

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет транспорту та механічної інженерії

(повне найменування факультету)

Кафедра прикладної механіки та мехатроніки

(повна найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»
ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЙ ОБЛАДНАННЯ
З МЕХАТРОННИХ МОДУЛІВ ДЛЯ ПАКУВАННЯ
ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ**

спеціальність 131 Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Прикладна механіка»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ІМм-21

Степанюк Максим Вікторович

(підпис)

Керівник:

д.т.н., професор

Повстяной Олександр Юрійович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«__» _____ 2025 р.

Гарант освітньої програми:

к.т.н., доцент

Четвержук Тарас Іванович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *транспорту та механічної інженерії*

Кафедра *прикладної механіки та мехатроніки*

Ступінь вищої освіти: *магістр*

Галузь знань: *13 Механічна інженерія*

Спеціальність: *131 Прикладна механіка*

Освітня програма: *«Прикладна механіка»*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Р. Г. Редько

« ___ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ДРУГОГО (МАГІСТЕРСЬКОГО) РІВНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Степанюка Максима Вікторовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: *Оптимізація конструкцій обладнання з мехатронних модулів*

для пакування продуктів харчування

Керівник роботи: *д.т.н., професор Повстяной Олександр Юрійович*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «14» червня 2025 року №391/01-07

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи: «1» грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: *мехатронні модулі, харчові сипкі продукти, технології формування*

та кріплення упаковки

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Огляд існуючих компонувань машин для групового пакування

2. Методологія наукового дослідження.

3. Методологія створення обладнання для спеціального пакування харчових сипких продуктів

4. Впровадження конструкцій модулів для роботи обладнання спеціального пакування

харчових продуктів

5. Перелік графічного матеріалу :

графічний матеріал виконано у вигляді презентації, яка складається з 10 слайдів

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1</i>	<i>Повстяной О.Ю.</i>		
<i>Розділ 2</i>	<i>Повстяной О.Ю.</i>		
<i>Розділ 3</i>	<i>Повстяной О.Ю.</i>		
<i>Розділ 4</i>	<i>Повстяной О.Ю.</i>		
<i>Нормоконтроль</i>			
<i>Показник запозичень тексту</i>			
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Полінкевич Р.М.</i>		

7. Дата видачі завдання 14.06.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

N з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Аналіз проблеми за темою роботи та постановка задач</i>	<i>01.09.2025 р.</i>	<i>виконав</i>
2	<i>Аналіз і вибір напрямків дослідження</i>	<i>10.09.2025 р.</i>	<i>виконав</i>
3	<i>Теоретичне дослідження та практична реалізація</i>	<i>20.09.2025 р.</i>	<i>виконав</i>
4	<i>Опис засобів розробки об'єкта проєктування</i>	<i>01.10.2025 р.</i>	<i>виконав</i>
5	<i>Загальні висновки та рекомендації</i>	<i>20.10.2025 р.</i>	<i>виконав</i>
6	<i>Оформлення роботи</i>	<i>10.11.2025 р.</i>	<i>виконав</i>
7	<i>Оформлення презентації</i>	<i>20.11.2025 р.</i>	<i>виконав</i>
8	<i>Здача чистового варіанту кваліфікаційної роботи на кафедру</i>	<i>01.12.2025 р.</i>	<i>виконав</i>

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Степанюк М. В.
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис)

Повстяной О. Ю.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Степанюк М. В. Оптимізація конструкцій обладнання з мехатронних модулів для пакування продуктів харчування. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Прикладна механіка» спеціальності 131 Прикладна механіка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел.

У даній кваліфікаційній роботі запропоновано і реалізовано реальну технологію проектування обладнання для групового пакування, яка містить у собі мехатронні модулі заданих умов використання. Це дає можливість створювати нові зразки пакувальних машин найвищого інтелектуального та автоматизованого рівня на основі структурних графів технологічних процесів групового пакування. Розроблено та описано функціонально-структурні схеми та обґрунтовано вибір критеріїв ефективності роботоздатності обладнання для групового пакування.

Ключові слова: пакування, технологічний процес, роботоздатність, мехатронні модулі.

ABSTRACT

Stepanyuk M. Optimization of equipment designs from mechatronic modules for food packaging. Manuscript.

Master's qualification work OP «Applied Mechanics» specialty 131 Applied Mechanics. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025.

Master's qualification work consists of an introduction, 4 chapters, conclusions, list of used sources.

In this qualification work, a real technology for designing equipment for group packaging is proposed and implemented, which includes mechatronic modules of specified conditions of use. This makes it possible to create new samples of packaging machines of the highest intellectual and automated level based on structural graphs of technological processes of group packaging. Functional and structural diagrams are developed and described, and the choice of efficiency criteria for the operability of equipment for group packaging is justified.

Keywords: packaging, technological process, operability, mechatronic modules.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ КОМПОНУВАНЬ МАШИН ДЛЯ ГРУПОВОГО ПАКУВАННЯ.....	9
1.1 Фізико-механічні властивості пакувальних одиниць як об'єктів групового пакування.....	9
1.2 Технології формування та способи кріплення групової упаковки.....	13
1.3 Аналіз конструкцій обладнання для групового пакування.....	18
1.4 Постановка завдань на кваліфікаційну роботу.....	26
2 МЕТОДОЛОГІЯ НАУКОВОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.....	28
2.1 Програма, об'єкт та предмет досліджень.....	28
2.2 Досліджувані параметри та методи досліджень.....	30
2.3 Методи дослідження мехатронних модулів захоплювання.....	31
3 МЕТОДОЛОГІЯ СТВОРЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СПЕЦІАЛЬНОГО ПАКУВАННЯ ХАРЧОВИХ СИПКИХ ПРОДУКТІВ.....	39
3.1 Аналіз функціонально-структурних схем обладнання для групового пакування на основі топологічного методу	39
3.2 Побудова моделі обладнання для групового пакування з мехатронних модулів.....	46
3.3 Засади процесу проектування обладнання для групового пакування з мехатронних модулів.....	48
3.4 Порівняльний аналіз обладнання для групового пакування за критерієм енерговитрат.....	50
4 ВПРОВАДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ МОДУЛІВ ДЛЯ РОБОТИ ОБЛАДНАННЯ СПЕЦІАЛЬНОГО ПАКУВАННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ.....	53
4.1 Дослідження режимів роботи мехатронних модулів на основі типової конструкції пневматичного приводу слідкування.....	53
4.2 Дослідження розподілення зусилля утримання між елементами захоплення в комбінованих мехатронних модулях.....	58

ВИСНОВКИ.....	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	63

ВСТУП

Актуальність роботи. В Україні та за кордоном здійснюються інтенсивні науково-технічні дослідження, спрямовані на створення нового покоління високоефективного обладнання для групового пакування харчових продуктів. Ключовою вимогою до проектування такого обладнання є забезпечення можливості оперативного виготовлення машин із широкої номенклатури конструктивних варіантів відповідно до індивідуальних технічних вимог замовника за мінімальних часових і матеріальних витрат. Активне впровадження на підприємствах харчової та переробної промисловості індустріальних технологій укрупнення вантажних одиниць – зокрема групового пакування та пакування готової продукції – зумовлює потребу у створенні автоматизованих пакувальних комплексів із комп'ютерним програмним керуванням. Такі комплекси повинні забезпечувати швидке переналагодження відповідно до змін ринкової кон'юнктури, типів продукції та видів упаковки, що дозволяє оперативно реагувати на сучасні вимоги споживачів.

Таким чином, розробка нового пакувального обладнання з гнучкою структурою та високим рівнем універсальності щодо різних типів і видів упаковки харчових продуктів є одним із пріоритетних завдань сучасного пакувального машинобудування.

Мета магістерської роботи полягає в аналізі та розробці нового пакувального обладнання для групового пакування харчових продуктів на основі використання мехатронних модулів шляхом синтезу його структурної побудови та конструкцій робочих органів.

Основні завдання дослідження:

– аналіз технологічних схем і конструктивних рішень існуючих зразків обладнання для групового пакування харчової продукції з урахуванням способів формування групової упаковки, показників універсальності, конструкцій робочих органів та їх приводів;

– розроблення графа ієрархічної детермінованої структури машини для групового пакування з типових функціональних модулів та встановлення логічних зв'язків між ними;

– формулювання принципів побудови пакувальних машин на основі мехатронних модулів і розроблення їх типових структур для обладнання групового пакування;

– визначення впливу технологічних і конструктивних параметрів мехатронних модулів на можливості їх переналагодження, зокрема на рівні зміни координат зупинки робочих органів під час виконання операцій групового пакування;

– розроблення рекомендацій щодо впровадження нової концепції проектування типових мехатронних модулів переміщення та захоплення елементів групової упаковки у перспективні зразки пакувального обладнання.

Об'єкт дослідження – процес групового пакування харчових продуктів.

Предмет дослідження – параметри процесу та конструктивна реалізація групового пакування харчових продуктів на основі застосування мехатронних модулів у пакувальних машинах.

Особистий внесок магістранта. Основні результати досліджень, висновки та практичні рекомендації, викладені у магістерській роботі, належать автору. Магістрант самостійно визначив мету і завдання дослідження, а також виконав повний комплекс теоретичних і експериментальних досліджень, що забезпечили досягнення поставлених науково-практичних результатів.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ КОМПОНУВАНЬ МАШИН ДЛЯ ГРУПОВОГО ПАКУВАННЯ

1.1 Фізико-механічні властивості пакувальних одиниць як об'єктів групового пакування

Технологічні властивості пакувальних матеріалів визначають характер їхньої поведінки під дією механічних навантажень і належать до властивостей твердих тіл. До них відносять деформаційні характеристики (жорсткість, пластичність, повзучість, твердість, граничні деформації до руйнування), міцнісні показники (межа міцності, довговічність, втомна міцність, робота руйнування за ударного навантаження), а також фрикційні властивості, зокрема коефіцієнти тертя та зношування.

Показники технологічних властивостей не є сталими фізичними константами речовин, оскільки вони істотно залежать від геометричних параметрів матеріалу, умов і методів випробування, складу навколишнього середовища, стану поверхні зразків, а також фазового та релаксаційного стану матеріалу, що зумовлюється його структурою. У зв'язку з цим порівняльний аналіз різних матеріалів за технологічними властивостями можливий лише за умови дотримання стандартизованих умов і режимів їх застосування.

Технологічні властивості матеріалів можуть змінюватися в часі, а для окремих з них характерною є виражена анізотропія. Хоча механічні властивості визначаються силами міжатомної та міжмолекулярної взаємодії, їх безпосередній зв'язок зі структурними характеристиками ускладнюється наявністю дефектів кристалічної ґратки та структурною неоднорідністю, притаманною реальним матеріалам.

За сукупністю технологічних властивостей розрізняють такі основні типи матеріалів:

- жорсткі та крихкі матеріали (високоорієнтовані волокна, скло тощо), для яких характерні високі значення модуля Юнга (понад 10 ГПа) та обмежені відносні подовження при розриві;

- тверді та пластичні матеріали (більшість пластмас, м'які сталі, деякі кольорові метали), що характеризуються модулем Юнга понад 2 ГПа та значними розривними подовженнями;
- еластомери (гуми) — низькомодульні матеріали з рівноважним модулем високоеластичності в межах 0,1...2 МПа, здатні до значних зворотних деформацій;
- в'язкопластичні середовища, які здатні до необмежених деформацій і збереження наданої форми після зняття навантаження (пластичні мастила, глини);
- рідини та розплави солей, металів і полімерів, для яких характерні незворотні деформації плинину та прийняття заданої форми.

Разом із тим поведінка реальних матеріалів є значно складнішою та потребує опису з використанням нелінійних співвідношень, що не зводяться до класичних моделей.

До основних технологічних властивостей матеріалів відносять міцність, відносне видовження, модуль пружності, твердість, коефіцієнт тертя та шорсткість поверхні. Під міцністю розуміють здатність матеріалу протидіяти механічному руйнуванню, а під деформативністю — здатність зазнавати деформацій без втрати цілісності.

Фізико-механічні властивості матеріалів визначають за результатами механічних випробувань. Механічні характеристики речовин різної хімічної природи відзначаються значною різноманітністю, що зумовлює використання широкого спектра методів їх дослідження. Так, ПЕТФ-пляшки повинні витримувати без руйнування протягом 60 с внутрішній гідростатичний тиск 0,98 МПа; скляні пляшки для харчових продуктів відповідно до ДСТУ ГОСТ 10117.1.2003 залежно від групи мають витримувати протягом 60 ± 2 с внутрішній тиск у межах 0,39–1,67 МПа; скляні банки для консервів повинні витримувати без руйнування протягом 5 с тиск 0,4 МПа за місткості до 1000 см³ і 0,3 МПа — за місткості від 1000 до 3000 см³.

Слід зазначити, що руйнування матеріалів зумовлюється двома основними механізмами – пластичним плином і крихким розтріскуванням. Матеріал виявляє

той чи інший характер руйнування залежно від того, який механізм реалізується першим. Якщо первинним є пластичний плин, матеріал класифікують як пластичний; якщо ж руйнування відбувається внаслідок розтріскування до початку пластичної деформації, матеріал вважають крихким. Потенційна можливість обох механізмів руйнування притаманна всім матеріалам.

Твердість є характеристикою здатності матеріалу протидіяти локалізованим напруженням, зосередженим на його поверхні. Для пластмас твердість, зокрема, визначають методом вдавлювання сталеві кульки діаметром 5 мм з подальшим вимірюванням глибини відбитка за заданого навантаження або, навпаки, шляхом визначення прикладеної сили за фіксованої глибини вдавлювання. Підсумкове значення твердості обчислюють як середньоарифметичне результатів шести окремих вимірювань. Зазначений метод не застосовується для газонаповнених пластмас у зв'язку з особливостями їхньої пористої структури.

Для оцінювання твердості матеріалів також використовують статичні методи, зокрема метод склерометрії, який ґрунтується на дряпанні поверхні металів, сплавів, пластмас та інших матеріалів індентором у формі алмазної піраміди.

Пластичність визначають як здатність матеріалу до виникнення залишкової деформації за умов сферичного розтягування зразка, яку виражають у відсотках від величини заданої деформації.

Ударна в'язкість характеризує здатність матеріалу чинити опір дії навантажень, прикладених із високою швидкістю. Її визначають під час руйнування стандартного зразка розміром $10 \times 10 \times 55$ мм із заокругленим надрізом глибиною 2 мм, розташованим у центральній частині, або без надрізу, з використанням маятникового копра.

Модуль пружності E - відношення напруження до відповідної відносної деформації при розтягуванні або згинанні в межах певної пропорційності.

Шорсткість поверхні у виробництві тари контролюють методом порівняння з поверхнею контрольних зразків або еталонів.

Зразки для випробувань вирізають із пакувальної тари у вигляді прямокутних пластин розміром 40×20 мм. Вимірювання виконують щонайменше у трьох різних точках кожного зразка з метою підвищення достовірності отриманих результатів.

Контактні вимірювальні прилади – профілографи та профілометри – забезпечують отримання детальної інформації щодо параметрів шорсткості поверхні. На основі зареєстрованої профілограми обирають базову довжину, в межах якої здійснюють розрахунок числових показників, що характеризують шорсткість поверхні.

Шорсткість поверхні пакувальних матеріалів на полімерній основі істотно залежить від якості полірування формоутворювальних елементів прес-форми, природи та дисперсності наповнювача, а також параметрів технологічного режиму формування. Для поверхонь деталей із реактопластів нормативне значення шорсткості має становити $Ra \leq 1,6$ мкм, тоді як для термопластів — $Ra \leq 0,8$ мкм. Шорсткість паперових матеріалів змінюється у широкому діапазоні. Так, волого- та лугостійкий етикетковий чистоцелюлозний папір CHROMOLUX 900E характеризується шорсткістю лицьової поверхні 0,60 мкм і зворотної – 0,55 мкм; для інших паперових матеріалів типові значення шорсткості становлять 1,1...1,8 мкм, тоді як для синтетичного паперу на основі поліпропілену – 0,5...1,0 мкм.

Відповідно до вітчизняних стандартів, шорсткість поверхні, зокрема покривного шару картону, може визначатися методом, що ґрунтується на принципі проходження слабкого повітряного потоку між краями тонкого металевого кільця та поверхнею зразка. Реалізація цього методу здійснюється за допомогою приладу типу «Bendtsen», при якому вимірюють витрату повітря протягом однієї хвилини, виражену в мл/хв.

Наприкінці ХХ століття були створені вимірювальні системи для оцінювання стану поверхні у тривимірному просторі (3D-системи), що зумовило запровадження поняття «геометрична структура поверхні» (ГСП). Тривимірні вимірювання відкрили нові можливості для просторово-об'ємної оцінки ГСП та аналізу її структурних особливостей. Зокрема, високошвидкісне визначення

тривимірному профілю поверхні різних матеріалів забезпечує інтерферометр-профілометр «Рельєф», розроблений ЦКБ «Арсенал» (м. Київ), який характеризується чутливістю до висоти структурних елементів на рівні 150 нм та похибкою вимірювання профілю поверхні ± 10 нм.

