

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ЯКИМЧУК МИКОЛА ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 621.798.3:004.4 (043.3)

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ЗАСАДИ СТВОРЕННЯ ОБЛАДНАННЯ
ДЛЯ ГРУПОВОГО ПАКУВАННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ
НА ОСНОВІ МЕХАТРОННИХ МОДУЛІВ**

Спеціальність 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та
фармацевтичних виробництв

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті харчових технологій Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор

Гавва Олександр Миколайович,
Національний університет харчових технологій,
МОН України, завідувач кафедри машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Сухенко Юрій Григорович,
Національний університет біоресурсів і природокористування України, МОН України,
завідувач кафедри процесів і обладнання переробки продукції АПК

доктор технічних наук, професор

Мікульонок Ігор Олегович,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», МОН України,
професор кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування

доктор технічних наук, професор

Регей Іван Іванович,
Українська академія друкарства, МОН України
завідувач кафедри поліграфічних і пакувальних машин та технологій пакування

Захист відбудеться « 01 » червня 2016 року о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.058.02 Національного університету харчових технологій МОН України за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68, аудиторія А - 310.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету харчових технологій МОН України за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська, 68.

Автореферат розісланий « 27 » квітня 2016 року.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 26.058.02,
к.т.н., доц.



Л.О. Кривопляс-Володіна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В Україні і за кордоном ведуться інтенсивні роботи з розробки нового покоління вискоєфективного обладнання для групового пакування харчових продуктів. Основною вимогою до проектування такого обладнання є забезпечення можливості виготовлення будь-якого зразка машини з широкої номенклатури можливих конструкцій за технічними характеристиками замовника в короткий інтервал часу з малими витратами. Активне впровадження на підприємствах харчової та переробної промисловості індустріальних технологій укрупнення вантажних одиниць – групового пакування готової продукції та пакування потребують розробки автоматизованих пакувальних комплексів із комп'ютерним програмним управлінням, які дають можливість оперативного реагувати на сьогоденні вимоги споживачів – швидке переналагодження залежно від кон'юнктури ринку на інші види продукції та типи упаковки.

Створення нового пакувального обладнання з гнучкою структурою та високим ступенем універсальності до різних типів та видів упаковки з харчовими продуктами є основним завданням пакувального машинобудування сьогодення. Його вирішення потребує системного підходу, починаючи з розроблення нової концепції проектування машин-автоматів для групового пакування і закінчуючи конструкціями їх робочих органів. Найперспективнішим вирішенням цієї проблеми є використання концепції мехатронно-модульного принципу проектування, який дає можливість створювати базу даних функціональних мехатронних модулів і поєднувати їх між собою, створюючи широку лінійку параметричних рядів обладнання для групового пакування одного функціонального призначення з гнучкою структурою для зміни технологічного процесу на рівні автоматизованої системи керування. Концепція створення наукових засад формування пакувального обладнання з мехатронних модулів передбачає новий погляд на технічний об'єкт як на систему.

Дисертаційна робота спрямована на вирішення актуальної науково-прикладної проблеми – розроблення науково-технічних засад створення нового покоління обладнання для групового пакування харчових продуктів на основі мехатронних модулів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Проблеми, що вирішуються у дисертаційній роботі, впливають із завдань у сфері науки і техніки, сформульованих у Законі України № 2519-VI від 09.09.10 р. «Про внесення змін до закону України «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки». Дослідження і технічні розробки, наведені в дисертаційній роботі, безпосередньо пов'язані з: напрямком робіт цільової комплексної програми наукової та науково-технічної й інноваційної діяльності Національного університету харчових технологій на 2013-2017 роки; планом науково-дослідної роботи кафедри технічної механіки та пакувальної техніки НУХТ за напрямом «Розроблення складових сучасних технологій та процесів виготовлення пакувальних матеріалів і упаковки, підготовки харчової продукції до фасування і синтез машин для пакування та переробки упаковки»; держбюджетних тематик

проблемної науково-дослідної лабораторії НУХТ «Наукові засади оптимізаційного синтезу функціонально-модульної структури машин для пакування харчових продуктів» (замовник дослідження – МОН України, державний реєстраційний номер 0112U007798, автор – виконавець теми); «Розроблення новітніх способів інтенсифікації масообмінних процесів харчових технологій» (замовник – МОН України, державний реєстраційний номер 0107U010362, автор – виконавець теми), «Розроблення наукового підґрунтя контурів замкненого енергокористування в харчовій промисловості» (замовник – МОН України, державний реєстраційний номер 0109U008362, автор – виконавець теми).

Мета і завдання дослідження: розроблення науково-технічних засад створення нового покоління обладнання з мехатронних модулів для групового пакування харчових продуктів на основі синтезу його структури та конструкцій робочих органів.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

- проаналізувати технологічні схеми та конструкції існуючих зразків обладнання для групового пакування харчової продукції відповідно до способів формування групової упаковки, коефіцієнтів універсальності, конструкцій робочих органів та їх приводів;

- розробити граф ієрархічної, детермінованої структури машини для групового пакування з типових функціональних модулів та встановити логічні зв'язки між ними;

- сформулювати принцип побудови пакувальної машини з мехатронних модулів та розробити їх типові структури для машин групового пакування;

- удосконалити теоретичні основи побудови нового обладнання для групового пакування із сформованих баз даних мехатронних модулів та розробити методи їх уніфікованого поєднання за попередньо заданими критеріями;

- визначити вплив технологічних і конструктивних параметрів мехатронних модулів на можливість їх переналагодження на рівні зміни координат зупинки робочих органів під час виконання технологічних операцій групового пакування.

- створити експериментальні зразки мехатронних модулів та перевірити адекватність запропонованих математичних моделей операцій групового пакування реальним процесам;

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

Об'єкт дослідження: процес групового пакування харчових продуктів на основі мехатронних модулів та зв'язки між їх конструктивними, кінематичними, динамічними та інформаційними параметрами.

Предмет дослідження: параметри процесу та конструктивна реалізація групового пакування харчових продуктів на основі мехатронних модулів в машинах.

Методи досліджень – теоретичні дослідження проводились комплексними методами із врахуванням мехатронно-модульної побудови пакувальної машини. Для аналізу геометричних, кінематичних і динамічних параметрів операцій

групового пакування та мехатронних модулів використано основні закони механіки, теорії термо- та газодинаміки для силових пневматичних приводів. Для аналітичного дослідження динаміки мехатронних модулів із позиційним пневматичним та електроприводами використовувались методи теорії автоматичного керування, які базуються на аналізі розв'язків лінеаризованої системи рівнянь. Експериментальні дослідження проведено з використанням теорії планування експерименту та математичної статистики, методології активного експерименту та за допомогою датчиків тиску, переміщення, зусилля та витрат, блоку аналогово-цифрового перетворювачів, комп'ютера та програмних пакетів: Labview, FluidLab_PA, CoDeSys. Оброблення експериментальних даних та розрахунки виконані в програмних пакетах Microsoft Excel, MathCad та SolidWorks.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розширенні теорії інноваційного проектування обладнання з мехатронних модулів для групового пакування харчових продуктів.

Уперше отримані такі наукові результати:

- побудовано детерміновану структуру обладнання для групового пакування харчових продуктів встановленням логічних зв'язків між функціональними мехатронними модулями та їх модуль-елементами;

- встановлено функціональний зв'язок між кластерами в моделі формування баз даних мехатронних модулів залежно від технології пакування, фізико-механічних властивостей пакувальних одиниць, транспортної тари та обгорткових матеріалів і запропоновано методологію створення обладнання для групового пакування харчових продуктів із використанням утворених баз даних;

- обґрунтовано показники ефективності роботи машин для групового пакування харчових продуктів із мехатронних модулів та їх вплив на структуру машин;

- теоретично та експериментально обґрунтовано геометричні, кінематичні та силові параметри нових конструкцій мехатронних модулів лінійного переміщення з пневмоприводом із використанням пропорційних регуляторів та визначено закономірності впливу непродуктивних витрат стисненого повітря на функціональну точність розроблених та існуючих конструкцій мехатронних модулів із пневмоприводом;

- встановлено функціональні залежності між законом руху упаковок з харчовим продуктом, рушійним зусиллям робочого органу та вхідним керуючим сигналом мехатронного модуля;

- запропоновано та науково обґрунтовано геометричні, кінематичні та силові параметри мехатронних модулів захоплення пакувальних одиниць із системою розподілення зусилля між захоплювальними елементами для переміщення структурних елементів групової упаковки з урахуванням фізико-механічних властивостей пакувальних одиниць та харчового продукту.

Дістали подальший розвиток:

- методологія аналізу та синтезу технологічних схем групового пакування із застосуванням функціональних графів;

- методи визначення функціональних залежностей між технічними параметрами мехатронних модулів: продуктивності, ступеня гнучкості до перена-

лагодження, енерговитрат, коефіцієнта готовності і економічної ефективності та параметрами фізико-механічних властивостей об'єктів групового пакування;

- методи пошуку оптимальної структури обладнання для групового пакування з мехатронних модулів за запропонованими критеріями ефективності.

- математичні моделі структурних схем мехатронних модулів із пневмо- та лінійним електроприводом, які включають елементи зворотного зв'язку, системи керування і модель-спостерігач;

- способи реалізації заданих законів руху та позиціонування робочих органів за допомогою мехатронних модулів під час виконання ними технологічних операцій групового пакування.

Практичне значення отриманих результатів.

Результати досліджень зв'язків між конструктивними, кінематичними, динамічними та інформаційними параметрами мехатронних модулів і фізико-механічними властивостями пакувальних одиниць; продуктивністю, ступенем гнучкості нового покоління обладнання для групового пакування харчових продуктів стали основою розробки та впровадження методик і рекомендацій щодо науково обгрунтованого його проектування, зокрема:

- на базі аналітичних та експериментальних досліджень розроблено структурні схеми типових мехатронних модулів для машин формування групових упаковок. Проведені дослідження режимів роботи таких мехатронних модулів показали розширення їх функціональних можливостей – швидку зміну та контроль кінематичних та динамічних параметрів. Технічні рішення захищені патентами України на корисні моделі № 61438, 61601, 80288 і 80291 та винаходи № 103436 і 91970;

- розроблено концепцію проектування пакувальних машин на основі мехатронних модулів, що дало можливість створювати нове покоління обладнання для групового пакування, яке характеризується високим ступенем переналагодження;

- розроблено методики розрахунку раціональних конструктивних, кінематичних та силових параметрів типових мехатронних модулів переміщення, захоплення, що дало можливість забезпечити їх функціональну точність та енергоефективність. Технічні рішення захищені патентами України на корисні моделі № 70384 і 72161 та на винахід № 103434;

- запропоновано методику синтезу детермінованої структури машин для групового пакування харчових продуктів, що дало можливість створювати машини із високими показниками ефективності їх роботи;

- результати досліджень впроваджено під час проектування нового пакувального обладнання та модернізації існуючого на таких підприємствах: ДП «Фесто», ТОВ «Інта», ТОВ «Термопак», ТОВ «Елопак» з передбачуваним економічним ефектом 938 405 грн на рік.

- результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі кафедри технічної механіки і пакувальної техніки НУХТ під час вивчення дисциплін «Пакувальне обладнання», «Розрахунок і конструювання пакувального обладнання», «Мехатроніка в пакувальному обладнанні», а також під час виконання курсових проектів із цих дисциплін, дипломних проектів і магістерських робіт.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок полягає в детальному вивченні проблеми, конструкції обладнання для групового пакування, аналізі інформаційних джерел, уточненні термінологічної бази, понять та концептуального апарату визначень, удосконаленні існуючих та створенні нових методів і методик, проведенні аналітичних та експериментальних досліджень з аналізу і узагальненню їх результатів, розробленні нових конструкцій мехатронних модулів, експериментальних зразків обладнання для групового пакування, впровадженні у виробництво результатів роботи, формулюванні висновків. Наведені в дисертації конструкції експериментальних установок, отримані результати експериментальних досліджень та їх практична реалізація виконані особисто автором.

Розробку математичних моделей і проведення числового моделювання параметрів мехатронних модулів виконано разом з д.т.н., проф. Гаввою О.М і к.т.н., проф. Беспалько А.П. Роботи, пов'язані з проведенням експериментальних досліджень та обробкою результатів числового моделювання виконані за участю к.т.н., доц. Волчка А.І., та к.т.н., доц. Валіуліна Г.Р., частина запатентованих винаходів створена разом з асист. Івановою Л.І. за особистої участі автора. Конкретний внесок автора в опубліковані у співавторстві наукові праці наведено у списку опублікованих праць за темою дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідалися й обговорювалися на щорічних наукових і міжнародних науково-практичних конференціях: міжвузівська науково-практична конференція молодих вчених, аспірантів і студентів НУХТ (м. Київ, 2002–2005 р.р., 2007 р., 2010–2014 р.р.); науково-практична конференція з проблем пакувальної індустрії (м. Київ, 2009–2015 р.р.); I, II та III міжнародна спеціалізована науково-практична конференція «Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції - основні засади її конкурентоздатності» (м. Київ, 2012–2014 р.р.); науково-практична конференція молодих вчених "Новітні технології пакування"(м. Київ, 2010–2015 р.р.); X Всеукраїнська наукова конференція студентів і молодих вчених «Молодь: освіта, наука. духовність», м. Київ, 2013 р.; міжнародна наукова конференція «Development of the Science, Technologies and Techniques for the Manufacture, Packaging, Storage and Distribution», м. Пловдив, (Болгарія), 2013 р.; міжнародна наукова конференція, присвячена 130-річчю Національного університету харчових технологій «Нові ідеї в харчовій науці – нові продукти харчовій промисловості», м. Київ, 2014 р.; II міжнародна науково-практична конференція «Продовольчі ресурси: проблеми і перспективи» м. Київ, 2014 р.; Республіканський науково-практичний семінар «Автоматизация и роботизация процессов и производств», м. Мінськ (Білорусь), 2014 р.; міжнародна науково-практична конференція «Иновация-2014», м. Ташкент (Узбекистан), 2014 р.; XX Міжнародна науково-технічна конференція «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці», м. Київ, 2015 р.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 48 друкованих наукових працях, у тому числі 1 монографія; 22 статті опубліковані у нау-

кових фахових виданнях (з них – 5 одноосібно та 1 в наукометричних базах: Index Copernicus; EBSCOhost; CABI Full Text; Universal Impact Factor; Google Scholar); 8 статей – у наукових виданнях інших держав (в тому числі 4 статті в наукометричній базі Index Copernicus) та 6 – у збірниках матеріалів міжнародних наукових конференцій. Створені автором і за його участю нові способи, технічні засоби для операцій групового пакування пакованих харчових продуктів захищено 11-ма патентами України, з яких 3 на винахід і 8 на корисну модель.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, восьми розділів, висновків, додатків і списку використаних джерел. Основна частина дисертації представлена на 359 сторінках і містить 37 таблиць і 150 рисунків. Загальний обсяг роботи становить 447 сторінок, у тому числі 6 додатків на 36 сторінках і список використаних джерел з 331 найменування на 32 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** окреслено науково-технічні проблеми, розв'язанню яких присвячена дисертація, обґрунтована актуальність теми, відображено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, визначені мета та завдання досліджень, сформовано наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, висвітлено особистий внесок здобувача та наведено апробацію результатів дисертаційної роботи.

У **першому розділі** роботи проаналізовано фізико-механічні властивості пакувальних одиниць як об'єктів групового пакування, технології формування та способи скріплення групової упаковки. Розглянуто структуру процесу групового пакування, визначено конструкції типових функціональних модулів для їх виконання. Здійснено огляд існуючих компоновань машин для групового пакування, проаналізовано техніко-економічні показники ефективності їх роботи, окреслено напрямки та перспективи розвитку таких машин, розроблено узагальнену структуру такого типу обладнання, проведено аналіз приводів та елементів систем керування функціональних модулів.

На основі аналізу результатів наукових праць Кривопляса О.П., Гавви О.М., Масла М.А., Беспалька А.П., Волчка А.І, Соколенка А.І., Fischer G, Albring W та ін. з питань проектування машин для групового пакування встановлено, що проаналізовані наукові праці не дають повної відповіді з вирішення проблеми проектування нового покоління обладнання для групового пакування на основі мехатронного підходу; наведені методики в працях Бурляя Ю.В., Сухого Л.А., Новікова М.Б., Васильєва А.Л., Губарєва О.П., Черкашенка М.В., Кузнєцова М.М., Усова Б.А., Осипова В.А., Гавриша А.П., Дашенко А.І., Герц О.В., Івановського К.Є., Крутікова Г.А., Ямпольського Л.С., Ingram J., Uhling H. та ін. не враховують повною мірою фізико-механічні властивості новітніх пакувальних матеріалів, особливості підбору сучасної елементної бази керування та імовірність впливу пакованої продукції на реалізацію заданих законів руху пакувальних одиниць.

