

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**



КРИВОПЛЯС-ВОЛОДИНА ЛЮДМИЛА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 621.6:621.5

**БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ СИНТЕЗ МЕХАТРОННИХ
ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОДУЛІВ МАШИН
ПАКУВАННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ**

05.18.12 – Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних
та фармацевтичних виробництв
Технічні науки

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ 2019

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, доцент
Сухенко Владіслав Юрійович,
Національний університет біоресурсів і
природокористування України МОН України,
завідувач кафедри стандартизації та сертифікації
сільськогосподарської продукції

доктор технічних наук, професор
Орловський Броніслав Вікентійович,
Київський національний університет технологій
та дизайну МОН України,
професор кафедри прикладної
механіки та машин, заслужений діяч науки і
техніки України

доктор технічних наук, професор
Регей Іван Іванович
Українська академія друкарства МОН України,
завідувач кафедри комп'ютеризованих комплексів
поліграфічного та пакувального виробництв

Захист відбудеться “17”квітня 2019 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 26.058.02 Національного університету харчових технологій, за адре-
сою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська,68, ауд.А-311.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету
харчових технологій, за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська,68.

Автореферат розісланий “ 14 ” березня 2019 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д26.058.02, к.т.н., доц.



С.І.Літвинчук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Враховуючи сучасні проблеми конструювання, компоновки і вибору пакувального обладнання поточкових ліній харчових виробництв, яке розвивається в умовах жорсткої конкуренції та швидкого оновлення продукції, упаковки, актуальним питанням є обґрунтований вибір оптимальних структури, геометричних, кінематичних, динамічних й експлуатаційних параметрів машин пакувальних ліній, скорочення термінів їх розроблення та виготовлення, раціонального зниження вартості, підвищення якості та конкурентоспроможності. Сучасні пакувальні машини - це високоточна і автоматизована техніка із застосуванням мехатронних модульних систем. Розвитку теоретичних основ та удосконаленню пакувального обладнання присвячені роботи провідних науковців цієї індустрії: Артоболевського І.І., Благодарського В.А., Бурляя Ю.В., Васильєва А.Л., Гавви О.М., Генкіна М.Д., Кривопляса А.П., Новікова М.Б., Пальчевського Б.О., Пароя А.А., Соколенка А.І., Сторіжка Й.І., Сухого Л.А., Rao S., Smith J., Yoshida C. та ін. Враховуючи сучасний етап розвитку пакувальної індустрії, рівень методів та засобів аналізу і синтезу обладнання, долучення багатокритеріального синтезу та оптимізації дасть можливість одержати суттєве підвищення показників ефективності роботи пакувальних машин.

Тому актуальною є науково-прикладна проблема розроблення концепції багатокритеріального синтезу пакувального обладнання із використанням адаптованого до специфіки пакувальних машин математикопрограмного апарату. Такий підхід до проектування дає можливість у мінімальні терміни із високою достовірністю здійснити вибірковий аналіз та синтез допустимих варіантів компонувань із визначеного набору функціональних мехатронних модулів, оцінити їх параметри та обрати кращі варіанти. Отже, поглиблення існуючих та розроблення нових методів багатокритеріального синтезу пакувального обладнання за заданими характеристиками на основі системного підходу до оцінки його якості та конкурентоспроможності є актуальною і надзвичайно важливою науково-прикладною проблемою для пакувальної індустрії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до основних напрямів науково-інноваційної діяльності України, пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки «Наукові основи створення сучасних пакувальних систем із забезпеченням тривалого зберігання харчової продукції». А також дисертаційна робота виконана відповідно до пріоритетного напрямку наукових робіт НУХТ та з урахуванням розвитку наукових шкіл: «Розроблення наукових основ тепломасообмінних та інших процесів харчових, мікробіологічних і фармацевтичних виробництв з метою створення нових високоефективних технологій та обладнання, засобів механізації та автоматизації для харчових та переробних галузей АПК» (схвалено вченою радою НУХТ, протокол № 7 від 25.03.2006); з планом науково-дослідної роботи кафедри мехатроніки і пакувальної техніки; з держбюджетними науководослідними роботами: фундаментальною «Наукові засади оптимізаційного синтезу функціонально-модульної структури машин для пакування харчових продуктів» (шифр держреєстрації 0112U007798, автор – виконавець теми); прикладною «Науковотехнічні засади створення енергоефективних, багатофункціональних пакувальних машин для харчових продуктів на основі

неоднорідної системи мехатронних модулів», (державний реєстраційний номер теми: 0112U001249, автор – головний виконавець теми).

Мета і завдання досліджень. *Мета дисертації* — розробити та реалізувати наукову концепцію багатокритеріального синтезу пакувальних машин поточкових ліній харчових виробництв за заданими характеристиками, що дає можливість на стадіях проектування виконати відбір раціональних технічних рішень та створити на їх основі конкурентоспроможні зразки обладнання.

Досягнення поставленої мети потребує формулювання, наукового обґрунтування та вирішення в дисертації таких основних **завдань** дослідження:

1. Виконати аналіз структури та тенденцій технічного й технологічного вдосконалення пакувальних машин поточкових ліній виробництва харчових продуктів.

2. Проаналізувати відомі методи та методики математичного, фізичного моделювання операцій пакування, а також структурного синтезу й параметричної оптимізації функціональних модулів пакувальних машин з метою їх удосконалення на основі системного підходу до оцінки якості альтернативних варіантів.

3. Розробити наукову концепцію багатокритеріального синтезу пакувальних машин поточкових ліній харчових виробництв за заданими характеристиками.

4. Розробити методи й алгоритми багатокритеріального синтезу пакувальних машин (ПМ) поточкових ліній харчових виробництв в умовах визначеності ситуації та в умовах невизначеності ситуації (коли один чи декілька локальних критеріїв якості функціональних мехатронних модулів або обмежень заздалегідь неможливо подати у вигляді функціональних залежностей від проектних параметрів).

5. Побудувати оптимізаційні математичні моделі і здійснити з використанням запропонованої концепції та розроблених алгоритмів і методів, в умовах визначеності ситуації багатокритеріальний синтез типових функціональних мехатронних модулів пакувальної машини та її узагальненої структури.

6. Побудувати оптимізаційну математичну модель і здійснити за заданими характеристиками багатокритеріальний синтез позиційного і слідкувального приводу машини для пакування штучних харчових продуктів.

Для цього:

- розробити придатні для структурно-параметричного синтезу математичні моделі електропневматичного, електромеханічного, пневмомеханічного і пневматичного приводів з інерційним навантаженням та з урахуванням зміни його структури під час роботи, пружно-дисипативних властивостей ланок і тертя в кінематичних парах та з'ясувати межі їх застосування;

- дослідити вплив пружнодисипативних властивостей ланок та тертя в кінематичних парах на динаміку і точність позиціювання електропневматичного приводу;

- дослідити вплив динамічних характеристик електропневматичних і пневмомеханічних приводів із регульованим інерційним навантаженням на роботу ПМ і запропонувати придатну для широкого використання конструкцію функціонального мехатронного модуля лінійного переміщення (ФММЛП) з позиційною системою керування та розширеними функціональними можливостями;

- розробити узагальнену математичну модель ФММЛП, яка враховує змінні характеристики робочого середовища та особливості пристрою гальмування, тертя в кінематичних парах, конструкцію.

7. Апробувати розроблені математичні моделі типових функціональних мехатронних модулів пакувальних машин поточкових ліній харчових виробництв на фізичних моделях, дослідних зразках пакувального обладнання та порівняти з даними у відомих літературних джерелах.

Об'єкт дослідження— процес пакування харчових продуктів із застосуванням функціональних мехатронних модулів на основі взаємозв'язків між їх конструктивними, кінематичними, динамічними та інформаційними параметрами.

Предмет дослідження— критерії та параметри процесу, пов'язаного із роботою функціональних мехатронних модулів пакувальних машин поточкових ліній виробництва харчових продуктів.

Методи досліджень. У дисертації використані методи теоретичної механіки, динаміки машин, теорії коливань та числового розв'язання систем диференціальних рівнянь (Рунге Кута, Ейлера) під час побудови математичних моделей і дослідження динамічних характеристик функціональних мехатронних модулів пакувальних машин; методи векторної оптимізації (досягнення мети), мінімізації функції за наявності обмежень (Куна Такера, послідовного квадратичного програмування, BFGS метод і проекції градієнта тощо); експертних оцінок, теорій сумарної корисності і нечітких множин під час розроблення оптимізаційних моделей синтезу ФММППМ; математичної статистики при опрацюванні результатів експериментів (принцип Паретто); комп'ютерної симуляції (пакети MatCAD, Exel, FluidLAB, MathLABSimulink, AnyLogic та ін.) на всіх стадіях досліджень. Стандартні методи базуються на чинних національних стандартах (ДСТУ), гармонізованих із міжнародними (ISO) та європейськими (EN).

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробленні та реалізації наукової концепції багатокритеріального синтезу функціональних мехатронних модулів пакувальних машин за заданими характеристиками, яка полягає в поєднанні структурного та параметричного синтезу, задач вибору та системній оцінці якості альтернативних варіантів компонувань пакувальної машини модульної побудови.

При цьому вперше:

- розроблено метод системної оцінки якості альтернативних варіантів компонувань пакувальної машини, побудованої із функціонально-мехатронних модулів;
- змодельовані новітні зразки пакувального обладнання за комплексним критерієм ефективності роботи та технічної досконалості й оптимальними показниками, що дає можливість підвищити їх технічний рівень та формулювати шляхи вдосконалення;
- розроблені математичні моделі оптимізації критеріїв та параметрів функціональних мехатронних модулів пакувальних машин, що уніфікує їх у кластерні групи;
- визначено вплив параметрів мінімізації деструктивних факторів мехатронних модулів на якісні характеристики процесу та об'єктів пакування;
- вирішено задачі побудови пакувальних машин на основі мехатронно-модульного принципу, які пов'язані із застосуванням високих технологій точної

механіки та системи керування, точністю функціонування, малими енерго- та матеріаловитратами, швидким переналагодженням на типорозміри упаковки і види продукції, високою продуктивністю.

Удосконалено:

- наукові підходи до проведення багатокритеріального синтезу функціональних мехатронних модулів пакувальних машин за заданими характеристиками, в основу яких покладено принцип формування множини альтернативних парето-оптимальних (у межах своєї структури) варіантів модулів різної структури з подальшим вибором кращого з них за інтегральним критерієм якості (функцією сумарної корисності) та критерієм економічної доцільності (компенсацією за корисність) на основі відображення множини альтернативних варіантів;

- багатокритеріальні оптимізаційні математичні моделі й розроблені алгоритми ієрархічного структурно-параметричного синтезу в умовах визначеності ситуації функціонального мехатронного модуля лінійного переміщення пакувальної плівки рулоно-розмотувального пристрою автоматизованої пакувальної машини із електропневматичною системою керування;

- методи регулювання навантаження, характеристики соплового ежектуючого пристрою, спосіб регулювання швидкості руху повітряного струменя на стадії оброблення пакувального матеріалу. Досліджено динаміку і точність позиціонування робочого сопла для розробленої системи функціональних мехатронних модулів пакувальних машин, розроблено математичну модель керування дозувальним пристроєм із слідкувальним електропневматичним приводом.

Отримали подальший розвиток:

- концепція багатокритеріальної оптимізаційної оцінки пакувального обладнання, метод ієрархічного структурно-параметричного синтезу типових функціональних мехатронних модулів пакувальних машин за заданими характеристиками в умовах невизначеності ситуації на основі базової структури;

- методика імітаційної оцінки умов синтезу та експлуатації функціональних мехатронних модулів пакувальних машин.

Практичне значення отриманих результатів. На основі запропонованої концепції та методів багатокритеріального структурно-параметричного синтезу функціональних мехатронних модулів пакувальних машин розроблені методики та підпрограми їх синтезу в умовах визначеності ситуації та в умовах невизначеності ситуації для електропневматичних приводів із змінним навантаженням. Виконано прогнозування функціональних характеристик та якісних показників функціональних мехатронних модулів пакувальних машин, опрацьована порівняльна характеристика їх структури й параметрів за умови забезпечення заданого технічного рівня і конкурентоспроможності. Розроблені й захищені патентами на винаходи та корисні моделі нові конструкції функціональних мехатронних модулів пакувальних машин, приводів соплових, дозуючих, транспортуючих систем і електропневмоприводів із покращеними технічними характеристиками. Окремі результати дисертації за результатами запропонованого методу узагальненої оптимізації використані під час проектування конструкції пакувальних машин із функціональних мехатронних модулів: руху плівки, подачі споживчої упаковки та продукту в зону фасування, підведення газових середовищ. Методики й програми динамічного аналізу та багаток-

ритеріального структурно-параметричного синтезу електропневмоприводів соплових систем та дозаторів реалізовані ТОВ “КАМОЦЦІ”. За результатами досліджень розроблено та впроваджено функціональні мехатронні модулі, які пройшли промислово апробацію у виробничих умовах ТОВ «ПАК СЕРВІС», ТОВ «ПАКУВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ», ТОВ «Понінківська картоннопаперова фабрика – Україна». Новизну технічних рішень захищено 21 патентом України на винахід. Розроблені в дисертації концепція, математичні моделі та методи динамічного аналізу й синтезу функціональних мехатронних модулів пакувальних машин увійшли до навчальних програм дисциплін “Мехатроніка” (розділ „Синтез функціональних модулів технологічного обладнання”), “Технологія і обладнання пакування” та „Виробнича логістика” (розділ „Загальні принципи конструювання і розрахунку технологічних машин та їх елементів”) і застосовуються в навчальному процесі та науково-дослідній роботі в Національному університеті харчових технологій.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є результатом комплексних досліджень автора з проблем динамічного аналізу та синтезу, розроблення конструкцій і багатокритеріального синтезу функціональних мехатронних модулів пакувальних машин. Усі основні результати, наведені в дисертації (постановка завдань, концепція багатокритеріального структурно-параметричного синтезу, математичні моделі, критерії, алгоритми та методи), отримані автором особисто та опубліковані у 80 друкованих наукових працях. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належать постановка завдань, виведення основних рівнянь і співвідношень, розроблення пакетів підпрограм, участь в аналізі отриманих результатів і формулюванні висновків. Основні результати аналітичних та експериментальних досліджень, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Автором дисертації особисто розроблено та виготовлено оригінальні експериментальні стенди, сформована методика та проведені експериментальні дослідження. Проведення числового моделювання параметрів мехатронних модулів виконано разом з д.т.н., проф. Гаввою О.М. Частину запатентованих винаходів створено разом з к.т.н., доц. Валіуліним Г.Р., к.т.н., доц. Любімовим В.М. 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 результати дисертаційної роботи доповідалися й схвалені на таких наукових конференціях і конгресах: VII Международная научная конференция «Техника и технология пищевых производств», Могилевский государственный университет продовольствия, (2010р.); IV, VII Міжнародна науковопрактична конференція вчених, аспірантів і студентів. – «Національний університет біоресурсів і природокористування України», (2014, 2017рр.); Новітні технології пакування: XI, XVII Науковопрактична конференція молодих вчених «Упаковка», (2015, 2018рр.); Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції - основні засади її конкурентоздатності: II, VII Міжнародна спеціалізована науково-практична конференція, (2013, 2017рр.); Пакувальна індустрія (технічні рішення в рамках ініціативи Save Food»: XI Міжнародна науково-практична конференція, (2017р.) Національний університет «Львівська політехніка».; Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XXII, XXIII Міжнародної науково-технічної конференції НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», (2016, 2017рр.); «III Международная научно-практическая конференция БГФТУ»