1.2 Технології формування та способи кріплення групової упаковки

У сучасних умовах споживчого ринку значним попитом користуються товари в груповій упаковці, у складі якої представлена не лише однотипна фасована продукція, а й різноманітні вироби з широким діапазоном масових і об'ємних параметрів. З метою підвищення ефективності вантажооброблення в логістичному ланцюгу «виробник – споживач» переважна більшість підприємств харчової промисловості здійснює постачання готової продукції саме у груповій упаковці.

Згідно з термінологічним визначенням, групове пакування – це технологічний процес об'єднання однотипних пакувальних одиниць або непакованої штучної продукції у єдину групову упаковку. Основним призначенням групового пакування є формування вантажної одиниці, зручної для виконання навантажувально-розвантажувальних, транспортних і складських операцій у процесі переміщення продукції від виробника до кінцевого споживача.

Відповідно до функціонального призначення до групового пакування висувається низка вимог, серед яких основними є забезпечення захисту харчової продукції, упакованої у споживчу тару, від впливу зовнішніх чинників, зокрема статичних і динамічних навантажень, вологи, механічних ушкоджень і несанкціонованого втручання, що можуть виникати під час зберігання, транспортування, перевантаження та реалізації продукції.

Нормативною документацією встановлено, що геометричні розміри групової упаковки повинні бути кратними базовому модулю 600×400 мм, а її маса, як правило, не має перевищувати 15 кг. Водночас в умовах розвитку сучасної оптової торгівлі та мереж супермаркетів групова упаковка набуває

додаткових функцій, притаманних споживчій тарі, зокрема забезпечення зручності під час перенесення і розпаковування, надання рекламно-інформаційних відомостей про товар, а також спрощення процесів утилізації.

Групова упаковка, як правило, формується з «жорстких», «м'яких» та «напівжорстких» споживчих упаковок з продукцією таких основних геометричних форм:

– у формі паралелепіпеда, до яких належать картонні та паперові пачки, жерстяні банки для сипкої продукції, пакети з комбінованих матеріалів для рідких і в'язких продуктів, брикети з пресованої продукції, обгорнутої пакувальним матеріалом, а також коробки з дрібноштучною продукцією. Ця група упаковок є найбільш поширеною з огляду на обсяги їх виробництва;

– у формі циліндра, до яких відносяться скляні та ПЕТ-пляшки, металеві банки для напоїв, скляні банки для консервованої продукції, жерстяні банки для м'ясних і рибних консервів, а також пакети з комбінованих матеріалів для молочної продукції та різних видів напоїв.

Для формування групової упаковки застосовують різні види транспортної тари, зокрема ящики з гофрокартону або полімерних матеріалів, спеціальні лотки з гофрокартону та полімерів, короби, а також плоскі листи. Процес групового пакування полягає у послідовному формуванні структурних елементів пакета та їх подальшому переміщенні у транспортну тару.

Алгоритм технологічних операцій, необхідних для формування структурних елементів групової упаковки, визначається насамперед геометричною формою пакувальних одиниць. Зокрема, для виробів у формі паралелепіпеда відповідна послідовність операцій може бути представлена у вигляді технологічної схеми (рисунк 1.1).

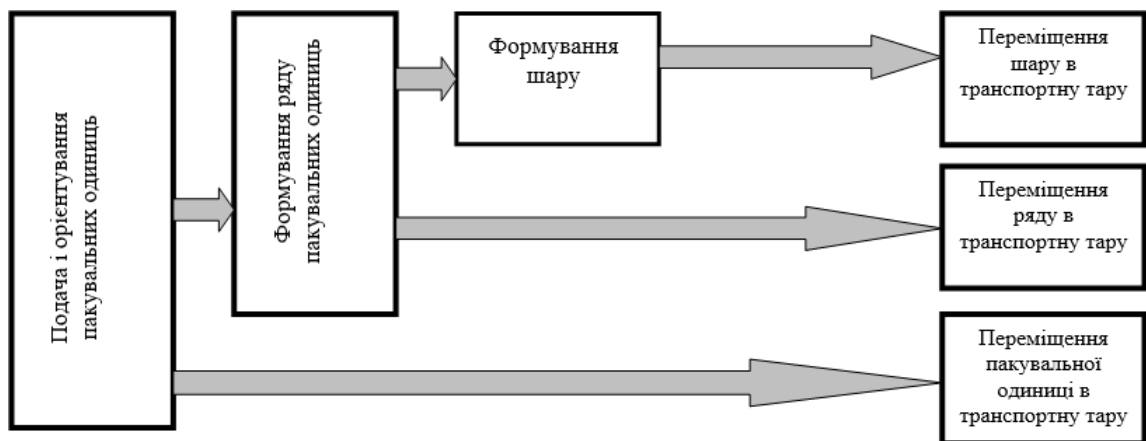


Рисунок 1.1 - Послідовність формування групової упаковки із пакувальних одиниць

Послідовність операцій формування структурних елементів групової упаковки з пакувальних одиниць у формі циліндра представлено на рисунку 1.2.

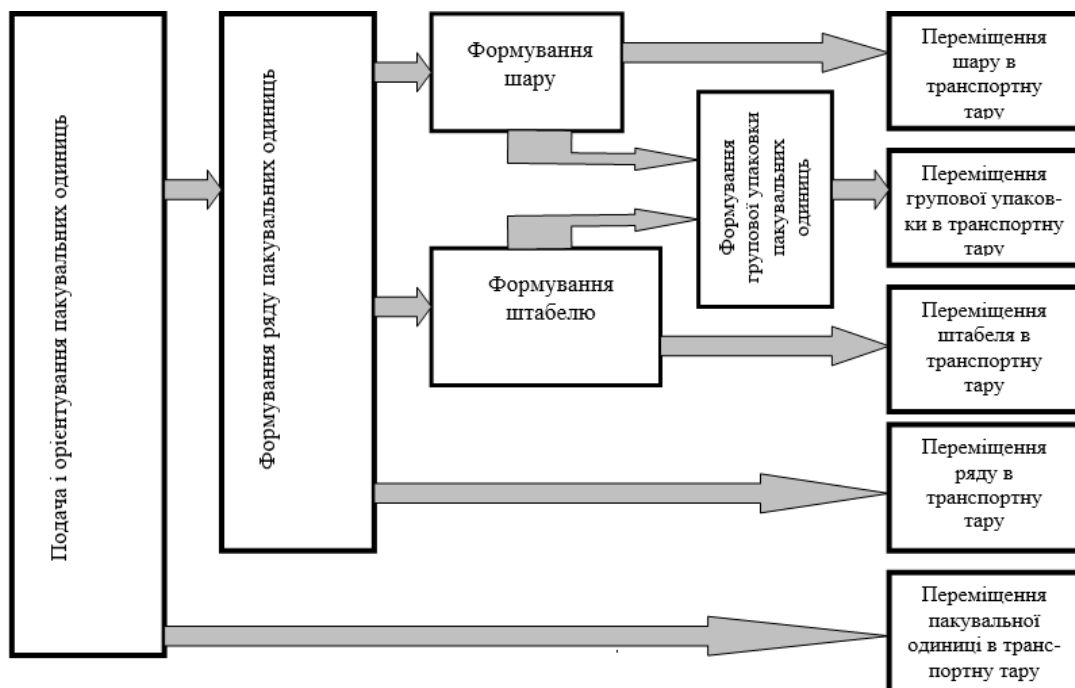


Рисунок 1.2 – Послідовність формування групової упаковки із пакувальних одиниць циліндричної форми

Найбільш типовими технологічними операціями групового пакування є формування ряду, шару (штабеля) та пакета, створення групової упаковки, формування ящика, піддона або лотка, подача тари до зони завантаження, а також переміщення сформованого ряду, шару чи пакета у транспортну тару або його обгортання гнучкими пакувальними матеріалами.

Формування групової упаковки з подальшим обгортанням полімерною плівкою забезпечує можливість виконання різноманітних транспортно-логістичних операцій із пакованою продукцією, надійного скріплення споживчої тари з метою запобігання її відкриванню та пошкодженню під час транспортування, зменшення маси та вартості групової упаковки. Крім того, такий спосіб пакування дає змогу здійснювати візуальний контроль стану пакованої продукції через плівку, оцінювати її цілісність і умови зберігання, забезпечувати захист товару від вологи, пилу, бруду та механічних пошкоджень, подовжувати строки зберігання продукції, а також унеможливити несанкціоноване відкривання упаковок, розкрадання або підміну продукції.

Водночас до недоліків цього способу формування групової упаковки слід віднести підвищену енергоємність процесу, додатковий термічний вплив на харчовий продукт, а також поступову втрату напруженого стану полімерної плівки протягом відносно короткого проміжку часу.

Серед закордонних зразків пакувального обладнання доцільно виокремити групу машин, у яких для формування групової упаковки застосовують картонні лотки або короби. До складу таких ліній додатково входять модулі формування лотка чи короба з плоско-складеної заготовки, що подається з магазину заготовок. Технологічний процес формування піддона, як правило, здійснюється у два етапи: на першому етапі згинають два бокові борти, а після подачі сформованого пакета або шару упаковок на другому етапі формують передні та задні борти. В окремих конструктивних рішеннях картонні піддони формуються повністю на початковому етапі, після чого пакет або шар упаковок укладається у вже сформований піддон.

Найбільш традиційним способом утворення групової упаковки залишається використання ящиків із гофрокартону. Чинними в Україні

стандартами передбачено різні типи таких ящиків, зокрема чотириклапанні, обгорткові, телескопічні, лоткові, пенальні та демонстраційні. Окрім того, широко застосовуються численні конструкції ящиків, систематизовані в класифікації FEFCO-ASSCO. Основними матеріалами для їх виготовлення є картон і гофрокартон. До переваг групового пакування з використанням картонних ящиків належать висока жорсткість готової упаковки, збереження геометричної форми з можливістю формування штабелів, а також уніфікація розмірів, що забезпечує раціональне використання площі і об'ємів під час транспортування та складування продукції.

Сучасні дизайнерські рішення картонних ящиків надають виробникам додаткові можливості для розміщення рекламно-інформаційних матеріалів про пакований продукт. Застосування конструкцій, які шляхом нескладних трансформацій перетворюються на міні-вітрини для продукції («show box»), суттєво розширює їх функціональні можливості у торговельних мережах. Вагомою перевагою картонних ящиків є також їх екологічність, придатність до утилізації та повторного використання у виробництві картону і гофрокартону.

До недоліків групової упаковки такого типу слід віднести обмежену можливість її застосування для важкої продукції, зниження фізико-механічних властивостей за умов підвищеної вологості, а також недостатню стійкість до дії значних зовнішніх статичних і динамічних навантажень.

Для пакування виробів циліндричної форми переважно застосовується схема формування групової упаковки шляхом пошарового укладання продукції з розділенням шарів картонними прокладками.

Формування групової упаковки з комбінованих пакувальних одиниць складної конфігурації або різних габаритних розмірів, як правило, здійснюється із застосуванням робототехнічних систем. Такі системи оснащуються захоплювальними головками з механічними, пневматичними, вакуумними або комбінованими захоплювальними пристроями. Заміна захоплювальних елементів у разі зміни типу або форми упаковки може виконуватися як в автоматичному, так і в ручному режимі, при цьому рух укладальних головок і подача тари до зони завантаження здійснюються синхронно.

Отже, під час вибору способу формування групової упаковки доцільно враховувати ефективність технологічних операцій, що полягає у створенні упаковки, економічної у виготовленні, зручної та ефективної під час транспортування, складування і подальшого використання. Сучасні тенденції розвитку технологій групового пакування орієнтовані на мінімізацію сумарних витрат на формування упаковки, задоволення зростаючих потреб споживачів шляхом упровадження додаткових функціональних рішень, а також забезпечення безпечності та екологічності пакувальних систем. Проведений аналіз свідчить, що більшості зазначених вимог у сучасних умовах відповідає групова упаковка з використанням картонних і гофрокартонних ящиків або лотків.

1.3 Аналіз конструкцій обладнання для групового пакування

Типова структура машини для групового пакування відповідає структурі технологічного процесу формування групової упаковки та включає сукупність функціональних пристроїв згідно з ДСТУ 2379-94, систему приводів виконавчих механізмів і систему керування їх функціонуванням.

Усе обладнання для групового пакування за функціональною ознакою доцільно поділяти на три основні групи: основні пристрої, що безпосередньо виконують окремі технологічні операції та взаємодіють зі споживчими упаковками або структурними елементами групової упаковки; допоміжні пристрої, призначені для формування, переміщення та скріплення транспортної тари; додаткові пристрої, які реалізують контрольні-вимірювальні функції на основі використання систем зворотного зв'язку з елементами контролю.

Кожен механізм або пристрій обладнання для групового пакування є функціонально автономною та конструктивно завершеною сукупністю елементів, об'єднаних спільним функціональним призначенням, і може розглядатися як окремий функціональний модуль. За такого підходу конструкція пакувального обладнання формується шляхом поєднання функціональних модулів між собою безпосередньо через стикові поверхні або за допомогою

спеціальних перехідних корпусних елементів, установлених на рамі чи каркасі відповідно до принципів функціонально-модульної побудови.

Системний підхід до аналізу конструкцій обладнання для групового пакування передбачає їх розгляд у вигляді концептуальних моделей. Машини для групового пакування характеризуються значною різноманітністю компоновочних рішень, які доцільно класифікувати за характером міжопераційного переміщення споживчих упаковок і елементів групової упаковки, а також за схемою просторового розташування функціональних модулів.

Аналіз конструктивних рішень обладнання для групового пакування показав, що виробники пропонують як одиничні зразки машин, так і широкий спектр їх модифікацій, сформованих на основі різних методів компонування. Встановлено, що найчастіше застосовуються методи розділення, об'єднання та інверсії. Метод розділення полягає у створенні складних конструкцій шляхом декомпозиції конструктивно складних вузлів на простіші механізми. Метод об'єднання передбачає формування обладнання шляхом інтеграції механізмів різного функціонального призначення в один модуль. Метод інверсії реалізується шляхом конструктивної заміни одного функціонального модуля іншим зі зміною їх просторового розміщення.

Установлено, що найбільш поширеним у сучасному обладнанні для групового пакування є саме метод інверсії. Зокрема, у різних модифікаціях машин спостерігається заміна модулів орієнтування, зіштовхування та формування групової упаковки залежно від її типу й геометричної форми. Так, для обладнання, в якому траєкторія руху структурних елементів групової упаковки здійснюється за тривимірною схемою переміщення, метод інверсії передбачає зміну захоплювальних пристроїв. Машини, побудовані за таким принципом, характеризуються оптимальними габаритними показниками модифікованих зразків і відрізняються варіативністю просторового компонування функціональних механізмів – від горизонтального до вертикального.

Застосування методу розділення найбільш характерне для конструкцій приводів виконавчих механізмів. Якщо в перших зразках машин для групового пакування рух робочих органів забезпечувався від одного двигуна через систему кінематичних зв'язків, то на сучасному етапі розвитку практично кожен робочий орган оснащується індивідуальним приводом.

Результати використання методу об'єднання найбільш наочно проявляються в конструкціях порталних роботів для групового пакування, де в одному функціональному модулі інтегруються механізми піднімання та переміщення.

Поряд із зазначеними методами дедалі більшого поширення набуває напрям удосконалення конструкцій обладнання шляхом дублювання функціональних модулів, тобто введення до складу машини двох або більше модулів однакового функціонального призначення. Прикладами реалізації такого підходу є синхронна робота однотипних механізмів для формування проміжних елементів групової упаковки за умови подачі споживчих упаковок із декількох конвеєрів; використання кількох пар захоплювальних модулів для укладання шарів упаковок, що забезпечує перехід від машин дискретної дії до машин безперервної дії та підвищення продуктивності за рахунок скорочення тривалості операцій; створення декількох зон завантаження групової упаковки в тару шляхом встановлення паралельно розташованих модулів подачі й відведення заповненої тари.

На основі аналізу конструктивних особливостей машин для групового пакування встановлено, що розвиток їх структури спрямований як на розширення функціональних можливостей, так і на підвищення ефективності роботи, зокрема за рахунок:

— зростання продуктивності шляхом скорочення часу формування структурних елементів групової упаковки, упровадження раціональних за швидкістю законів руху та використання багатопотокових схем подачі упаковки і тари;

- підвищення універсальності обладнання, що забезпечує швидке переналагодження у разі зміни типорозмірів упаковки, тари та пакувального матеріалу;

- автоматизації процесів формування групової упаковки на основі програмно керованих пристроїв і систем датчиків, які забезпечують керування роботою активних робочих органів та контроль положення упаковки, тари і захоплювальних механізмів;

- формування комплексної групової упаковки з виробів, що містять різні види харчової продукції;

- удосконалення функціональних властивостей групової упаковки з урахуванням тенденцій її подальшого розвитку.