Незважаючи на значний перелік наукових праць, присвячених теорії розробки пакувального обладнання, методикам розрахунку функціональних модулів та під-

бору приводів, систем керування та слідкування практично відсутні концепція побудови обладнання для групового пакування з мехатронних модулів. Синтез та оптимізація структури нового обладнання здійснюється за методиками, наведеними в працях Подиновського В.В., Дашенка А.И., Рвачова В.В., Ілюхіна Ю.В., Крейніна Г.В., Пальчевського Б.О. та ін. Однак їх використання для створення нового покоління пакувального обладнання з мехатронних модулів є обмеженим, оскільки в наявних працях відсутнє визначення типових мехатронних модулів та обґрунтування критеріїв оптимізації для такого типу обладнання.

На основі цього були сформульовані завдання дослідження.

У другому розділі викладено методичні підходи й організація виконання дисертаційної роботи, обґрунтовано напрямок наукових досліджень, який поділяється на теоретичний та експериментальний етапи, представлено їх програми у вигляді послідовності спрямованих дій на досягнення поставленої мети.

Експериментальні дослідження виконувались методами планування експерименту. Наведено конструкції розроблених експериментальних установок та описано принципи роботи, послідовність виконання досліджень. Оброблення експериментальних даних здійснювалось стандартними статистичними методами за допомогою програм MathCad та SolidWorks. У процесі виконання роботи проведені дослідження для визначення:

- зміни кінематичних та динамічних параметрів руху робочих органів під час формування групової упаковки або її структурних елементів, які характеризувались параметрами змінних координат, швидкостей, прискорень, рушійних сил та сил опору тощо;

- впливу фізико-механічних властивостей пакувальних матеріалів на зусилля утримування пакувальних одиниць захоплювальними пристроями, які характеризувались змінними параметрами коефіцієнтів повітропроникності пакувальних матеріалів, значеннями вакууму та надлишкового тиску стисненого повітря, змінними коефіцієнтами тертя тощо;

- точності реалізації заданих законів руху структурних елементів групової упаковки мехатронними модулями з пневматичними та електричними приводами, які характеризувались змінними параметрами тисків та витрат стисненого повітря в порожнинах пневмоциліндрів, величинами напруги та силою струму керуючих електричних сигналів, непродуктивними втратами стисненого повітря.

У третьому розділі наведено розроблену методологію створення нового покоління обладнання з мехатронних модулів (далі – мехатронна система) для групового пакування харчових продуктів. За результатами аналізу технологічних процесів групового пакування запропоновано умовно поділити його на дві групи, які обумовлено траєкторією руху пакувальної одиниці (споживчої упаковки із харчовою продукцією) або сформованих структурних елементів групової упаковки під час виконання операцій групового пакування: 2D ($z = 0$) та 3D ($z = 1$) переміщенням. Для розгляду та проектування всіх можливих схем технологічних процесів формування групової упаковки з пакувальних одиниць для кожної групи були побудовані графи технологічних процесів (рис.1).

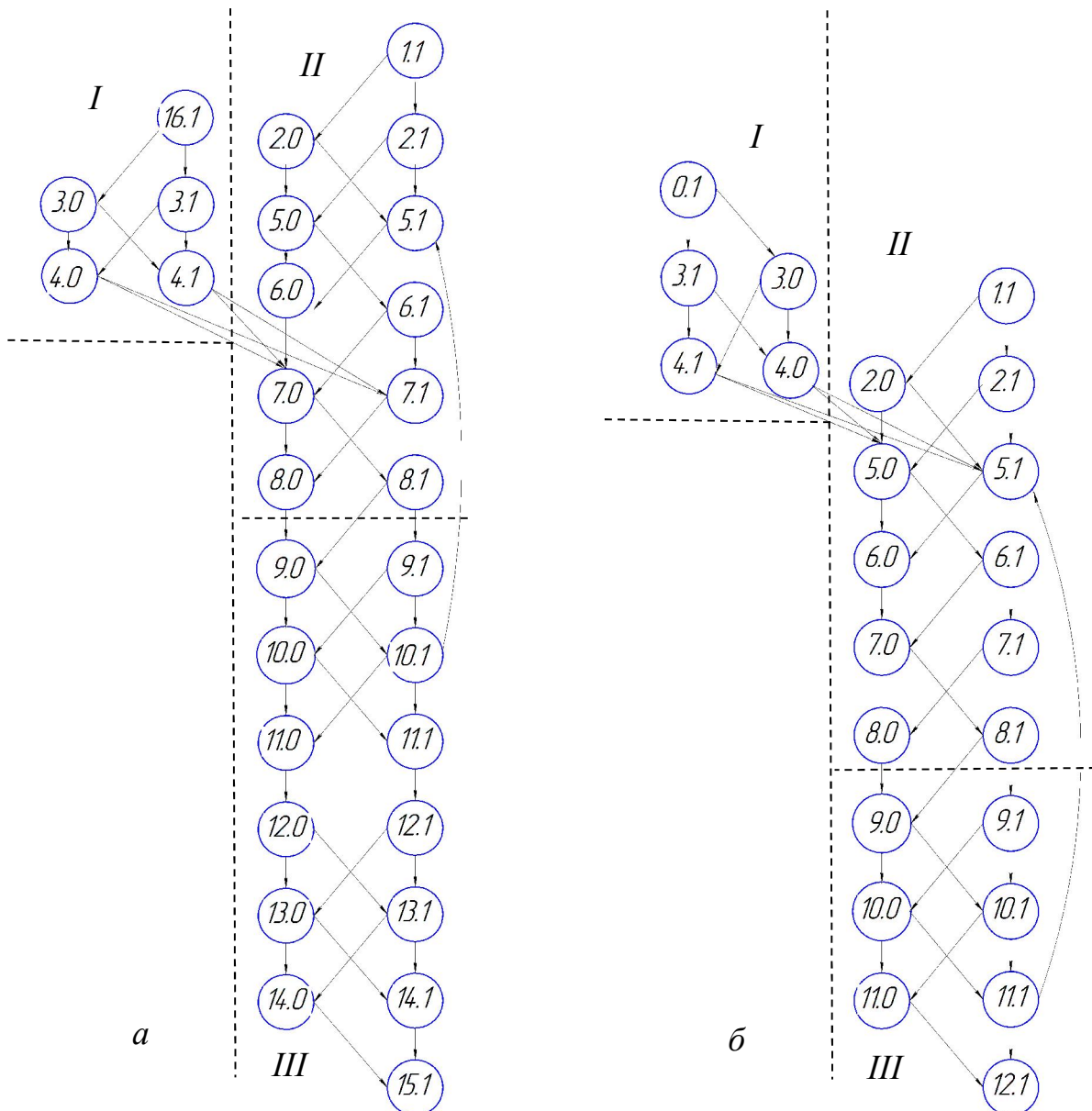


Рис. 1. Структурний граф технологічних процесів групового пакування, що виконується обладнанням за схемою *а* – 2D ($z = 0$); *б* – 3D ($z = 1$): *I* – формування тари; *II* – формування структурного елемента групової упаковки; *III* – формування групової упаковки.

На рис. 1 введено такі позначення: *а* – 1.1. – переміщення споживчих упаковок з харчовим продуктом від фасувальних машин подавальним конвеєром; 2.1. – орієнтування упаковок на конвеєрі; 3.1. – формування тари та встановлення ДПЗ; 4.1. – подача тари в місце завантаження; 5.1. – поштучне укладання упаковок у тару або на лоток шляхом переміщення в горизонтальній площині; 6.1. – формування ряду упаковок; 7.1. – порядне укладання упаковок у тару або на лоток шляхом переміщення в горизонтальній площині; 8.1. – формування шару упаковок; 9.1. – пошарове укладання упаковок у тару або на лоток шляхом переміщення в горизонтальній площині; 10.1. – переміщення тари або сформованих структурних елементів на певний крок у вертикальній площині; 11.1. – формування пакету групової упаковки із пакувальних одиниць; 12.1. –

переміщення пакета в тару або на лоток шляхом переміщення в горизонтальній площині; 13.1. – переміщення заповненої тари у вертикальній площині; 14.1. – переорієнтування заповненої тари на 90^0 ; 15.1. – переміщення групової упаковки в зону скріплення та оформлення; 16.1. – виділення одиничної плоскоскладеної заготовки або тари з магазину або потоку; б – 0.1. – виділення одиничної плоскоскладеної заготовки або тари з магазину або потоку; 1.1. – переміщення споживчих упаковок із харчовим продуктом від фасувальних машин подавальним конвеєром; 2.1. – орієнтування упаковок на конвеєрі; 3.1. – формування тари та встановлення ДПЗ; 4.1. – подача тари в місце завантаження; 5.1. – поштучне укладання пакувальних одиниць у тару або на лоток шляхом піднімання, переміщення та опускання; 6.1. – формування ряду упаковок; 7.1. – порядне укладання упаковок у тару або на лоток шляхом піднімання, переміщення та опускання; 8.1. – формування шару упаковок; 9.1. – пошарове укладання упаковок у тару або на лоток шляхом піднімання, переміщення та опускання; 10.1. – укладання міжшарового роздільного елемента; 11.1. – переорієнтація тари або групової упаковки на 90^0 ; 12.1. – переміщення групової упаковки в зону скріплення та оформлення.

Застосування таких топологічних моделей дає змогу представити можливі схеми технологічних процесів групового пакування в наочній формі для подальшого їх аналізу та синтезу.

Новітні зразки пакувального обладнання – це сукупність функціонально-мехатронних модулів, пов'язаних між собою послідовністю виконання технологічного процесу. Під **мехатронним модулем** розуміють цілісну технічну систему, що поєднує функціональний модуль із апаратним та інформаційним, є конструктивно і функціонально закінченим самостійним виробом, має автоматизовану систему керування з гнучким програмним забезпеченням зміни технологічного процесу роботи робочих органів та зворотній зв'язок у вигляді використання різних типів датчиків, які забезпечують можливість сприймання інформації про зміну характеристик зовнішнього середовища, характеризується конструктивно визначеними уніфікованими каналами механічного, енергетичного та інформаційного зв'язку для синергетичного з'єднання з іншими мехатронними модулями.

Для формування мехатронного модуля використано три групи кластерів, модуль-елементи яких характеризуються різним функціональним призначенням: виконавчим, апаратним та інформаційним, що були сформовані по визначених утворювальних критеріях типу

$$X(d) = \{X_i^M(d_{\beta, \gamma}) : i = \overline{1, N} : \beta = \overline{1, S}\}, \quad (1)$$

де S – кількість типорозмірів модуль-елементів i -го розмірного ряду; N – кількість типорозмірних рядів модуль-елементів; $X_i^M(d_{\beta, \gamma})$ – кількість (M) модуль-елементів в i -му розмірному ряді, кожен з яких має такий набір параметрів

$$d_{\gamma} = (d_{i, \gamma}, \dots, d_{\beta, \gamma}, \dots, d_{s, \gamma}), \quad (2)$$

де $d_{\beta, \gamma}$ – значення γ -го параметру, $\gamma = 1, \overline{n(i)}$, в β -му типорозмірі модуль-елементу.

Кожен модуль-елемент будь-якого кластера X_i^M має власну множину потенційних зв'язків S_i^Π у вигляді конструктивно-приєднувальних розмірів та функціонально-керуючих роз'ємів. Поділимо дану множину на вхідні $S_{\text{ВХ}}^\Pi$ та вихідні $S_{\text{ВИХ}}^\Pi$ зв'язки.

На першому етапі формування мехатронних модулів відповідно до заданих характеристик технологічних операцій визначено обмежену область елементної бази в кожній групі кластерів у вигляді скінченної множини модуль-елементів. Для формування такої множини задавались початковими критеріями до параметрів сортування: $\Omega\beta, \gamma; \Omega\alpha, \varphi; \Omega\gamma, \alpha$.

Для використання наведеної методики розроблена програма для формування кластерів виконавчих пневматичних модуль-елементів за критеріями оптимізації: магістральний тиск; хід робочого органу; зведена маса; додаткові сили тертя та удару; напрям руху робочого органу; кут нахилу модуль-елемента відносно горизонтальної площини; діаметр циліндра; приєднувальні розміри та ін.

Результатом проведеного синтезу є отримання кластерів функціональних параметричних рядів пневмоциліндрів для мехатронних модулів машин групового пакування.

На другому етапі формування мехатронних модулів здійснено поєднання модуль-елементів між собою їх потенційних зв'язків. Створені таким способом мехатронні модулі мають структуру виду

$$Z_{\beta, \gamma} : (\tau)_{\beta, \gamma} = X_i^M (\zeta)_{\beta, \gamma}, \quad (3)$$

де $(\tau)_{\beta, \gamma}$ – характеристика параметрів утвореної системи.

Вважаємо, що таке поєднання можливе за умови використання всіх потенційних зв'язків кожного із модуль-елементів.

У результаті такого поєднання отримано системи керування виду

$$\left. \begin{aligned} \frac{U}{i=1, N} (S_{\text{ВХ}, i}^\Pi) &= S_{\text{ВХ}}; \\ \frac{U}{i=1, N} (S_{\text{ВИХ}, i}^\Pi) &= S_{\text{ВИХ}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Представимо множину вхідних $S_{\text{ВХ}, i}^\Pi$ та вихідних $S_{\text{ВИХ}, i}^\Pi$ потенційних зв'язків кожного модуль-елемента X_i^M у вигляді

$$S_{\text{ВИХ}, i}^\Pi = X_i^M (S_{\text{ВХ}, i}^\Pi). \quad (5)$$

Ця система керування передбачає контроль впливу зовнішнього середовища $S_{\text{ВХ}}$ на роботу мехатронного модуля з відповідним корегуванням вихідних параметрів $S_{\text{ВИХ}}$. Для цього структура системи зв'язків мехатронного модуля повинна задовольняти умови:

$$S_{\text{ВХ}} \cap S_{\text{ВИХ}} = \theta, \quad S_{\text{ВХ}}, S_{\text{ВИХ}} \subset S \quad (6)$$

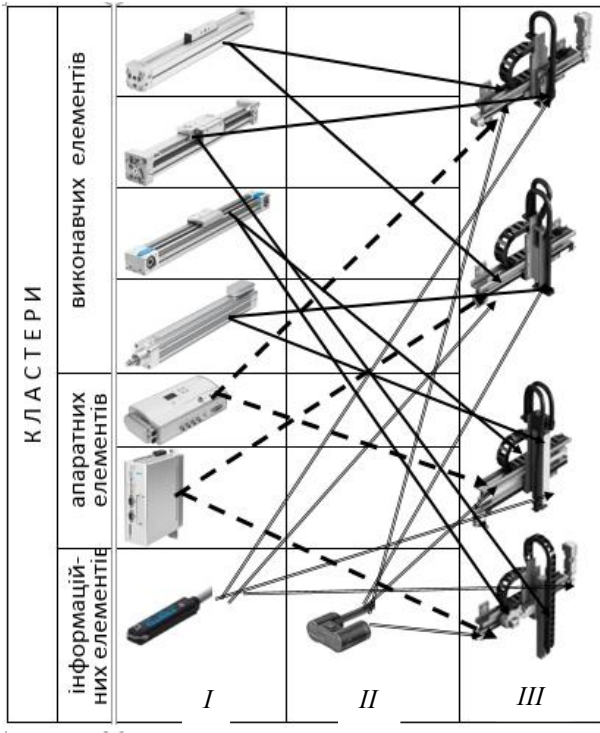


Рис. 2. Схема структурного синтезу мехатронних модулів лінійного переміщення з модуль-елементів одного виробника: *I* – формування кластерів; *II* – формування мехатронних модулів методом комбінаторики; *III* – бібліотека мехатронних модулів.

Множина отриманих альтернативних варіантів структури мехатронних модулів утворює їх бібліотеку і є областю допустимих рішень задачі, яка задовольняє багатокритеріальні початкові умови. Параметричний ряд мехатронних модулів, які утворюють функціональну бібліотеку, характеризується виконанням однакової технологічної операції типу

$$L_k = (x_{k1}, x_{k2}, x_{k3} \dots, x_{kn}), \quad (7)$$

де, x_{kn} – модуль-елементи різної природи.

Структурний синтез мехатронних модулів лінійного переміщення в межах функціональних кластерів із модуль-елементів одного виробника за попередньо заданими критеріями наведено на рис. 2. За результатами синтезу утворено чотири мехатронних модулі, конструкції яких забезпечують лінійне переміщення в горизонтальній та вертикальних площинах. Послідовність формування мехатронних систем наведена на рис. 3.

