на графіках тиску і сили буде ідеально синхронізована з початком фізичного процесу.

**Методика експериментальних досліджень.** Розроблений стенд є універсальним інструментом. Основна методика досліджень полягає у визначенні впливу геометричних параметрів присоски на силу утримання.

Для цього застосовується план повного факторного експерименту. Змінними факторами виступають параметри змінних робочих органів (присосок):

- X1 – Діаметр дросельного отвору (мм). Визначає динаміку наростання вакууму та чутливість до витоків.
- X2 – Внутрішній діаметр (мм).
- X3 – Зовнішній діаметр (мм). Різниця (X3 - X2) визначає площу ущільнювальної юбки.

Матриця планування (таблиця 1) передбачає проведення серії з 15 дослідів для різних комбінацій факторів.

Алгоритм проведення дослідів:

1. Встановлення присосок з параметрами згідно з планом.
2. Закріплення зразка матеріалу (наприклад, шкіра ВРХ) у тензометричну рамку.
3. Запуск автоматичного циклу:
  - зведення кареток до контакту з матеріалом.
  - відкриття клапанів (подача вакууму).
  - витримка часу  $t$  для стабілізації тиску.
  - розведення кареток з заданою швидкістю  $V$ .
  - фіксація моменту відриву.
4. Збереження масиву даних на ПК.

Програмне забезпечення та обробка даних. Для взаємодії з оператором та візуалізації процесів розроблено програмне забезпечення на мові Python. Скрипт виконує такі функції:

Таблиця 1 – Матриця планування експерименту

X1	X2	X3
3.0	25.0	35.0
3.0	15.0	35.0
1.0	25.0	35.0
1.0	15.0	35.0
2.0	20.0	35.0
3.0	20.0	40.0
3.0	20.0	30.0
1.0	20.0	40.0
1.0	20.0	30.0
2.0	20.0	35.0
2.0	25.0	40.0
2.0	25.0	30.0
2.0	15.0	40.0
2.0	15.0	30.0
2.0	20.0	35.0

- Зчитування потоку даних з СОМ-порту.
- Фільтрація шумів тензодатчика (медіанний фільтр).
- Побудова графіків у реальному часі та автоматичний розрахунок максимальної сили відриву (F) та залишкового тиску в момент відриву.

Аналіз отриманих поверхонь відгуку дозволяє знайти таку конфігурацію присоски, яка забезпечує максимальну різницю сил утримання між лицьовою та виворітною стороною матеріалу, що є необхідною умовою для надійного автоматичного сортування.

**Висновок.** Розроблено конструкцію та виготовлено діючий зразок автоматизованого стенда, що дозволяє моделювати динамічні процеси вакуумного захоплення шорстких матеріалів. Використання гвинтових передач та жорсткої рами забезпечило високу точність позиціонування та відсутність паразитних коливань при вимірюванні сил. Впровадження пневматичної схеми з ресивером та диференціальним вимірюванням тиску дозволило дослідити вплив шорсткості матеріалу на ефективність захоплення. Двоконтурна система керування забезпечила надійну синхронізацію механіки та вимірювального тракту, що дозволяє отримувати високоточні експериментальні дані для проектування робототехнічних систем легкої промисловості.

#### Інформаційні джерела

1. Спосіб орієнтованої подачі на обробку плоских деталей... з пристроєм переорієнтації: пат. 160149 Україна: МПК В65Н 3/64 / Кармаліта А.К., Пундик С.І., Бартков М.С.; заявник Хмельницький нац. ун-т. № u202500915; заявл. 03.03.2025; опубл. 06.08.2025, Бюл. № 32.
2. Monk S. Programming Arduino: Getting Started with Sketches. McGraw-Hill Education, 2016.

UDC 681.51:621.865.8

**Bartkov M.**

Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine

#### DEVELOPMENT AND DESIGN-TECHNOLOGICAL FEATURES OF AN AUTOMATED STAND FOR RESEARCHING VACUUM GRIPPING SYSTEMS

*The article is devoted to solving the urgent scientific and practical problem of creating specialized research equipment for the needs of light industry robotics. The object of development is an automated mechatronic stand designed for modeling the processes of manipulating flexible flat parts. The work describes in detail the design of the stand, which implements the vacuum gripping method. The kinematic scheme of the installation based on precision screw gears for creating a controlled separation force is analyzed. The architecture of the pneumatic system with vacuum stabilization through the receiver is substantiated. The features of building a dual-circuit control system based on microcontrollers are disclosed, which provides synchronization of mechanical movement and high-speed data collection. The methodology for conducting a multifactor experiment to determine the optimal geometric parameters of vacuum suction cups is presented.*

**Key words:** robotics, experimental stand, vacuum gripper, mechatronics, pneumatic scheme, automation, shoe industry, Arduino.

Дата першого надходження  
статті до видання  
11.03.2026 р.

Дата прийняття статті  
до друку  
27.04.2026 р.

Дата  
оприлюднення  
30.05.2026 р.