Доцільність і ефективність зазначених напрямів підтверджена їх успішним впровадженням у промислове виробництво як вітчизняними, так і зарубіжними виробниками пакувального обладнання. Водночас розвитку структури машин для групового пакування притаманний і негативний аспект, пов'язаний із заміною системного вдосконалення конструкції частковою модернізацією окремих вузлів.

Зокрема, для машин, що формують групову упаковку методом укладання, механічне переналагодження є доцільним у модулях піднімання-опускання та переміщення, тоді як для обладнання, що працює за принципом зіштовхування, — у модулях зіштовхування та орієнтування. При зміні геометричних параметрів і форми транспортної тари в будь-якій схемі формування групової упаковки обов'язковим є механічне переналагодження модулів орієнтування та фіксації тари.

За складністю переналагодження спеціалізоване обладнання умовно поділяють на три групи. До першої належить обладнання з мінімальною складністю переналагодження, пов'язаною виключно зі зміною параметрів тари. Друга група включає машини, переналагодження яких зумовлене зміною характеристик упаковки. Третя група характеризується найбільшою складністю, оскільки потребує адаптації як до змін параметрів упаковки, так і транспортної тари.

Обладнання, здатне адаптуватися до умов виробництва без механічного переналагодження, що характеризується багатофункціональністю технологічних операцій і різноманітням алгоритмів керування, належить до універсального. До цієї групи, як правило, відносять роботизовані технічні комплекси (РТК), які являють собою сукупність промислового робота та допоміжних технічних засобів, що функціонують автономно, реалізуючи багаторазові технологічні цикли.

Промислові роботи за характером програмування поділяють на три покоління. В умовах сучасного виробництва в Україні переважно застосовуються роботи другого покоління, які здатні сприймати інформацію про зовнішнє середовище за допомогою сенсорних систем і працювати за гнучкими програмами керування. Роботи третього покоління лише набувають поширення і представлені інтегральними та інтелектуальними системами, здатними до самостійної адаптації до змін виробничих умов.

Саме застосування роботизованих технічних комплексів забезпечує можливість швидкого переналагодження пакувального виробництва відповідно до змін споживчого попиту. Типовий роботизований комплекс для виконання операцій групового пакування (рисунок 1.3) включає промисловий робот, систему конвеєрів для подачі споживчої упаковки та конвеєр для подачі порожньої й відведення заповненої транспортної тари.



Рисунок 1.3 – Схема робототехнічної системи для формування групової упаковки із пакувальних одиниць циліндричної форми в картонні ящики

Обладнання для групового пакування оснащується електричними, пневматичними та гідравлічними приводами, вибір яких зумовлюється вимогами до кінематичних, динамічних і силових характеристик виконавчих механізмів.

До складу електропривода входять підсилювачі потужності, електродвигуни, передавальні механізми, а також датчики зворотного зв'язку. Як приводи в сучасних пакувальних машинах застосовують крокові та сервоприводи постійного і змінного струму. Передавання руху від електродвигунів до виконавчих механізмів здійснюється за допомогою комбінованих редукторів. Кожен функціональний модуль електропривода комплектується датчиками зворотного зв'язку, які забезпечують контроль швидкості та положення робочих органів.

Характерною особливістю електроприводів промислових пакувальних машин є наявність пристроїв перетворення обертального руху вала електродвигуна у поступальний рух робочого органу. У сучасних конструктивних рішеннях такі пристрої виробники позначають терміном «ось», підкреслюючи їх функціональну завершеність та інтегрованість у систему керування.

Встановлено, що останнім часом для реалізації зворотно-поступального руху за допомогою електропривода дедалі ширше застосовуються лінійні асинхронні двигуни (ЛАД). Конструктивні принципи лінійних електродвигунів відомі давно, однак розвиток нових матеріалів і технологій виготовлення електромагнітних систем зумовив зростання інтересу до їх практичного використання у сучасному пакувальному обладнанні.

Пневматичні приводи в обладнанні для групового пакування реалізують два основних типи схем переміщення робочих органів. Перший тип забезпечує переміщення з фіксацією у крайніх положеннях і є класичним. Такі схеми відрізняються відносною простотою, не потребують складних систем керування та контролю і є достатньо добре дослідженими. Більш складними й сучасними є схеми другого типу, які формують слідкуючі приводи, що забезпечують рух за заданим законом із можливістю зупинки у проміжних положеннях ходу.

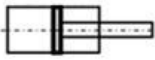

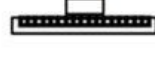
За принципом роботи елементної бази схеми слідкуючих пневматичних приводів умовно поділяють на дві групи. У схемах першої групи керування рухом здійснюється шляхом зміни витрати стисненого повітря, що дозволяє формувати необхідні швидкісні характеристики переміщення. Основним пневматичним елементом у таких системах є пропорційний розподільник, керування яким здійснюється зміною напруги в діапазоні 0–10 В або сили струму в межах 4–20 мА.

У схемах другої групи закон руху реалізується за рахунок регулювання тиску стисненого повітря, що забезпечує формування заданих силових характеристик привода. Ключовим елементом таких систем є пропорційний регулятор тиску. Сучасні пропорційні регулятори тиску являють собою автономні пристрої з вбудованою мікропроцесорною системою керування та зворотним зв'язком, реалізованим за допомогою інтегрованих модулів аналогового входу і виходу.

З метою визначення перспектив упровадження слідкуючих приводів у обладнання для групового пакування було проведено огляд і аналіз конструктивних рішень та технічних характеристик слідкуючих приводів

лінійного переміщення. Результати порівняльного аналізу відповідних систем наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльний аналізу відповідних систем приводів

Характеристики привода	Пневматичні приводи 	Приводи з пасом 	Приводи з передачею гвинт-гайка ковзання 	Приводи з передачею гвинт-гайка кочення 	Лінійний двигун 
Навантаження	++	++	++	+++	++
Хід	+++	+++	++	++	+++
Швидкість	++	+++	+	++	+++
Прискорення	++	+++	+	+	+++
Точність зупинки	++	++	+++	+++	+++
Шум	++	+++	++	++	+++
Жорсткість	++	++	+++	+++	+++
Ціна	+++	++	++	++	++
Гнучкість переналагодження	+++	+++	+++	+++	+++

Таким чином, можна стверджувати, що перспективним напрямом розвитку приводних систем обладнання для групового пакування є створення та вдосконалення приводів, призначених для реалізації лінійного переміщення робочих органів за заданим законом руху. Реалізація таких переміщень досягається шляхом застосування лінійних електродвигунів або пневматичних циліндрів зі спеціалізованими слідкуючими схемами керування, побудованими на елементній базі пропорційної та сервопневматики.

Для забезпечення високої якості виконання технологічних процесів необхідним є впровадження систем контролю їх реалізації на основі схем зворотного зв'язку. Тип і структура зворотного зв'язку визначаються контрольованими параметрами процесу, тоді як точність та надійність керувальних сигналів залежать від застосованої елементної бази. У цьому контексті використання технічних (машинних) камер є одним із найбільш перспективних напрямів розвитку систем зворотного зв'язку, оскільки такі засоби дають змогу одному сенсорному елементу одночасно здійснювати

контроль декількох параметрів технологічного процесу, підвищуючи рівень автоматизації та адаптивності пакувального обладнання.

1.4 Постановка завдань на кваліфікаційну роботу

На підставі виконаного аналізу компоновочних рішень, методик розрахунку функціональних модулів ліній групового пакування харчової продукції, конструктивних рішень робочих органів, а також опрацювання наукових публікацій, присвячених дослідженню операцій і механізмів групового пакування, можна сформулювати такі узагальнені висновки.

В Україні та за кордоном нині активно здійснюються науково-дослідні й дослідно-конструкторські роботи, спрямовані на створення вискоелективного обладнання для групового пакування. Ключовим критерієм його проєктування є забезпечення можливості оперативного виготовлення машин із широкої номенклатури конструктивних виконань відповідно до технічних вимог замовника за мінімальних витрат часу та ресурсів.

Завдання розроблення нових зразків пакувального обладнання доцільно вирішувати шляхом його проєктування на основі мехатронних модулів, що забезпечує підвищення гнучкості та адаптивності технологічних систем. Аналіз існуючих конструкцій машин для групового пакування показує, що для формування компоновок, здатних до швидкого переналагодження технологічного процесу з урахуванням зміни конфігурації, габаритів і маси упаковки, використовується обмежена номенклатура типових модулів, кількість яких визначається схемою формування групової упаковки.

Для уніфікації та ефективного застосування мехатронних модулів лінійного переміщення, підйому та захоплення виникає необхідність у розробленні нових і вдосконаленні наявних методів їх розрахунку з урахуванням фізико-механічних властивостей пакувальних матеріалів і динаміки їх пружних коливань. Поява нових пакувальних матеріалів стимулює створення упаковок різноманітної форми та дизайну, що, у свою чергу, зумовлює потребу в постійному удосконаленні конструкцій захоплювальних пристроїв.

Установлено, що сила утримання упаковки вакуумними захоплювальними пристроями визначається величиною створеного вакууму. При цьому тенденція до зменшення товщини пакувальних матеріалів призводить до зростання їх повітропроникності, а одним із визначальних чинників, що істотно впливає на величину сили утримання, залишаються фізико-механічні властивості матеріалу упаковки.

Узагальнення результатів аналізу конструкцій обладнання для групового пакування та літературних джерел дало змогу сформулювати такі основні завдання дослідження:

- провести аналіз технологічних схем і конструктивних рішень існуючих зразків обладнання для групового пакування харчової продукції з урахуванням способів формування групової упаковки, коефіцієнтів універсальності, конструкцій робочих органів і типів їх приводів;
- розробити граф ієрархічної детермінованої структури машини для групового пакування на основі типових функціональних модулів та встановити логічні зв'язки між ними;
- сформулювати принципи побудови пакувальної машини з мехатронних модулів і розробити їх типові структурні рішення для систем групового пакування;
- дослідити теоретичні засади створення нового обладнання для групового пакування на основі сформованих баз даних мехатронних модулів і розробити методи їх уніфікованого поєднання за наперед заданими критеріями;
- визначити вплив технологічних і конструктивних параметрів мехатронних модулів на можливість їх переналадження шляхом зміни координат зупинки робочих органів під час виконання операцій групового пакування;
- розробити практичні рекомендації щодо впровадження нової концепції проєктування типових мехатронних модулів переміщення та захоплення структурних елементів групової упаковки у сучасні зразки пакувального обладнання.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Програма, об'єкт та предмет наукового дослідження

Програма теоретичних і експериментальних досліджень у узагальненому вигляді подана на рисунку 2.1.

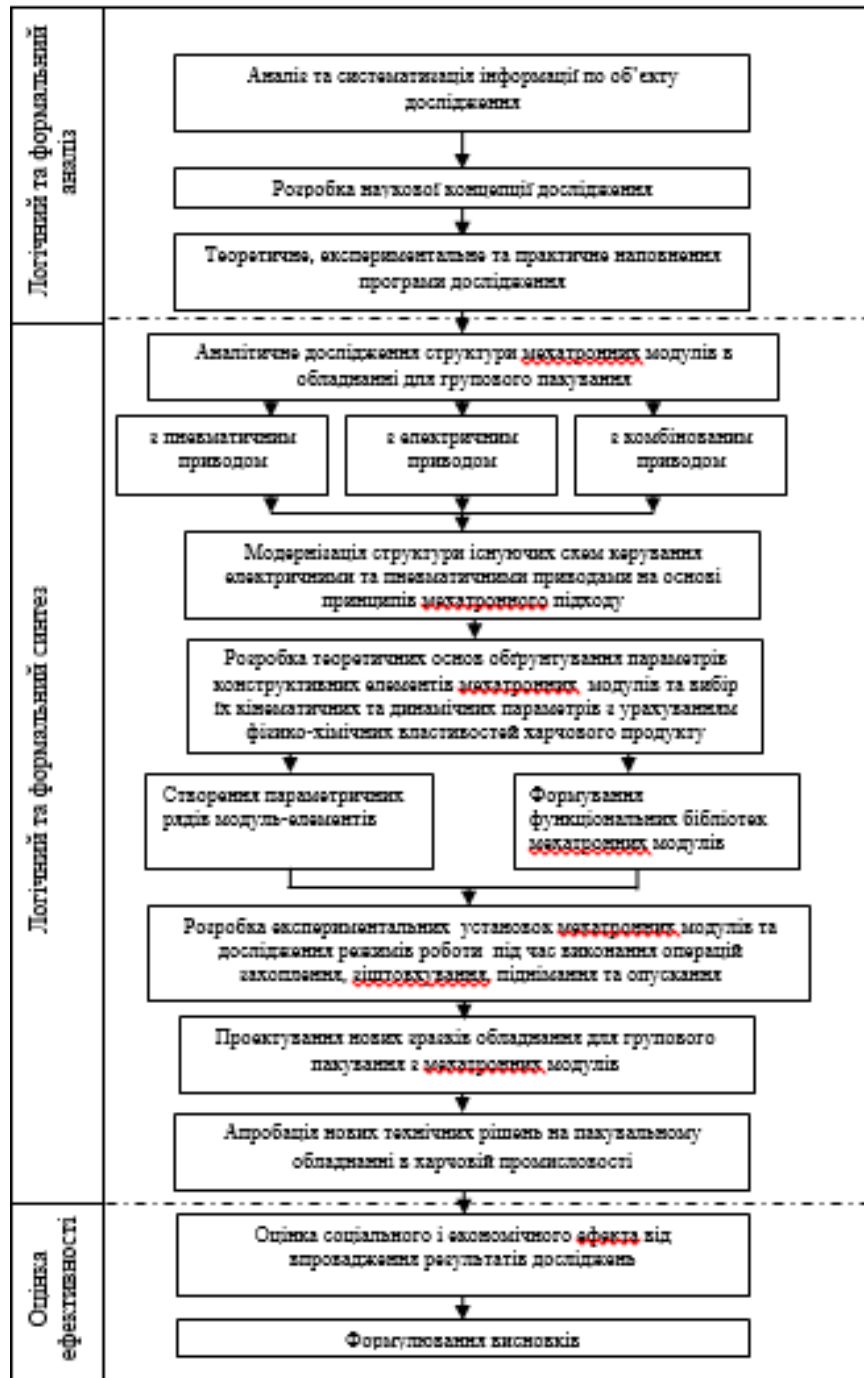


Рисунок 2.1 – Програма теоретичних та експериментальних досліджень

Для проведення теоретичного аналізу динаміки мехатронного модуля з пневматичним приводом застосовувалися системи нелінійних диференціальних рівнянь, розв'язання яких здійснювалося числовими методами. До таких рівнянь належать рівняння зміни тиску в робочих порожнинах пневмоциліндра, а також рівняння руху пакувальних одиниць і робочого органу. Стиснене повітря в моделі розглядалося як ідеальний газ, при цьому тиск і температура в системі живлення вважалися сталими, а процеси, що відбуваються в порожнинах пневмоциліндра, – квазістаціонарними. Теплообмін між повітрям у порожнинах пневмоциліндра та навколишнім середовищем не враховувався; приймалося припущення, що процеси зміни параметрів повітря відбуваються достатньо швидко разом із теплопередачею, внаслідок чого температура в порожнинах у кожен момент часу вирівнюється до температури навколишнього середовища.

Дослідження динаміки мехатронних модулів з позиційним пневматичним приводом виконувалося із застосуванням методів теорії автоматичного керування, що ґрунтуються на аналізі рішень лінеаризованої системи рівнянь. З метою спрощення розв'язання вихідної задачі були введені припущення, відповідно до яких початкова нелінійна математична модель у зоні малих відхилень розглядалася як лінійна. Такий підхід дозволив спростити аналіз умов стійкості стаціонарних режимів, реалізацію заданих законів руху, а також оцінку впливу динамічних характеристик системи на точність позиціонування.

Параметри роботи мехатронного модуля з позиційним пневмоприводом, визначені у першому наближенні на основі лінеаризованої моделі, надалі уточнювалися шляхом розв'язання початкової нелінійної математичної моделі з урахуванням особливостей кінематичної схеми механізмів та впливу зовнішніх факторів на динаміку функціонування позиційних пневматичних приводів.

Для аналітичного дослідження динамічних характеристик мехатронних модулів із лінійним електричним приводом була сформована математична модель, побудована на основі експериментальних даних, оброблених із застосуванням методів ідентифікації. Процес побудови такої моделі мав ітераційний характер і включав послідовне виконання аналітичного аналізу, експериментальних досліджень з подальшим опрацюванням результатів та ідентифікацією визначальних параметрів, а також безпосередню розробку математичної моделі. Отримана в такий спосіб математична модель подана у непараметричній формі у вигляді перехідних характеристик і частотних функцій. Результати моделювання були використані для вдосконалення структури систем керування лінійним електроприводом, синтезу алгоритмів керування та їх реалізації на базі мікропроцесорних систем керування.

Для обґрунтування параметрів вибору конструктивних елементів мехатронних модулів із пневматичним та електричним приводами, а також мехатронних модулів захоплювальних пристроїв, і оцінювання можливості реалізації ними необхідних силових і кінематичних характеристик під час виконання функціональних операцій з урахуванням змінних фізико-механічних властивостей пакувальних матеріалів з харчовими продуктами, було застосовано синтез теорії подібності та розмірності.