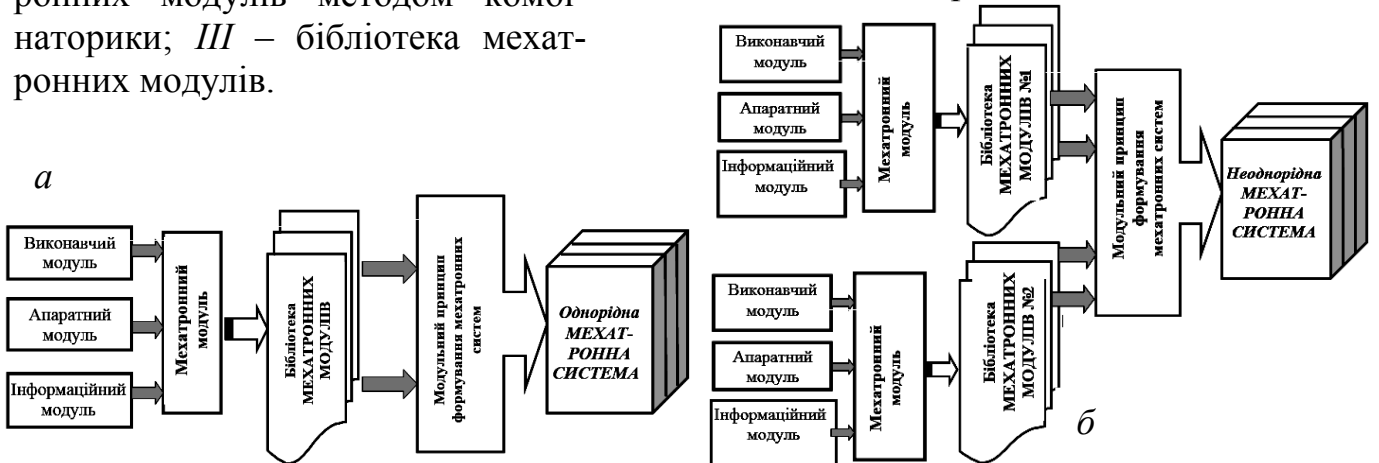


Рис. 3. Послідовність формування: однорідної (а) та неоднорідної (б) мехатронних систем

Створення нового високоефективного обладнання здійснюється методами комбінаторики на основі функціонально-мехатронної структури машини для групового пакування у вигляді узагальненого графа компоновки, який наведений у вигляді «*i* – або» дерева (рис. 4).

Умова формування обладнання має вигляд

$$L^{(1n)} = \bigcup_{i=1}^m L_i = \{x \mid x_{1n} \in L_1 \wedge x_{2n} \in L_2 \vee x_{3n} \in L_3 \vee \dots \wedge x_{mn} \in L_m\}, \quad (8)$$

де $L_1 \dots L_m$ – мехатронні модулі для технологічних операцій групового пакування виду x_{mn} .

У такому обладнанні перебір та компоновання різних мехатронних модулів, що утворюють множину варіантів N з однаковою функціональною схемою формування групової упаковки та різними структурами L_{ij} здійснюється за

$$N = (L^{(1n)}, L^{(2n)}, L^{(3n)}, \dots, L^{(in)}). \quad (9)$$

Наступним кроком є пошук такого варіанта компоновання машини для групового пакування з мехатронних модулів, який найбільшою мірою задовольняє початкові умови проектування.

$$\text{Умова оптимізації має вигляд: } L_{\text{опт}} : L_{\text{опт}} \in L''', L''' \subset L'' \subset L'. \quad (10)$$

Обґрунтовані та запропоновані такі критерії оптимізації: фактична продуктивність Z_{ϕ} ; один із параметрів надійності – коефіцієнт готовності; функціональна точність – $\lambda_{зв}$, основним показником якої є похибка позиціонування пакувальних одиниць; енерговитрати.



Рис. 4. Узагальнений граф компоновки структури машини для групового пакування з мехатронних модулів: ● — вершини зв'язані «і»; ○ — вершини зв'язані «або».

На першому кроці оптимізаційного синтезу на всю отриману множину варіантів N машин групового пакування накладемо обмеження за критеріями оптимізації типу:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n Z_{\phi i} x_i \geq Z_{\phi(\text{зад})} \rightarrow \max \\ x_i \in L_j, i, j = \overline{1, n} \end{array} \right. ; \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n K_{B\Gamma i} x_i \leq K_{B\Gamma(\text{зад})} \rightarrow \min \\ x_i \in L_j, i, j = \overline{1, n} \end{array} \right. ; \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \lambda_{зв i} x_i \leq \lambda_{зв(\text{зад})} \rightarrow \min \\ x_i \in L_j, i, j = \overline{1, n} \end{array} \right. , \quad (11)$$

де $Z_{\phi(\text{зад})}$, $K_{B\Gamma(\text{зад})}$, $\lambda_{зв(\text{зад})}$ – відповідно граничні значення коефіцієнтів фактичної продуктивності, відносної готовності та точності функціонування.

На другому кроці оптимізації виконано порівняльну характеристику отриманих зразків обладнання на рівні трансформації матеріальних і енергетичних потоків в його функціональних мехатронних модулях. В основі цієї методології є побудова енергетично-потоківих графів. Реалізація цієї методології наведена на машинах-автоматах для групового пакування полімерних пляшок з харчовими рідинами в гофрокартонні ящики за схемою 3D ($z = 1$) переміщень структурних елементів групової упаковки (рис. 5, і рис. 6).

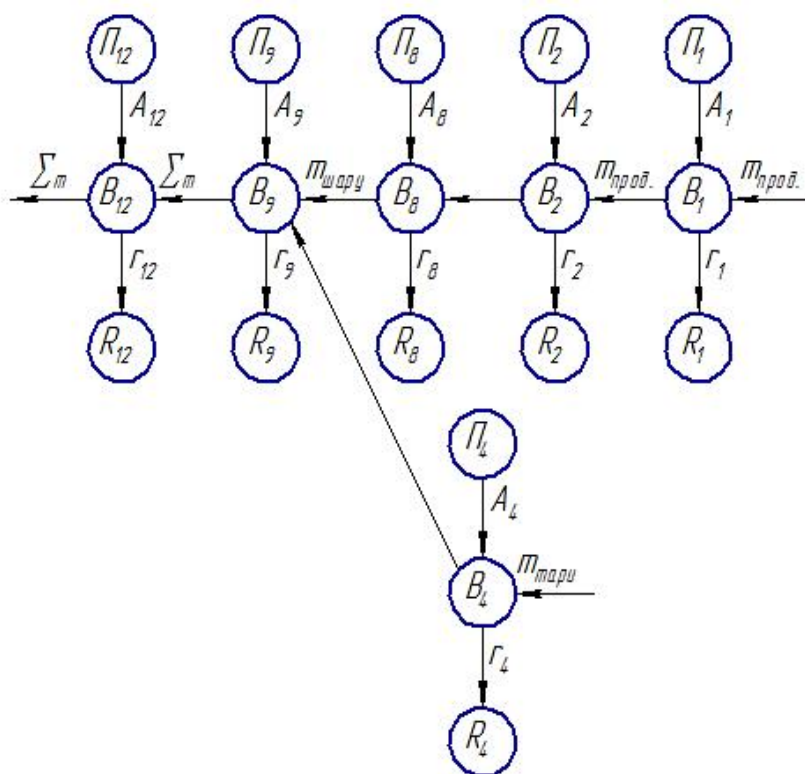


Рис. 5. Енергетично-потоківий граф процесу формування групової упаковки обладнанням 3D структур, які включають: споживачів енергії: B_i – механізми та пристрої, які виконують технологічні операції групового пакування; джерела енергії: P_i – приводи робочих органів; стоки енергії: R_i – споживання енергії у виконавчих механізмах відповідних пристроїв; r_i – робота, що виконується для подолання опорів руху у відповідних пристроях; A_i – енергія, що передається приводом відповідного пристрою; $m_{\text{прод}}$ – маса одиначної споживчої упаковки; $m_{\text{шару}}$ – маса шару споживчих упаковок.

На основі виконаних досліджень встановлено, що модулями з найважчим режимом роботи є модулі формування групової упаковки. Вони є пристроями, на яких сходяться всі потоки мас. За схемою 2D формування до таких механізмів відносять пристрої зіштовхування та підйомно-опускні платформи. На основі виконаних розрахунків встановлено, що витрати енергії на формування групової упаковки обладнанням 2D групи є меншими (до 10%) порівняно з 3D.

На третьому кроці здійснюється оцінювання структури обладнання для групового пакування методом багатокритеріального поетапного вибору рішень, яка полягає у виборі із множини можливих рішень деякої сукупності ефективних альтернатив шляхом використання методу пошуку Парето-ефективних рішень.

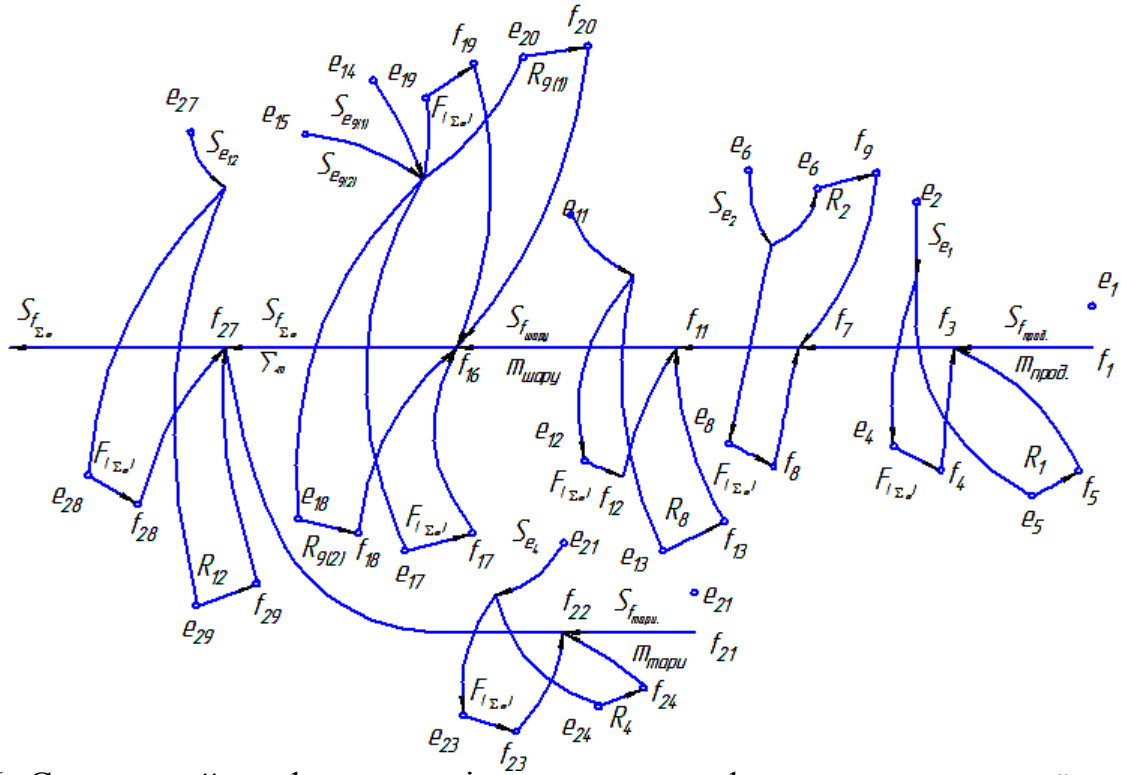


Рис. 6. Сигнальний граф технологічного процесу формування групової упаковки обладнанням 3D структур: $S_{f_{\text{прод}}}$ – потік маси споживчих упаковок; $S_{f_{\text{тари}}}$ – потік маси транспортної тари; $S_{f_{\text{шару}}}$ – потік маси шару споживчих упаковок; $S_{f_{\Sigma m}}$ – потік маси споживчих упаковок та транспортної тари; $R_1 - R_4, R_8 - R_{10}, R_{12}$ – опір руху та втрати у відповідних пристроях; $S_{e_1} - S_{e_4}, S_{e_8} - S_{e_{10}}, S_{e_{12}}$ – джерела енергії для створення рушійних сил у відповідних пристроях; $F(\Sigma_m)$ – витрати енергії на подолання опору, що створюється рухомими масами.

У четвертому розділі проведено структурний синтез мехатронних модулів лінійного переміщення для виконання операцій зіштовхування, піднімання та опускання структурних елементів групової упаковки із харчовим продуктом та встановлено закономірності між законом руху пакувальних одиниць, рушійним зусиллям робочого органу та вхідним керуючим сигналом мехатронного модуля. Розглянуто операції переміщення окремих упаковок із харчовими продуктами та структурних елементів групової упаковки за заданим законом руху: по нерухомій площині поверхні формування; з нерухомою несучою площини приймального столу на нерухому поверхню формування; з рухомою несучою площини стрічки конвеєра на нерухому поверхню формування.

Теоретичні дослідження проведені при таких припущеннях: тиск від структурних елементів групової упаковки на несучі площини розподіляється рівномірно і залишається незмінним на протязі всього процесу переміщення; упаковки розглядаються як абсолютно тверде тіло; коефіцієнт тертя f може бути постійним при незначних відносних швидкостях або змінним як функція швидкості штовхача та апроксимується лінійними залежностями виду

$$f(\dot{x}) = f_0 + k_2 \dot{x}; \quad f(\dot{x}) = f_0 - k_1 \dot{x}, \quad (12)$$

де f_0 – коефіцієнт тертя покою; k_1, k_2 – коефіцієнти пропорційності, визначаються як тангенс кута нахилу апроксимуючої прямої до осі X ; \dot{x}_1 – швидкість переміщення зведеної маси упаковок та рухомих частин механізму переміщення по осі X ; переміщення упаковок відбувається при сталих параметрах навколишнього середовища; рушійна сила P протягом часу t змінюється в межах $0 \leq P(t) \leq Q = \text{const}$ (де, Q – максимальне зусилля, що розвивається штовхачем); реалізація миттєвого значення діючого зусилля в системі керування мехатронним модулем забезпечується параметром керування $u(t)$ за рівнянням:

$$P(t) = Qu, \quad (13)$$

де u – змінна, що є керуючим параметром для роботи мехатронного модуля в межах:

$$0 \leq u \leq +1. \quad (14)$$

Для надійного контакту штовхача із структурним елементом групової упаковки на етапі гальмування запропоновано: штовхач повинен повторювати закон руху структурного елемента групової упаковки. Для реалізації цієї умови отримані рівняння для визначення кінематичних параметрів переміщення окремих пакувальних одиниць або структурних елементів групової упаковки та керуючого сигналу мехатронного модуля, який забезпечує заданий закон руху штовхача (табл.). Для реалізації результатів теоретичних досліджень виготовлена експериментальна установка (рис. 7), на якій визначено основні кінематичні та динамічні параметри переміщення структурних елементів групової упаковки в реальному часі (рис. 8).

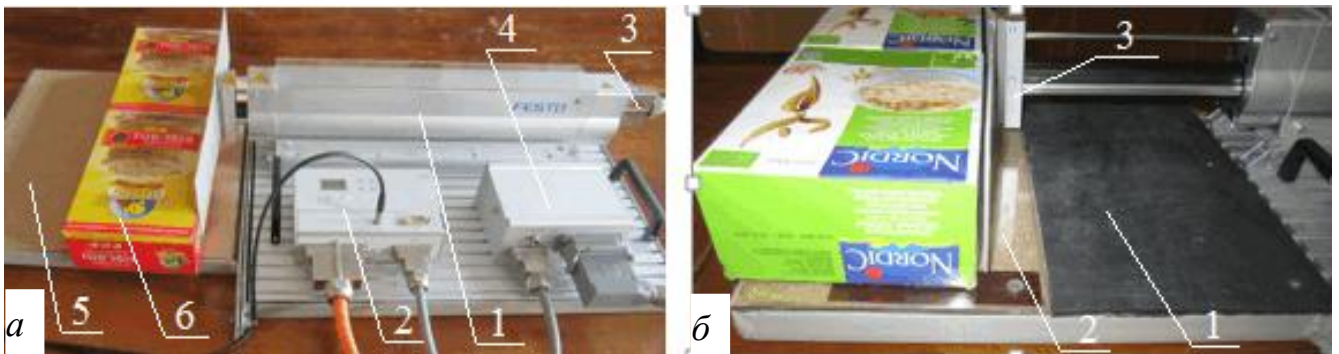


Рис. 7. Експериментальна установка для переміщення структурних елементів групової упаковки (а) загальний вигляд: 1 – лінійний електродвигун; 2 – контролер; 3 – система зворотного зв'язку; 4 – блок живлення; 5 – опорні поверхні переміщення упаковки; б – структурний елемент групової упаковки; б – розташування змінних несучих поверхонь: 1 – стрічка конвеєрна, 2 – опорна поверхня, 3 – зіштовхувальна пластина.