Мінськ, (2017p.); 8th Central European for Wellbeing Kyiv, Ukrain, (2017p.); University of Ruse "Angel Kanchev". 55th, 56th Annual Science Conference of Ruse University, Industry 4.0 business environment. Quality of life. Bulgaria, Ruse, Razgrad, (2016, 2017pp.); Proceedings of the III international scientific and practical conference international trends in science and technology, (2018p.), Warsaw, Poland; Modern scientific challenges and trends: a collection scientific works of the International scientific conference "Modern scientific challenges and trends", (2018p.). У повному обсязі дисертація доповідалася і схвалена на об'єднаному семінарі (під керівництвом д.т.н., проф. Соколенка А.І.) кафедр: мехатроніки і пакувальної техніки; машин і апаратів харчових та фармацевтичних виробництв; технологічного обладнання та комп'ютерних технологій проектування; теплоенергетики та холодильної техніки; машинобудування, стандартизації та сертифікації обладнання; теоретичної механіки та ресурсощадних технологій; процесів та апаратів харчових виробництв Національного університету харчових технологій; Національного університету біоресурсів і природокористування України; Інституту технічної теплофізики НАН України.

Публікації. Основні результати досліджень опубліковані у 80 наукових працях: 2 монографіях, 1 навчальному посібнику; 35 статтях у наукових фахових журналах і збірниках наукових праць (із них: 3 з реферативною базою цитування даних Scopus; 2 – з базою цитування Web of Science), 21 патент України на винаходи, 21 друкованому матеріалі і тезах доповідей наукових конференцій та конгресів.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 7 розділів, загальних висновків та 5 додатків. Основний зміст роботи викладено на 325 сторінках і містить 45 таблиць та 132 рисунки. Повний список використаних літературних джерел - 328 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Дисертація присвячена розробленню концепції багатокритеріального синтезу пакувального обладнання за заданими характеристиками на основі системного підходу до оцінки їхньої якості та конкурентоспроможності в структурі харчових виробництв.

У *вступі* розкрито сучасний стан науково-прикладної проблеми, визначено актуальність, мету, завдання роботи, наукову новизну і практичну цінність роботи, особистий внесок здобувача, апробацію, описано структуру дисертації.

У *розділі 1 «Аналіз сучасних методів багатокритеріального синтезу функціональних мехатронних модулів машин пакування харчових продуктів»* виконано аналіз сучасних тенденцій розвитку пакувальних машин, методології їх проектування та проблем багатокритеріального синтезу поточкових пакувальних ліній харчових виробництв. Проаналізовано структури пакувальних машин харчових продуктів та встановлено, що їх побудова базується переважно на модульному принципі. Поряд із цим широкого застосування в конструкції пакувальної машини (ПМ) знайшли функціональні мехатронні модулі (ФММ). Виявлено недостатність в сьогоденній практиці послідовного розв'язання задач структурного й параметричного синтезів ПМ та вибору ФММ для комплексного оцінювання потенційних можливостей альтернативних варіантів побудови пакувального обладнання на ранніх стадіях проектування. Проблема вибору альтернативної структури й параметрів пакувальної машини особливо актуально та гостро стоїть, коли формується основа

майбутнього машинобудівного виробу, що надалі визначатиме його техніко-економічні характеристики та рівень конкурентоспроможності. Помилка у виборі структури майбутньої пакувальної машини призводить до марно витрачених коштів на її подальше проектування і доведення до потрібного рівня якості, втрат у процесі експлуатації. Результати аналізу засвідчують актуальність і необхідність розробки теоретичних основ багатокритеріального синтезу функціональних мехатронних модулів ПМ за заданими характеристиками, які б дали можливість органічно поєднати в єдиний процес процедури розв'язання задач структурного та параметричного синтезів й підвищити ефективність проектування конкурентоспроможних виробів у галузі пакувального машинобудування.

Розділ 2 «Об'єкт, предмет та методи досліджень ФММ пакувальних машин» присвячений опису програм аналітичних та експериментальних досліджень, синтезу алгоритму дій для досягнення поставленої мети, обґрунтуванню об'єкту та предмету досліджень, визначенню вихідних фізико-механічних параметрів досліджуваних об'єктів (рис.1).

Під час побудови та дослідження математичних моделей прийняті такі *припущення*. Під час дослідження функціональних мехатронних модулів укладання і переорієнтування дрібноштучних продуктів лінійним електропневмоприводом синтезована математична модель на основі експериментального дослідження з використанням методів ідентифікації.

Вибір параметрів компонування пакувальної машини із окремих ФММ, побудованих із пневматичним, електричним, або комбінованим приводом – проведено із використанням імітаційного моделювання.

Робоче середовище електропневмоприводу є стиснене повітря – ідеальний газ, процеси відбуваються при адіабатному режимі з постійною температурою і тиском стисненого повітря в системі живлення, в робочих камерах циліндра процеси розглядались як квазістаціонарні.

Узагальнені припущення моделей дослідження: об'єкти дослідження для пакування – дрібноштучні харчові продукти (під час проведення технологічних операцій – є твердими тілами з рівномірно розподіленим і незмінним тиском на їх опорну поверхню). Параметри навколишнього середовища і робочого середовища регламентовано ISO 85731:2010. Розв'язок математичних моделей ФММ розроблено на основі попереднього аналізу структурних елементів функціональних пристроїв, з яких складається ФММ, та їх систем керування.

У ході вирішення використані сучасні методи пошуку кінематичних та динамічних параметрів робочих органів ФММ.

Для проведення експериментальних досліджень розроблено на сучасній елементній мехатронній базі оригінальні експериментальні стенди. Проведення експериментальних досліджень виконано і оптимізовано їх результати математикостатистичними методами планування експериментів із використанням програм оброблення статистичних даних. Для об'єктивного оцінювання та усунення похибок, які виникають при визначенні числових параметрів внаслідок впливу різних неконтрольованих факторів, всі дослідження проводились в багатократній повторності.

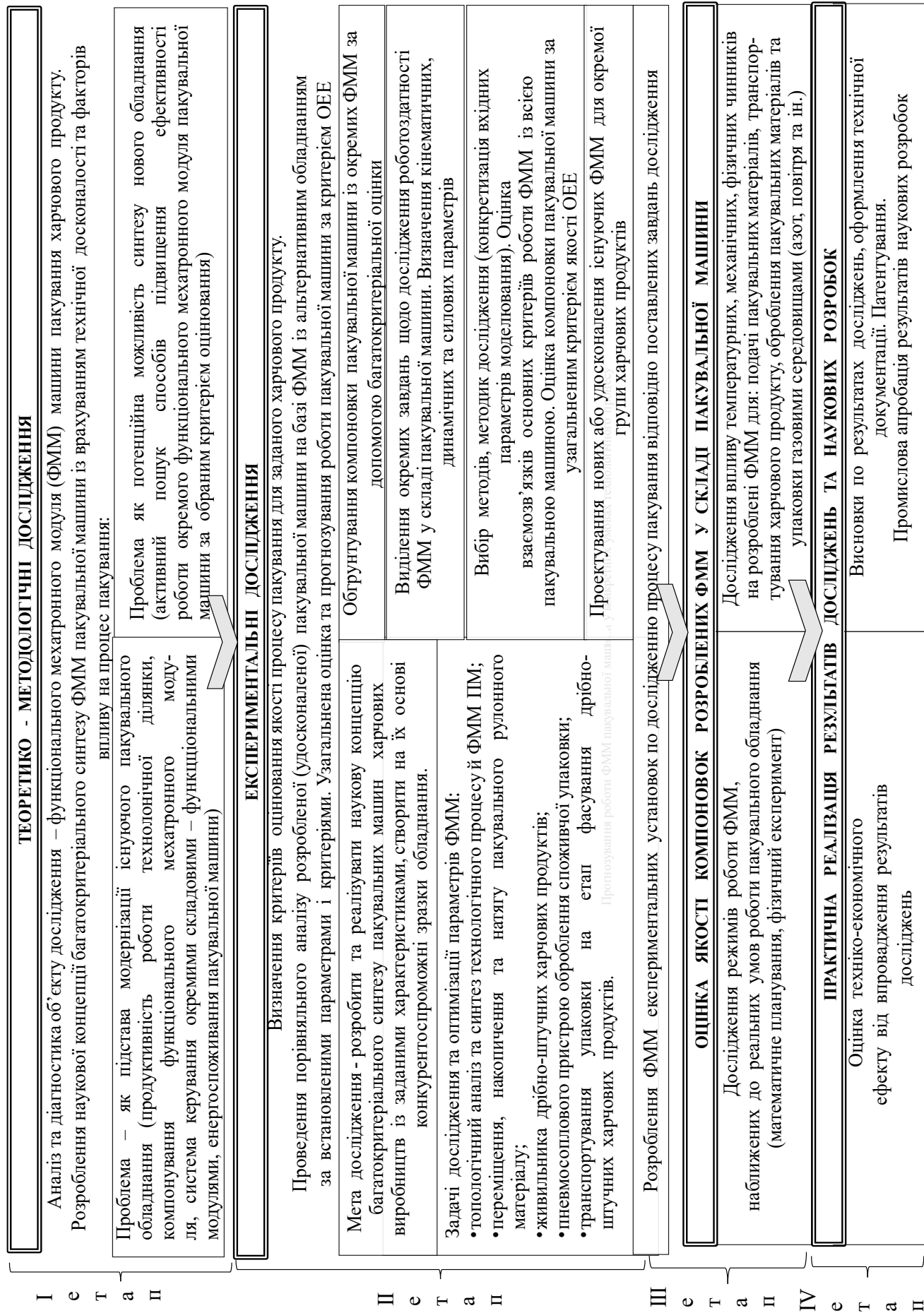


Рис.1. Загальна схема досліджень

Ймовірність можливих помилок розраховували за допомогою критеріїв Стюдента з коефіцієнтом t , значення якого обирали, виходячи з довірчої ймовірності 0,95, достовірність відхилення $p \leq 0,05$ та відносною похибкою не вище 5%.

Розділ 3 «Методологія багатокритеріального синтезу ФММ машин пакування харчових продуктів» присвячений розробленню методології багатокритеріального синтезу машин пакування харчових продуктів та реалізації її на прикладі машин пакування штучних і дрібно-штучних харчових продуктів.

Запропоновано оцінювати пакувальне обладнання за комплексним критерієм ефективності – ОЕЕ для різних комбонувань функціональних мехатронних модулів:

$$OEE = A \cdot P \cdot Q = \frac{\sum_{j=1}^n (T_{3j} - DTL_j)}{\sum_{j=1}^n (T_{3j})} \cdot \frac{\sum_{i=1}^k (OT_i \cdot TP_i)}{\sum_{j=1}^n (T_{3j} - DTL_j)} \cdot \frac{\sum_{i=1}^k \{OT_i (TP_i - m_i)\}}{\sum_{i=1}^k (OT_i \cdot TP_i)}, \quad (1)$$

де A – доступність (надійність); P – продуктивність; Q – якість; i – кількість функціональних підсистем (ФПС) для ФММ або пакувальної машини; j – кількість оброблених одиниць (продукт, споживча упаковка, пакувальний матеріал); m_i – кількість відбракувань за час роботи обладнання; T_3 – час роботи одиниці обладнання (зміна, доба, т.ін.); DTL – втрати на зупинки; OT – робочий час, що залишився після обліку простоїв – операційний час; TP – фактична кількість одиниць продукції, випущена за операційний час. Розроблені умови синтезу пакувальної машини на базі критеріальної оцінки окремих ФММ об'єднані двома основними групами оцінок: функціональні та економічні (рис.2).