2.2 Досліджувані параметри та методи досліджень

У процесі виконання роботи було проведено комплекс досліджень, спрямованих на вивчення таких параметрів:

- зміну кінематичних і динамічних характеристик робочих органів функціональних модулів під час формування групової упаковки або її структурних елементів, що описуються змінними координатами, швидкостями, прискореннями, рушійними силами та силами опору;

- вплив фізико-механічних властивостей пакувальних матеріалів на зусилля відриву упаковки від захоплювальних пристроїв, які характеризуються

коефіцієнтами повітропроникності матеріалів, величинами вакууму та надлишкового тиску стисненого повітря, а також змінними коефіцієнтами тертя;

– реалізацію заданих законів руху мехатронними модулями з пневматичними та електричними приводами, що визначається параметрами тиску та витрати стисненого повітря в порожнинах пневмоциліндрів, а також значеннями напруги та сили струму керувальних електричних сигналів електродвигунів.

Для визначення зазначених параметрів частково застосовувалися відомі методики, а також нові методи, розроблені автором. Значна частина параметрів, що досліджуються у даній роботі, не має уніфікованих методик визначення в повному обсязі, а деякі з них характеризуються суб'єктивністю оцінювання. З цією метою були спроектовані та виготовлені спеціальні експериментальні установки й допоміжні пристрої. З метою підвищення достовірності отриманих результатів експериментальні дослідження проводилися в умовах, максимально наближених до реальних виробничих.

2.3 Методи дослідження мехатронних модулів захоплювання

Захоплювальні пристрої належать до найбільш поширених функціональних модулів у складі обладнання для групового пакування, в якому формування упаковки здійснюється шляхом відриву проміжних структурних елементів від поверхні їх переміщення. Аналіз наявних конструктивних рішень показав, що серед усього різноманіття захоплювальних пристроїв найбільш широке застосування отримали вакуумні та механічні захоплювачі.

Загальний вигляд експериментальної установки наведено на рисунку 2.2. Конструкція установки включає корпус, горизонтально розташовану пластикову пластину з перфорованими отворами по всій поверхні, а також механізм кріплення досліджуваного зразка. Вакуумний присмоктувач закріплений на жорсткій пластині, яка здійснює вертикальне переміщення вздовж двох напрямних. Створення вакууму для забезпечення процесу присмоктування

здійснюється за допомогою ежектора, а контроль глибини вакууму проводиться електронним вакуумметром.

Конструктивне виконання установки передбачає можливість прикладання до вакуумного присмоктувача регульованого механічного зусилля, при якому відбувається переміщення пластини з присмоктувачем у вертикальній площині. Величина прикладеного зусилля плавно змінюється за допомогою спеціального механічного пристрою з черв'ячним редуктором та вимірюється електронним динамометром. Сигнали з електронних вимірювальних датчиків через аналого-цифровий перетворювач (рис. 2.3) передаються на комп'ютер і реєструються за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення.

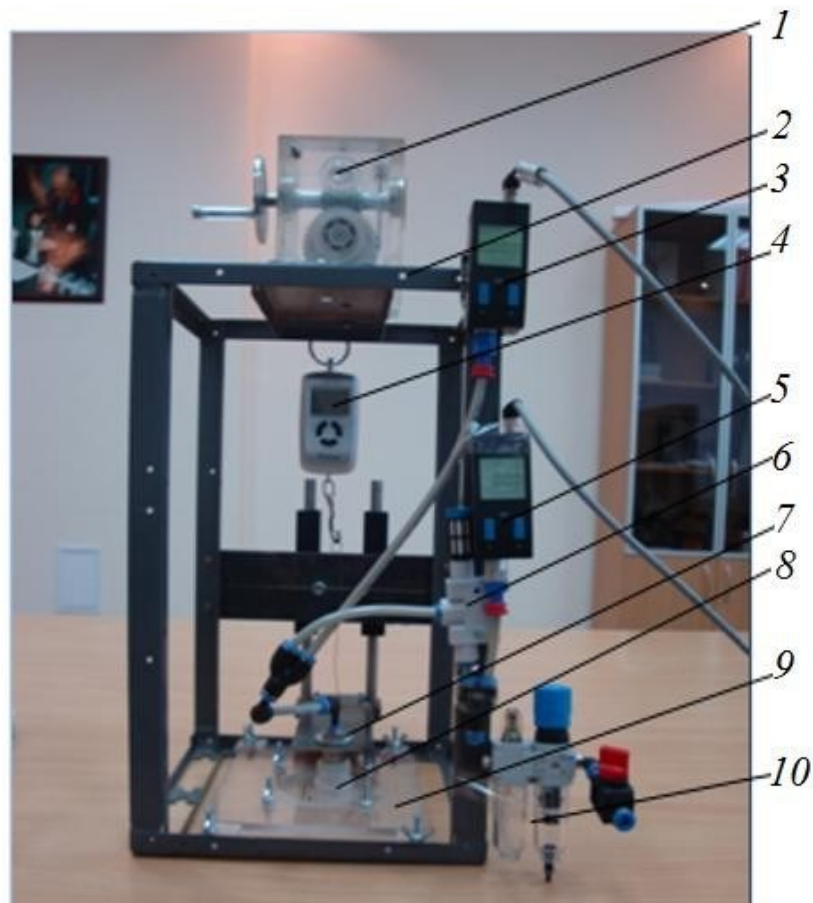


Рисунок 2.2 – Експериментальна установка для дослідження зусилля відриву пакувальної одиниці від присмоктувача мехатронного модуля з вакуумним захоплювальним пристроєм

Дана експериментальна установка (рис. 2.2) для дослідження зусилля відриву пакувальної одиниці від присмоктувача мехатронного модуля з вакуумним захоплювальним пристроєм складається з наступних елементів: 1 - черв'ячний редуктор; 2 – корпус установки; 3 – електронний манометр; 4 – електронний динамометр; 5 – електронний вакуумметр; 6 – ежектор; 7 - жорстка пластина, на якій закріплений вакуумний присмоктувач; 8 – вакуумний присмоктувач; 9 – пластикова пластина з перфорованими отворами та механізмом кріплення досліджуваного зразка упаковки в горизонтальній площині; 10 – регулятор тиску.



Рисунок 2.3 – Аналоговоцифровий перетворювач (АЦП)

Основні технічні характеристики елементів установки наведені в таблиці 2.1.

Для врахування фізико-механічних характеристик пакувальних матеріалів проведено дослідження їх на повітропроникність. Для проведення дослідження використовували картонні та гофрокартонні упаковки з різних марок картону: МО, ММ, Н, НМ К і т.д.

Таблиця 2.1 – Характеристика елементів експериментальної установки

N	Найменування елемента	Компанія - виготовлювач	Одиниці вимірювання показників	Діапазон вимірювання	Похибка вимірювання	Примітки
1	Електронний датчик тиску SDE – 1 - 10	Festo, Німеччина	бар	0 - 10	± 2 % від вимірюваного діапазону	–
2	Електронний датчик вакууму	Festo, Німеччина	бар	-1 - 0	± 2 % від вимірюваного діапазону	–
3	Електронний динамометр HDB 5K5	KERN, Німеччина	кг	0 - 5	Дискретність 5 г	–
4	АЦП	Festo, Німеччина	мс	4	–	16 розрядний

Експериментальна установка для дослідження зусилля зсуву пакувальної одиниці відносно вакуумного присмоктувача мехатронного модуля наведено на рисунку 2.4.

Прикладання зусилля зсуву відбувається до моменту початку її руху. Критичним зусиллям зсуву є зусилля, при якому починається рух присмоктувача.

Наведена методика дозволяє визначити вплив зовнішніх факторів на величину утримання упаковок. Це запобігає явищу зсуву відносно вакуумного присмоктувача під час виконання операцій переміщення.

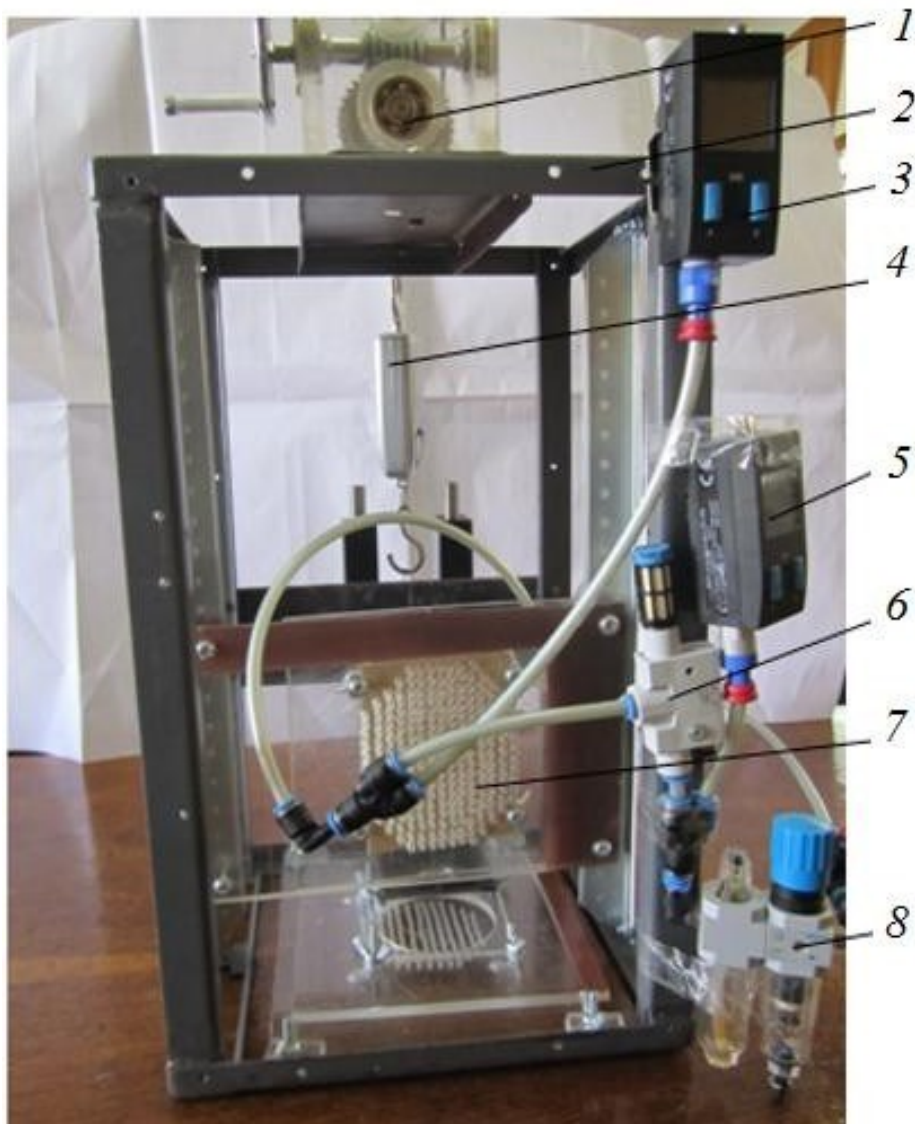


Рисунок 2.4 – Експериментальна установка для дослідження зусилля зсуву пакувальної одиниці відносно вакуумного присмоктувача мехатронного модуля: 1 – черв'ячний редуктор; 2 – корпус установки; 3 – електронний манометр; 4 – електронний динамометр; 5 – електронний вакуумметр; 6 – ежектор; 7 - жорстка пластина, на якій закріплений вакуумний присмоктувач; 8 – вакуумний присмоктувач; 9 – пластикова пластина з перфорованими отворами та механізмом кріплення досліджуваного зразка упаковок у вертикальній площині; 10 – регулятор тиску.

Для проведення досліджень була також розроблена та виготовлена експериментальна установка (рис. 2.5). Для дослідження зусилля відриву захоплювального елемента від упаковки було вибрано пакований харчовий продукт у гофрокартоні або картонні упаковки.

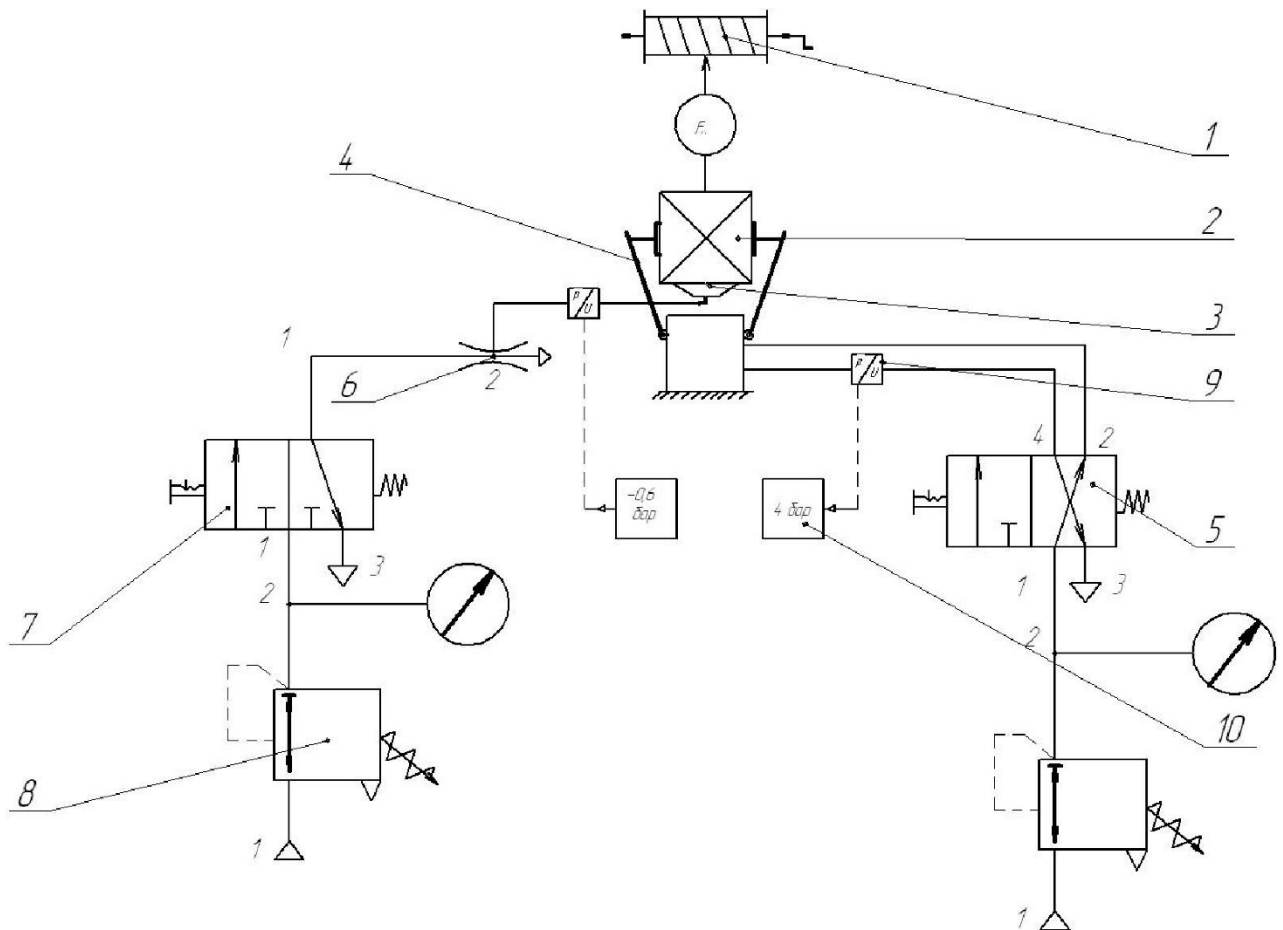
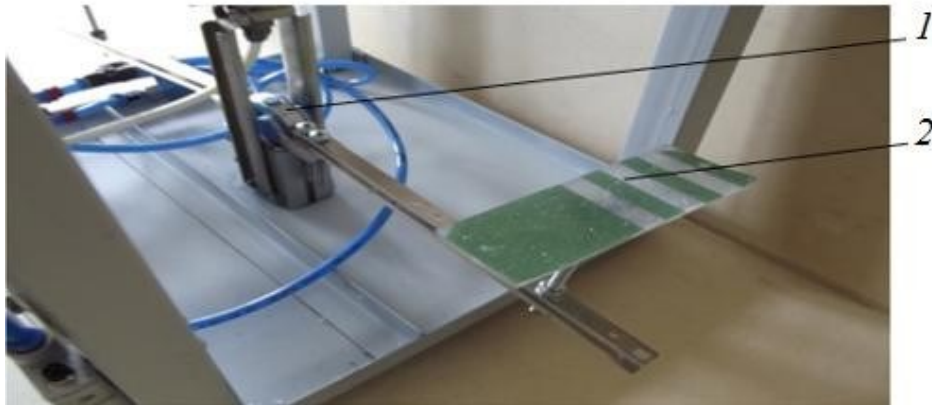


Рисунок 2.5 – Принципова схема експериментальної установки для дослідження мехатронних модулів із комбінованими захоплювальними елементами: 1 – редуктор, 2 – картонна упаковка; 3 – вакуумний присмоктувач; 4 – механічний елемент; 5 – пневморозподільник марки 4/2; 6 – ежектор; 7 – пневморозподільник марки 3/2; 8 – регулятор тиску; 9 – електронні датчики вакууму і тиску; 10 – інформаційне табло тиску і вакууму.