Для забезпечення постійного контакту між штовхачем та структурним елементом групової упаковки на всьому шляху його переміщення, пропонується за допомогою одержаного рівняння регресії

$$\Delta = 0,8489 + 0,0106 t - 0,327 V - 2,256 f + 0,54 Vf, \quad (15)$$

Рівняння для визначення кінематичних параметрів та сигналу керування $u(t)$ мехатронного модуля, що забезпечує заданий закон руху штовхача під час переміщення структурних елементів групової упаковки

Технологічні операції переміщення пакувальних одиниць	Ділянка розгону	Ділянка гальмування
по нерухомій горизонтальній площині при $f = const$	$u = \frac{m}{Q}(\dot{x}_2 + gf); \dot{x}_2 = \frac{Q}{m} - gt$	$\dot{x}_2 = -gf; u = \frac{m'\dot{x}_2}{Q}$
по нерухомій горизонтальній площині при змінному коефіцієнті тертя типу $f = f_0 + k_1 x_1$	$u = \frac{m}{Q}(\dot{x}_2 + gk_1 x_2 + gf_0); x_2 = \frac{1}{k_1} \left(f_0 - \frac{Q}{mg} \right) \left(e^{-gk_1 t} - 1 \right);$ $\dot{x}_2 = \left(\frac{Q}{m} - gf_0 \right) e^{-gk_1 t}$	$\begin{cases} \dot{x}_2 = -gf_0 e^{-gk_1(T-t)}; \\ u = \frac{m'}{Q} \dot{x}_2. \end{cases}$
по нерухомій горизонтальній площині при змінному коефіцієнті тертя типу $f = f_0 - k_1 x_1$	$u = \frac{m}{Q}(\dot{x}_2 - gk_1 x_2 + gf_0); x_2 = \frac{1}{k_2} \left(\frac{Q}{m} - f_0 \right) \left(e^{gk_2 t} - 1 \right);$ $\dot{x}_2 = \left(\frac{Q}{m} - gf_0 \right) e^{gk_2 t}$	$\begin{cases} \dot{x}_2 = -gf_0 e^{gk_2(T-t)}; \\ u = \frac{m'}{Q} \dot{x}_2. \end{cases}$
з нерухомої площини на нерухому при $f_1 > f_2$	$u = (m/Q)(\dot{x}_2 - Ax_1 + B); x_1 = \frac{Q - Bm}{Am} (ch \sqrt{A}t - 1)$ $\dot{x}_2 = \frac{Q - Bm}{m} ch \sqrt{A}t; A = \frac{g}{a}(f_1 - f_2); B = gf_1$	$\begin{cases} \dot{x}_2 = (Aa - B)ch \sqrt{A}(T-t); \\ u = \frac{m'}{Q} \dot{x}_2. \end{cases}$
з нерухомої площини на нерухому при $f_1 < f_2$	$u = \frac{m}{Q}(\dot{x}_2 + Ax_1 + B); x_1 = \frac{Q - Bm}{Am} (1 - \cos \sqrt{A}t)$ $\dot{x}_2 = \frac{Q - Bm}{m} \cos \sqrt{A}t; A = \frac{g}{a}(f_1 - f_2); B = gf_1$	$\begin{cases} \dot{x}_2 = -(Aa - B)ch \sqrt{A}(T-t); \\ u = \frac{m'}{Q} \dot{x}_2. \end{cases}$

при $\Delta = 0$ визначати V_{\max} за вихідних даних m та f

$$V_{\max} = \frac{0,8489 + 0,0106m - 2,256f}{0,327 - 0,54f}, \quad (16)$$

де m – зведена маса вантажу, кг; V_{\max} – задана максимальна швидкість зіштовхування, м/с; f – коефіцієнт тертя по поверхні формування структурних елементів групової упаковки.

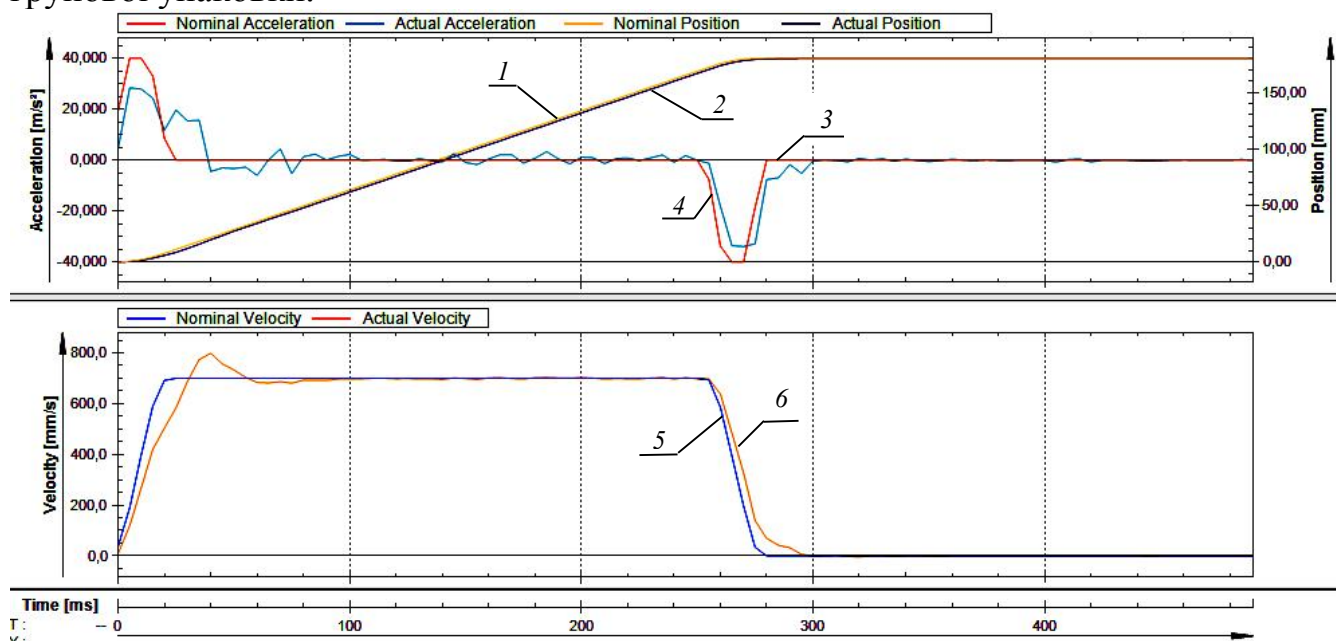


Рис. 8. Зміна кінематичних параметрів зіштовхування структурного елемента групової упаковки мехатронним модулем із лінійним електродвигуном за початкових умов: зведена маса $m = 2,8$ кг; хід до позиції зупинки по координаті $s = 200$ мм (за максимального ходу 300 мм): 1, 2 – зміна теоретичних та експериментальних координат; 3, 4 – зміна теоретичного та експериментального прискорення; 5, 6 – зміна теоретичної та експериментальної швидкості.

Теоретичні дослідження піднімання та опускання структурних елементів групової упаковки мехатронним модулем за заданим законом руху проводились за умови, що захоплювальний пристрій з структурним елементом групової упаковки є абсолютно тверде тіло, коефіцієнт тертя f є функцією швидкості і апроксимується лінійною залежністю (12).

Основним завданням дослідження є визначення закономірностей зміни рушійної сили $P(t)$ як функції часу для привода мехатронного модуля під час піднімання та опускання структурних елементів групової упаковки у вертикальній площині за заданим законом руху. Максимальна швидкість та зусилля переміщення обмежені технічними характеристиками механічної системи:

$$0 \leq \dot{y}_1 \leq V_{\max} \quad (17)$$

$$0 \leq P(t) \leq Q_{\max} \quad (18)$$

де V_{\max} – максимально допустима швидкість механічної системи; Q_{\max} – максимально допустиме зусилля, що створює привод мехатронного модуля.

Графічна інтерпретація результатів теоретичних досліджень реалізації законів зміни рушійної сили під час піднімання та опускання наведена на рис.9.

Оптимальні умови виконання операції піднімання та опускання передбачають два режими руху захоплювального пристрою з структурним елементом групової упаковки: розгону та гальмування [етап розгону позначений цифрою I, а гальмування – II].

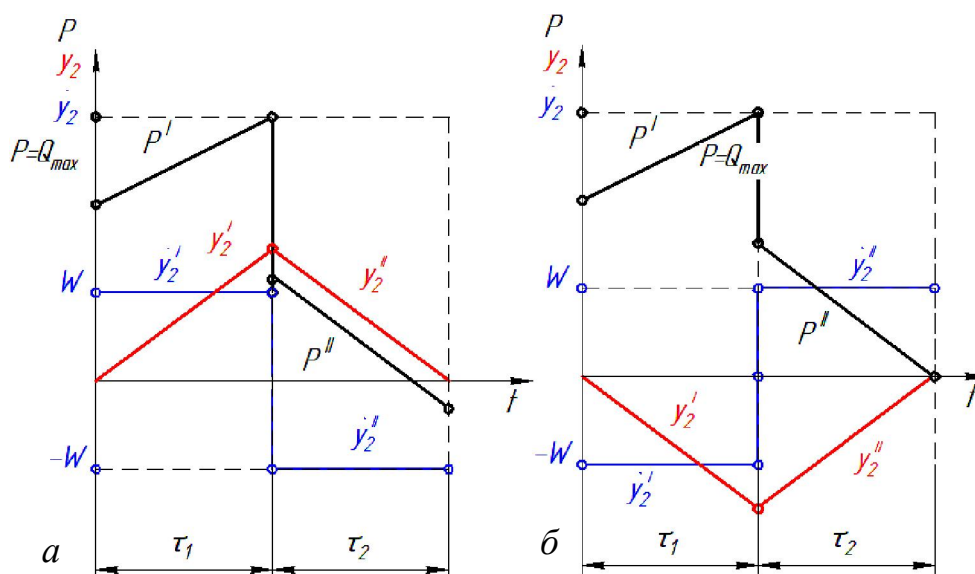


Рис. 9. Зміна рушійної сили P , швидкості y_2 та прискорення \dot{y}_2 зведеної маси від часу t переміщення за умови реалізації оптимального закону руху для технологічних операцій: a – піднімання; b – опускання.

турних елементів групової упаковки мехатронними модулями. Результати дослідження представлено у вигляді рівняння регресії:

$$t = 0,643 - 0,0427 a - 0,009975 V - 0,094 m + 0,00085 aV - 0,0022 am - 0,0105 Vm + 0,00521 aVm. \quad (19)$$

де a – прискорення руху зведеної маси, м/с²; V – швидкість руху зведеної маси, м/с; m – зведена маса вантажу та рухомих частин механізму, кг.

За результатами аналітичних досліджень технологічних операцій переміщення окремих упаковок або структурних елементів групової упаковки встановлено, що підвищення продуктивності мехатронного модуля неминуче призводить до збільшення інерційних навантажень на структурні елементи групової упаковки, що виникають внаслідок дії надмірних прискорень та призводить до руйнування їх структури та порушення товарного виду. Для запобігання таких явищ запропоновано методику визначення граничного значення прискорення з урахуванням фізико-механічних властивостей споживчої упаковки із харчовою продукцією.

У п'ятому розділі наведено методи формування мехатронних модулів захоплювання в обладнанні для групового пакування. У запропонованих конструкціях передбачається контроль та перерозподілення зусилля утримання між

Для реалізації теоретичних досліджень виготовлена експериментальна установка, на якій визначено інерційні та динамічні параметри переміщення догори та донизу структурних елементів групової упаковки в реальному часі (рис. 10).

За результатами досліджень визначено характеристику впливу зовнішніх факторів на тривалість (t) виконання технологічних операцій піднімання та опускання структурних елементів групової упаковки мехатронними модулями.

захоплювальними елементами під час переміщення структурних елементів групової упаковки залежно від фізико-механічних властивостей пакувальних одиниць, які суттєво обмежують максимальні значення прикладених зусиль до упаковки окремими захоплювальними елементами.

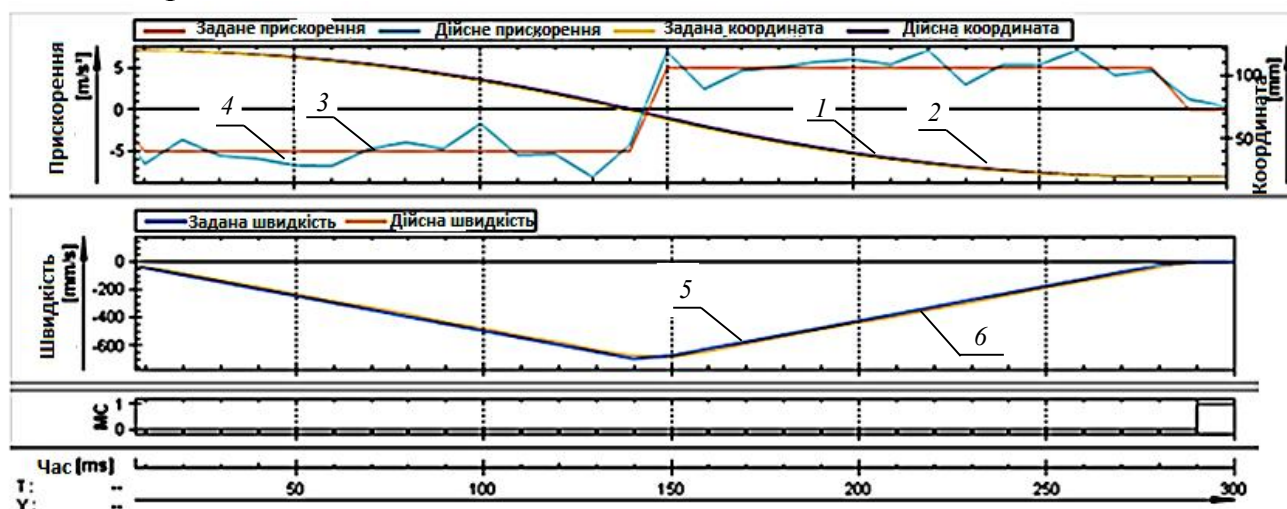


Рис. 10. Зміна кінематичних параметрів опускання пакуваних одиниць мехатронним модулем з лінійним електродвигуном за початкових умов: зведена маса $m = 4$ кг; хід до позиції зупинки по координаті $s = 200$ мм (за максимального ходу 300 мм); максимальне задане прискорення $a = 5$ м/с²: 1, 2 – зміна теоретичних та експериментальних координат; 3, 4 – зміна теоретичного та експериментального прискорення; 5, 6 – зміна теоретичної та експериментальної швидкості.

За результатами аналізу конструкцій захоплювальних пристроїв для упаковки з харчовим продуктом, встановлено, що широко застосовуваними є механічний та пневматичний способи утримання та їх комбінування з використанням пневматичних, електромеханічних робочих органів. Досліджено вплив фізико-механічних властивостей матеріалів упаковки, способів захоплення, конструкцій захоплювальних елементів на динаміку роботи таких захоплювальних пристроїв (рис.11).

Однією з важливих характеристик сучасної картонної упаковки з харчовим продуктом як об'єкту переміщення вакуумними захоплювальними пристроями є її пористість, яка оцінюється через коефіцієнт повітропроникності. Встановлено, що величина повітропроникності картону суттєво впливає на технічні параметри робочих органів вакуумних захоплювальних пристроїв. Запропоновано методику визначення коефіцієнта повітропроникності ξ

$$\xi = \frac{Q_s b \mu_0}{S} \cdot \frac{P_2}{P_1^2 - P_2^2} \quad (20)$$

де P_1 – абсолютний тиск на вході капіляра, Па; P_2 – абсолютний тиск на виході капіляра, Па; μ_0 – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря, Па с; S – активна площа присмоктувача, м²; Q_s – масова витрата повітря, мл/хв; b – товщина картону, м.

Для визначення раціональних значень діаметра присмоктувача розроблено математичну модель за допомогою якої можна визначити зусилля захоплення

упаковки з харчовим продуктом вакуумними захоплювальними пристроями залежно від величини вакууму, конструкції (рис. 12) і геометричних розмірів присмоктувачів та пористої структури пакувального матеріалу.