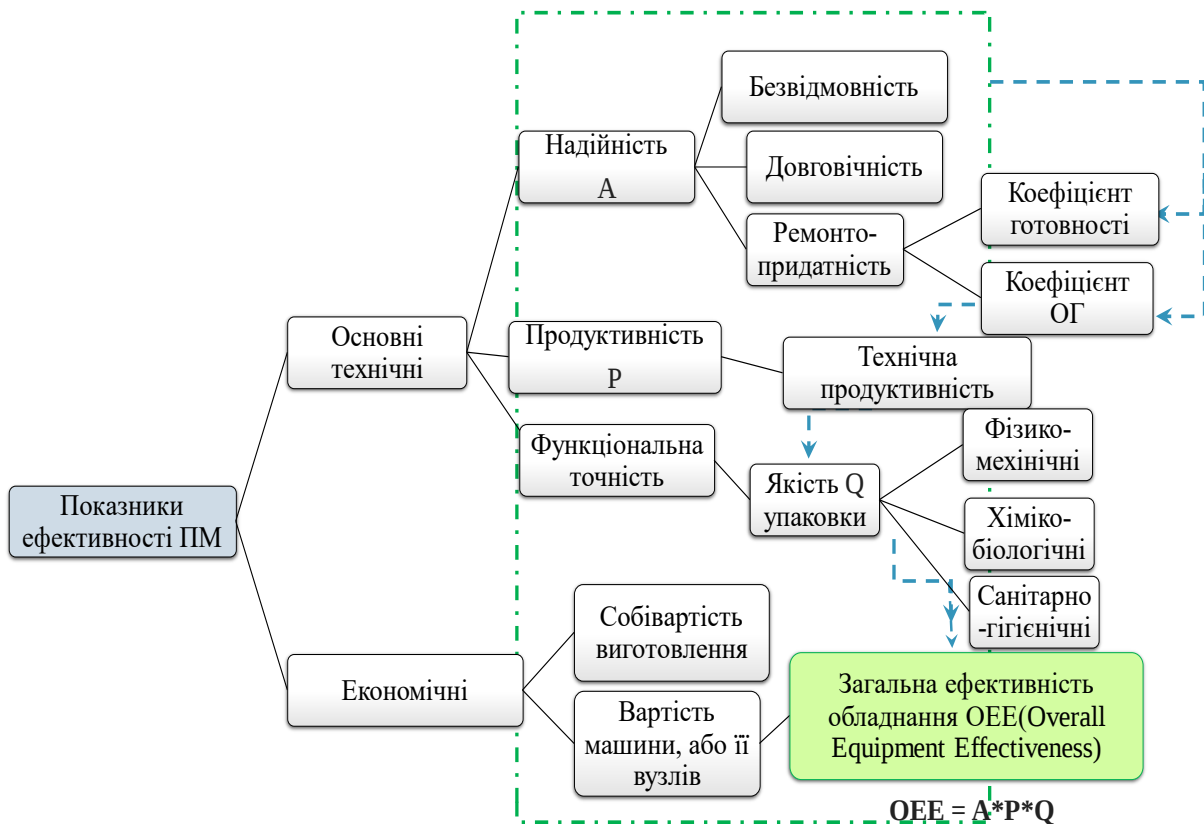


Рис.2. Синтез пакувальної машини на базі критеріальної оцінки окремих ФММ (коефіцієнт ОГ – оперативна готовність ПМ)

ПМ складається за принципом взаємозв'язків між рівнями: сформується як множина на елементних засобах $\Phi П = \{\Phi П^0, \Phi П^1, \dots, \Phi П^{u-1}\}$, де відповідно кожен

формує виконання для заданої елементарної функції у множині процесу пакування для функціонального мехатронного модуля: $\Phi MM = \{\Phi MM^0, \Phi MM^1, \dots, \Phi MM^{\mu-1}\}$.

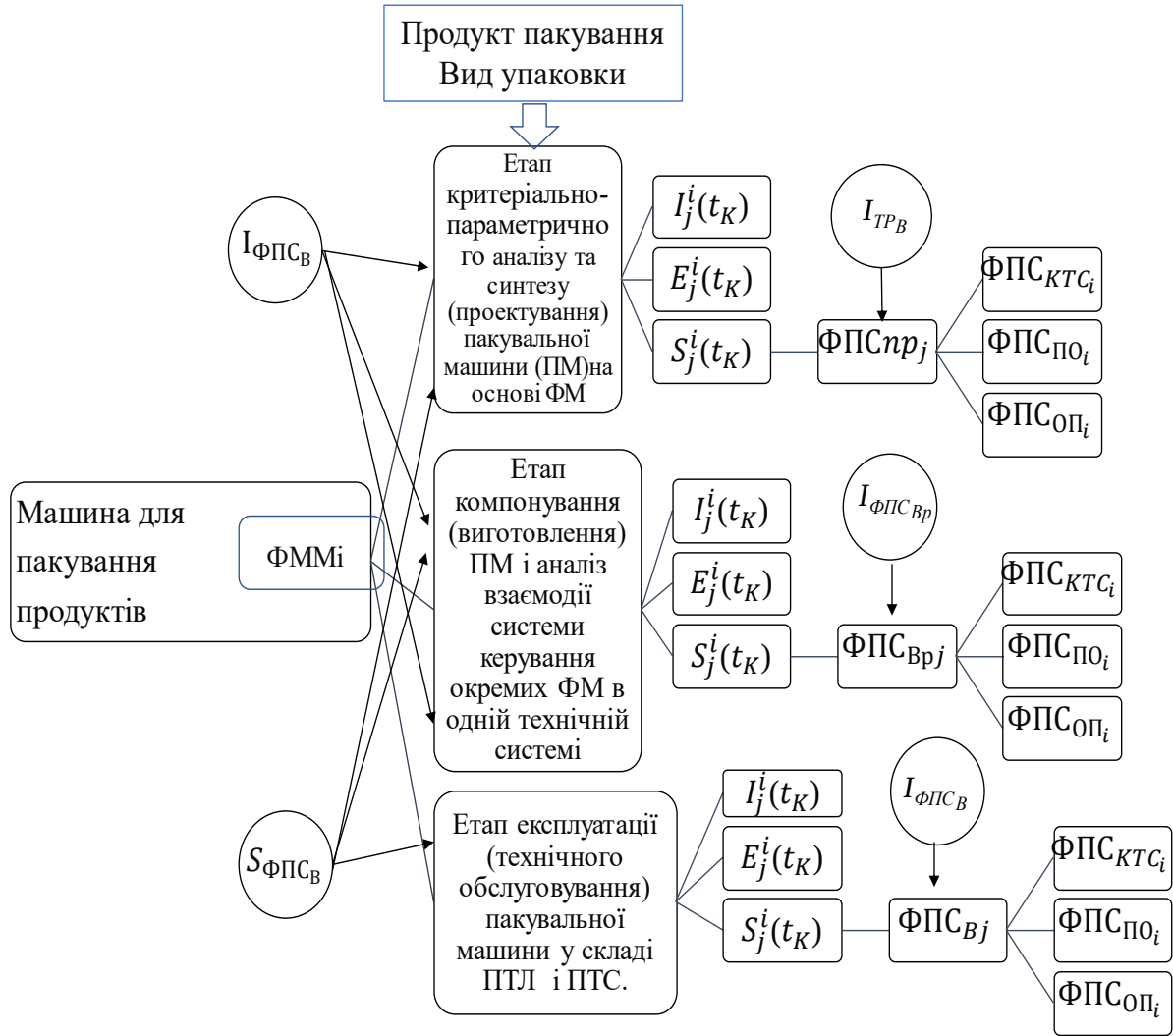


Рис. 3. Модель системи перетворень на етапах синтезу ФММ пакувальної машини: I_{TPB} – це інформація, яка містить вимоги до конструкції ФММ; $I_{\Phi PC_{Bp}}$ – інформація, яка описує вимоги відповідно функціональної підсистеми виготовлення ФММ; $I_{\Phi PC_B}$ – інформація, яка містить вимоги для умов щодо виготовлення та експлуатації; $S_j^i(t_K)$ – матеріали та комплектуючі щодо виготовлення; $S_{\Phi PC_B}$ – виготовлений ФММ (синтезований із кластерів мехатронних функціональних пристроїв пакувальних машин)

Враховуючи можливість формування для різних варіантів щодо характеристики функціональних підсистем, таких як $X_{\Phi PC_i}$ забезпечується цілеспрямованим вибором із сукупності множини $\{\Phi PC^0\}$ для сукупності від елементів $\Phi P_i \subset \Phi PC^0$, які забезпечують умови виконання заданої множини функцій, як $\{\Phi^0\}$: $X_{\Phi PC_i}: [\{\Phi_i^0\} \rightarrow \{\Phi PC_i^0\}; \{\Phi_i^1\} \rightarrow \{\Phi PC_i^1\}; \dots; \{\Phi_i^N\} \rightarrow \{\Phi PC_i^N\}]$; з умовою обмежень для параметрів:

$$X_{\Phi PC_{\min}}^1 \leq X_{\Phi PC}^1 \leq X_{\Phi PC_{\max}}^1; X_{\Phi PC}^1 = \{X_{\Phi PC_1}^1, X_{\Phi PC_2}^1, \dots, X_{\Phi PC_{k1}}^1\};$$

$$X_{\Phi PC_{\min}}^N \leq X_{\Phi PC}^N \leq X_{\Phi PC_{\max}}^N; X_{\Phi PC}^N = \{X_{\Phi PC_1}^N, X_{\Phi PC_2}^N, \dots, X_{\Phi PC_{k_\mu}}^N\}, \quad (2)$$

де i – індекс характеристики для функціональної підсистеми від $X_{\Phi PC_i}$ $0 \leq i \leq M$; M – кількість характеристик $X_{\Phi PC_i}$; μ – індекс рівня ієрархії; N – кількість рівнів ієрархії; $X_{\Phi PC_{\min}}, X_{\Phi PC_{\max}}$ – діапазони параметрів ефективності функціональної модульної підсистеми, де j – вершина ієрархії; k_μ – кількість параметрів функціональної ефективності на j -му рівні ієрархії.

Модель системи синтезу пакувальної машини складається з об'єктів (елементів, функціональних модулів підсистем) певного ієрархічного рівня: технічних (ΦPC_{KT3_j}), програмних засобів ($\Phi PC_{ПЗ_j}$) та оперативного персоналу ($\Phi PC_{ОП_j}$), які одночасно є операторами й операндами системи. Вони здійснюють цілеспрямовану дію матеріального $S_N(t_K)$, енергетичного $E_N(t_K)$ та інформаційного $I_N(t_K)$ типів на об'єкт перетворення. Згідно рис.3: $I_j^i(t_K)$ – інформаційна дія i -го типу на j -й об'єкт у момент часу t_K ; $E_j^i(t_K)$ – енергетична дія i -го типу на j -й об'єкт у момент часу t_K ; $S_j^i(t_K)$ – матеріальна дія i -го типу на j -й об'єкт у момент часу t_K ; ΦPC_j – j -та функціональна підсистема; ΦPC_{KT3_j} – група технічних засобів, що беруть участь у реалізації j -ї функції (j -та функціональна підсистема комплексу технічних засобів КТЗ); $\Phi PC_{ПЗ_j}$ – група програмних засобів, що беруть участь у реалізації j -ї функції (j -та функціональна підсистема ПЗ); $\Phi PC_{ОП_j}$ – група тих, що беруть участь у реалізації j -ї функції ергатичних засобів (j -та функціональна підсистема програми керування ФММ). Відповідно до результату процесу проектування та розроблення пакувальної машини, відбувається змінення стану технічної системи. З формулюванням вимог (до технічного завдання) із створення (модернізації) і до впровадження їх в нових (модернізованих) досліджуваних зразках, конструкторської, технологічної та іншої документації проекту. Зв'язки щодо зовнішнього технологічного середовища визначають як сукупність додаткових критеріальних вимог до синтезу пакувальної машини, для функціонування в технологічних системах. Для переліку і характеристики критеріїв для переваги ΦPC_j та комплекси заходів удосконалення спрямовані на виконання цільових вимог технологічного процесу пакування харчового продукту певної групи за рахунок розвитку елементів підсистем пакувальної машини. Отримані зміни для цільових вимог в системах для вищого порядку – економічних, екологічних й інших потреб є основою для формування комплексних критеріїв переваги для характеристик виробу ΦPC_{Bj} (тобто пакувальної машини).

Для керування станом пакувальної машини сформовано вираз, як сума-рівнянь:

$$U(t) = C(S_i^j) + C(E_i^j) + C(I_i^j), \quad (3)$$

де $C(S_i^j)$, $C(E_i^j)$, $C(I_i^j)$ – вартість множини витрат матеріального, енергетичного й інформаційного типів відповідно.

При цьому можуть бути враховані обмеження на вектор станів X_k та управління U_k відповідно набором нерівностей:

$$h_j(x(k), k) \geq 0 \quad (j=1, \dots, s_k; k=0, 1, \dots, N), \quad (4)$$

$$g_i(u(k), k) \geq 0, \quad (i=1, \dots, m_k; k=0, 1, \dots, N-1). \quad (5)$$

Обмеження можуть задаватися разом на змінні управління і стани:

$$g_i(x(k), u(k), k) \geq 0, (j = 1, \dots, m_k; k = 0, 1, \dots, N-1). \quad (6)$$

Для випадку, коли ФПС переходить із стану $x(0)$ у стан $x(k)$ за k кроків (етапів), його можна записати у вигляді виразу:

$$f_{k-l}(X_{\text{ФПС}_l}) = \max_{U_{l+1}} [E_{l+1}(X_{\text{ФПС}_l}, U_{l+1}) + f_{k-(l+1)}(X_{\text{ФПС}_{l+1}})], \quad (7)$$

де $U_l = \{u_l(1), \dots, u_l(m)\}$ – рішення (управління), яке вибране на l -му кроці; $X_{\text{ФПС}_l} = \{x_l(1), \dots, x_l(m)\}$ – стан ФПС на l му кроці; E_{l+1} – безпосередній ефект, який досягається на l – му кроці; f_{n-1} – оптимальне значення ефекту, який досягається за $k-l$ кроків; k – кількість кроків. Під час визначення кожного наступного значення функції f_{n-1} використовується значення функції $f_{n-(l+1)}$, отримане на попередньому кроці (етапі), й безпосереднє значення ефекту $E_{l+1}(X_{\text{ФПС}_l}; U_{l+1})$, яке досягається в результаті вибору рішення U_{l+1} при заданому стані системи $X_{\text{ФПС}_l}$. Процес підрахунків значень функції f_{n-1} ($l = \overline{0, k-1}$) здійснюється за початковою умовою $f_0(X_{\text{ФПС}_k}) = 0$, яка означає, що за межами кінцевого стану функціональної підсистеми виробу ефект дорівнює нулю. Для пошуку рішення (щодо управління) на етапах синтезу ФММ із застосуванням кластерної бібліотеки ФММ пакувальних машин в бібліотеці обладнання EPLAN застосовано принцип оптимальності Р. Беллмана. Послідовність розрахунку (1) критерія ОЕЕ виконано на основі розробленої підпрограми в ПП Excel, за допомогою якої здійснюється аналіз окремих ФММ_i під час створення нових пакувальних машин для харчових продуктів.