Система керування мехатронним модулем складається із розподільників марки 5/2 та 3/2, які забезпечують керування захоплювальними елементами. Перерозподілення зусилля забезпечує електронний регулятор тиску 7. Конструкція експериментальної установки передбачає прикладання зусилля відриву до упаковки. Величина зусилля вимірюється електронним динамометром 3. Інформація від електронних датчиків в режимі реального часу надходить на АЦП і після перетворення – на комп'ютер до програми керування.

Захоплення упаковки відбувається одночасно двома захоплювальними елементами – вакуумним присмоктувачем та механічними губками. Конструкцію механічного захоплювального елемента представлено на рисунку 2.6.

Тут використовується рейково-важільний механізм промислового захоплювача HGR-25-A «FESTO», який забезпечує зусилля губок на всій траєкторії їх руху під час розкриття та закриття.



Рисунк 2.6 – Механічний захоплювальний елемент:

1– промисловий захоплювач HGR-25-A;

2– губки з фрикційними накладками

Технічна лінійка промислових захоплювачів складається з чотирьох модифікацій з діаметром поршня 16, 25, 32, 40 мм. Кут розкриття кулачків на всіх пристроях становить 180 °. Час відкриття-закриття кулачків при тиску 0,6 МПа знаходиться в межах від 0,01 до 0,04 с. Розкриття та закриття кулачків відбувається після подачі повітря в порожнини механізму захоплювача.

Після завантаження початкових та кінцевих умов вмикається експериментальна установка і реалізується задана технологічна операція піднімання або опускання. Результати досліджень отримуються у вигляді графіків (рис. 2.7), на яких одночасно показуються аналітичні та експериментальні досліджувані характеристики.

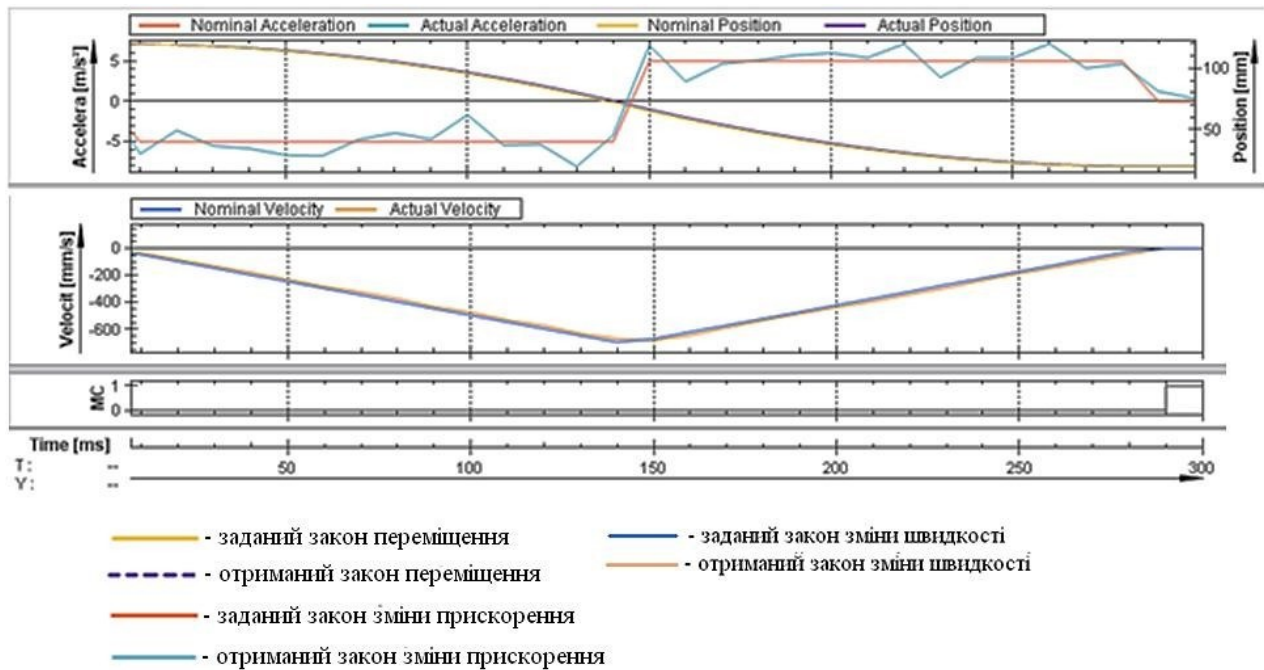


Рисунок 2.7 – Приклад представлення результатів експериментальних досліджень

Відповідно до плану експерименту тут відбувається зміна значення основних факторів та повторюється наведена послідовність дій. Наведена методика дозволяє визначити вплив зовнішніх факторів на роботу мехатронного модуля з лінійним двигуном при виконанні операцій піднімання-опускання структурних елементів групової упаковки мехатронної системи.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДОЛОГІЯ СТВОРЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СПЕЦІАЛЬНОГО ПАКУВАННЯ ХАРЧОВИХ СИПКИХ ПРОДУКТІВ

3.1 Аналіз функціонально-структурних схем обладнання для групового пакування на основі топологічного методу

Технологічний процес формування групової упаковки доцільно умовно поділити на дві основні групи (рис. 3.1). Такий поділ зумовлений особливостями траєкторії переміщення пакувальної одиниці або вже сформованих структурних елементів групової упаковки в процесі виконання операцій групового пакування.

До першої групи належить обладнання, у якому переміщення пакувальних одиниць або сформованих структурних елементів групової упаковки здійснюється без їх відриву від несучих поверхонь робочих органів. Надалі таку групу обладнання будемо характеризувати як системи з двовимірним переміщенням ($2D, z = 0$).

Технологічний процес формування групової упаковки за даним принципом передбачає реалізацію сукупності типових технологічних операцій (рис. 3.1, а), а саме: формування ряду та шару упаковок; зіштовхування сформованого шару в тару на попередньо укладений шар; переміщення тари у вертикальному напрямку (вгору або вниз) на висоту одного шару; формування штабеля з подальшим його переміщенням у тару; завершальне формування групової упаковки та її подача в тару.

У зазначеній структурі обладнання застосовуються як горизонтальні, так і вертикальні схеми формування групової упаковки. Горизонтальна схема передбачає подачу споживчої упаковки у задане положення з подальшим її переміщенням у напрямку, перпендикулярному до напрямку подачі, внаслідок чого здійснюється формування ряду. Надалі сформований ряд переміщується на поверхню накопичення шару також у напрямку, перпендикулярному до напрямку руху під час формування ряду.

Після завершення процесу формування шару він зіштовхується у тару на попередньо укладений шар упаковок, який разом із тарою переміщується у

вертикальному напрямку на висоту сформованого шару. Вертикальна схема формування групової упаковки передбачає укладання кожного нового шару на попередній шляхом його опускання вниз на висоту шару, що забезпечує поетапне формування штабеля у тарі.

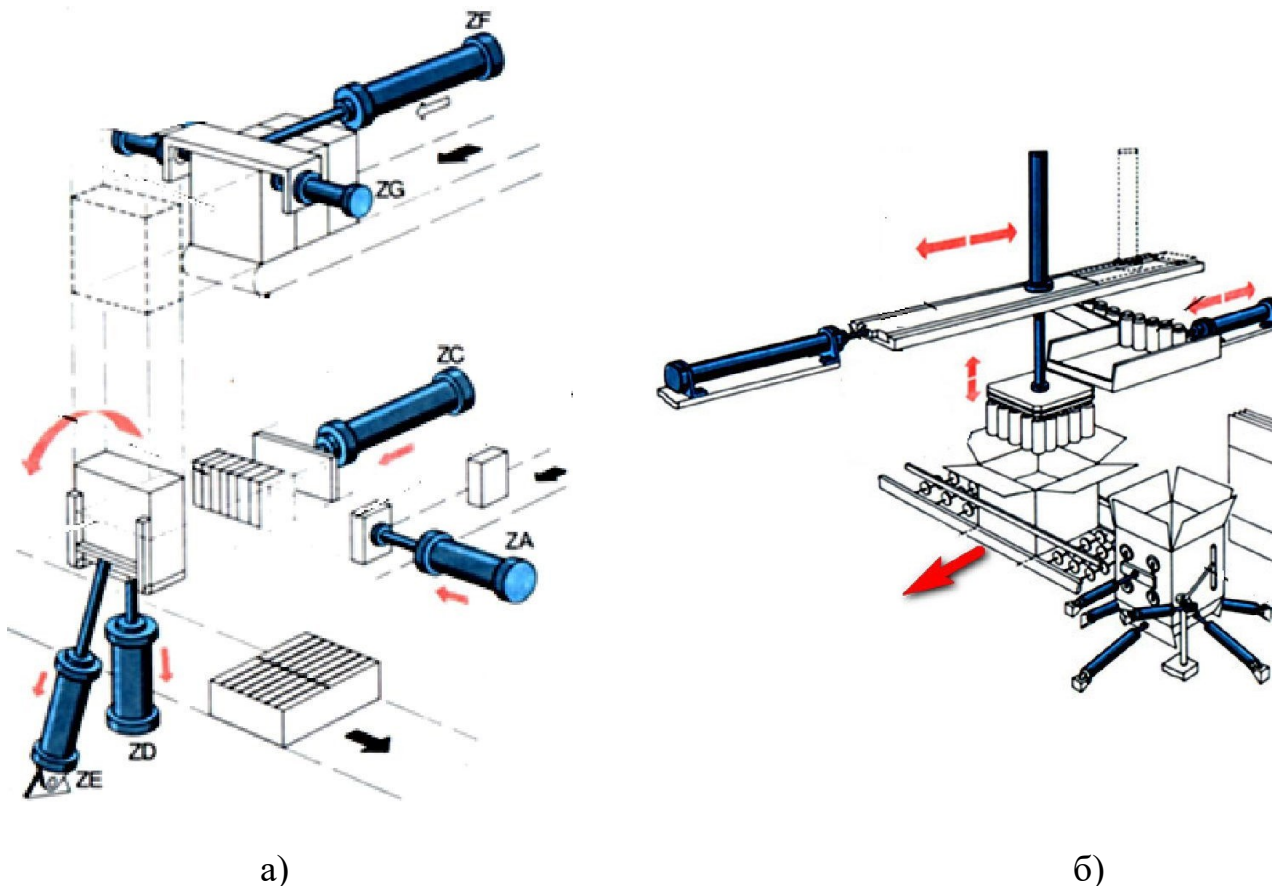


Рисунок 3.1 – Технологічні схеми утворення групової упаковки:

- а) – для пакування за схемою 2D ($z=0$) переміщень структурних елементів групової упаковки
- б) – для пакування за схемою 3D ($z=1$) переміщень структурних елементів групової упаковки другої групи обладнання

Основними технологічними операціями обладнання першої групи є орієнтування пакувальних одиниць і транспортної тари, формування структурних елементів групової упаковки з їх подальшим зіштовхуванням, а також покрокове переміщення пакувальної одиниці або тари в процесі виконання операцій групового пакування.

До другої групи належить обладнання, у якому формування групової упаковки здійснюється з відривом пакувальних одиниць або структурних елементів від несучих поверхонь робочих органів. Надалі таку групу обладнання будемо характеризувати як системи з тривимірним переміщенням (3D, $z = 1$). На відміну від обладнання першої групи, у цьому випадку пакувальна одиниця або структурний елемент групової упаковки переміщується в тару або на обгортальний матеріал шляхом піднімання, транспортування та опускання без опори на несучі поверхні робочих органів (рис. 3.1, б).

При реалізації даного способу сформований шар пакувальних одиниць не зіштовхується безпосередньо в тару, а піднімається, переміщується у просторі та укладається в тару або на попередньо сформований шар упаковок. При цьому довжина сформованого ряду відповідає довжині групової упаковки. Формування шару здійснюється шляхом зіштовхування ряду у напрямку, перпендикулярному до напрямку подачі пакувальних одиниць. Подальший процес укладання шару включає послідовне піднімання, просторове переміщення та опускання шару упаковок у транспортну тару на раніше вкладений шар.

Для обладнання другої групи характерним є домінування операцій орієнтування пакувальних одиниць і тари, формування структурних елементів групової упаковки з їх подальшим переміщенням шляхом піднімання, транспортування та опускання, а також покрокове переміщення (опускання) транспортної тари у процесі формування штабеля.

З метою аналізу всіх можливих схем технологічних процесів формування групової упаковки з окремих пакувальних одиниць (відповідно до структурної схеми, наведеної на рис. 3.2) доцільно застосовувати граф технологічного процесу з використанням топологічного методу аналізу технологічних схем, що дозволяє формалізувати послідовність операцій та виявити структурні взаємозв'язки між ними.



Рисунок 3.2 – Структурна схема поєднання матеріальних та інформаційних потоків під час виконання технологічного процесу групового пакування

Топологічний метод ґрунтується на аналізі математичних іконографічних моделей технічних систем, до складу яких входять початкові, структурні, інформаційні та сигнальні графи. Застосування топологічних моделей дозволяє подати значний обсяг інформації щодо можливих схем реалізації технологічних процесів групового пакування у наочній та формалізованій формі, що спрощує їх аналіз і порівняння.

У наведеному графі не враховано операції формування структури групової упаковки шляхом утворення стопи. Це пояснюється тим, що проведений аналіз існуючих технологічних схем засвідчив обмежене поширення такого способу формування групової упаковки, зумовлене складністю його технічної реалізації та підвищеними вимогами до конструкції обладнання.

Послідовність виконання основних операцій групового пакування у графі подано у вигляді ієрархічних рівнів. Реалізація технологічних операцій відображається переходами від вищого рівня до наступного нижчого, які позначені орієнтованими стрілками. Числові позначення в колах відповідають номерам технологічних операцій та їх можливим варіантам виконання. Значення «0» вказує на відсутність відповідної технологічної операції у конкретному варіанті технологічного процесу, що проходить через даний рівень.

Розглянутий граф (рис. 3.2) відображає виключно наявність та послідовність виконання окремих операцій технологічного процесу групового пакування. При цьому кожній технологічній операції відповідає певна номенклатура основних робочих органів і механізмів обладнання. У зв'язку з цим побудова розгорнутого графа, що враховував би всі конструктивні елементи машини, суттєво ускладнила б структуру моделі та знизила її наочність.

Для технологічного процесу групового пакування за першим способом формування групової упаковки у межах топологічного графа виокремлено такі характерні операції (за рівнями):

- 1.1 – переміщення споживчих упаковок від фасувальних машин подавальним конвеєром;
- 2.1 – орієнтування упаковок на конвеєрі;
- 3.1 – формування транспортної тари;
- 4.1 – подача тари в зону завантаження;
- 5.1 – поштучне зіштовхування упаковок у тару або на лоток
- 6.1 – формування ряду упаковок
- 7.1 – порядне зіштовхування упаковок у тару або на лоток
- 8.1 – формування шару упаковок
- 9.1 – пошарове укладання упаковок у тару або на лоток
- 10.1 – покрокове переміщення тари або сформованого структурного елемента у вертикальній площині;
- 11.1 – формування групової упаковки;
- 12.1 – переміщення групової упаковки у тару;
- 13.1 – переміщення заповненої тари у вертикальній площині;
- 14.1 – переорієнтування заповненої тари на 90 °;
- 15.1 – переміщення споживчої тари у зону її скріплення.