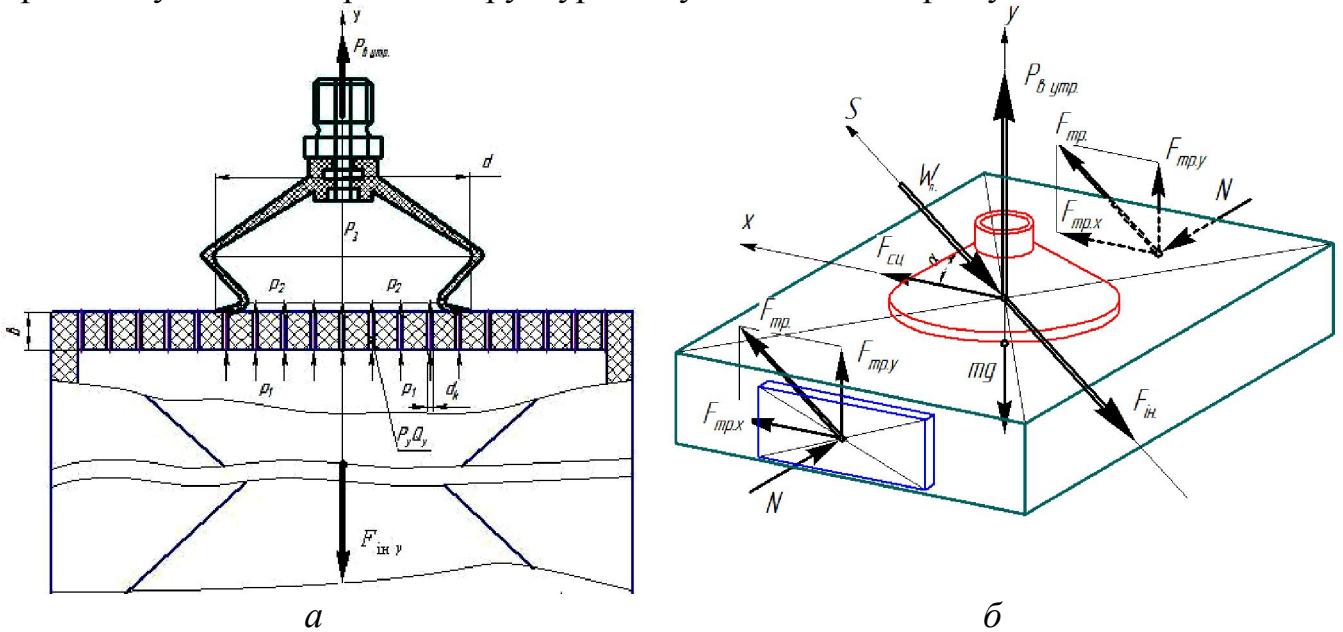


Рис.11. Схема дії зовнішніх сил під час утримання елементами захоплювального пристрою упаковки з пористого матеріалу: *а* – вакуумним; *б* – комбінованим.

За результатами теоретичних досліджень запропоновано:

– методику визначення величини розрідження в присмоктувачі, яке забезпечує утримання пакувальної одиниці з харчовим продуктом із пористого пакувального матеріалу

$$\Delta p = P_1 - P_2 + P_3 > \left(\frac{F_{\text{ин}} \cos \alpha + W_n \cos \alpha}{\mu} + G + F_{\text{ин}} \sin \alpha + W_n \sin \alpha + Q_y \right) \frac{1}{S}, \quad (21)$$

де P_3 – абсолютний тиск повітря на виході з порожнини, обмеженою елементарною площадкою контакту присмоктувача; W_n – сила опору повітря; Q_y – сила пружності присмоктувача; G – сила тяжіння упаковки; $F_{\text{ин}}$ – сила інерції; μ – коефіцієнт тертя між кромкою присмоктувача та упаковкою;

– методику визначення зусилля притискання губок механічного захоплювального елемента до стінок упаковки в разі застосування комбінованого захоплювального пристрою та за умови заданої величини розрідження в присмоктувачі

$$N = \frac{\mu m g + (\mu \sin \alpha + \cos \alpha)(F_{\text{ин}} + W_n) - \mu k f_{\text{эф}} (P_1 - P_2 + P_3)}{2 f \cos \alpha}; \quad (22)$$

– методику визначення величини розрідження в присмоктувачі у разі використання комбінованого захоплювального пристрою та за умови відомої або допустимої величини зусилля $[N]$ на стінки упаковки губками механічного захоплювального елемента

$$\Delta p = (P_1 - P_2 + P_3) = \frac{m g + F_{\text{ин}} \sin \alpha + W_n \sin \alpha - 2 f [N]}{k f_{\text{эф}}}. \quad (23)$$

Результати теоретичних досліджень наведено у вигляді порівняльної характеристики зусиль утримання між захоплювальними пристроями з різними елементами захоплення (рис. 13 і рис. 14).

Доведено також, що використання гофроприсмоктувачів дає додаткові технічні можливості для захоплення упаковки з харчовим продуктом із складною конфігурацією твірних поверхонь, але і є додатковим джерелом коливальних процесів, які суттєво зменшують зусилля утримання упаковок на 50% у порівнянні з стандартними присмоктувачами при однакових показниках величини розрідження, кінематичних та динамічних навантажень.

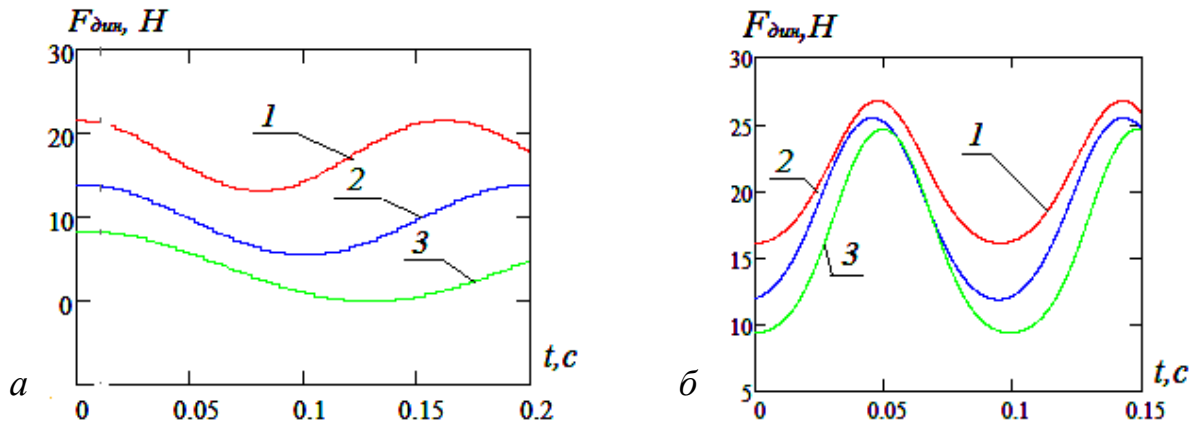


Рис.12. Зміна динамічного навантаження під час переміщення вантажу вакуумними присмоктувачами з діаметрами 1 – 40 мм; 2 – 30 мм; 3 – 20 мм: а – з одним гофрокільцем; б – з трьома гофрокільцями за умови: $m_2=7$ кг; $V=0,4$ м/с.

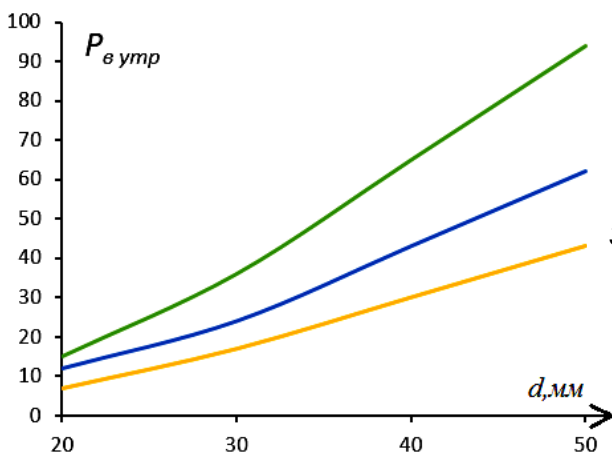


Рис.13. Зміна зусилля утримання упаковки залежно від діаметрів гофроприсмоктувача: 1 – стандартним присмоктувачем; 2 – гофроприсмоктувачем з 1,5-гофро; 3 – гофроприсмоктувачем з 3,5-гофро.

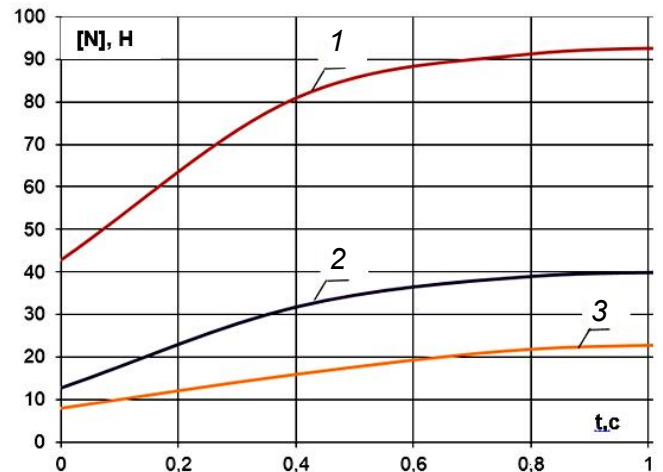


Рис.14. Зміна зусилля утримання упаковки захоплювальним пристроєм: 1 – комбінованим (механічним та вакуумним захоплювальними елементами); 2 – вакуумним; 3 – механічним.

За результатами теоретичних досліджень встановлено, що використання комбінованих захоплювальних пристроїв забезпечує більш надійне утримання упаковки з харчовим продуктом та збереження їх товарного вигляду за рахунок можливості розподілення зусилля утримання між захоплювальними елементами.

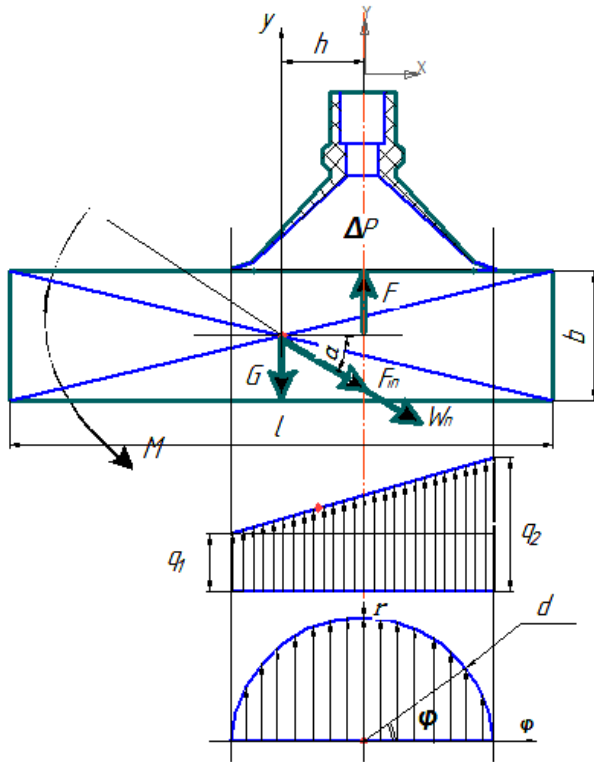


Рис. 15. Схема дії зовнішніх сил під час утримання вакуумним елементом упаковки за умови зміщення його відносно центру тяжіння упаковки.

Встановлено, що зміщення осі захоплення вакуумного присмоктувача відносно центру тяжіння пакувальної одиниці додатково зменшує зусилля утримання. Так технологічна операція переміщення пакованих одиниць вакуумним захоплювальним пристроєм за умови, що центр тяжіння упаковки масою m зміщений відносно осі присмоктувача на величину h (рис. 15) передбачає перерозподілення тиску присмоктувача на поверхню упаковки. Найменший тиск q_1 визначає зону ймовірного відриву контакту присмоктувача від упаковки.

Зміна тиску з \max до \min визначається з рівняння:

$$q = q_0 + \frac{M_r}{I_r} r_\phi \quad (24)$$

де q_0 – значення тиску за умови його рівномірного розподілення; r_ϕ – кутова координата, яка описує зону зміни тиску; I_p – момент інерції опорної площини; M_r – момент від зовнішніх навантажень відносно поверхні контакту. Мінімальний та максимальний тиск становить:

$$\begin{cases} q_1 = \frac{4(F - (G + F_{in} \sin \alpha + W_{II} \sin \alpha))}{\pi d^2} - \left(\frac{(G + F_{in} \sin \alpha) h}{I_p} - \frac{F_{in} \cos \alpha b}{2I_p} \right) \frac{d}{2} \\ q_2 = \frac{4(F - (G + F_{in} \sin \alpha + W_{II} \sin \alpha))}{\pi d^2} + \left(\frac{F_{in} \cos \alpha b}{2I_p} + \frac{(G + F_{in} \sin \alpha) h}{I_p} \right) \frac{d}{2} \end{cases} \quad (25)$$

За результатами теоретичних досліджень запропоновано:

– методику визначення величини розрідження в присмоктувачі, яке забезпечує утримання пакувальної одиниці за відомого h :

$$\Delta p = \left(\frac{(G + F_{in} \sin \alpha) h}{I_p} - \frac{F_{in} \cos \alpha b}{2I_p} \right) \frac{d}{2} + \frac{4(G + F_{in} \sin \alpha + W_{II} \sin \alpha)}{\pi d^2}; \quad (26)$$

– методику визначення максимального зміщення осі присмоктувача відносно центру тяжіння упаковки та за умови заданої величини розрідження в присмоктувачі:

$$h \leq \frac{2 I_p}{(G + F_{in} \sin \alpha) d} \left(\Delta p - \frac{4(G + F_{in} \sin \alpha + W_{II} \sin \alpha)}{\pi d^2} \right) + \frac{F_{in} \cos \alpha b d}{4 I_p}. \quad (27)$$

Результати теоретичних досліджень наведено у вигляді графіка рис. 16.

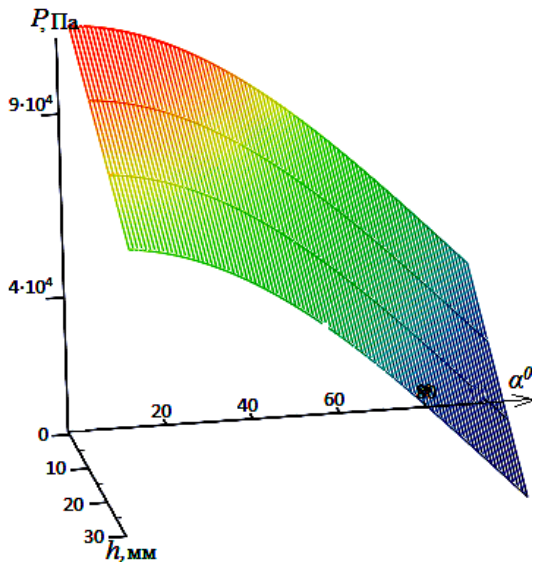


Рис. 16. Зміна розрідження в присмоктувачі (P , Па) як функції зміщення її осі розташування відносно центру тяжіння упаковки (h , мм) та кута (α) дії сили інерції.

Для перевірки адекватності результатів теоретичних досліджень виготовлені експериментальні установки (рис. 17), на яких визначено вплив зовнішніх факторів на величину утримання упаковки з харчовим продуктом захоплювальними пристроями з метою запобігання явища їх відриву під час виконання операцій переміщення.

Результати експериментальних досліджень наведено у вигляді рівнянь регресії, які показують вплив зовнішніх факторів:

– на величину вакууму у вакуумних присмоктувачах:

$$P_{\text{вак}} = -1,79 + 0,006 d_{\text{прис}} + 0,003 S - 0,000279 Q_s b + 0,011 Q_s + 0,027 b, \quad (28)$$

де $d_{\text{прис}}$ – діаметр присмоктувача, мм; $P_{\text{вак}}$ – величина розрідження в порожнині вакуумного присмоктувача, Па; b – товщина картону, мм; Q_s – повітропроникність, мл/хв;

S – площа контакту присоски з поверхнею пакувального матеріалу, м^2 ;

– на зусилля відриву упаковки з харчовою продукцією від губок механічних захоплювальних елементів з пневматичним приводом:

$$F_1 = 1,091 + 0,086 P_{\text{пр}} - 2,78 f_m + 2 P_{\text{пр}} f_m, \quad (29)$$

де F_1 – зусилля відриву, Н; f_m – коефіцієнт тертя ковзання між матеріалом губок захоплювальних елементів та матеріалом упаковки; $P_{\text{пр}}$ – тиск в пневматичному приводі механічного захоплювального елемента, Па;

– на зусилля відриву упаковки з харчовою продукцією від комбінованого захоплювального пристрою при одночасній роботі механічного та вакуумного захоплювальних елементів:

$$F_2 = -18,737 + 0,172 \rho + 0,432 P'_{\text{пр}} + 152,525 f - 4,226 P'_{\text{вак}} - 0,043 \rho P'_{\text{вак}} - 0,08 P'_{\text{вак}} P'_{\text{пр}} - 0,81 f P'_{\text{вак}} \rho - 0,6 f \rho + 202,9 f P'_{\text{вак}} \quad (30)$$

де F_2 – зусилля відриву, Н; ρ – об'ємна маса пакувального матеріалу, $\text{кг}/\text{м}^3$; $P'_{\text{пр}}$, $P'_{\text{вак}}$ – тиск в приводі захоплювального елемента та розрідження в порожнині вакуумного присмоктувача комбінованого захоплювального пристрою.