Створення нового інноваційного пакувального обладнання здійснюється методами комбінаторики на основі існуючих або новостворених та апробованих кластерних бібліотек ФММ. Реалізація концепції багатокритеріального синтезу виконана під час розроблення інноваційних проектів машин пакування штучних та дрібно-штучних харчових продуктів. Системний підхід до аналізу конструкцій обладнання для пакування дрібноштучної та штучної харчової продукції у споживчу упаковку передбачає розгляд їх побудови у вигляді концептуальних моделей, тобто таких абстрактних моделей, які відображають їх структуру побудови та зв'язки між їх елементами. Аналіз конструкцій показує, що кожний виробник пакувальних машин пропонує як одиничні зразки, так і широкий спектр їх модифікацій, які створені шляхом використання відповідних методів компонувань. Граф логічних зв'язків між прийнятими до розгляду ФММ (за структурою направленої подачі стрічки рулонного пакувального матеріалу) наведено як формалізований математичний вираз:

$$\begin{aligned} S : & m_1(x_{11} \vee x_{12} \vee x_{13} \vee x_{14} \vee x_{15}) \wedge m_2(x_{21} \vee x_{22} \vee x_{23}) \wedge m_3(x_{31} \vee x_{32} \vee x_{33}) \wedge \\ & \wedge m_4(x_{41} \vee x_{42} \vee x_{43} \vee x_{44} \vee x_{45}) \wedge m_5(x_{51} \vee x_{52} \vee x_{53} \vee x_{54}) \wedge m_6(x_{61} \vee x_{62}) \wedge \\ & \wedge m_7(x_{71} \vee x_{72} \vee x_{73}) \wedge m_8(x_{81} \vee x_{82} \vee x_{83} \vee x_{84}) \wedge m_9(x_{91} \vee x_{92} \vee x_{93} \vee x_{94}) \wedge \\ & \wedge m_{10}(x_{101} \vee x_{102} \vee x_{103} \vee x_{104}) \wedge m_{11}(x_{111} \vee x_{112} \vee x_{113}), \end{aligned} \quad (8)$$

де S_i – реалізація службової функції ПМ (виконання технологічної операції пакування), m_i – технологічні переходи, виконані відповідними ФММ; варіант конструкції $\text{ФПС}_{ij} = \text{ФП}_{ij}$ відповідає x_{ij} . Зважаючи, що на даному етапі немає одного

сформованого рішення щодо структури ФММ_i, потрібно створити перелік типових ФП, що можуть входити до складу ФММ_i заданого призначення (подачі рулонного пакувального матеріалу). Кожному ФП_i присвоєні значення критеріїв оптимальності, які відомі заздалегідь або визначені шляхом експериментального дослідження при порівнянні всіх ФП_i на одному переході або операції m_i. Поставлена задача розглядалась як оптимізаційна однокритеріальна, тобто:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n P_i x_i \geq P_{i(\text{зад})} \rightarrow \max \\ x_i \in \text{ФП}_j; i, j = \overline{1n} \end{array} \right\}; \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n OEE_i x_i \geq OEE_{(\text{зад})} \rightarrow \max \\ x_i \in \text{ФП}_j; i, j = \overline{1n} \end{array} \right\}; \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n K_{\Gamma_i} x_i \geq K_{\Gamma(\text{зад})} \rightarrow \max \\ x_i \in \text{ФП}_j; i, j = \overline{1n} \end{array} \right\}. \quad (9)$$

Тобто оптимізація проводилась за граничними значеннями $P_{i(\text{зад})}$; $OEE_{(\text{зад})}$; $K_{\Gamma(\text{зад})}$ – відповідно граничні значення критерію продуктивності, критерію загальної ефективності обладнання; коефіцієнту готовності. Далі оцінювалась структура ФММ для ПМ методом пошуку Парето ефективних рішень.

Під час застосування багатокритеріальної оптимізації використовується інтегральний критерій із напрямом екстремуму:

$$F(x) = \{f_1(P_i), f_2(OEE_i), f_3(K_{\Gamma_i})\} \rightarrow \max, \quad (10)$$

прийняті до розгляду критерії оптимальності об'єднуються в один інтегральний критерій та вказується напрям екстремуму.

Для отримання кінцевого варіанту синтезу ФММ використано метод пошуку оптимального варіанту структури, який базується за принципом: виділення множини домінуючих альтернатив і серед них оптимальної та виключення ймовірності відсіювання потенційно більш ефективних варіантів у порівнянні з тими, які приймаються рішенням для подальшого синтезу.

Результати розрахунків критеріїв оцінювання ФММ наведено на графіках (рис.4). За аналізом отриманих результатів розрахунків методом Парето оптимальних рішень, обрано компоновку ФММ, наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Варіанти структур ФММ машини для пакування дрібно-штучних харчових продуктів

Варіант структури	ФПСі _j , що формують структуру ФММ, при $OEE \rightarrow \max$	ФПСі _j , що формують структуру ФММ, при $K_{\Gamma} \rightarrow \max$	ФПСі _j , що формують структуру ФММ, при $P \rightarrow \max$
ФММ подачі рулонного пакувального матеріалу	X ₁₂ ; X ₂₂ ; X ₃₂ ; X ₄₁ ; X ₅₄ ; X ₆₁ ; X ₇₂ ; X ₈₃ ; X ₉₂ ; X _{10.3} ; X _{11.2}	X ₁₂ ; X ₂₁ ; X ₃₃ ; X ₄₂ ; X ₅₃ ; X ₆₂ ; X ₇₁ ; X ₈₂ ; X ₉₄ ; X _{10.2} ; X _{11.1}	X ₁₄ ; X ₂₂ ; X ₃₁ ; X ₄₁ ; X ₅₁ ; X ₆₁ ; X ₇₂ ; X ₈₃ ; X ₉₂ ; X _{10.3} ; X _{11.1}
$\frac{\sum_{i=1}^n \text{критерій}(x_{ij})}{n} \rightarrow \max$	89,76	0,99	95,97

Враховуючи результати проведеного критеріального аналізу, на підставі введених початкових даних по ФММ отримано перелік ФПС_j за обраним критерієм оптимальності OEE для оцінки його якості та структури пакувальної машини загалом.

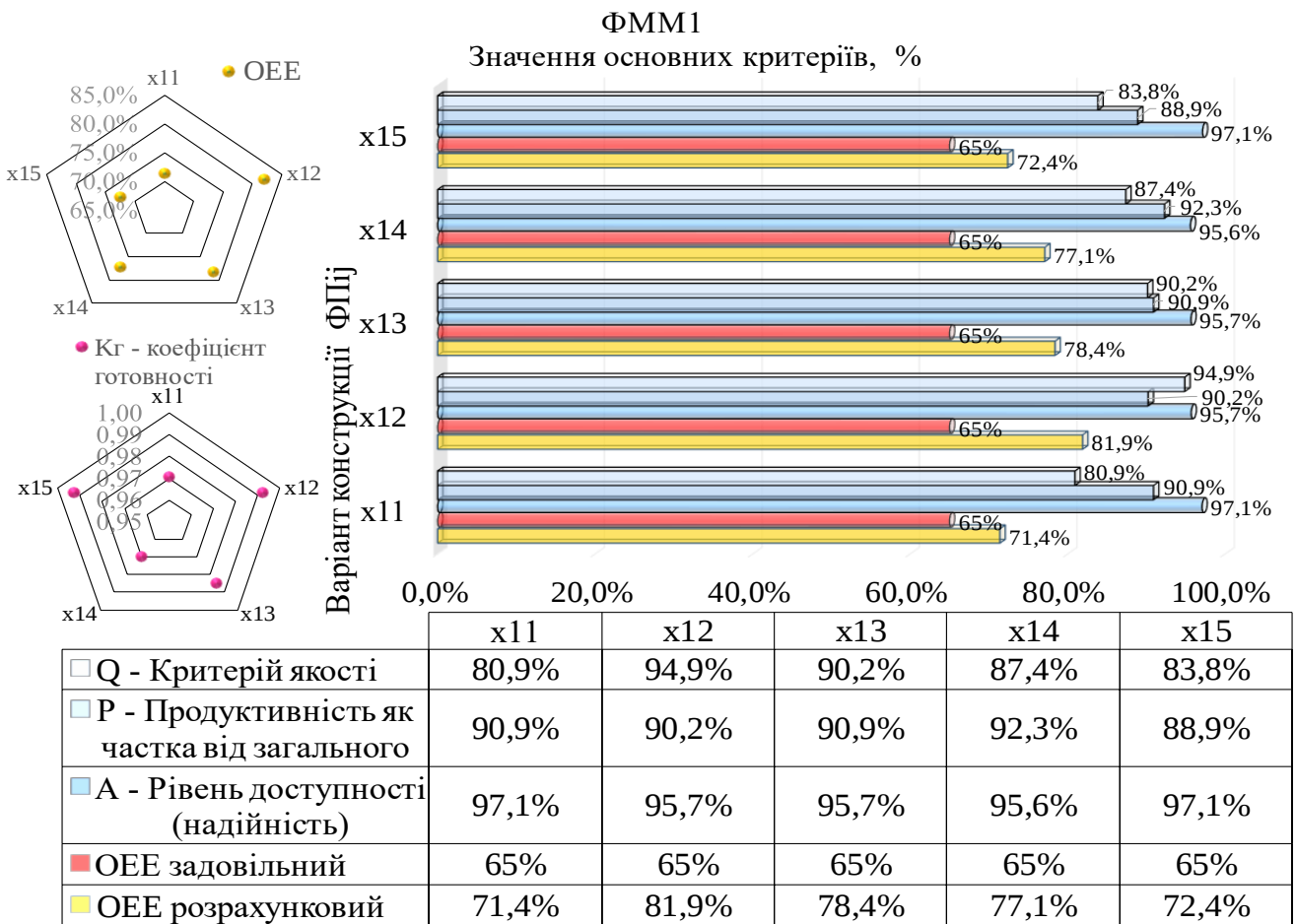


Рис.4. Гістограма критеріальної оцінки складу ФММ подачі рулонного пакувального матеріалу

Для вибору найбільш раціонального рішення використовують метод розстановки пріоритетів. Результати нормування відносних пріоритетів за загальною сумою абсолютних пріоритетів наведено в таблиці 2. Якість розробленого ФММ порівнювали із найближчими за призначенням прототипами. Так для ФММ подачі рулонного плівкового матеріалу прийнято такі критерії: K_1 – рівень конструкторської розробки(визначається можливостями конкретного виробника); K_2 – рівень конструкторської розробки(визначається конкуренцією на ринку); K_3 – точність виконання основної функції (заданого закону руху робочих органів); K_4 – економічність виконання основної функції; $K_{5,4}$ – надійність; K_6 – технологічність виготовлення; K_7 – ремонтнопридатність. A_1 (електропневматичний привод ФММ) переважає над варіантом A_2 (електричний привод), а під час розгляду варіантів A_2 і A_3 (електромеханічний привод лінійний), A_4 (пневматичний привод), A_5 (комбінований привод). Коефіцієнт значущості реалізації (A_1) визначається як: $R_{A_1} = \sum_{j=1}^N \beta_j^k \beta_i^a(K_j)$. (11)

Для пошуку Парето оптимальних варіантів математично задача формулюється як:

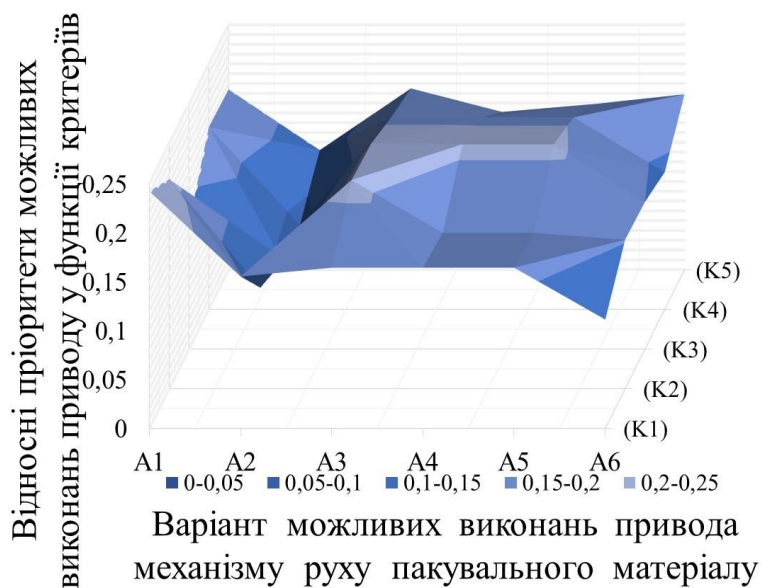
$$f_i(x) \rightarrow \min_{x \in D}; D \subset R^n (i = \overline{1, k}). \quad (12)$$

Таблиця 2

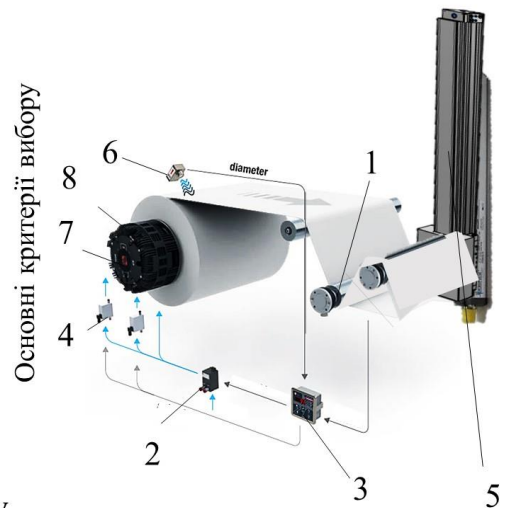
Основні результати порівняльної оцінки відносних пріоритетів реалізацій ФММ подачі плівкового пакувального матеріалу

Варіант можливих виконань привода механізму руху пакувального матеріалу	Відносні пріоритети можливих виконань привода механізму руху пакувального матеріалу у функції критеріїв				
	β_1^a (K ₁)	β_1^a (K ₂)	β_1^a (K ₃)	β_1^a (K ₄)	β_1^a (K ₅)
A ₁	0,242	0,214	0,128	0,186	0,184
A ₂	0,155	0,103	0,094	0,086	0,122
A ₃	0,164	0,213	0,210	0,196	0,185
A ₄	0,164	0,159	0,209	0,196	0,161
A ₅	0,164	0,159	0,209	0,196	0,169
A ₆	0,111	0,152	0,150	0,140	0,179

Діаграма Парето рішень (рис.5) візуалізує висновок: з точки зору встановлених критеріїв, найбільшою мірою їм відповідають перший і третій варіанти привода ФММ подачі рулонного пакувального матеріалу – електромеханічний та електропневматичний.