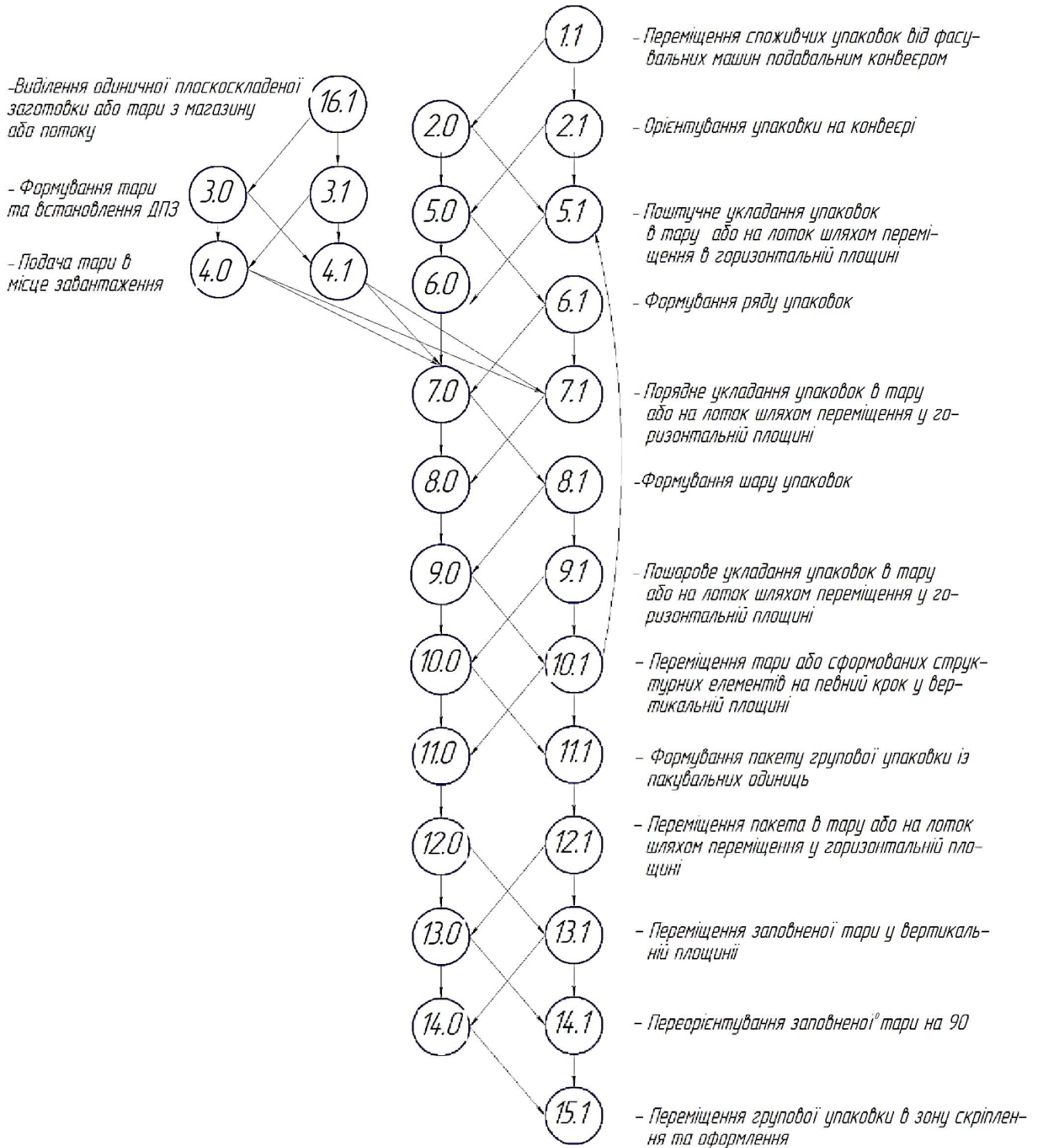


Рисунок 3.2 – Структурний граф технологічного процесу групового пакування за схемою 2D ($z=0$) переміщень структурних елементів групової упаковки

Наведений граф охоплює всі можливі способи формування групової упаковки із найрізноманітніших розмірів споживчих упаковок форми паралелепіпеда.

Однак процес має певні недоліки, серед яких обмеження за продуктивністю, що є наслідком кінематичних обмежень руху робочих органів механізмів, та підвищені вимоги до відхилень геометричних параметрів тари. Характерною конструктивною особливістю обладнання за схемою 3D ($z=1$) переміщень структурних елементів групової упаковки є наявність в усіх конструкціях захоплювальних пристроїв.

Таким чином, було визначено раціональну послідовність виконання технологічних операцій, які наведені на рисунку 3.3.



Рисунок 3.3 – Логічні зв'язки взаємодії між функціональними модулями в технологічному процесі групового пакування в транспортну тару

3.2 Побудова концептуальної моделі обладнання для групового пакування з мехатронних модулів

Модульна система розглядається як сукупність функціональних модулів, об'єднання яких підпорядковується визначеним закономірностям. Однак таке трактування мехатронного модуля не повною мірою відображає сучасні підходи до його проєктування та застосування. У зв'язку з цим доцільним є більш розширене та уточнене визначення.

Під мехатронним модулем пропонується розуміти цілісну технічну систему, яка інтегрує функціональний, апаратний та інформаційний компоненти, є конструктивно і функціонально завершеним самостійним виробом та оснащена автоматизованою системою керування з гнучким програмним забезпеченням для зміни технологічного процесу роботи робочих органів. Обов'язковою складовою такого модуля є система зворотного зв'язку, реалізована на основі використання різних типів датчиків, що забезпечують сприймання та обробку інформації про зміну параметрів зовнішнього середовища. Крім того, мехатронний модуль характеризується наявністю конструктивно визначених уніфікованих каналів механічного, енергетичного та інформаційного зв'язку, які забезпечують можливість його синергетичного об'єднання з іншими мехатронними модулями.

Конструктивне та функціональне поєднання окремих мехатронних модулів утворює мехатронну систему. У загальному випадку мехатронна система являє собою сукупність кількох мехатронних модулів, взаємопов'язаних між собою, які формують складну технічну систему з великою кількістю параметрів і характеристик та функціонують синергетично з метою виконання заданої функціональної або виробничої задачі.

З урахуванням уточненого визначення мехатронного модуля доцільним є часткове коригування та доповнення основних термінів. Надалі під мехатронною системою будемо розуміти складну технічну систему, створену на основі типових мехатронних модулів, об'єднання яких підпорядковується визначеним функціональним закономірностям, спрямованим на вирішення конкретної виробничої задачі. Така система формує багаторівневу інтелектуальну систему

керування з розгалуженою мережею зворотних зв'язків та здатна адаптуватися до змін умов виробництва.

Мехатронну систему, сформовану з мехатронних модулів одного типу, але різних типорозмірів, доцільно відносити до однорідних. У разі використання мехатронних модулів різних типів і типорозмірів система класифікується як неоднорідна.

Модульний принцип формування мехатронних систем визначається як сукупність послідовних кроків, формалізованих у вигляді математично описаної процедури вибору та поєднання мехатронних модулів відповідно до заданих функціональних і параметричних вимог.

Бібліотека (база даних) мехатронних модулів являє собою сукупність конструктивних рішень однотипних мехатронних модулів з різними функціональними та конструктивними типорозмірами, що відповідають заданому параметричному ряду та можуть бути використані для формування мехатронних систем різного призначення.

Послідовність формування мехатронних систем із використанням наведених визначень та принципів проєктування представлено на рисунках 3.4 та 3.5.

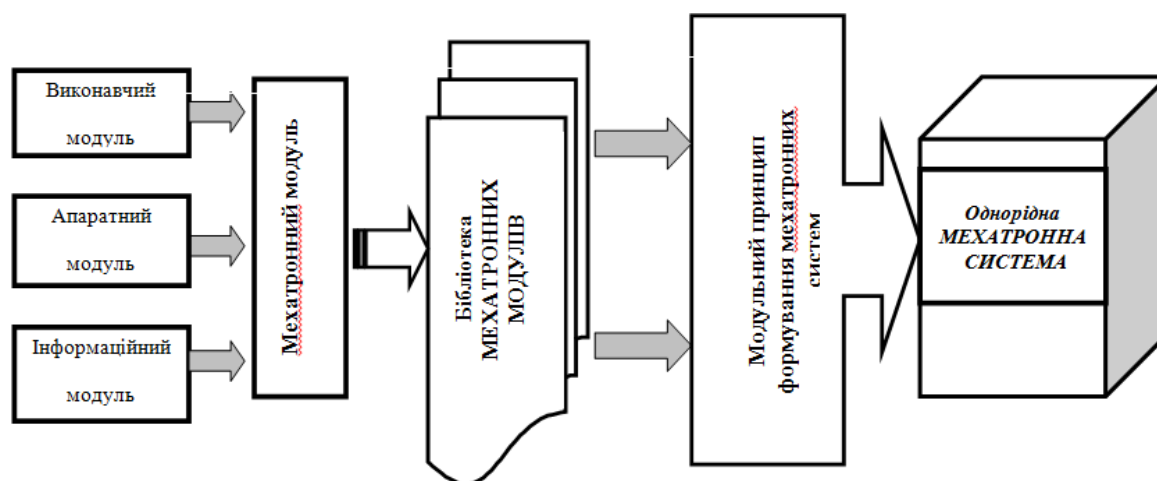


Рисунок 3.4 – Послідовність формування однорідної мехатронної системи

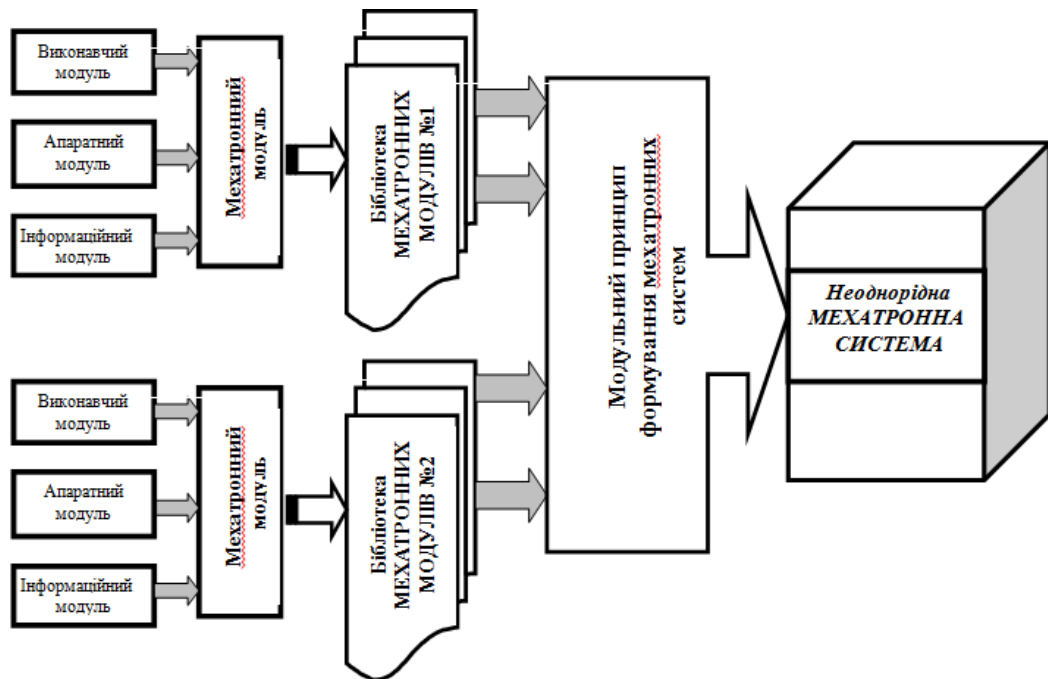


Рисунок 3.5 – Послідовність формування неоднорідної мехатронної системи

3.3 Засади процесу проектування обладнання для групового пакування з мехатронних модулів

Розроблення та виготовлення нового обладнання для групового пакування передбачає обґрунтований вибір оптимального конструкторського рішення, яке має забезпечувати раціональне поєднання двох ключових факторів - технологічного та економічного. Досягнення такого поєднання потребує застосування системного підходу до проектування, що базується на методах структурного синтезу та оптимізації технічних рішень.

Приклад реалізації структурного синтезу мехатронних модулів лінійного переміщення відповідно до запропонованої методики в межах функціональних кластерів, сформованих із модульних елементів одного виробника (компанії FESTO), наведено на рисунку 3.6.

У результаті проведеного синтезу сформовано вісім варіантів мехатронних модулів, конструктивні рішення яких забезпечують можливість реалізації лінійних переміщень як у горизонтальній, так і у вертикальних площинах.

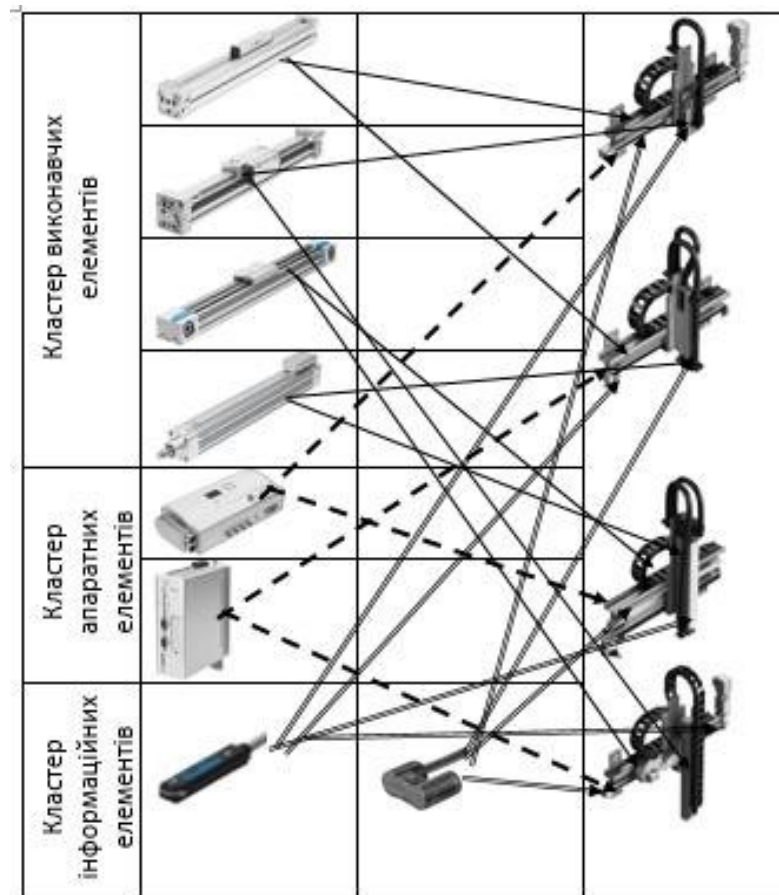


Рисунок 3.6 – Структурний синтез мехатронних модулів лінійного переміщення з модуль-елементів одного виробника

Четвертий етап методики використовується для розв'язання задач структурного синтезу другої групи складності та передбачає подальшу оптимізацію структури мехатронного модуля шляхом введення додаткових критеріїв оцінювання. Зокрема, до таких критеріїв належить мінімізація енерговитрат у процесі експлуатації, що дозволяє на заключному етапі визначити раціональний та технічно обґрунтований варіант конструктивного виконання модуля.

За результатами проведених досліджень розроблено узагальнену функціонально-структурну схему машини для групового пакування, побудованої на основі мехатронних модулів. Зазначену схему (s-модель) подано у вигляді логічного дерева типу «І-АБО» (рисунок 3.6), що відображає можливі варіанти структурних рішень та взаємозв'язки між основними функціональними елементами машини.

Наведений граф відображає типову структуру функціонально-модульної будови машин для групового пакування з мехатронних модулів, а також показує взаємозв'язки між модулями (рис. 3.7).



Рисунок 3.7 – Узагальнений граф компоновки структури машини для групового пакування з мехатронних модулів

3.4 Порівняльний аналіз обладнання для групового пакування за критерієм енерговитрат

Наступний етап дослідження передбачає проведення порівняльного аналізу отриманих варіантів обладнання на рівні трансформації матеріальних та енергетичних потоків у його функціональних мехатронних модулях. Зазначений

підхід дає змогу у підсумку обґрунтувати вибір остаточного варіанта оптимальної конструкції обладнання.

Розглянемо послідовність дій щодо визначення енерговитрат обладнання, побудованого за схемами 2D ($z = 0$) та 3D ($z = 1$) переміщення структурних елементів групової упаковки, на прикладі типових конструкцій машин-автоматів для групового пакування брикетів солодковершкового масла в гофрокартонні ящики серії 710, а також полімерних пляшок з харчовим продуктом у гофрокартонні ящики серії МСР.

Дослідження виконувалося на основі технічних характеристик обладнання, наведених у паспортній документації, що забезпечило коректність вихідних даних для подальших розрахунків.

На першому етапі формується топологічна модель системи шляхом побудови кодової діаграми. Для цього всі структурні елементи системи зводяться до їх енергетичних еквівалентів або до умовних блоків, у межах яких відбуваються процеси введення, перетворення, розгалуження та розсіювання потоків енергії і маси. Енергетичні блоки кодової діаграми відображають витрати енергії у складових елементах системи та їх взаємодію з зовнішнім середовищем, яка реалізується через блоки приводів механізмів і дисипації енергії у виконавчих механізмах та робочих органах.

На основі побудованої кодової діаграми формуються енергетично-потоківі графи зв'язків для технологічних процесів групового пакування, реалізованих за схемами 2D ($z = 0$) та 3D ($z = 1$) переміщення структурних елементів групової упаковки. Відповідно до визначення графа зв'язків як топологічного опису дисипативної функції, його основними компонентами є джерела та стоки зусилля і потоку, а також перетворювачі енергії. Напрямок стрілки на графі приймається додатним.

Нанесені на графі штрихи причинності є графічним відображенням формалізованих правил алгебраїчних перетворень і однозначно визначають вхідні та вихідні величини кожного структурного елемента, конкретизуючи причинність джерел і стоків, споживачів та вузлів розгалуження.