Результати проведених теоретичних та експериментальних досліджень дали можливість встановити характер впливу: діаметра вакуумного присмоктувача; товщини стінки картонної упаковки; повітропроникності матеріалів упаковки; площі контакту присосок з поверхнею пакувального матеріалу на величину розрідження в присосках.

Похибка між теоретичними і експериментальними результатами знаходиться в межах до 8 %, що є допустимо для таких досліджень.

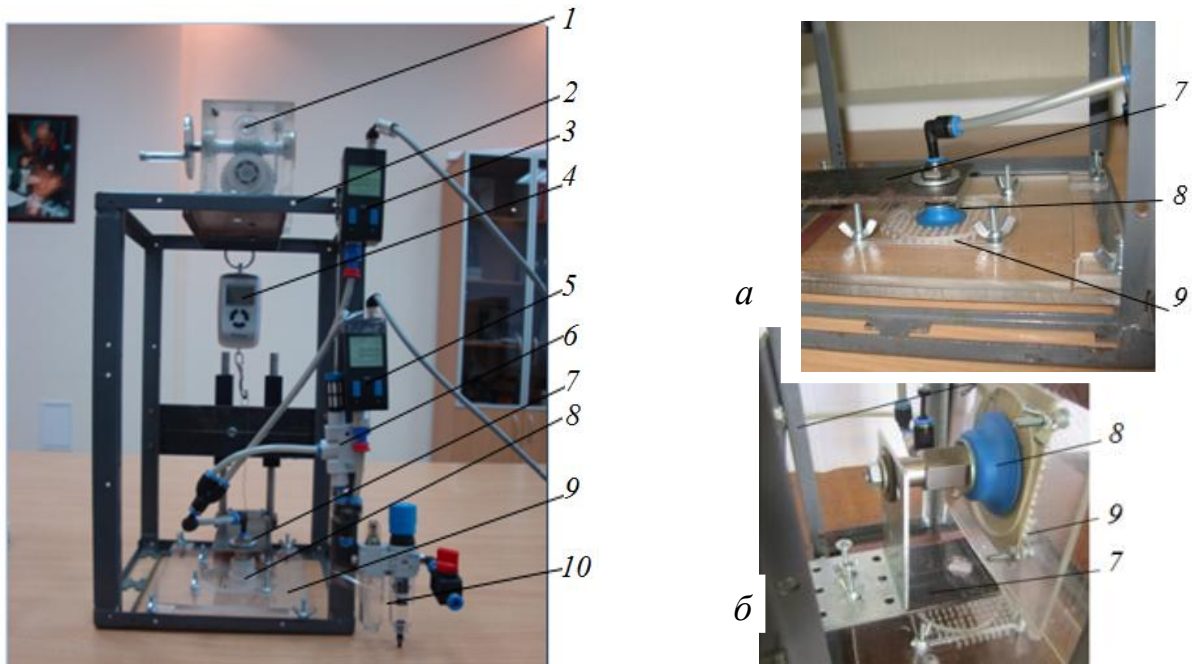


Рис. 17. Експериментальна установка для дослідження зусилля відриву (а) та зсуву (б) в мехатронному модулі з вакуумним захоплювальним пристроєм: 1 – черв'ячний редуктор; 2 – корпус установки; 3 – електронний манометр; 4 – електронний динамометр; 5 – електронний вакуумметр; 6 – ежектор; 7 – жорстка пластина, на якій закріплений вакуумний присмоктувач; 8 – вакуумний присмоктувач; 9 – полімерна пластина з перфорованими отворами та механізмом кріплення досліджуваного зразка упаковки в горизонтальній площині; 10 – регулятор тиску.

У шостому розділі запропоновано нову ефективну структуру мехатронних модулів для реалізації операцій піднімання, опускання, переміщення та зіштовхування структурних елементів групової упаковки. Контроль параметрів переміщення структурних елементів групової упаковки та реалізація ними заданого закону руху в нових мехатронних модулях забезпечується такими показниками: координатою, швидкістю, прискоренням, зміною тисків у порожнинах пневмоциліндра.

Для перевірки параметрів робоздатності запропонованих моделей функціональних мехатронних модулів лінійного переміщення з пневмоприводом розроблені та виготовлені експериментальна установка (рис. 18).

Визначено кінематичні та динамічні параметри нової мехатронної системи при різних режимах роботи під час формування структурних елементів групової упаковки. Результати експериментальних досліджень наведено у вигляді графіків (рис. 19) з порівняльною характеристикою теоретичного і дійсного процесу для кожного із наведених параметрів.

На першому етапі досліджувалась робота мехатронних модулів із пневмоприводом у запропонованих режимах переміщення: «Оптимальний за швидкодією», «Раціональний за заданим зусиллям», «Позиціонування із компенсацією непродуктивних втрат повітря» для операцій піднімання, опускання, зіштовхування та переміщення сформованих структурних елементів

групової упаковки за схемами 2D ($z = 0$) та 3D ($z = 1$).

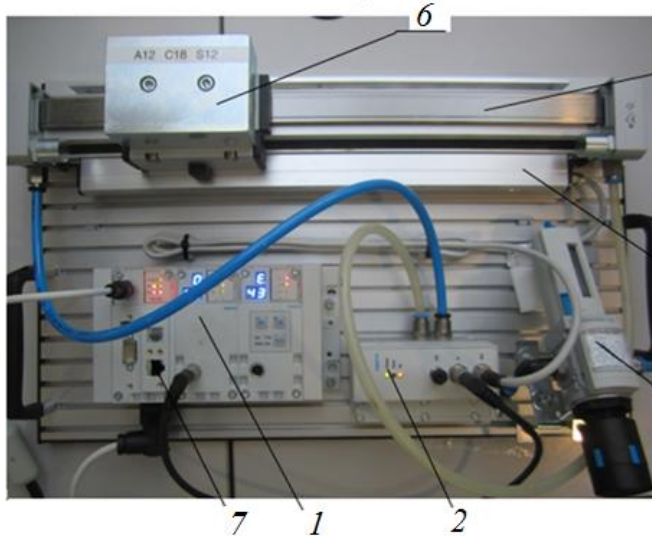


Рис. 18. Експериментальна установка мехатронного модуля лінійного переміщення з пневмоприводом на базі використання розподільників із пропорційним керуванням: 1 – контролер нижчого рівня; 2 – розподільник з пропорційним керуванням; 3 – система підготовки та очищення повітря; 4 – система контролю координати об'єкту переміщення; 5 – безштоковий пневмоциліндр; 6 – об'єкт переміщення; 7 – роз'єм для

приєднання шини зв'язку з контролером вищого рівня.

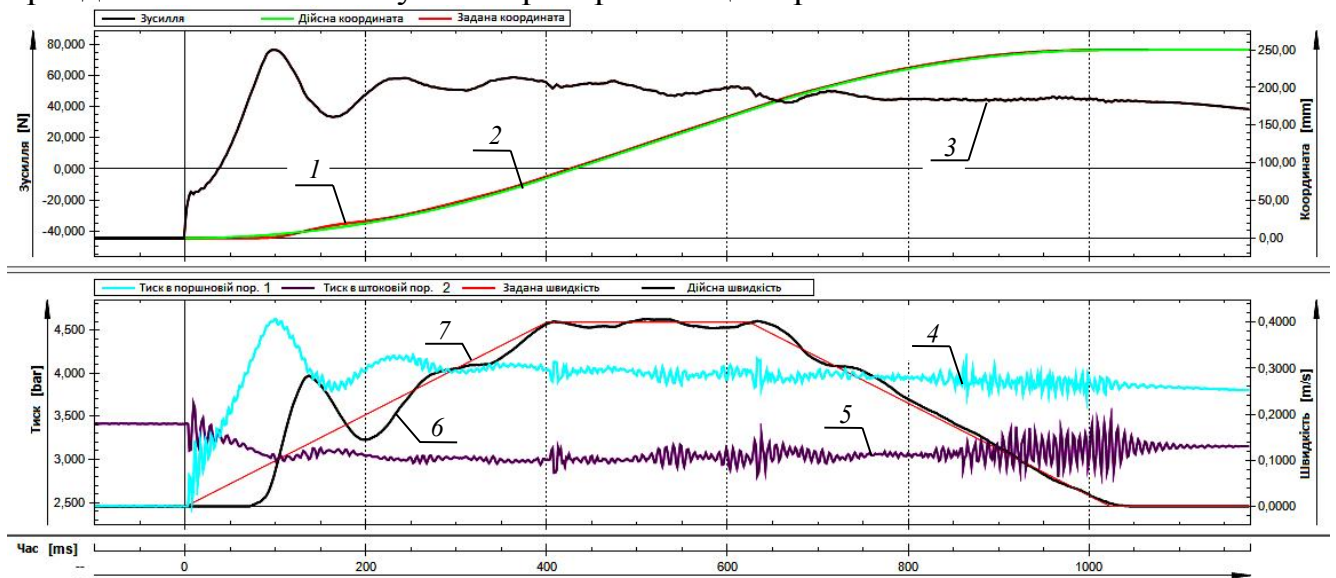


Рис. 19. Зміна кінематичних та силових параметрів горизонтального переміщення упаковок з харчовим продуктом мехатронним модулем з пневмоприводом за режимом «Позиціонування з компенсацією непродуктивних втрат повітря» за початкових умов: зведена маса $m = 5$ кг; хід до позиції зупинки по координаті $s = 250$ мм (за максимального ходу 300 мм); магістральний тиск повітря $P_M = 0,6$ МПа: 1, 2 – зміна теоретичних та експериментальних координат; 3 – зміна експериментального зусилля; 4, 5 – зміна експериментального тиску в поршньовій та штоковій порожнинах; 6, 7 – зміна теоретичної та експериментальної швидкості.

Встановлено, що основним недоліком експлуатації таких пристроїв за умов непродуктивних втрат стисненого повітря є зменшення точності реалізації закону руху внаслідок появи коливань, що не затухають, амплітуда яких відображала неузгодженість дійсної миттєвої швидкості із заданою теоретичною до 2 %.

Одним із запропонованих варіантів вирішення даної задачі є нова конструкція мехатронного модуля з використанням двох пропорційних регуляторів тиску.

Система керування таким мехатронним модулем побудована на математичній моделі (31), за допомогою якої визначають миттєві кінематичні, динамічні та керуючі показники руху робочого органу та об'єкту переміщення

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_1 - F_2 \pm F_c; \\ \dot{F}_1 = c_{x1}(k_{cr}k_{\beta1}U_{y1} - k_{p1}F_1 - \dot{x}); \\ \dot{F}_2 = c_{x2}(-k_{\beta2}U_{y2} - k_{p2}2F_1 + \dot{x}); \\ U_{y1} = k_{y1}U_{p1}; \\ U_{y2} = k_{y2}U_{p2}; \\ U_{p1} = k_1(\bar{x} - x) - k_2\dot{x} - k_3\ddot{x}; \\ U_{p2} = (1 - k_1(k_{cr}\bar{x} - x)) - k_2\dot{x} - k_3\ddot{x}, \end{cases} \quad (31)$$

де \bar{x} – розрахункове значення переміщення; x ; \dot{x} ; \ddot{x} – дійсні показники переміщення, швидкості та прискорення; U_i – сигнали керування; k_i – коефіцієнти передачі у відповідних контурах зворотних зв'язків; F_i – рушійні сили та сили корисного опору.

Для реалізації запропонованої моделі в реальному процесі розроблена та виготовлена експериментальна установка мехатронного модуля лінійного переміщення з пневмоприводом на базі використання пропорційних регуляторів тиску (рис. 20).

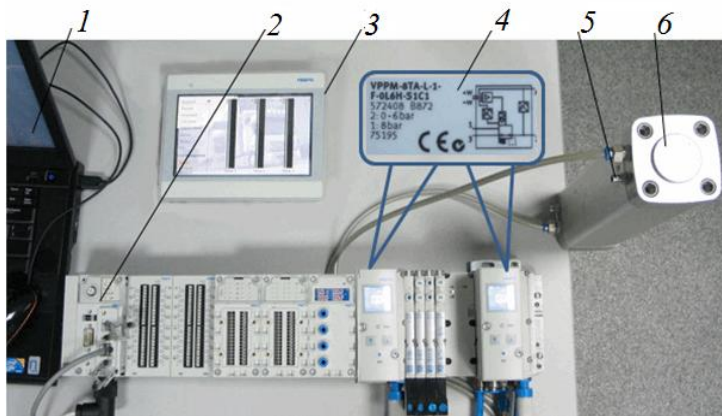


Рис. 20. Експериментальна установка мехатронного модуля лінійного переміщення з пневмоприводом на базі регуляторів тиску з пропорційним керуванням: 1 – блок програмного забезпечення для роботи системи керування; 2 – контролер нижчого рівня; 3 – панель оператора; 4 – два регулятори тиску з пропорційним керуванням; 5 – датчики зворотного зв'язку; 6 – пневмоциліндр двосторонньої дії.

Результати експериментальних досліджень роботи мехатронного модуля представлено у вигляді графіків із порівняльною характеристикою розрахункового та дійсного процесу для кожного із наведених параметрів (рис.21).

За результатами експериментальних досліджень встановлено, що така система на кінцевому етапі руху структурних елементів групової упаковки може сприймати на 30% більше динамічних навантажень, компенсувати непродуктивні втрати тиску в порожнинах пневмоциліндра, що підтверджено отриманими даними зміни кінематичних та силових параметрів, які не відрізнялись від аналогічних за умови роботи без втрат повітря.

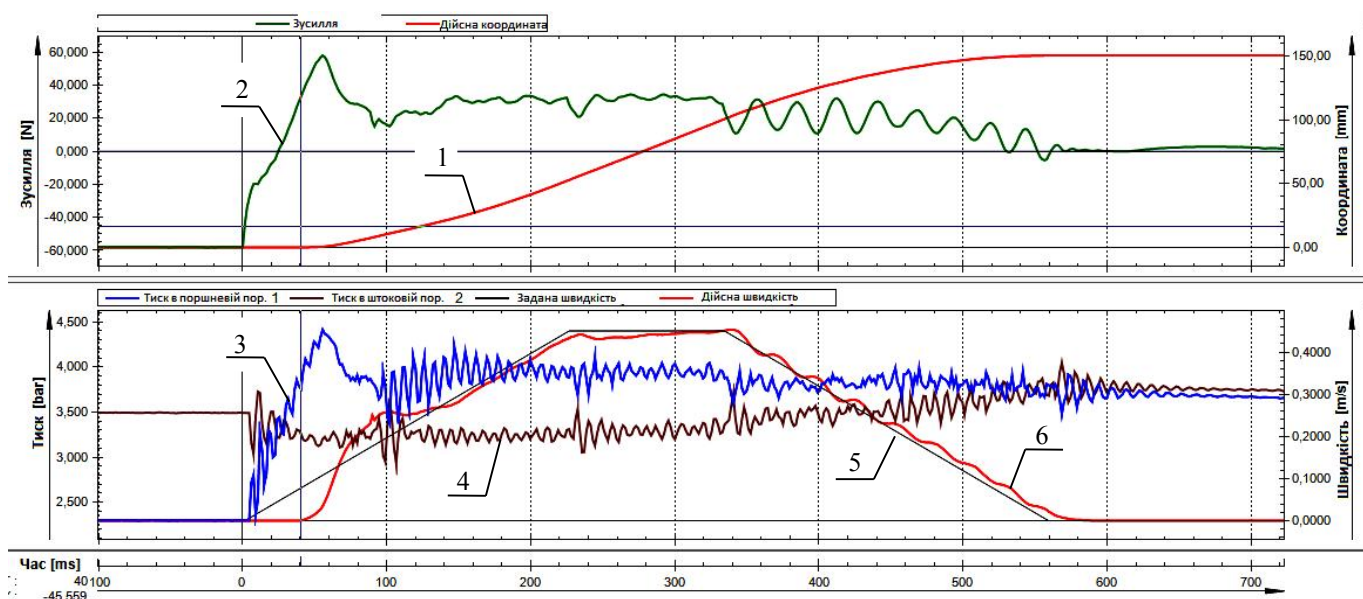


Рис. 21. Зміна кінематичних та силових параметрів опускання платформи з структурними елементами групової упаковки мехатронним модулем із пневмоприводом при початкових параметрах: приведена маса $m = 5$ кг; хід до позиції зупинки по координаті $s = 150$ мм (за максимального ходу 300 мм); магістральний тиск повітря $P_M = 0,6$ МПа: 1 – зміна експериментальної координати; 2 – зміна експериментального зусилля; 3, 4 – зміна експериментального тиску в поршневій та штоковій порожнинах; 5, 6 – зміна теоретичної та експериментальної швидкості.