а)



б)

Рис.5. Приклади компонувань досліджуваного прототипу ФММ подачі рулонного пакувального матеріалу пакувальної машини із різними ФПС: 1- натяжний приводний ролик; 2 - пневморегулятор гальма; 3 – контролер; 4 - блок керування, забезпечує заданий тиск на гальмо; 5- позиційний привод із пневматичним циліндром двосторонньої дії із системою протиповороту штока і датчиком руху ролика натягу стрічки (п'єзоелектричний пристрій BTL5 (Balluff)); 6 – ультразвуковий датчик контролю діаметра рулона (сигнал 4..20мА); 7 – пристрій рулонотримача з цифровим драйвером для покрокових двигунів з вбудованими системами bluetooth NFC; 8 – фрикційне пневматичне гальмо

3D поверхня екстремумів (рис.5), відповідає варіанту запропонованої структури ФММ, містить інформацію про склад ФММ пакувальної машини та сумарні числові значення по кожному із заданих критеріїв оптимальності. В ході моделювання використана об'єктно орієнтована концепція з елементами функціональних пристроїв кластерної бібліотеки моделей виробників пакувального обладнання та оболонка для проектування технічних систем EPLAN. Розроблена концепція багатокритеріальної оптимізації за принципом пошуку Парето-ефективних рішень включає програму, що генерує усі можливі варіанти структури машини та будує графік залежності значень часткових критеріїв оптимальності. Принциповими особливостями синтезу ФММ пакувальної машини є додаткова потреба виконання досліджень із кінематики, динаміки руху об'єктів пакування та робочих органів і енерговитрат тривалості виконання операцій та інших параметрів.

Розділ 4 «Синтез ФММ пакування дрібно - штучних продуктів у сформований рукав на обладнанні горизонтального типу» присвячений динамічному синтезу пневмопривода ФММ переміщення штучних продуктів із метою реалізації оптимального закону руху поршня та за умови забезпечення заданої продуктивності ПМ й електропневмоприводу зі східчасто змінним навантаженням у горизонтальних машинах пакування дрібно-штучних харчових продуктів у полімерний рукав. Поглиблене дослідження ФММ ПМ із пневмо- та електроприводами обумовлено особливостями врахування зовнішніх навантажень в структурі їх керування рис.6.

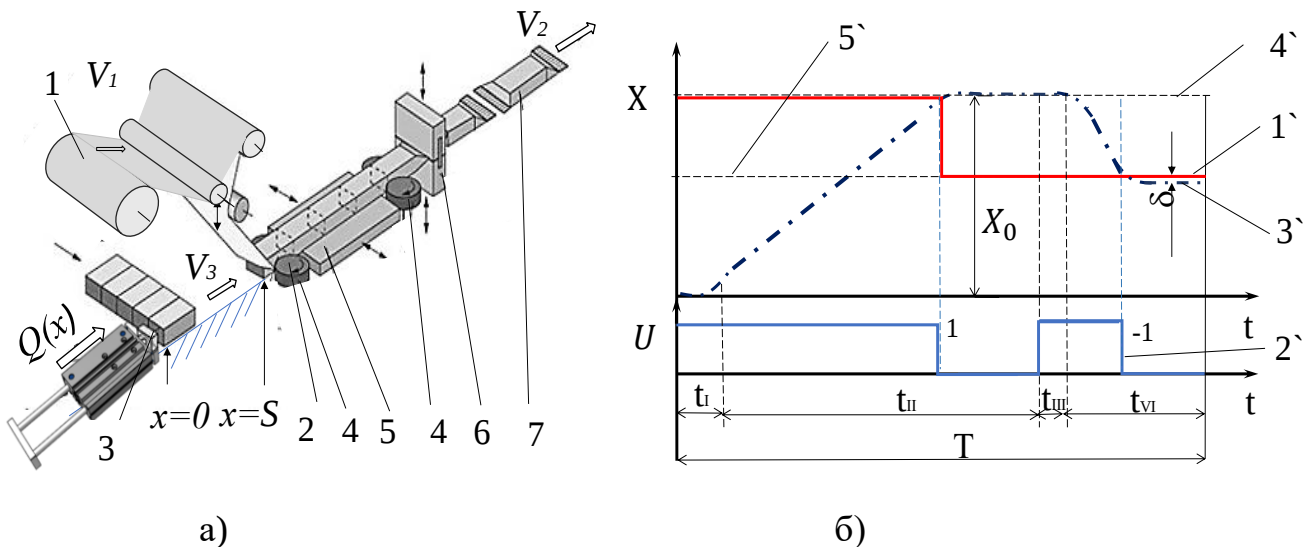


Рис.6. Узагальнена характеристика дослідного ФММ ПМ пакування штучних харчових продуктів у тришовний пакет: 1 – ФММ подачі пакувального матеріалу; 2 – ФП формування упаковки; 3- ФММ переміщення продуктів у рукав; 4 – ролик; 5 – ФММ формування поздовжнього шва; 6 – ФММ формування зварювальних поперечних швів; 7 – ФММ – транспортна система відведення готової упаковки; 1' – вхідний вплив; 2' – команда впливу на соленоїд керуючого розподільника; 3' – закон руху поршня робочого циліндра; 4' – межі впливу (бажане значення); δ - допустима похибка; а) технологічна схема б) комбінований закон руху ведучої ланки в позиційному приводі ФММ із врахуванням надходження сигналів керування від електромагнітних реле електропневматичного розподільника; T – час кінематичного циклу роботи штока; x_0 – інтервал переміщення за повний час руху T

На рис.6 наведено технологічну схему машини-автомата для пакування дрібно-штучних виробів у горизонтальний рукав із полімерної плівки та кінематичні характеристики руху робочого органу ФММ зіштовхування штучних виробів. ФММ зіштовхування штучних виробів із електромеханічним приводом працює за лінійним – модифікованим законом. В основу концепції побудови структури електропневматичного слідкувального приводу, що характеризується підвищеною точністю і швидкістю, покладено два фундаментальних принципи мехатронного підходу: принцип домінування керуючої ЕОМ і принцип конструктивної та функціональної інтеграції. Керуюча система повинна бути оснащена необхідними інтерфейсними модулями, в першу чергу цифро-аналоговими (ЦАП) і аналого-цифровими (АЦП) перетворювачами, а також пристроями обміну дискретними сигналами. При цьому на керуючу комп'ютерну частину слідкувального приводу покладається вирішення завдань формування впливів, перетворення інформації, отриманої від інформаційно-вимірювальної підсистеми в цифровому вигляді, її динамічної корекції і фільтрації та формування на виконавчих функціональних пристроях - ФП_i до відповідного закону руху. Це дає можливість значно розширити функціональні можливості слідкувального приводу і спростити реалізацію законів керування вихідної ланки ФП_i. Дистанційне оперативне управління надлишковим тиском стисненого повітря у вихідній порожнині пневмоциліндра, з високою точністю змінює пропорційно вхідний електричний сигнал. Цю дію покладено на мехатронний електропневматичний регулятор (МЕПР). Структура МЕПР (рис. 7) включає силову пневмомеханічну частину, пілотну камеру, датчик тиску, дискретні розподільники з електричним управлінням і плату управління з мікроконтролером. Мікропроцесорний пристрій керування у складі з регулятором забезпечено підсилювачем потужності, який впливає на електропневматичні розподільники для регулювання тиску в проміжній (пілотній) камері.

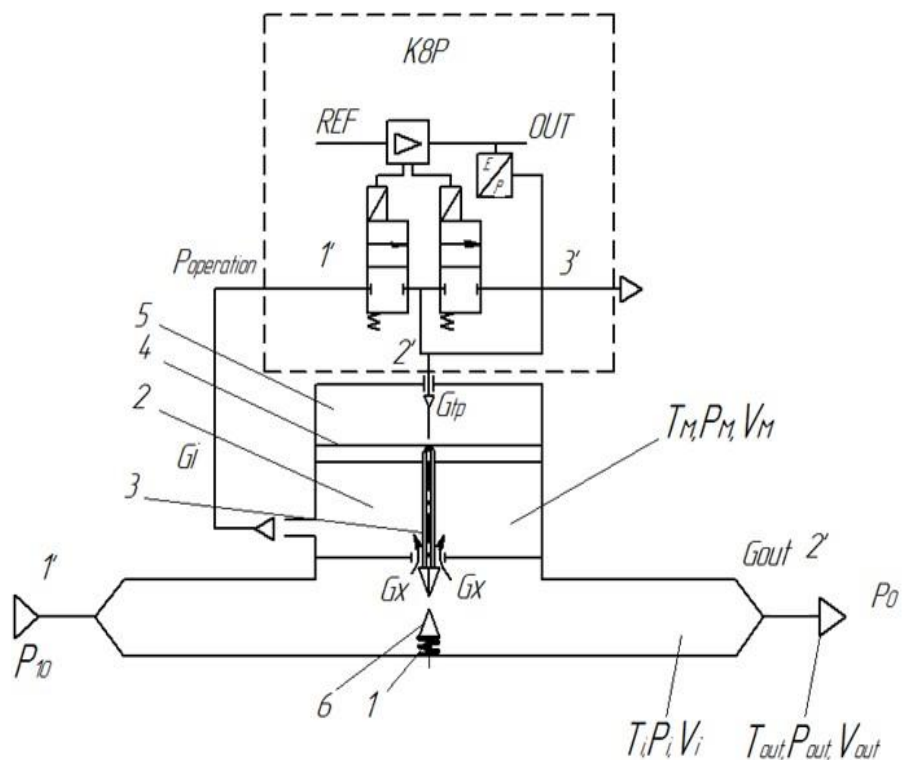


Рис.7. Пневмомеханічна система пропорційного мехатронного електропневматичного регулятора тиску у складі ПМ: 1 – шток; 2 – камера підтримування встановленого тиску на магістральному каналі; 3 – порожнистий шток для зв'язку між робочими камерами; 4 – мембрана; 5 – камера регулювання тиску; 1' – магістральний канал вхідного тиску; 2' – канал вихідного тиску; 3' – вихлопний канал керуючого модуля; 6 - заслінка

Залежно від неузгодженості між заданою дією і тиском, виміряним датчиком, розподільники мають три дискретних стани.

В одному з них тиск у пілотній камері підвищується, в іншому скидається, в третьому стабілізується завдяки тому, що пілотна камера закривається. Тиск створює регульоване зусилля, що діє на виконавчий орган - поршень регулятора. Канал 3'є каналом вихлопу під час скидання повітря. Поршень 3 і мембрана перебувають під дією командного тиску $P_{operftion}$ від клапанів управління електропневматичного регулятора - задатчика.

Запропонована конструкція побудована шляхом поєднання механічного регулятора тиску з витратною характеристикою до 10^5 (л/хв) із керуючим електропневматичним регулятором К8Р (Камоці). За основу обрано подвоєну систему 2/2 пневмоклапанів із блоком зворотнього зв'язку (аналоговий сигнал 0..10В, відхилення у межах 0,2%).

Рівняння рівноваги мембрани, як динамічної ланки із зосередженими параметрами m , $C_{пр}$, ξ - наведено як:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + \xi \frac{dx}{dt} + C_{пр}x - F_{01} + F_{02} - F_{\Sigma} = 0, \quad (13)$$

де F_{Σ} - сума сил нелінійного тертя, аеродинамічна підйомна сила та сили, що діють на мембрану і шток, Н; $C_{пр}$ - жорсткість пружини, Н/м; m – маса рухомої системи, кг; ξ - коефіцієнт демпфування; F_{01}, F_{02} - зусилля попереднього впливу механічної пружини 1 і газової пружини в камері 5, Н.

Робоча керована камера дозволяє змінювати масові витрати стисненого повітря. Зважаючи, що стан газу в порожнині змінюється за адіабатичним законом, можна записати: $C_c \cdot \frac{dP_c}{dt} = G_{i+1} - G_{out}$, де $C_c = \frac{V_c}{k \cdot R \cdot T_c}$, k – коефіцієнт адіабати; R – газова стала, Дж/(кг·К); T_c – температура в робочій керованій камері; К; V_c – об'єм робочої камери, м³. Витрати стисненого повітря крізь переріз дроселювання регулятора, на базі формул Сен-Венана й Ванцеля змінюються як:

$$\begin{cases} G_x = \mu_x \pi d_c x P_{10} \sqrt{\frac{2}{RT_{10}} \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P'_1}{P_{10}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P'_1}{P_{10}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \text{ де } \frac{P_i}{P_{10}} > \pi_{кр}, \\ G_x = \mu_x \pi d_c x P_{10} \sqrt{\frac{k}{RT_{10}}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}, \text{ де } \frac{P_i}{P_{10}} \leq \pi_{кр}, \end{cases} \quad (14)$$

де μ_x - коефіцієнт витрат в перерізі штока 3; x - хід тарелі клапана, м; P_{10} – тиск на вході в електропневматичний регулятор; P_i – тиск перед входом у керуючу систему електропневматичного регулятора, Па; $\pi_{кр}$ - критичне відношення тисків; k – показник адіабати повітря; T_{10} – температура гальмування у камері 2, К; d_c - діаметр поршня на штоці 3, м.