Побудована у такий спосіб топологічна модель у вигляді графа зв'язків є базовою основою для подальших перетворень, які забезпечують можливість використання моделі для розв'язування конкретних проєктних або експлуатаційних задач.

З цією метою наступним етапом є перетворення графа зв'язків у форму, придатну для розв'язання поставленої задачі. Одним із таких перетворень є побудова сигнального графа. Перехід від графа зв'язків до сигнального графа дає змогу застосувати апарат теорії графів, спростити структуру моделі та перейти до аналітичного подання інформації.

Результати розрахунків для машини-автомата групового пакування, що реалізує схему 3D ($z = 1$) переміщення структурних елементів з полімерних пляшок у гофрокартонні ящики серії МСР, подано у вигляді гістограми на рисунку 3.8.

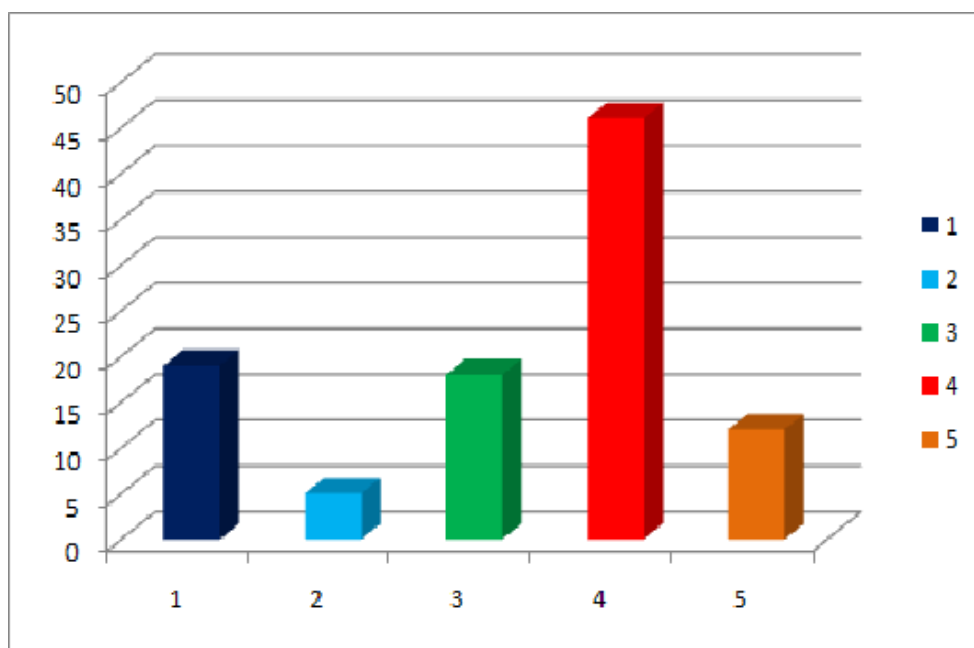


Рисунок 3.8 – Співвідношення витрат енергії в основних функціональних механізмах автомата для групового пакування:

- 1 – механізм подачі споживчої упаковки по магістральному конвеєру;
- 2 – механізм формування структурного елемента групової упаковки;
- 3 – механізм формування та подачі ящика; 4 – механізм формування групової упаковки шляхом укладання; 5 – механізм подачі ящика в зону скріплення

РОЗДІЛ 4

ВПРОВАДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ МОДУЛІВ ДЛЯ РОБОТИ ОБЛАДНАННЯ СПЕЦІАЛЬНОГО ПАКУВАННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

4.1 Дослідження режимів роботи мехатронних модулів на основі типової конструкції пневматичного приводу слідкування

Типова схема пневматичного приводу слідкування, що застосовується для зіштовхування проміжних структурних елементів групової упаковки, наведена на рисунку 4.1. Пристрій, побудований за даною схемою, забезпечує реалізацію заданих законів переміщення об'єктів з можливістю їх проміжного позиціонування, яке досягається шляхом регулювання витрати стисненого повітря.

Контроль процесу переміщення робочих органів здійснюється за допомогою датчика положення 8, сигнали з якого використовуються у системі зворотного зв'язку. Усунення розбіжності між сигналом задавання та фактичним положенням робочого органа забезпечується контролером нижнього рівня 2, який реалізує алгоритм керування пневматичним приводом.

Живлення системи стисненим повітрям здійснюється через блок підготовки повітря 5, який забезпечує необхідні параметри робочого середовища. Регулювання витрати повітря та, відповідно, швидкості і характеру переміщення виконавчого механізму здійснюється за допомогою розподільника з пропорційним керуванням 4. У більшості практичних схем застосовується п'ятилінійний трипозиційний золотниковий розподільник з електромагнітним імпульсним керуванням.

Процес керування розподільником полягає у забезпеченні переміщення золотника під дією магнітного поля котушки електромагніта. Таке переміщення відбувається у разі подачі електричного сигналу керування на відповідну котушку розподільника, що забезпечує зміну напрямку та величини потоку стисненого повітря у пневматичному приводі і, як наслідок, кероване переміщення робочих органів мехатронного модуля.

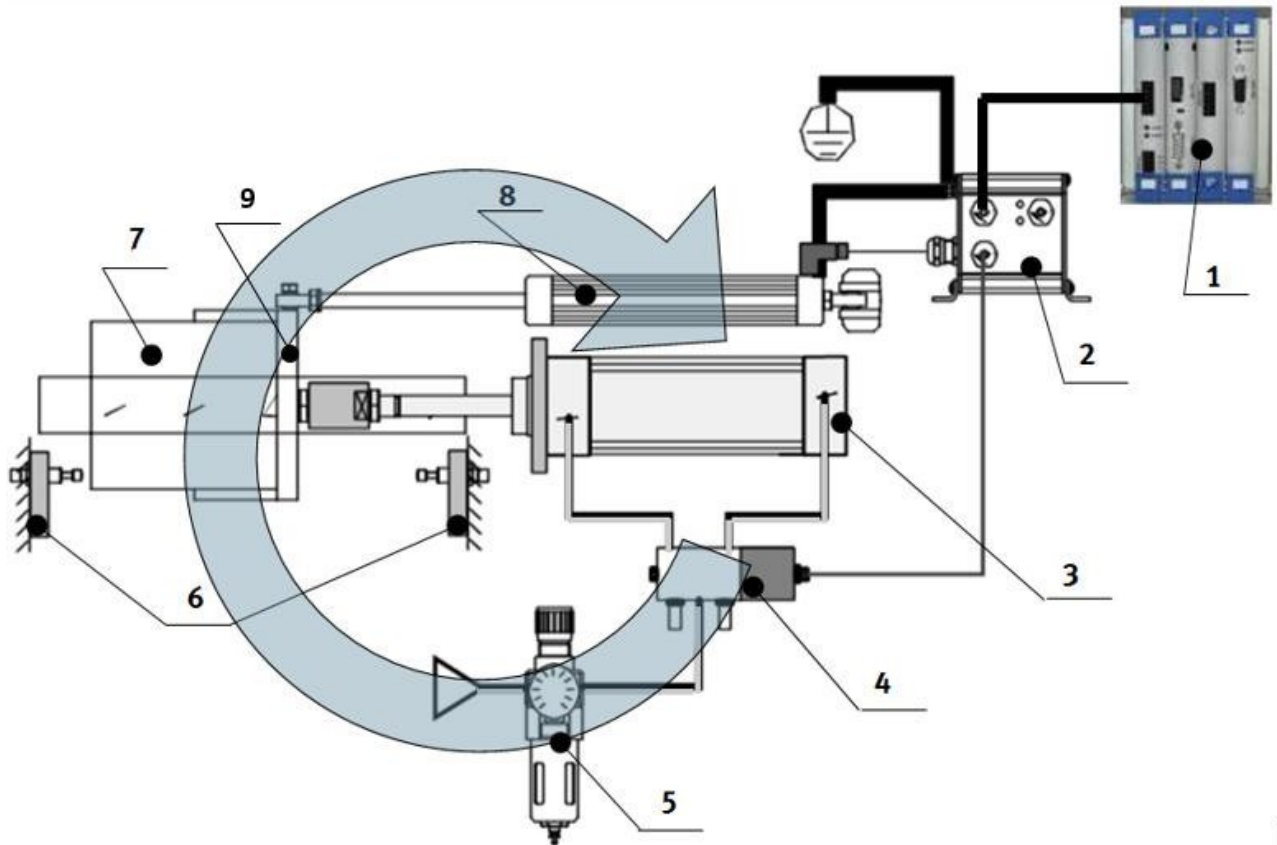


Рисунок 4.1 – Структурна схема мехатронного модуля пневматичним приводом слідування: 1 – контролер; 2 – інтерфейс перетворення сигналів; 3 – пневмо-циліндр; 4 – пропорційний розподільник; 5 – система підготовки та очищення повітря; 6 – система безударної зупинки в кінцевих положеннях; 7 – упаковка; 8 – датчик зворотного зв'язку по положенню робочого органу; 9 – зіштовхувач.

Робота системи слідування експериментальної установки характеризується використанням у програмному забезпеченні спеціальної математичної моделі типу «модель-спостерігач» (рис. 4.2).

Поєднання математичної моделі з електронною системою керування дозволяє отримати координату переміщення робочого органу x_0 прямим способом, а швидкість і прискорення – математичним розрахунком.

Традиційна схема структури керування передбачає паралельне надходження інформації щодо координати переміщення в реальному часі, що

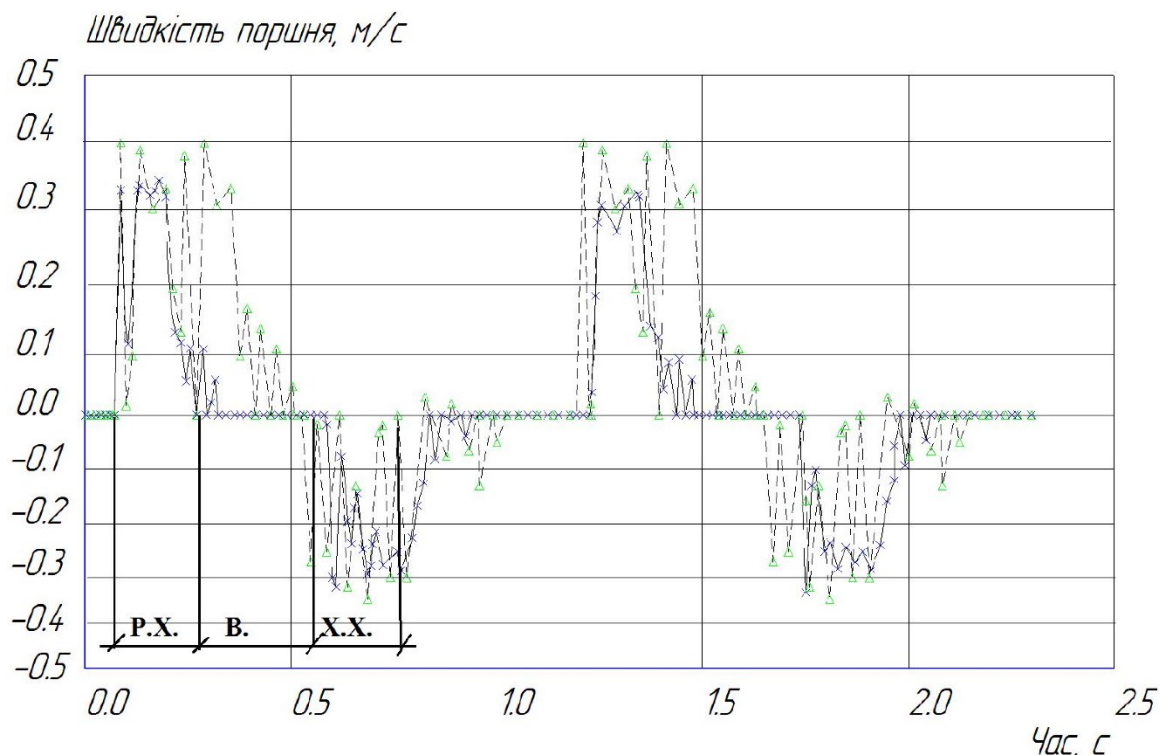


Рисунок 4.4 – Залежність швидкості поршня циліндра мехатронного модуля в часі для трьох робочих циклів із характеристикою: робочий хід (Р.Х) – 0,4 с.; холостий (Х.Х.) – 0,3 с.; час вистою (В.) – 0,5 с.

Другий етап досліджень мехатронного модуля з пневмоприводом слідування проводився в режимі навантаження.

Метою цього дослідження було визначення впливу навантаження на роботу мехатронного модуля, часу переміщення структурних елементів групової упаковки з харчовим продуктом та точність реалізації заданих законів руху.

З аналізу величин навантажень для подібних операцій в обладнанні для групового пакування були визначені відповідні значення – 50 Н, 100 Н і 200 Н. Циклограма переміщення відповідає попереднім дослідженням. Результати досліджень наведено у вигляді графіків на рисунку 4.5.

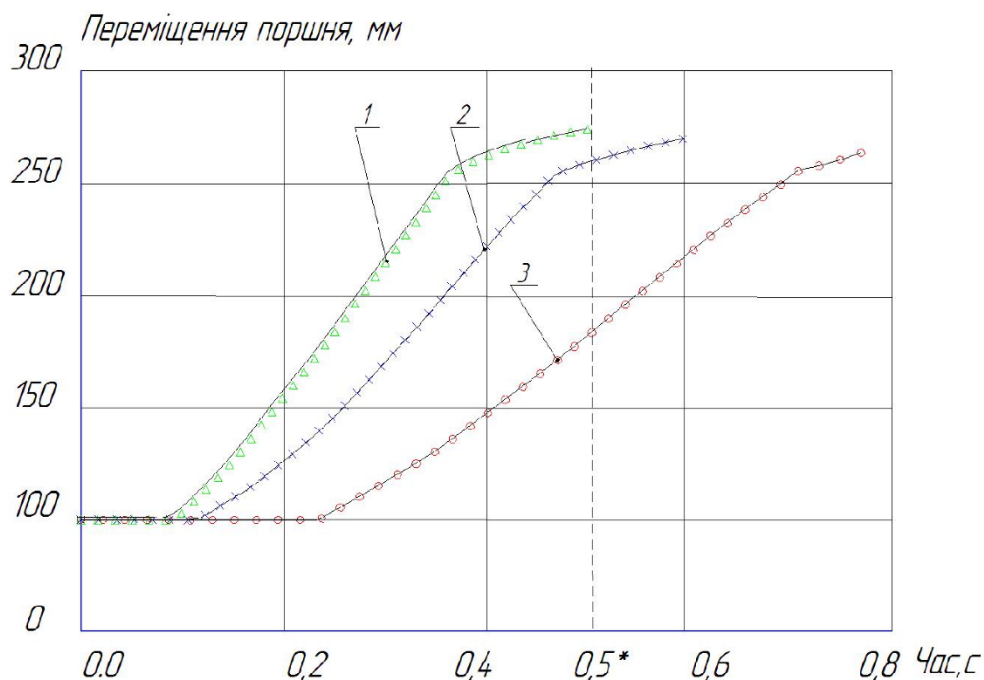


Рисунок 4.5 – Зміна переміщення поршня пневмоциліндра мехатронного модуля в часі при постійному навантаженні: 1 – 50 Н; 2 – 100 Н; 3 – 200 Н

Мехатронним модулем з пневмоприводом слідкування з великою точністю реалізується заданий закон руху, забезпечуючи його кінематичні та динамічні параметри за допомогою системи зворотного зв'язку та моделі спостерігача. Нестабільність роботи системи керування спостерігається на етапі позиціонування та зупинки робочого органу в заданій координаті під час виконання операцій зіштовхування структурних елементів групової упаковки безштоковим пневмоциліндром.

У цій операції елементи групової упаковки переміщувались в горизонтальній площині на платформі формування і були нерухомі відносно неї. Втрати повітря в порожнинах безштокового пневмоциліндра та замалі значення сил тертя ковзання між рухомими та нерухомими його поверхнями забезпечують швидкий дисбаланс сил на торцях його поршня, що призводить до його постійного переміщення в сторону меншої сили.

Система зворотного зв'язку визначає зміну координати позиціонування шляхом зміни ефективної площі розподільника намагається повернути робочий орган в задану координату, що призводить до утворення автоколивань, що не

затухають. Значення частоти та амплітуди коливань залежать від швидкості втрат тиску повітря в порожнинах пневмоциліндра (рис. 4.6).