У цьому розділі експериментально перевірено адекватність результатів запропонованих математичних моделей реальним процесам та визначено: коефіцієнти повітропроникності зразків найбільш вживаних в пакувальній індустрії марок картону: МО, ММ, Н, НМ з товщиною від 0,30мм до 0,50 мм; вплив пружних коливань у захоплювальних пристроях із пакованою харчовою продукцією, які утворюють додаткові збурення під час роботи системи керування мехатронних модулів в моменти виконання технологічних операцій піднімання та опускання структурних елементів групової упаковки (рис. 22); характер зміни величини вакууму та зусиль відриву та зсуву картонних упаковок з харчовим продуктом від вакуумних елементів; зміну вакууму в присмоктувачах, зусиль відриву та зсуву залежно від повіт-

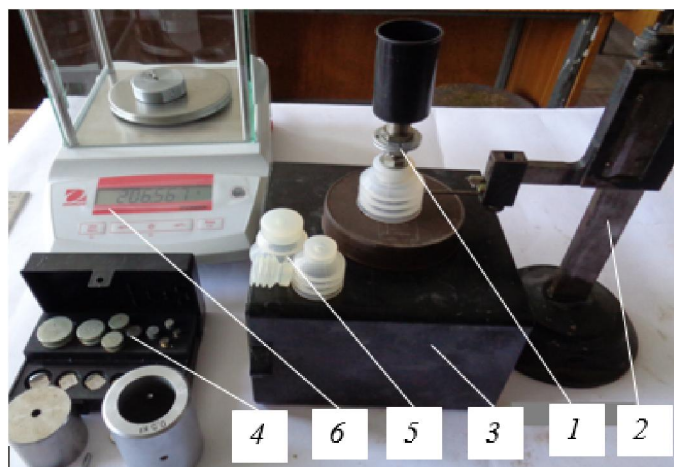


Рис. 22. Експериментальна установка для дослідження жорсткості вакуумних гофроприсосок: 1 – пристрій навантаження; 2 – пристрій для вимірювання координати переміщення; 3 – станина; 4 – комплект ваг; 5 – комплект гофроприсосок; 6 – електронні лабораторні ваги.

рії марок картону: МО, ММ, Н, НМ з товщиною від 0,30мм до 0,50 мм; вплив пружних коливань у захоплювальних пристроях із пакованою харчовою продукцією, які утворюють додаткові збурення під час роботи системи керування мехатронних модулів в моменти виконання технологічних операцій піднімання та опускання структурних елементів групової упаковки (рис. 22); характер зміни величини вакууму та зусиль відриву та зсуву картонних упаковок з харчовим продуктом від вакуумних елементів; зміну вакууму в присмоктувачах, зусиль відриву та зсуву залежно від повіт-

ропроникності картонного матеріалу, магістрального тиску повітря, діаметрів та конструкцій присмоктувачів; характер впливу зовнішніх факторів на тривалість виконання операцій піднімання та опускання структурних елементів групової упаковки мехатронними модулями з лінійним електродвигуном; вплив зовнішніх факторів на тривалість виконання операцій зіштовхування структурних елементів групової упаковки з нерухомої несучої площини на нерухомих площинах формування; зміну зусилля відриву картонної упаковки від мехатронних модулів комбінованих захоплювальних пристроїв з механічним та вакуумним захоплювальними елементами залежно від зовнішніх факторів; зміну зусиль відриву упаковки з харчовою продукцією від вакуумних захоплювальних елементів залежно від кількості гофрокілець; зміну зусиль відриву упаковки з харчовою продукцією від мехатронного модуля комбінованих захоплювальних пристроїв при одночасній роботі механічних та вакуумних захоплювальних елементів.

Експерименти проводились в лабораторії кафедри «Технічна механіка і пакувальна техніка» НУХТ. Відхилення значень параметрів, одержаних експериментальним шляхом порівняно з теоретичними не перевищували допустимі прийняті під час розв'язання подібних інженерних задач (до 10...12 %).

У восьмому розділі наведено прикладні аспекти впровадження у виробництво методології створення обладнання з мехатронних модулів для групового пакування харчових продуктів, під час проектування нового пакувального обладнання та модернізації існуючого на підприємствах: ДП «Фесто», ТОВ «Інта», ТОВ «Термопак», ТОВ «Елопак».

ВИСНОВКИ

На основі аналізу досліджень процесу групового пакування харчових продуктів з використанням автоматизованого обладнання, результатів власних експериментальних досліджень, виконаних у лабораторних і виробничих умовах, розроблені, обґрунтовані та одержані нові важливі наукові результати, які дають можливість вирішувати актуальну науково-практичну проблему створення нового покоління машин для групового пакування харчових продуктів з мехатронних модулів. Сукупність отриманих результатів дає можливість сформулювати такі узагальнення та висновки:

1. Запропоновано і реалізовано наукову концепцію проектування обладнання з мехатронних модулів для групового пакування фасованих харчових продуктів. Теоретично та експериментально доведено, що нові зразки пакувальних машин, розроблених за запропонованою методологією проектування, мають розширені функціональні можливості порівняно з існуючими моделями, а саме – швидке переналадження геометричних, кінематичних, динамічних та інформаційних параметрів мехатронних модулів при зміні фізико-механічних властивостей, типу та виду пакувальних одиниць, схем формування групової упаковки та способу її скріплення.

2. Встановлено функціональні зв'язки між показниками ефективності роботи пакувального обладнання з мехатронних модулів фактичною продуктивністю, коефіцієнтом готовності, похибкою позиціонування пакувальних одиниць, питомих енерговитрат та його структурою. Експериментально визначено значення кое-

фіцієнта готовності функціональних модулів, який характеризує фактичну продуктивність машини та теоретично оцінено відносні витрати енергії в функціональних модулях. Встановлено, що у машинах, які реалізують 2D схему формування групової упаковки витрати енергії на 10 % менше порівняно з 3D схемою.

3. Відповідно до визначених функціональних залежностей між законом руху пакувальних одиниць, рушійним зусиллям робочого органу та вхідним керуючим сигналом мехатронних модулів для зіштовхування, піднімання та опускання структурних елементів групової упаковки запропоновано структури типових мехатронних модулів для практичного використання. Зокрема встановлено, що характеристика зміни швидкості руху робочого органу має зони нестабільності, які характеризуються миттєвими скачками амплітуди, а їх кількість залежить від величини рухомої зведеної маси та сил інерції. та запропоновано метод їх локалізації шляхом використання детермінованої структури мехатронних модулів.

4. Встановлено, що запропоновані та досліджені режими роботи мехатронних модулів суттєво розширяють функціональні можливості робочих органів в обладнанні для групового пакування, а саме: режим «Оптимальний за швидкодією» забезпечує максимальну продуктивність мехатронного модуля під час виконання операцій піднімання, опускання, зіштовхування та переміщення сформованих структурних елементів групової упаковки; режим «Позиціонування з компенсацією непродуктивних втрат повітря» є характерним для мехатронних модулів з пневмоприводом; режим «Раціональний за заданим зусиллям» передбачає реалізацію заданого зусилля мехатронним модулем з пневмоприводом для операцій піднімання та опускання структурних елементів групової упаковки. Експериментально визначено, що середня похибка позиціонування за такими режимами роботи становить до 0,2 мм, період квантування до 2 мс, що відповідає кроку переміщення вихідної ланки до 4 мм та дало можливість запропонувати нові технічні рішення механізмів формування структурних елементів групової упаковки.

5. Експериментально доведено, що під час виконання операцій лінійного переміщення структурних елементів групової упаковки у вертикальній та горизонтальній площинах за заданим законом руху запропованою конструкцією мехатронного модуля із використанням пропорційних регуляторів тиску середня похибка позиціонування становить 0,2 мм, а на кінець руху структурних елементів групової упаковки може сприймати на 30 % більше динамічних навантажень, що дало можливість суттєво розширити функціональні можливості пакувального обладнання за схемою 3D ($z = 1$) переміщень та створити більш ефективні структурні схеми формування групової упаковки.

6. Запропоновано та обґрунтовано новий спосіб компенсації впливу непродуктивних втрат стисненого повітря на функціональну якість роботи мехатронних модулів із пневмоприводом (як існуючих конструкцій так і розроблених). Експериментально доведено, що удосконалена система керування таких мехатронних модулів забезпечує дотримання заданих кінематичних і динамічних показників руху та точності позиціонування, які не виходять за межі заданої похибки і мають повторюваність до 0,5 %.

7. Встановлено, що використання вакуумних гофроприсмоктувачів дає додаткові технічні можливості для захоплення упаковок із складною конфігурацією твірних поверхонь, але і є додатковим джерелом коливальних процесів, які суттєво зменшують зусилля утримання упаковок до 50 % порівняно з стандартними присмоктувачами при однакових показниках експлуатації, що дало змогу запропонувати нові конструктивні схеми захоплювальних пристроїв для надійного утримання упаковок з харчовим продуктом.

8. Теоретично доведено та експериментально підтверджено, що запропоновані конструкції комбінованих мехатронних модулів захоплення із системою розподілення зусилля між захоплювальними елементами для переміщення структурних елементів групової упаковки з урахуванням фізико-механічних властивостей пакувальних одиниць (пористість та ін.), кінематичних і динамічних навантажень на них мають більше зусилля утримання упаковок до 55 % порівняно з вакуумними, та до 67 % з механічними.

9. Запропоновано методологію синтезу структури обладнання для групового пакування створеного з мехатронних модулів з одночасною її оптимізацією по вибраних критеріях: фактична продуктивність, один із параметрів надійності – коефіцієнт готовності, функціональна точність, енерговитрати. Встановлено необхідний перелік основних процедур, що дає можливість зменшити трудомісткість і скоротити терміни проектування такого обладнання у 1,5–1,7 рази, підвищити якість конструкторських рішень за рахунок перегляду значної кількості можливих компонентів обладнання з різним конструктивним виконанням мехатронних модулів.

10. Розроблено рекомендації щодо найбільш раціонального використання в певних групах машин групового пакування (швидке переналагодження, реалізації заданих законів руху по координатним позиціюванням робочих органів і т. ін.) нових за принципом конструкцій мехатронних модулів (запатентовано та виготовлено), побудованих за розробленими в роботі методами (апробовано експериментально).

11. У результаті експериментальних досліджень, а також порівняння одержаних результатів із результатами інших дослідників отримано підтвердження адекватності розроблених математичних моделей. Відхилення результатів розрахунків та експериментів для різних операцій не перевищує 10 %. Результати досліджень захищені охоронними документами на винаходи і корисні моделі, п'ять з яких впроваджені у виробництво.

12. Достовірність запропонованих на основі виконаних у роботі теоретичних та експериментальних досліджень рекомендацій щодо проектування новітнього пакувального обладнання, модернізації існуючих конструкцій підтверджено випробуваннями на таких підприємствах: ДП «Фесто», ТОВ «Інта», ТОВ «Термопак», ТОВ «Елопак». Передбачуваний економічний ефект – 938 405 грн на рік.

Результати досліджень використано в навчальному процесі на кафедрі технічної механіки та пакувальної техніки НУХТ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Якимчук М.В. Функціонально модульне проектування пакувальних машин: моногр. / О.М. Гавва, Л.О., Кривопляс-Володіна, М.В. Якимчук [та ін.]. — К: Видавництво «Сталь», 2015. — 547 с. (*Особистий внесок: написання розділів 2 та 3*).
2. Якимчук М.В. Особливості використання пневматичних елементів для пакувальної техніки / М.В. Якимчук, В.С. Костюк // Наукові праці УДУХТ. — 2001. — №10, II ч. — С. 189—190. (*Особистий внесок: викладання теоретичного матеріалу, огляд та аналіз конструкцій*).
3. Якимчук М.В. Розробка основних положень модульної системи проектування обладнання для укрупнення вантажних одиниць / М.В. Якимчук, О.М. Гавва, А.В. Чуприна // Харчова промисловість. — 2001. — № 47. — С. 42—43. (*Особистий внесок: розробка положень, термінів, методики проектування*).
4. Якимчук М.В. Визначення раціональних параметрів механізму профілювання м'якої транспортної тари з сипкою продукцією / М.В. Якимчук, О.М. Гавва, А.В. Чуприна // Хімічна промисловість України. — 2001. — №5. — С. 49—52. (*Особистий внесок: огляд та аналіз функціональних модулів*).
5. Якимчук М.В. Розроблення основних положень модульної системи проектування обладнання для укрупнення вантажних одиниць / М.В. Якимчук, О.М. Гавва, А.В. Чуприна // Харчова промисловість. — 2002. — № 2. — С. 79—84. (*Особистий внесок: розроблення положень, опис методики проектування*).
6. Якимчук М.В. Мікропроцесорна техніка в системах керування пакувального обладнання / М.В. Якимчук, О.М. Гавва // Харчова промисловість. — 2004. — № 3. — С. 56—58. (*Особистий внесок: розроблення та опис систем керування*).
7. Якимчук М.В. Шляхи зменшення енерговитрат в пакувальному обладнанні / М.В. Якимчук, О.М. Гавва, К.І. Бережко // Упаковка. — 2005. — № 3. — С. 45—48. (*Особистий внесок: розроблення методики визначення енерговитрат та обробка результатів експерименту*).
8. Якимчук М.В. Розробка математичної моделі для визначення максимальної продуктивності обладнання в роботизованих лініях для групової упаковки / М.В. Якимчук // Харчова промисловість. — 2010. — № 9. — С. 133—136.
9. Якимчук М.В. Робототехнічні комплекси для групового пакування фасованої продукції / М.В. Якимчук, О.М. Гавва, А.П. Беспалько // Упаковка. — 2010. — № 4. — С. 37—42. (*Особистий внесок: аналіз конструкцій, класифікація, визначення робочих параметрів*).
10. Якимчук М.В. Определение усилия вакуумного захвата для пористых материалов / М.В. Якимчук, О.М. Гавва // Научные труды (Пловдив). — 2011. — № 3. — С. 391—398. (*Особистий внесок: розробка рівнянь для визначення величини вакууму з урахуванням пористості матеріалу, експериментальні дослідження*).