Враховуючи рівняння масових витрат, для запропонованої конструкції електропневматичного регулятора, отримано систему рівнянь щодо роботи регулятора:

$$\left\{ \begin{array}{l} G_i = \mu_i S_i P_i \sqrt{\frac{2}{RT_i} \frac{k}{k-1} \left[\left(\frac{P_{i+1}}{P_i} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_{i+1}}{P_i} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \text{ де } \frac{P_{i+1}}{P_i} > \pi_{кр}, \\ G_i = \mu_i \pi S_i P_i \sqrt{\frac{k}{RT_i} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}, \text{ де } \frac{P_i}{P_{10}} \leq \pi_{кр}, \\ m \frac{d^2 x}{dt^2} + D \frac{dx}{dt} + C_{пр} x - F_{01} + F_{02} - F_{\Sigma} = 0, \\ F_{\Sigma} = -P_m S_m + P_i S_c - P_{10} S_T + P_a S_m, \\ m \frac{d^2 x}{dt^2} + \xi \frac{dx}{dt} + C_{пр} x - P_{01} + P_{02} + P_m S_m - P_i S_c + P_{10} S_p + P_a S_m = 0, \end{array} \right. \quad (15)$$

де μ_i – коефіцієнт витрат в перерізі керуючої камери; S_i – площа прохідного перерізу керуючої камери, м²; P_i – абсолютний тиск у робочій камері, Па; T_i – температура у робочій камері, К; D – зовнішній діаметр перерізу сопла на виході регулятора, м; P_a – атмосферний тиск, Па; P_m – робочий тиск на мембрану регулятора, Па; S_m – площа мембрани, м²; S_c – площа сидла, м²; S_T – площа тарелі, м²; P_c – тиск у порожнині камери 2, Па; G_{i+1} – масова витрата, яка визначається керуючими клапанами, кг/с; G_i – масові витрати живлення керуючих клапанів, кг/с; T_c – температура повітря, К; π – відношення тисків на вході і на виході керуючої камери; P_{01}, P_{02} – тиск впливу газової пружини в камері, Н

Вирішення поставленої задачі зводиться до розв’язання оптимізаційної задачі з початковими умовами, в яких параметри не дорівнюють нулю, з подальшим згладжуванням розривної функції в момент відключення рушійної сили. При цьому рух поршня позиційного пневмопривода (рис.8, в) можна навести сукупністю чотирьох етапів:

I етап початковий. Спрацьовує керуючий сигнал від електромагнітних реле електропневматичного розподільника і рушійна сила збільшується ($Q \leq Q(x) \leq Q_{max}$). Закон руху поршня пневмоциліндра набуває параболічного виду. Починається рух робочої ланки;

II етап інтенсивного прискорення. Завершується під час зникнення сигналу керуючого електромагніту (перший соленоїд). Рушійна сила постійна ($Q_{max} = const$). Умова етапу: Q_{max} максимальна рушійна сила, що розвивається штовхачем, не викликає деформацію штучного продукту;

III етап перехідний. Спрацьовує електромагнітне реле електропневматичного розподільника (другий соленоїд). Рушійна сила зменшується ($Q_{max} \geq Q(x) \geq Q$) внаслідок опору стисненого повітря штокової камери пневмоциліндра;

IV етап – характеризується зворотнім рухом штока, під дією інтенсивного гальмування. Етап завершується під час вимкнення керуючого сигналу від другого соленоїда. Рушійна сила дорівнює нулю ($Q=0$). При цьому необхідно забезпечити відривність продукту від штовхача. Граничні умови на цьому етапі:

$$t = 0; \ddot{x} = 0; \dot{x} = 0; x = 0; \ddot{x} = \ddot{x}_{IV}; \dot{x} = 0; x = S,$$

де S - величина переміщення продукту з початкової позиції в кінцеву; $\ddot{x}_{IV}$ - величина прискорення продукту на етапі інтенсивного гальмування. Змінні кінематичні ха-

рактеристики роботи штока пневмоциліндра задані залежно від параметра x . Рівняння руху поршня пневмопривода двосторонньої дії матиме вигляд:

$$m\ddot{x} = p_1(x)F_1 - p_2(x)F_2 - P(x), \quad (16)$$

де m – зведена маса продукту та рухомих елементів привода; p_1, p_2 – тиск поршневої і штокової порожнин, $F_{1,2}$ – площа поршня пневмоциліндру. Зміна тисків у поршневій і штоковій порожнинах пневмоциліндру визначається:

$$\frac{dp_1}{dx} = \frac{k}{x_{01}+x} \left[\frac{f_1^e K p_m \sqrt{RT_m}}{F_1} \varphi(\delta_1) \cdot \frac{1}{\dot{x}} - P_1 \right]; \quad (17)$$

$$\frac{dp_2}{dx} = \frac{k}{S+x_{02}-x} \left[\frac{f_2^e K p_m^{(3k-1)/2k} \sqrt{RT_m}}{F_2 p_m^{(k-1)/2k}} \cdot \frac{1}{\dot{x}} \varphi\left(\frac{\delta_a}{\delta_2}\right) + P_2 \right], \quad (18)$$

де k – коефіцієнт адиабати стисненого повітря, $k=1,4$; x_{01}, x_{02} – початкова і кінцева координата руху поршня, R – газова стала повітря (287 Дж/кг·К), T_m – температура стисненого повітря (293°K), p_m – тиск пневмомагістралі (0,7 МПа); $\varphi(\delta_1)$ – витратна характеристика перерізу (м³/хв). З рівняння (15) тиск у вихлопній штоковій порожнині:

$$P_2(x) = (P_1(x)F_1 - m\ddot{x} - P(x))/F_2 \quad (19)$$

Продиференціювавши функцію $P_2(x)$ за змінною x , маємо

$$\dot{P}_2(x) = \frac{\dot{P}_1(x)F_1 - m\ddot{x} - \dot{m}\ddot{x} - \dot{P}(x)}{F_2}. \quad (20)$$

Тоді ефективна площа вихлопного отвору:

$$f_2^e = \frac{\left[P_2 - \frac{dp}{dx} \frac{S+x_{02}-x}{k} \right] \dot{x} F_2 p_m^{(k-1)/2k}}{k p_2^{(3k-1)/2k} \sqrt{RT_m} \varphi\left(\frac{\delta_a}{\delta_2}\right)} \quad (21)$$

Таким чином із урахуванням рівнянь (16) – (21), які описують параметри руху штоку, запишемо рівняння руху штучного продукту по нерухомій площині у комплексі із системою керування.

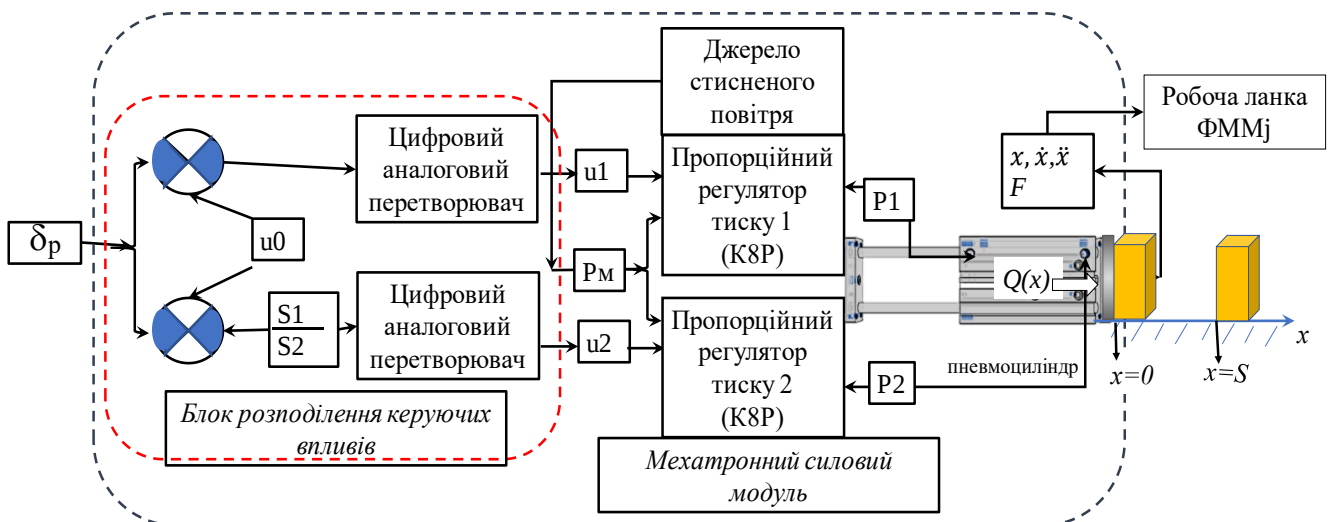


Рис.8. Узагальнена схема керування рухом вантажу по нерухомій площині у компоновці із структурною схемою стеження за рухом поршня пневмоциліндра

На рис.8 запропонована схема електропневматичних позиційних приводів пакувальної машини. Керуючі впливи u_1 і u_2 на два модуля регулювання тиску реалі-

зовані програмно за допомогою блока розподілення керуючих впливів. Для досягнення високої швидкодії привода і отримання максимального діапазону регулювання сили доцільно забезпечити узгоджену зміну впливів u_1 і u_2 відповідно до рівняння:

$$\begin{cases} u_1 = u_0 + \delta_p, \\ u_2 = (u_0 + \delta_0) \cdot \frac{S_1}{S_2}. \end{cases} \quad (22)$$

У цьому рівнянні використовуються вхідний вплив мехатронного ФП δ_p і опорне значення u_0 , яке задає тиску в порожнинах пневмоциліндра при нульовому вхідному впливі з урахуванням різниці площ поршня з боку штокової порожнини S_1 і безштокові порожнини S_2 . На рис.9 наведено графіки залежності кінематичних параметрів від часу переміщення штучного продукту в реалізованому режимі і зміна тиску в робочих порожнинах пневмоциліндра (силової частини позиційного привода електропневматичного) за таких вихідних даних: $Q_{\max}$, τ і x_τ . Визначено кінематичні параметри руху штучного продукту зіштовхуючим механізмом з пневмоприводом під час реалізації закону руху, наближеного до оптимального за швидкістю для різних ФММ у складі пакувальної машини.

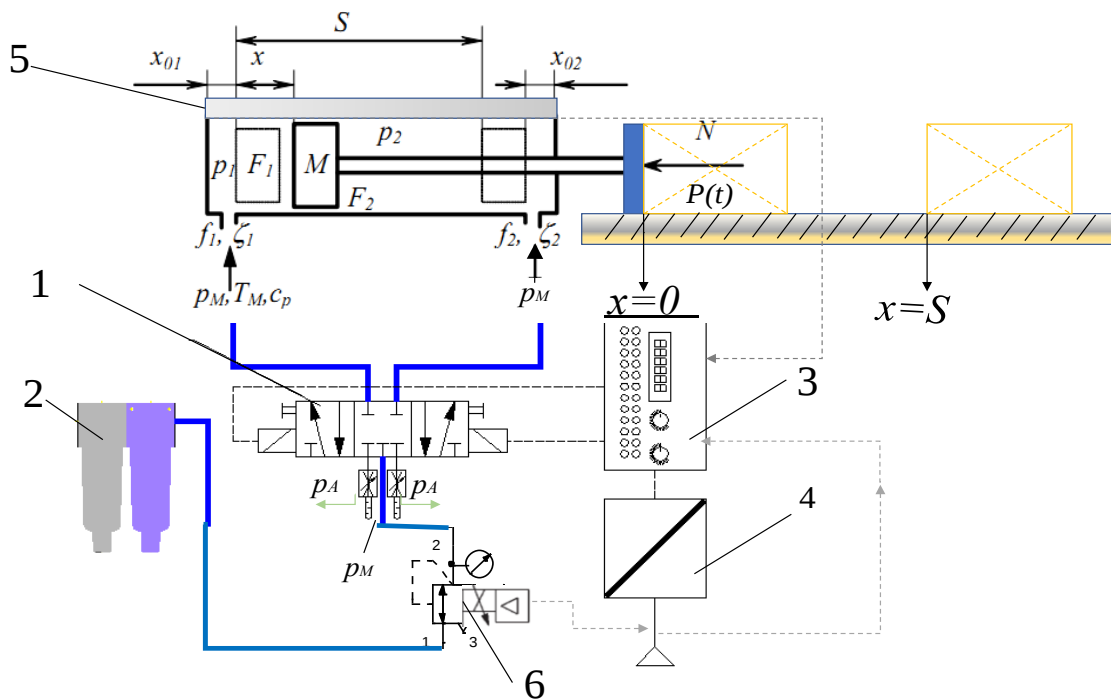
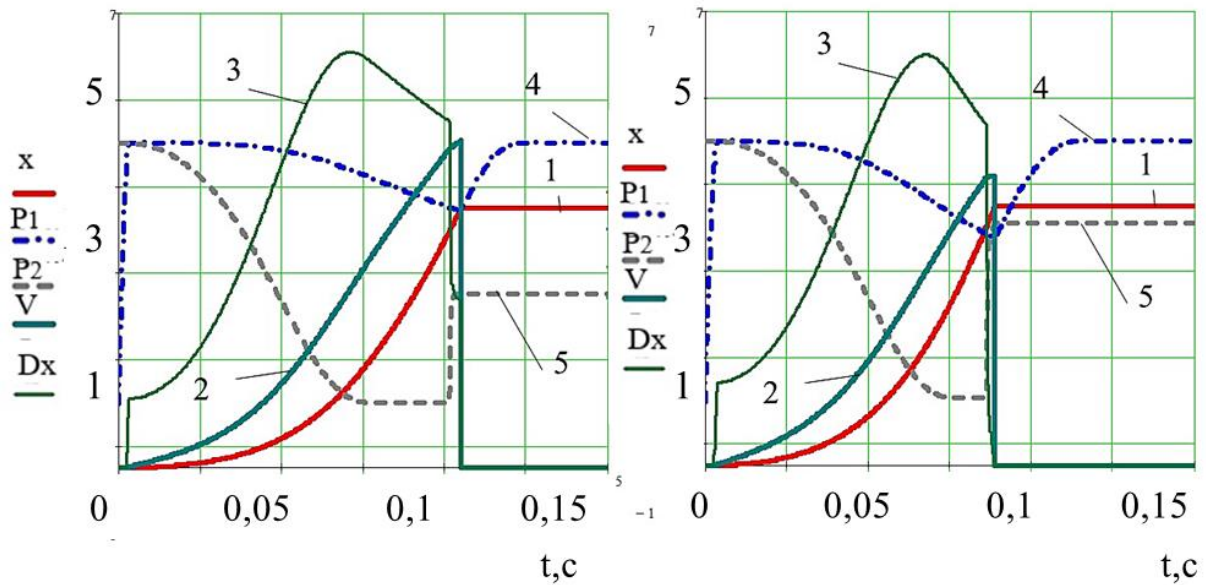