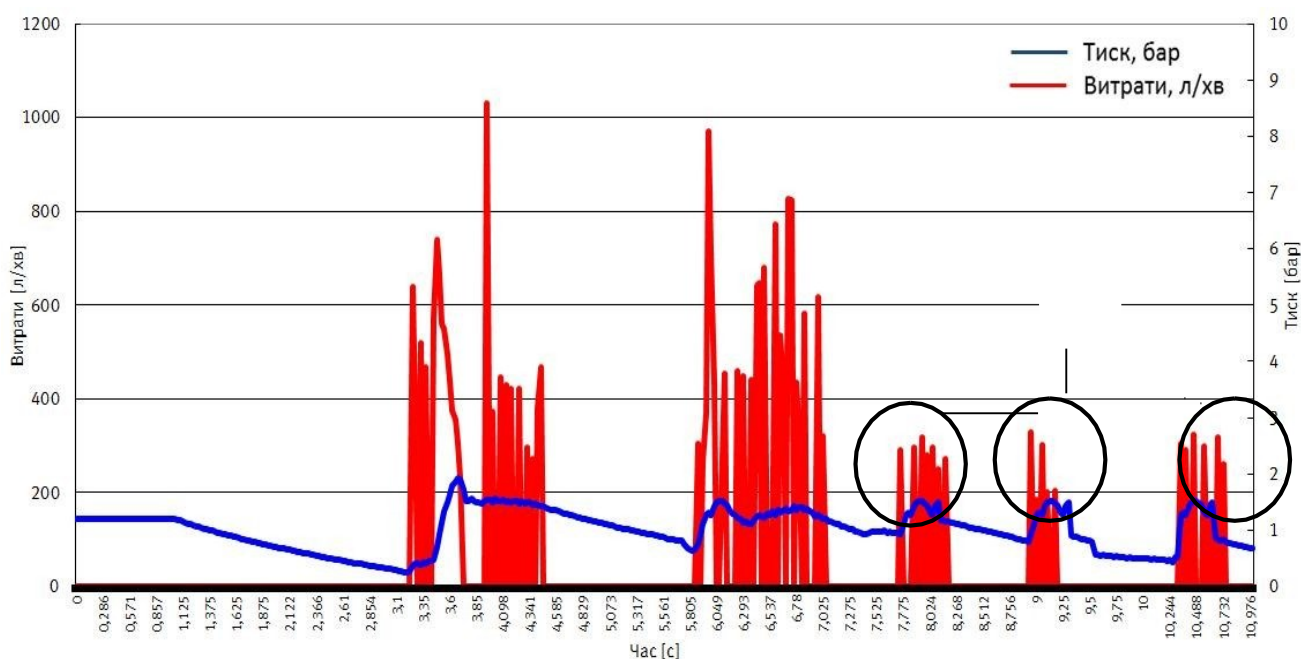


Рисунок 4.6 – Зміна тиску та витрат повітря в поршневій порожнині штокового пневмоциліндра мехатронного модуля за умови його часткових втрат під час виконання технологічної операції зіштовхування структурного елемента групової упаковки

4.2 Дослідження розподілення зусилля утримання між елементами захоплення в комбінованих мехатронних модулях

Дослідження технологічних операцій переміщення структурних елементів групової упаковки захоплювальними пристроями – по виду їх руху можна умовно поділити на три групи (рис.4 .7).

Це характеризується у першій групі послідовністю виконання вертикального підйому упаковки до кінцевої точки по висоті та подальше її переміщення в горизонтальній площині.

Друга група характеризується частковою послідовністю виконання операцій. Бо на першому етапі відбувається операція підйому упаковки до певної висоти. Далі настає другий етап, який характеризується комбінованою схемою її переміщення.

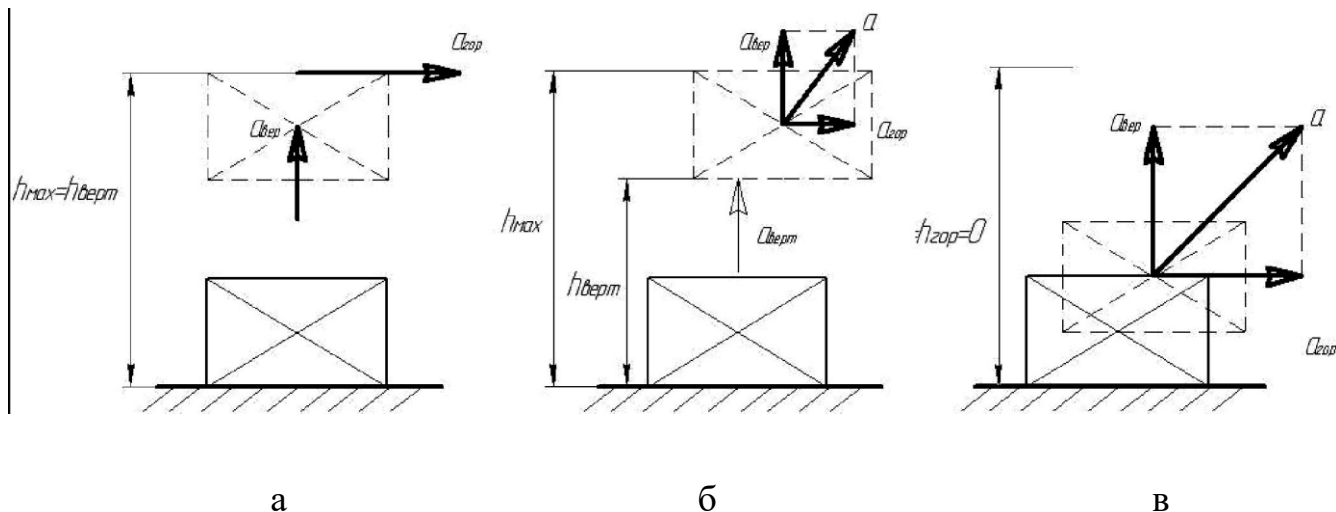


Рисунок 4.7 – Схеми операцій переміщення упаковок захоплювальними пристроями

Інша, третя група характеризується комбінованою схемою переміщення, яка реалізується уже на початку руху упаковки і характерна одночасним рухом у горизонтальній і вертикальній площинах. Напрямок вектора переміщення залежить від величини прискорення у вертикальній та горизонтальній площинах. Сучасні механізми можуть забезпечувати зміну прискорення за попередньо заданим законом руху, що дозволяє на початку руху надати перевагу вертикальному переміщенню, а потім горизонтальному. У такому випадку прискорення упаковки є величиною змінною.

Висота губок механічного захоплювального пристрою співставна з висотою упаковки або відрізняється в незначних межах (рисунок 5.2).

Захоплення упаковки можливо двома способами, які можна характеризувати відповідним розташуванням губок механічного захоплювального пристрою відносно напрямку переміщення.

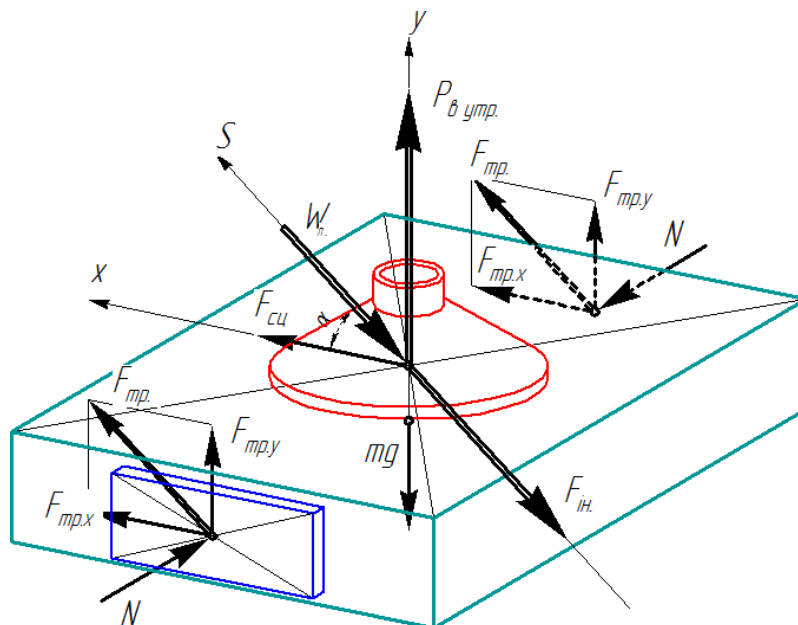


Рисунок 5.2 - Схема дії сил у процесі переміщення упаковки комбінованим захоплювальним пристроєм у випадку, коли губки механічного захоплювального пристрою направлені паралельно переміщенню упаковки

За результатами дослідження встановлено, що використання комбінованих захоплювальних пристроїв забезпечує більш надійне утримання упаковок та збереження їх товарного вигляду за рахунок можливості розподілення зусилля утримання між захоплювальними елементами. Так, різниця в зусиллі утримання упаковок комбінованими та вакуумними захоплювальними пристроями при однакових умовах переміщення становить до 55 %, а між комбінованими і механічними до 67 %. (рисунок 5.3).

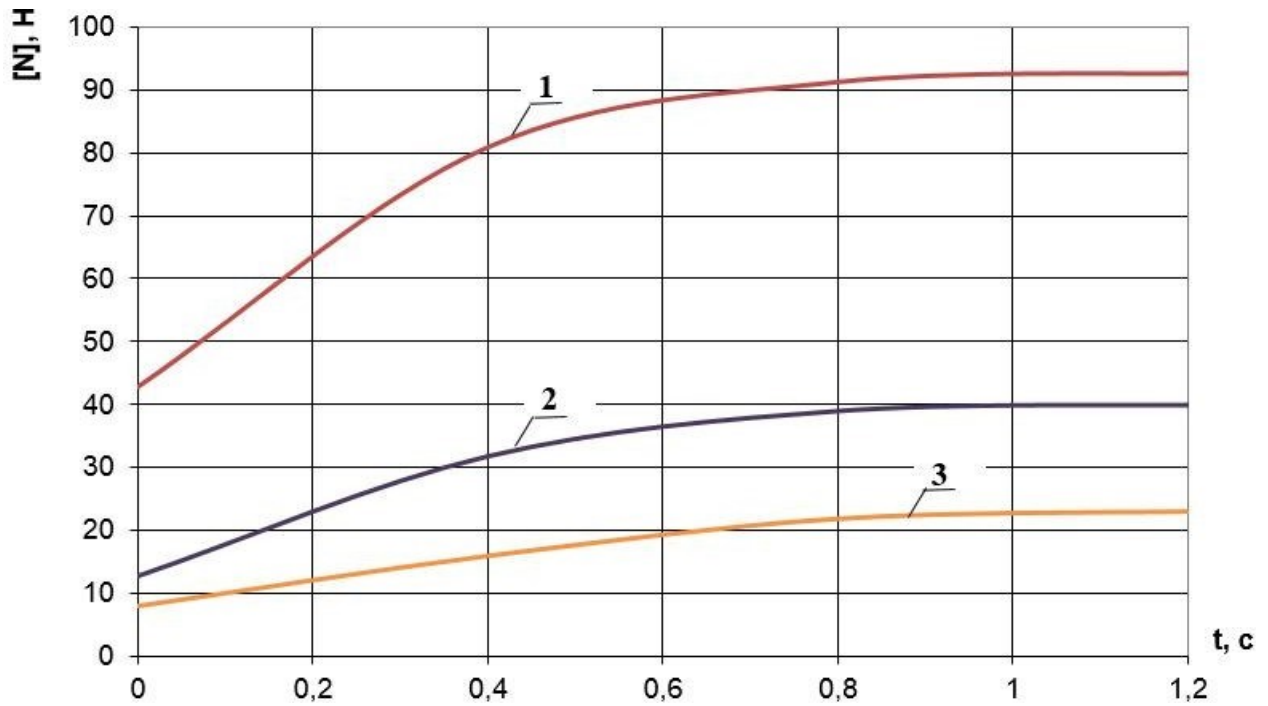


Рисунок 5.3 – Графік зміни припустимого зусилля утримання різними конструкціями захоплювальних пристроїв від часу при виконанні технологічної операції піднімання структурного елемента групової упаковки : 1 – комбінованим захоплювальним пристроєм (одночасною дією механічним та вакуумним захоплювальним елементами); 2 – вакуумним захоплювальним пристроєм; 3 – механічним захоплювальним пристроєм.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було оптимізовано конструкцію та розроблено нове обладнання з мехатронних модулів для групового пакування харчових продуктів, а саме:

1. Проаналізовано технологічні схеми існуючих зразків для групового пакування харчової продукції відповідно щодо способів формування групової упаковки, коефіцієнтів універсальності, конструкцій робочих органів та їх приводів.

2. Розроблено граф ієрархічної, детермінованої структури машини для групового пакування з типових функціональних модулів.

3. Сформульовано принцип побудови пакувальної машини з мехатронних модулів.

4. Розроблено типові структури для машин групового пакування.

5. Визначено вплив технологічних і конструктивних параметрів мехатронних модулів на можливість їх переналагодження.

6. Розроблено рекомендації із впровадження нової концепції проектування типових мехатронних модулів переміщення та захоплення структурних елементів групової упаковки у нові зразки пакувального обладнання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Povstianoi O., Markina L., Denysiuk V., Lapchenko Y., Satsyk V., Pylypets M. Automated smart humanoid robot arm on the arduino platform V. 129, Issue 4. 2025, P.43-53. <https://doi.org/10.7862/tiam.2025.4.4>
2. Кваліфікаційна робота: методичні вказівки до оформлення кваліфікаційних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівнів вищої освіти всіх освітніх програм денної та заочної форм навчання / уклад. Н.В. Ковальчук, Ю.Г. Фесіна, І.Л.Заблоцька Луцьк : ЛНТУ, 2023. 46 с.
3. Інноваційні підходи в підготовці магістрів з прикладної механіки : навч. посіб. / Т. Є. Божко, Б. П. Валецький, Л. М. Самчук, Т. І. Четвержук. Луцьк : Вежа-Друк, 2024. – 324 с.
4. Методичні рекомендації до написання кваліфікаційної роботи за ступенем вищої освіти «магістр» : метод. рекомендації для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти освітньої програми «Прикладна механіка», спец. 131 Прикладна механіка, галузі знань 13 Механічна інженерія денної та заоч. форм навч. / уклад.: Т. І. Четвержук, Р. М. Полінкевич. – Луцьк: ЛНТУ, 2024. 48 с.
5. Дмитрієв Д.О. Кінетостатичний аналіз каркасних компоновок верстатів з механізмами паралельної структури // Науковий журнал "Технологічні комплекси" №2, 2020. С. 40-45.
6. Борозенець Г.М., Павлов В.М., Семак І. В. Деталі машин : Навчальний посібник. – К.: Видавничий дім «Кондор», 2021. 220 с.
7. Головня В.Д. САПР технологічних процесів : конспект лекцій / В.Д. Головня. – Житомир : Житомирська політехніка, 2019. 200 с.
8. Morenko A., Morenko O., Dmytrotsa O., Poruchynsky A., Korzhyk O. Changes in electroencephalogram (EEG) power during subdominant (left) hand finger movements in females with different alpha rhythm characteristics. Health Problems of Civilization. 2020. Vol 14, No 1. P. 63–69. 15. <https://doi.org/10.5114/hpc.2020.93295>
[Web of Science/](#)

9. Korzhyk O. V., Dmutrotsa O. R., Poruchynskyi A. I., Morenko A. H. Event-related potentials during contralateral switching over motor programs in humans. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*. 2020. Vol. 11, No 1. P. 110–115. <https://doi.org/10.15421/022016> Scopus (Q4), Web of Science.

10. Obertyukh, R., Slabkyi A., Polishchuk, L., Povstianoi, O., Kumargazhanova, S., & Satymbekov M. Dynamic and mathematical models of the hydroimpulsive vibro-cutting device with a pressure pulse generator bult into the ring spring. *Informatyka, Automatyka, Pomiarы W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 2022. 12(3), 54–58.

11. Halchuk T. N., Povstyanoy O. Yu., Bembenek M., Redko R. G., Chetverzhuk T. I., Polinkevych R. M. (2023). Impact of technological system's characteristics on the machining accuracy of bearing rings. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 10(1), pp. A22-A30, doi:10.21272/jes.2023.10(1). a4.

12. Zaleta O. M., Povstyanoy O. Yu., Ribeiro L. F., Redko R. G., Bozhko T. Ye., Chetverzhuk T. I. (2023). Automation of optimization synthesis for modular technological equipment. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 10(1), pp. A6-A14, doi: 10.21272/jes.2023.10(1).a2.

13. Povstyanoy O., MacMillan A. (2021). Mechatronic system's permeable materials with controlled porosity. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 8(1), pp. C45–C49, doi: 10.21272/jes.2021.8(1).c DOI: 10.21272/jes.2021.8(1).

14. Редько Р.Г. Дослідження сили різання при розточуванні гвинтових нежорстких деталей машин / Р.Г. Редько, О.Ю.Повстяной, Р.М. Полінкевич, Т.І. Четвержук // *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. Том 1, №20, 2023. С.26-32.

15. Повстяной О.Ю., Полінкевич Р.М., Редько Р.Г., Четвержук Т.І. Технологія п'ятикоординатної обробки на фрезерних верстатах з ЧПУ // *Важке машинобудування. проблеми та перспективи розвитку: Матеріали XXII Міжнародної науково-технічної конференції (м.Краматорськ - Тернопіль, ДДМА, 28-30 травня 2024 р.)*. С.154