11. Якимчук Н.В. Дослідження зусиль утримання упаковок вакуумними захоплювальними пристроями / М.В. Якимчук // Харчова промисловість. — 2011. — № 10—11. — С.240—246.
12. Якимчук М.В. Дослідження витрат повітря через пористі пакувальні матеріали / М.В. Якимчук, О.М. Гавва // Харчова промисловість. — 2011. — № 10—11. — С. 249—253. *(Особистий внесок: рівняння для визначення коефіцієнта повітропроникності, експериментальні дослідження).*
13. Якимчук М.В. Вплив пористості пакувальних матеріалів на зусилля утримання упаковок вакуумними захоплювальними пристроями / М.В. Якимчук, О.М. Гавва, А.Є Самойлик // Упаковка. — 2011. — № 2. — С. 35—37. *(Особистий внесок: викладання теоретичного матеріалу, експериментальні дослідження).*
14. Якимчук М.В. Синтез машин ліній пакування та енергозбереження / М.В. Якимчук, А.І. Соколенко, К.В. Васильківський, К.В. Мудрак // Упаковка. — 2012. — № 3. — С. 53—55. *(Особистий внесок: експериментальні дослідження).*
15. Якимчук Н.В. Дослідження впливу динаміки лінійних двигунів в модулях переміщення упаковок / М.В. Якимчук // Харчова промисловість. — 2012. — № 13. — С.115—121.
16. Якимчук Н.В. Розробка методик вибору основних параметрів комбінованих захоплювальних пристроїв під час проектування обладнання для групової упаковки / М.В. Якимчук // Харчова промисловість. — 2013. — № 14. — С.101—124.
17. Iakymchuk M. Innovative solutions the pneumatic control systems in equipment for group packaging / M. Iakymchuk, A. Gavva // Scientific works volume LX — Plovdiv: УПТ, 2013. — P. 1198—1202. *(Особистий внесок: залежності для визначення кінематичних параметрів процесу, розробка нових структур керування, експериментальні дослідження).*
18. Якимчук М.В. Проектування пакувальної техніки за модульним принципом (стан питання, тенденції розвитку) / М.В. Якимчук, А.П. Беспалько, В.Г. Валіулін // Упаковка. — 2013. — № 1. — С.45—50. *(Особистий внесок: розробка методики формування обладнання для групового пакування з мехатронних модулів, визначення критеріїв оптимальності).*
19. Якимчук Н.В. Розробка наукової бази формування обладнання для групового пакування з мехатронних модулів / М.В. Якимчук // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. — 2013. — № 3. — С.237—242.
20. Якимчук Н.В. Пневматические устройства для упаковочного оборудования / М.В. Якимчук // Упаковка. — 2013. — № 5. — С.47—51.
21. Iakymchuk M. Research of mechatronic linear module with pneumatic drive based on the use of proportional pressure regulators / M. Iakymchuk, A. Gavva, A. Bespalko // Journal of food and packaging science Technique and technologies. — 2014. — №3. — С. 93—97. *(Особистий внесок: залежності для визначення кінематичних та динамічних параметрів мехатронних модулів, розробка нової конструкції модуля).*

22. Iakymchuk M. Multipeak equipment power consumption study / M. Iakymchuk, A. Gavva // Journal of food and packaging science technique and technologies. — 2014. — №4. — С. 50–53. *(Особистий внесок: викладання теоретичного матеріалу, проведення експериментальних досліджень)*.
23. Iakymchuk M. Scientific substantiation of combined gripping devices parameters in equipment for group packaging / M. Iakymchuk, A. Gavva // Journal of food and packaging science Technique and technologies. — 2014. — №3. — С. 24–27. *(Особистий внесок: рівняння для визначення величин вакууму з урахуванням повітропроникності, розробка нових конструкцій мехатронних модулів)*.
24. Якимчук М.В. Сервоприводи в пакувальному обладнанні (стан питання, тенденції розвитку) / М.В. Якимчук, А.П. Беспалько, В.Г. Валіулін, С.В. Токарчук // Упаковка. — 2014. — № 2. — С.50–54. *(Особистий внесок: огляд та аналіз конструкцій сервоприводів, викладання теоретичного матеріалу)*.
25. Якимчук М.В. Дослідження мехатронного модуля лінійного переміщення з пневмоприводом на базі використання пропорційних регуляторів тиску / М.В. Якимчук, С.М. Мироненко // Харчова промисловість. — 2014. — № 15. — С. 121–127. *(Особистий внесок: рівняння для визначення динамічних та кінематичних параметрів роботи, розробка нової структурної схеми керування, експериментальні дослідження)*.
26. Якимчук М.В. Виконавчі механізми укладальних машин в лініях фасування (шляхи модернізації) / М.В. Якимчук, А.П. Беспалько, В.Г. Валіулін, В.С. Костюк // Упаковка. — 2014. — № 4. — С. 50–54. *(Особистий внесок: огляд та аналіз конструкцій)*.
27. Iakymchuk M. Strukturalna synteza sprzętu do pakowania zbiorczego / M. Iakymchuk, A. Gavva, W. Chałajdzy // Opakowanie. — 2014. — №8. — С. 65–70. *(Особистий внесок: проведення структурного синтезу, експериментальні дослідження)*.
28. Iakymchuk M. The methodology of designing packaging machines based mechatronic modules/ M. Iakymchuk, A. Gavva // Journal of food and packaging science Technique and technologies. — 2015. — №6. — Р. 111–117. *(Особистий внесок: розробка положень, термінів, методики проектування)*.
29. Iakymchuk M. Impact of Vacuum Gripping System Oscillation on Product Holding Force / M. Iakymchuk, A. Gavva // «Традиции и инновации в химичните, хранителните и биотехнологиите». — 2015. — №1. — Р. 111–117. *(Особистий внесок: викладання теоретичного матеріалу, проведення експериментальних досліджень)*.
30. Якимчук М.В. Мехатроніка — шлях розвитку пакувальних машин IV та V покоління/ М.В. Якимчук, О.М. Гавва // Упаковка. — 2015. — № 5. — С. 38–41. *(Особистий внесок: розробка положень, термінів)*.
31. Якимчук М.В. Дослідження впливу коливальних процесів в захоплювальних пристроях з гофроприсосками на зусилля утримання структурних елементів групової упаковки/ М.В. Якимчук, А.П. Беспалько // Харчова промисловість. — 2015— № 17— с 114–120. *(Особистий внесок: рівняння для визначення величин вакууму з урахуванням впливу коливальних процесів)*.

32. Якимчук М.В. Мехатроніка в пакувальному обладнанні / М.В. Якимчук, О.М. Гавва // XI Науково—практична конференція молодих вчених «Новітні технології пакування» (НУХТ, Київ, Україна, 3 квітня 2015). — К.: НУХТ, 2015. — С. 51—55. *(Особистий внесок: структурні схеми мехатронних модулів, математичні моделі формування обладнання, експериментальні дослідження)*.
33. Якимчук Н.В. Структурний синтез обладнання для групового пакування за критеріями енерговитрат / М.В. Якимчук // IV Міжнародна науково-практична конференція вчених, аспірантів і студентів «Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації і безпеки продовольств» (НУХТ, Київ, Україна, 14 квітня 2014). — К.: НУХТ, 2014. — С. 75—76.
34. Якимчук М.В. Основи методології створення пакувальних машин із мехатронних модулів / М.В. Якимчук, О.М. Гавва // VIII Науково-практична конференція з проблем пакувальної індустрії (НУХТ, Київ, Україна, 24—25 вересня 2014). — К.: НУХТ, 2014. — С. 41—51. *(Особистий внесок: розробка методології, понять та визначень, критерії оптимізації)*.
35. Якимчук Н.В. Дослідження шляхів зменшення енерговитрат у пакувальному обладнанні / М.В. Якимчук // II Міжнародна науково-практична конференція «Продовольчі ресурси: проблеми і перспективи» (Інститут продовольчих ресурсів НААН України, Київ, Україна, 11 листопада 2014). — К.: ННЦ «Інститут аграрної політики», 2014. — С. 226—229.
36. Якимчук Н.В. Научные основы методологии создания упаковочных машин с мехатронными модулями / Н.В. Якимчук // Республиканский научно-практический семинар «Автоматизация и роботизация процессов и производств» (Минск, Беларусь, 13 февраля 2014). — Минск: 2014. — С. 90—92.
37. Якимчук Н.В. Некоторые подходы к уменьшению энергозатрат в упаковочном оборудовании / Н.В. Якимчук, А.Н. Гавва, С.В. Токарчук // Международная научная конференция «Proceeding of the Conference» (Ташкент, Узбекистан, 23—24 октября 2014). — Ташкент: 2014. — С. 166—169. *(Особистий внесок: побудова енергетично-потоків та сигнальних графів, аналітичні дослідження)*.
38. Пат. 61438 U Україна, МПК В65В 9/06 (2006.01). Пристрій для формування, наповнення та зварювання пакетів з плівки / М.В. Якимчук, Л.І. Іванова, А.М. Недашківський; Заявник і патентовласник: Національний університет харчових технологій, Київ; заявл. 10.11.2010; опубл. 25.07.2011; Бюл. № 14. — 16 с. : іл. *(Особистий внесок: патентний пошук, розробка ідеї, опис)*.
39. Пат. 61601 U Україна, МПК В65В 31/00 (2011.01). Рукавоутворювач / М.В. Якимчук, Л.І. Іванова, В.В. Нагорна, А.В. Кандиба; Заявник і патентовласник: Національний університет харчових технологій, Київ; заявл. 22.12.2010; опубл. 25.07.2011; Бюл. № 14. — 18 с. : іл. *(Особистий внесок: патентний пошук, розробка ідеї, опис)*.
40. Пат. 70384 U Україна, МПК(2006.01)В65G 47/91. Комбінований захоплювальний пристрій / М.В. Якимчук, Л.І. Іванова, В.В. Нагорна; Заявник і

- патентовласник: Національний університет харчових технологій, Київ; заявл. 16.11.2011; опубл. 11.06.2012; Бюл. № 11. — 16 с. : іл. (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка конструкції, участь у проведенні експериментальних дослідженнях*).
41. Пат. 72161 U Україна, МПК(2012.01) F15B 9/00. Модуль горизонтального переміщення з безштоковими циліндрами / М.В. Якимчук, Л.І. Іванова, Б.В. Мазур; Заявник і патентовласник: Національний університет харчових технологій, Київ; заявл. 23.01.2012; опубл. 10.08.2012; Бюл. № 15. — 20 с. : іл. (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка конструкції, підготовка формули та опису*).
42. Пат. 80288 U Україна, МПК(2006.01) B65G 47/91. Вакуумний захоплювач / М.В. Якимчук, Л.І. Іванова; Заявник і патентовласник: Національний університет харчових технологій, Київ; заявл. 02.11.2012; опубл. 27.05.2013; Бюл. № 10. — 16 с. : іл. (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка конструкції, опис*).
43. Пат. 80291 U Україна, МПК(2006.01) B65B 35/16. Механічний захоплювальний пристрій / М.В. Якимчук, Л.І. Іванова; Заявник і патентовласник: Національний університет харчових технологій, Київ; заявл. 02.11.2012; опубл. 27.05.2013; Бюл. № 10. — 18 с. : іл. (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка конструкції, опис*).
44. Пат. 82996 U Україна, МПК(2013.01) F15B 9/00 F15B 3/00. Компактний пневмоциліндр / М.В. Якимчук, Л.І. Іванова, Ю.А. Бабич; Заявник і патентовласник: Національний університет харчових технологій, Київ; заявл. 13.02.2013; опубл. 27.08.2013; Бюл. № 16. — 18 с. : іл. (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка конструкції, опис*).
45. Пат. 103434 A Україна, МПК(2006.01) B65G 47/91. Вакуумний захоплювач / М.В. Якимчук, Л.І. Іванова; заявник і патентовласник Національний університет харчових технологій. — № а201212510; заявл. 02.11.2012; опубл. 10.10.2013; Бюл. № 19. — 16 с. : іл. (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка конструкції, опис, участь в експериментальних дослідженнях*).
46. Пат. 103436 A Україна, МПК(2006.01) B65G 47/90 B65B 35/16. Механічний захоплювальний пристрій / М.В. Якимчук; Заявник і патентовласник: Національний університет харчових технологій. — а201212513; заявл. 02.11.2012; опубл. 10.10.2013; Бюл. № 12. — 18 с. : іл.
47. Пат. 91970 U Україна, МПК(2006.01) B65G 47/91. Мехатронний захоплювальний пристрій / М.В. Якимчук, Л.І. Іванова, Ю.А. Бабич, І.О.Звоник; Заявник і патентовласник: Національний університет харчових технологій, Київ; заявл. 12.02.2014; опубл. 25.07.2014; Бюл. № 14. — 18 с. : іл. (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка конструкції, опис*).
48. Пат. 108388 A Україна, МПК(2015.01) F15B 15/14 F15B 9/00. Компактний пневматичний модуль / М.В. Якимчук, Л.І. Іванова, Ю.А. Бабич; Заявник і патентовласник: Національний університет харчових технологій. — а201301757; заявл. 13.02.2013; опубл. 27.04.2015; Бюл. № 8. — 10 с. : іл. (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка конструкції, опис*).

АНОТАЦІЯ

Якимчук М.В. Науково-технічні засади розвитку обладнання для групового пакування харчових продуктів на основі мехатронних модулів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.12 – процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв. – Національний університет харчових технологій, Київ, 2016.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-технічної проблеми розроблення науково-технічних засад створення нового покоління машин із мехатронними модулями для групового пакування харчових продуктів на основі синтезу їх структури.

У роботі викладене сучасне бачення теоретичних та практичних основ створення функціональних мехатронних модулів та методологію формування з них нового покоління обладнання для групового пакування з розширеними функціональними можливостями.

Запропоновано і реалізовано наукову концепцію проектування обладнання для групового пакування з мехатронних модулів для заданих умов використання, що дає можливість створювати нові зразки пакувальних машин найвищого інтелектуального рівня на основі розроблених структурних графів технологічних процесів групового пакування, функціонально-структурних схем та обґрунтованих критеріїв ефективності їх роботоздатності.

Результати роботи впровадженні у виробництво під час проектування нового пакувального обладнання та модернізації існуючого на підприємствах: ДП «Фесто», ТОВ «Інта», ТОВ «Термопак», ТОВ «Елопак».

Ключові слова: харчова продукція, групова упаковка, функціональний мехатронний модуль, структурна схема, критерій оптимізації.

АННОТАЦИЯ

Якимчук Н.В. Научно-технические принципы развития оборудования для групповой упаковки пищевых продуктов на основе мехатронных модулей. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.18.12 - процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств. - Национальный университет пищевых технологий, Киев, 2016.

Диссертация посвящена решению научно-технической проблемы создания нового поколения машин для групповой упаковки пищевых продуктов из мехатронных модулей на основе синтеза их структуры.

В работе изложено современное видение теоретических и практических основ создания функциональных мехатронных модулей и методологию формирования из них нового поколения оборудования для групповой упаковки с расширенными функциональными возможностями. Прежде всего это - гибкость, которая характеризуется удобством переналадки оборудования с целью оперативного переориентирования его на выпуск другой продукции, в которой нуждается рынок.

Предложено и реализовано научную концепцию проектирования оборудования для групповой упаковки из мехатронных модулей для заданных условий эксплуатации, что позволяет создавать новые образцы упаковочных машин высокого интеллектуального уровня на основе разработанных структурных графов технологических процессов групповой упаковки, функционально-структурных схем машин с одновременной их оптимизацией по критериям: фактической производительности; надежности; функциональной точности; энергозатрат.

Проведен анализ и синтез функционально-структурных схем оборудования для групповой упаковки пищевых продуктов и выделены типичные функциональные модули - подъема, перемещения и захвата; установлено логические взаимосвязи между ними, выполнен сравнительный анализ их приводов.

Предложена методология создания функциональных баз данных мехатронных модулей и проведения многокритериальной оптимизации их структуры по критериям эффективности. На основе разработанной методики были получены аналитические результаты затрат энергии в функциональных модулях оборудования для групповой упаковки с горизонтальной и вертикальной схемами образования групповой упаковки.

Предложены математические модели технологических операций групповой упаковки (сталкивания, подъема и опускания структурных элементов групповой упаковки мехатронными модулями), с целью реализации заданных законов движения во время их перемещения путем установки взаимосвязей между физико-механическими характеристиками упаковочных материалов, техническими и технологическими характеристиками мехатронных модулей и параметром управляющего сигнала.

Исследовано и проанализировано влияние непроизводительных потерь сжатого воздуха на качество работы разработанных и существующих конструкций мехатронных модулей с пневмоприводом. Предложена новая конструкция мехатронного модуля с использованием двух пропорциональных регуляторов давления. По результатам экспериментальных исследований установлено, что такая система на конечном этапе движения структурных элементов групповой упаковки может воспринимать на 30% больше динамических нагрузок, компенсировать непроизводительные потери давления в полостях пневмоцилиндра.

Научно обосновано выбор параметров мехатронных модулей захватов с системой распределения усилия между элементами захвата с учетом физико-механических свойств материалов упаковочных единиц.

Результаты проведенных теоретических исследований использованы в прикладном аспекте их внедрения - синтез и анализ функционально-структурных схем машин из мехатронных модулей и создание конструкций функциональных мехатронных модулей подъема, опускания, перемещения и сталкивания структурных элементов групповой упаковки.

Результаты работы внедрены в производство при проектировании нового упаковочного оборудования и модернизации существующего на предприятиях ДП «Фесто», ООО «Инта», ООО «Термопак», ООО «Элопак».

Ключевые слова: пищевая продукция, групповая упаковка, функциональный мехатронный модуль, структурная схема, критерий оптимизации.

ABSTRACT

M. Yakymchuk. Scientific and technical foundations of equipment development for group packing of food products on the basis of mechatronic modules. – Manuscript.

Thesis for the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in the speciality 05.18.12 – Processes and Equipment of Food, Microbiological and Pharmaceutical Productions. – National University of Food Technologies, Kyiv, 2016.

Thesis is dedicated to solving an important scientific and technical problem of development of scientific and technical foundations for creation of new generation machines with mechatronic modules for group packing on the basis of synthesis of their structure. The work describes a modern view of theoretical and practical foundations of creation of functional mechatronic modules and methodology of formation of new generation equipment for group packing with widened functional abilities.

A scientific concept of equipment design for group packing from mechatronic modules with given conditions of use has been suggested and realized that gives a chance to create new examples of packing machines of the highest intellectual level on the basis of developed structural columns of technological processes of group packing, functional and structural schemes and justified criteria of their performance efficiency.

The results of theoretical research have been used in applied aspect of their implementation – synthesis and analysis of functional and structural schemes of machines with mechatronic modules of lifting, dipping, displacement and collision of structural elements of group package. The results of the work have been implemented in production during design of new packing equipment and modernization of the existing one at the following enterprises: “Festo” subsidiary, “Inta” ltd, “Thermopack” ltd, “Elopack” ltd.

Keywords: food products, group package, functional mechatronic module, structural scheme, criterion of optimization.