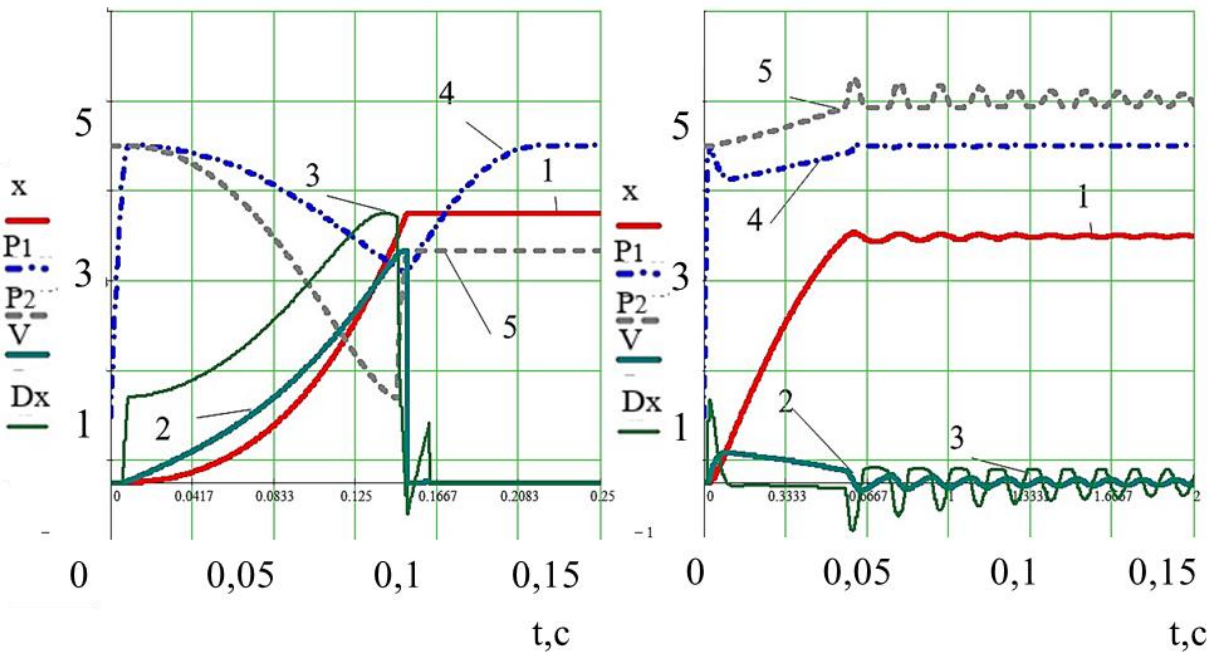
Рис.9. Структурована схема керування силовою частиною позиційного пневмопривода із динамічним навантаженням: 1 – керуючий розподільник 5/3 з перекритими лініями в центральній позиції, 2 – блок підготовки повітря, 3 – контролер, 4 – перетворювач керуючих сигналів автоматизованої системи керування

Зміна параметрів процесу переміщення продукту по нерухомій площині і робочих параметрів позиційного пневмопривода при $Q_{\max} = 20$ Н; маса штучного продукту $m_{\text{гр}} = 0,5$ кг; $f = 0,3$; $S = 0,2$ м; $F_1 = 4,9 \cdot 10^4$ м²; $F_2 = 3,77 \cdot 10^4$ м²; $P_m = 5 \cdot 10^5$ Па; $m = m_b + m_{\text{п}} = 0,5 + 1,5 = 2$ кг, де $m_{\text{п}} = 1,5$ кг маса рухомих частин пневмоциліндра; $P_{\text{с.тр.}} = 20$ Н – динамічне навантаження пневмоциліндра. Отримано математичний опис закону руху штока оптимального за швидкістю дії та результати розрахунку рис.10.



а)

б)



в)

г)

Рис.10. Узагальнені результати моделювання кінематичного навантаження і зміни тиску робочого позиційного пневмопривода (без врахування h – коефіцієнта в'язкого тертя поршня в пневматичному циліндрі) за умови мінімізації часу переміщення штучного продукту: а) діаметр трубопроводу 10мм, $f_1^e = 7.854 \cdot 10^5 \text{ м}^2$, б) діаметр трубопроводу 8 мм, $f_1^e = 5.027 \cdot 10^5 \text{ м}^2$, в) діаметр трубопроводу 6мм, $f_1^e = 2.827 \cdot 10^5 \text{ м}^2$, г) діаметр трубопроводу 4мм, $f_1^e = 1.257 \cdot 10^5 \text{ м}^2$; x – координата переміщення поршня (м); V – швидкість переміщення поршня (м/с); Dx – прискорення переміщення поршня; P_1 – тиск у поршневій камері пневмоциліндра (Па); P_2 – тиск у штоковій камері пневмоциліндра (Па); t час переміщення (с) В результаті математичного моделювання для позиційного пневмопривода із умовою зміни перерізу вихлопного отвору f_1^e , графік зміни координати поршня 1, швидкості руху поршня 2, прискорення поршня 3 і тисків в порожнині нагнітання 4 і вихлопної порожнини – 5.

В отриманих результатах чітко відстежується що при звуженні вихлопного перерізу робочого циліндра позиційного пневмоприводу, збільшується значення інерційної складової на 4 етапі (гальмування). Обґрунтовано вибір існуючих законів руху робочих органів ФММ на прикладі слідкувальних ЕПП. Синтезовано в системі ПП MathCAD мож-ливі закони руху робочих органів ФММ для виконання типових технологічних операцій, які дають можливість зменшити час їх виконання та реалізувати умову забезпечення заданої продуктивності з точністю позиціювання в межах технічних характеристик вибраних мехатронних модулів. В отриманих результатах чітко відстежується, що під час звуження вихлопного перерізу робочого циліндра позиційного пневмопривода, збільшується значення інерційної складової на 4 етапі (гальмування). Враховані умови початкового перепаду тисків повітря. Обґрунтовано вибір законів руху робочих органів ФММ на прикладі позиційних електропневматичних приводів. Синтезовано в ПП MathCAD можливі закони руху робочих органів ФММ для виконання типових технологічних операцій, які дають можливість зменшити час їх виконання та реалізувати умову забезпечення заданої продуктивності з точністю позиціювання в межах технічних характеристик вибраних мехатронних органів. Визначено кінематичні параметри руху штучного продукту ФММ зіштовхування з пневмоприводом під час реалізації закону руху, наближеного до оптимального за швидкістю для різних ФММ у складі пакувальної машини. Наведені результати синергетичного об'єднання вузлів точної механіки з електронними, електротехнічними, електропневматичними і комп'ютерними компонентами, які виконують кілька технологічних функцій, є основою запропонованої концепції багатокритеріального синтезу пакувальної машини.

У розділі 5 «*Синтез інтегрованих пневмосоплових ежекторів ФММ пакувальних машин*» наведено результати досліджень, що пов'язані з застосуванням моделей ежекторів для функціональних мехатронних модулів пакувальних машин. Наведено підходи імітаційного моделювання із математичним зв'язком між кінематичними і динамічними параметрами. Описано характер розподілу тиску і швидкості усередині ежекуючих модулів пакувальної машини під час зміни типу робочого середовища в однофазних пневмосистемах пакувальних машин. Об'єктами дослідження обрано функціональні пневмосоплові пристрої (рис.11) з ежекторами з L подібною компоновкою із сопловим перерізом у межах 0,5; 0,7; 1; 2мм.

Методами дослідження є чисельні методи у складі CFD моделі ежектора, отриманої в ПП FlowVision. Робочий процес ежектора у пакувальній машині для оброблення упаковки зводиться до наступного. Високо напірний (робочий) газ, що має повний тиск p^* і температуру гальмування T^* підводиться крізь сопло 1 (рис.12) у змішувальну камеру 4. У вхідному перерізі камери змішувача встановлюється статичний тиск p_2 , який менше повного тиску низько напірного газу p_2^* ежекції. Під дією різниці тисків низьконапірний газ (повітря) спрямовується у камеру змішування. У кінці камери 4 після завершення процесу змішування газ має у середнені параметри p_3 , T_3 , ω_2 .

На виході дифузору статичний тиск газу p_4 більше статичного тиску в кінці камери змішування p_3 . Якщо позначити масову витрату робочого потоку G_1 , а масові витрати газу ежекції G_2 , то співвідношення $n = G_2/G_1$ є коефіцієнтом ежекції.

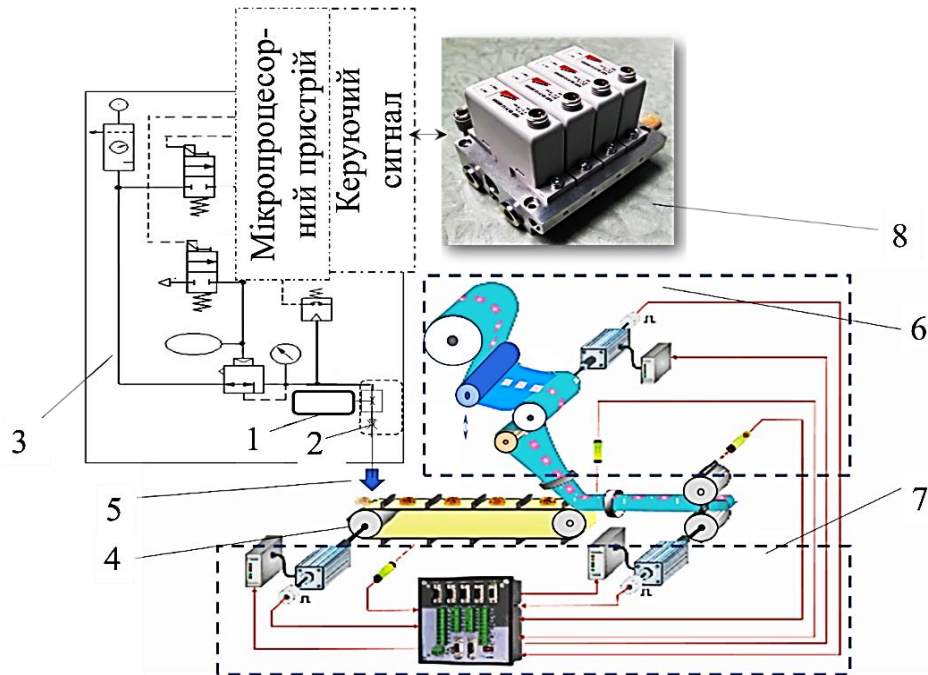


Рис.11. ФММ оброблення штучного харчового продукту та упаковки під час пакування (газовими сумішами або рідинними розчинами): 1- ресивер газової суміші для оброблення продукту; 2 – сопло підведення потоку газової суміші до продуктів(упаковки); 3-схема керування ФММ підведення газової суміші; 4 – конвеєр подачі штучних виробів; 5- потік газової суміші, напрямлений на продукт; 6 – ФММ подачі рулонного пакувального матеріалу для формування упаковки; 7– модуль подачі продукту в зону формування упаковки (зворотний зв'язок по координаті); 8 – загальний вид розробленого ФММ введення газової суміші на основі К8Р (Camozzi)

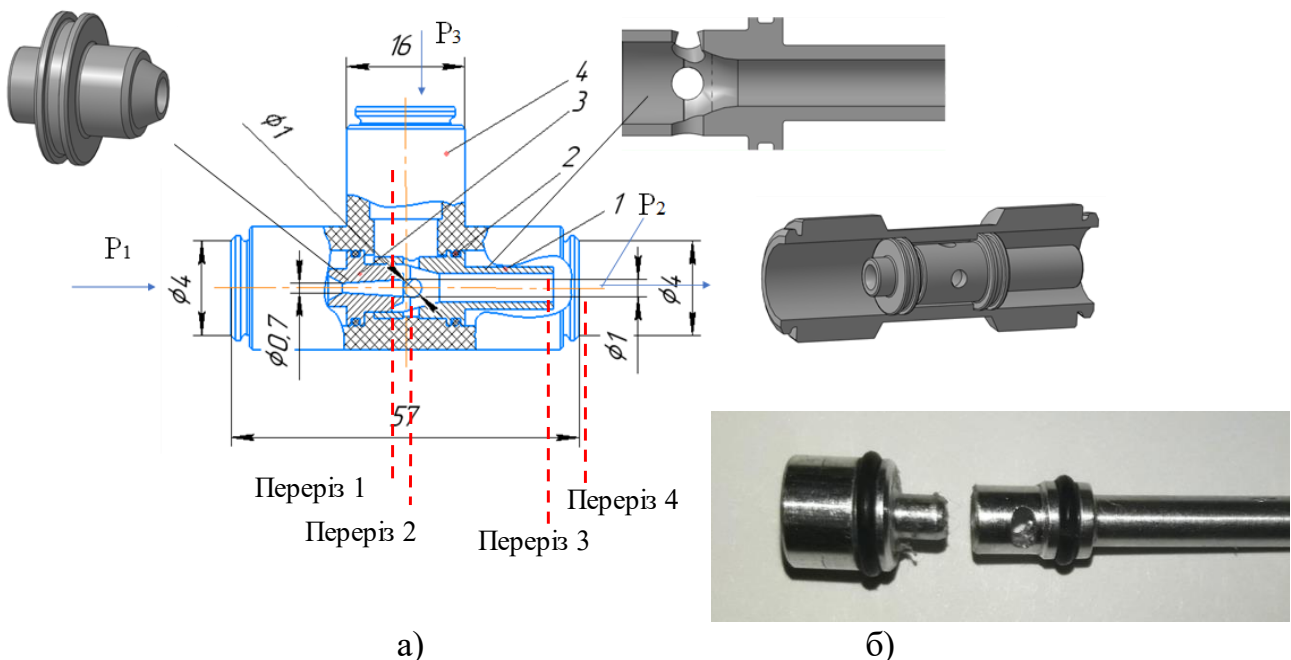


Рис.12. Загальний вид дослідної конструкції пневмосоплової системи ФММ пакувальної машини підведення газової суміші: а) креслення ежектуючої системи із розробленими 3D моделями для дослідження в ПП FlowVision; б) загальний вид розробленої конструкції: 1 – канал виведення газового середовища за типом дифузора; 2 – ущільнення робочої зони розрідження; 3 – канал підведення та звуження газового середовища за типом конфузора; 4 – корпус

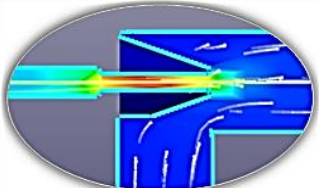
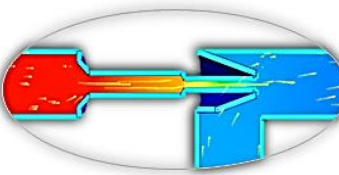
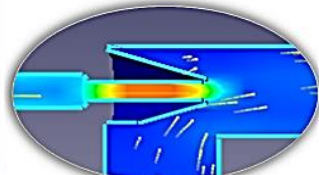
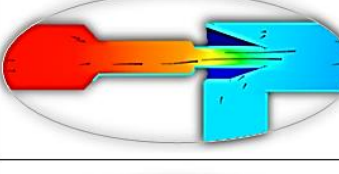
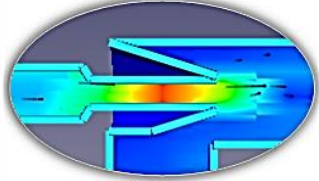
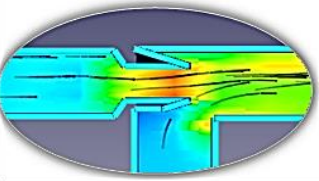
При цьому відношення статичного тиску робочого газу перед соплом до статичного тиску газу ежекції p_1/p_2 буде ступенем розширення. Відношення статичного тиску на виході з дифузора до статичного тиску газу ежекції p_4/p_2 визначає ступінь стиснення, або ступінь підвищення тиску. Під час моделювання у просторі ПП FlowVision, основним геометричним параметром ежектора є відношення площин вихідних соплових перетинів для робочого потоку і потоку ежекції:

$$\alpha = \frac{F_1}{F_1} = \frac{F_1}{F_3 - F_1}, \quad (23)$$

де F_1, F_2 – відповідно площа вихідних соплових перерізів для підведення робочого потоку і потоку ежекції; F_3 – площа перетину циліндричної камери змішування (переріз 3). Ежектор з великим значенням α вважається високо напірним, але має малий коефіцієнт ежекції. І навпаки, ежектор з малим α дає можливість отримати великий коефіцієнт ежекції, але характеризується малим напором.

Таблиця 3

Результати імітаційного моделювання L-подібного ежектора у складі ФММ ПМ

№ п/п	Ø проходного сопла L-подібного ежектора	Імітаційна модель зміни тиску в перерізі L-подібного ежектора	Узагальнені характеристики моделі зміни тиску і швидкості	Імітаційна модель зміни швидкості в перерізі L-подібного ежектора
1	0,5 мм		Properties [Flow of Pressure] Initial points Cover Save to file Variable: Pressure, Insert: 1 Max: 1000000, Min: -9500 Color palette: 1e+006 to -9500	
2	0,7 мм		Properties [Flow of ModVelocity] Initial points Cover Save to file Variable: ModVelocity, Insert: 1 Max: 345, Min: 12 Color palette: 345 to 12	
3	1 мм			
4	2 мм			

На основі імітаційного моделювання ПП FlowVision, проведено аналіз моделі ежектора (таблиця 3 та рис. 13). Вхідні параметри імітаційної моделі робоче середовище – повітря ($N_2+O_2+Ar+CO_2$), азот, кисень; робочий тиск на вхідному

перерізі ежектора – 10 бар, температура навколишнього середовища 293К, тиск оточуючого середовища 1,013 бар.

Другий геометричний параметр під час імітаційного моделювання ежектора – відносна довжина камери змішування L_1/d_3 – також впливає на динамічні характеристики ежектора.

Третій геометричний параметр моделі ежектора - ступінь розширення дифузора $f = F_4/F_3$ – приймалась як відношення площі перерізу на виході з дифузора до площини на вході в нього.

Припущенням дослідної моделі FlowVision приймалось, що ежектор працює за заданим статичним тиском на виході із дифузора (наприклад, при виході в атмосферу або усередину споживчої упаковки із постійним тиском). Ступінь розширення дифузора f розглядалась як параметр, який суттєво впливає на режими роботи ежектора.

Для проведення моделювання розроблено чотири 3D моделі ежектора з різними характеристиками прохідного робочого сопла, (рис.13). Під час моделювання ежектора також прийняті припущення про одномірність потоку. Закон збереження маси має вигляд: $G_3 = G_1 + G_2$, тоді

$$G_3/G_1 = 1 + n. \quad (24)$$

На основі закону збереження енергії можна записати:

$$G_3 \left(c_3 T_3 + \frac{w_3^2}{2} \right) = G_1 \left(c_1 T_1 + \frac{w_1^2}{2} \right) + G_2 \left(c_2 T_2 + \frac{w_2^2}{2} \right) + Q, \quad (25)$$

де Q – загальна кількість теплоти, яке підводиться до повітря (газу) в секунду через стінку змішувальної камери.

Під час розрахунків лінійних ежекторів, приймається, що $Q = 0$ і гази, які змішуються, однорідні і мають однакову теплоємність. Витрати повітря (газу) в будь-якому перетині сопла розраховувались за формулою:

$$G = m_0 \sigma_1 \frac{p^* F q(\lambda)}{\sqrt{T^*}}, \quad (26)$$

де m_0 знаходиться за формулою і для повітря $m_0 = 0,0404 \text{ м}^{-1} \cdot \text{с} \cdot \text{К}^{0,5}$; σ_1 – коефіцієнт відновлення тиску в активному соплі. На основі рівняння нерозривності потоку, одержано формулу для зв'язку параметрів ежектора в перетинах ежекції 1 та 3:

$$\frac{p_3^*}{p^*} = \sigma_1 \frac{\sqrt{\left(1+n\Theta\frac{c_2}{c_1}\right)(n+1)\frac{c_2}{c_1}}}{F_3/F_1 \cdot q(\lambda_3)} q(\lambda_1) \quad (27)$$

У випадку звукового або надзвукового режимів роботи ежектора приймаємо:

$q(\lambda_1) = 1$. Рівняння руху робочого середовища має вигляд:

$$G_3 \omega_3 + p_3 F_3 = G_1 \omega_1 + p_1 F_1 + G_2 \omega_2 + p_2 F_2 - P_{mp} \quad (28)$$

Введіть текст

де $G\omega + pF$ – повний імпульс у відповідному перерізі; P_{mp} – сумарна сила тертя по бічній поверхні змішувальної камери. Часто приймають $P_{mp} = 0$.

В іншому випадку її можна визначити за формулою: $P_{mp} = \zeta \frac{L_3}{d_3} \frac{p_3 \omega_3^2}{2} F_3$. (29)

де ζ – коефіцієнт опору. Для турбулентного режиму приймаємо, що $\zeta = \text{const}$. Загальне значення $\zeta = 0,015 - 0,02$. Враховуючи значення зведеної швидкості потоку ежекції, отримаємо: $P_{mp} = \zeta \frac{L_3}{d_3} G_3 \lambda_3 a_{k3}$ (30)

Рівняння імпульсів приймає наступний вигляд:

$$\left[z(\lambda_3) + \frac{1}{2} \chi \lambda_3 \right] \sqrt{(n+1)(1+n\theta)} = z(\lambda_1) + z(\lambda_2) n \sqrt{\theta}, \quad (31)$$

де χ – зведена довжина поверхні тертя, обумовлена залежністю:

$$\chi = \zeta \frac{L_3}{d_3} \frac{2k}{k+1}. \quad (32)$$

Так як в ежекторах відношення L_3/d_3 зазвичай не перевищує межу 10, то тертям можна знехтувати і використати формулу:

$$z(\lambda_3) \sqrt{(n+1)(1+n\theta)} = z(\lambda_1) + z(\lambda_2) n \sqrt{\theta}. \quad (33)$$

Виразимо коефіцієнт ежекції через відношення витрат за допомогою залежності:

$$n = \frac{G_2}{G_1} = \frac{\sigma_2 p_n^* q(\lambda_2) F_2 \sqrt{T_1^*}}{\sigma_1 p^* q(\lambda_1) F_1 \sqrt{T_2^*}}.$$

Після спрощення отримаємо: $n = \frac{p_2^* q(\lambda_2)}{p_1^* q(\lambda_1) \alpha \sqrt{\theta}}, \quad (34)$

де σ_2, σ_1 – коефіцієнти відновлення тиску відповідно в активному і пасивному соплі $p_1^* = p^* \sigma_1$ і $p_2^* = p_n^* \sigma_2$.

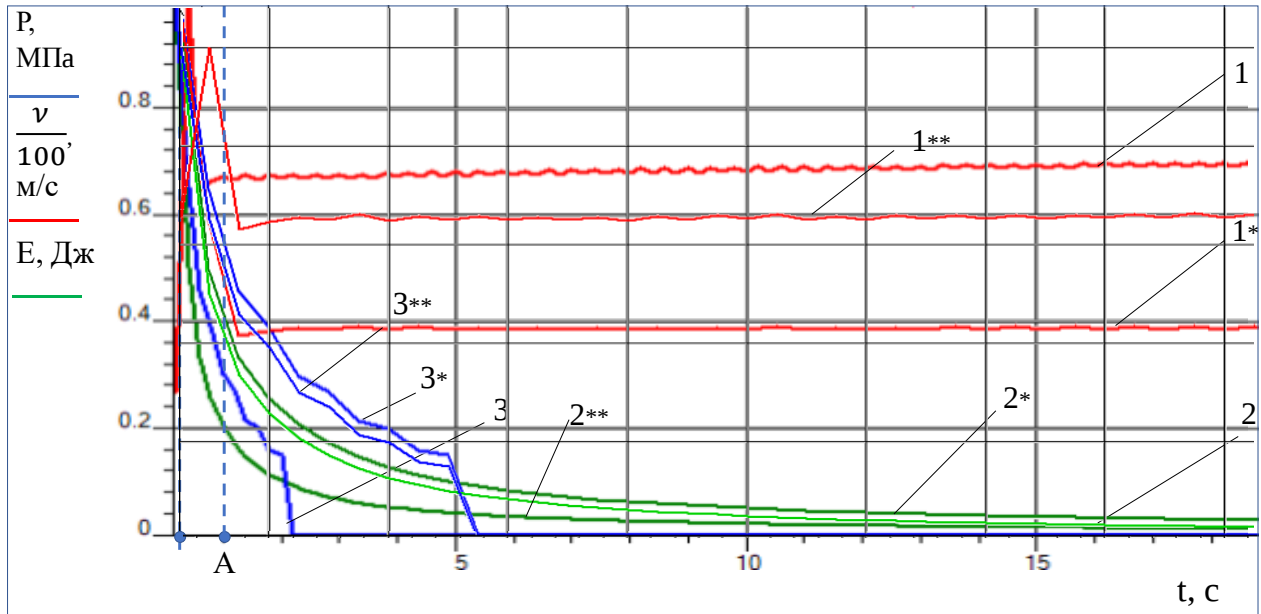


Рис. 13. Зміна робочих характеристик ежектора в сопловому перерізі: 1 – швидкість плин повітря; 1* – швидкість N_2 ; 1** – швидкість O_2 ; 2 – тиск повітря; 2* – тиск N_2 ; 2** – тиск O_2 ; 3 – потенційна енергія (повітря); 3* – потенційна енергія (N_2); 3** – потенційна енергія (O_2); А – зона зміни характеристик робочого середовища під час проходження перерізу сопла

На підставі результатів проведеного циклу імітаційних експериментів можна вважати, що визначальними елементами робочої характеристики ежектора є: сопло, що забезпечує потрібну плинність газового середовища оброблення продукту без деструкції його поверхні; камера змішування з

необхідними параметрами; місце розташування сопла і форма його з'єднання з поверхнею ежектора, що забезпечують необхідний розподіл тиску і поворот струмини. Розроблено альтернативи емпіричним і напівемпіричним методам дослідження пневмосоплових ежекторів, підходи, що базуються на механіці суцільних середовищ, CFD - методах (Computational Fluid Dynamics), коли система рівнянь Нав'є-Стокса або Рейнольдса вирішується за допомогою чисельних методів.

Розділ 6 «Експериментальні дослідження типових функціональних мехатронних модулів пакувальних машин» містить результати експериментальних досліджень, проведених для перевірки адекватності математичних моделей та параметрів роботоздатності запропонованих моделей функціональних мехатронних модулів пакувальних машин.

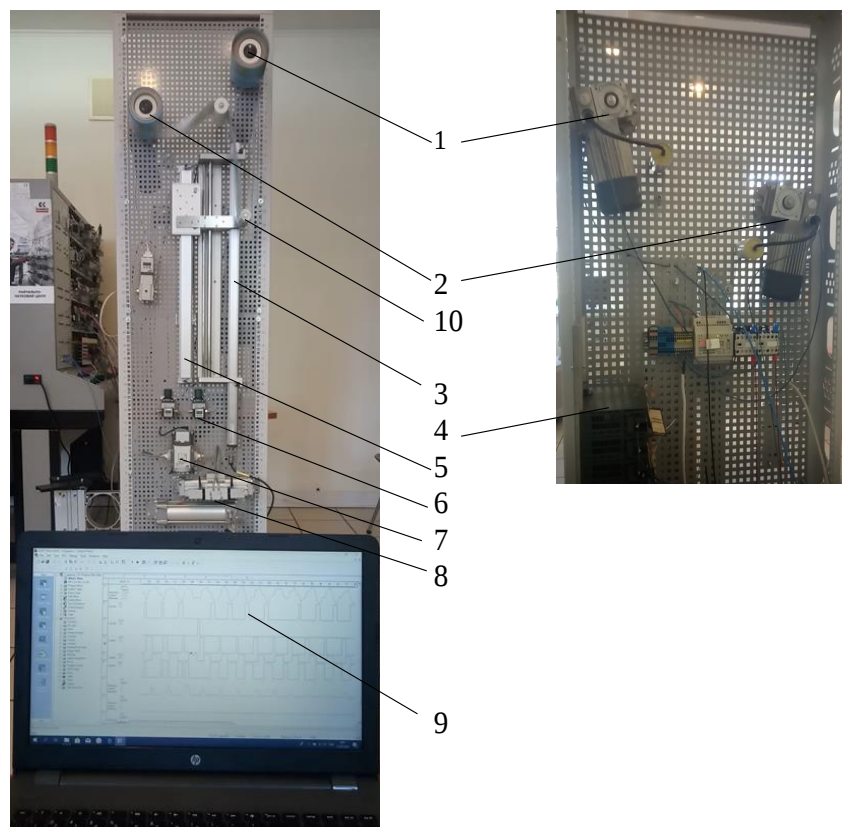


Рис.13. Загальний вид експериментального стенда дослідження динамічних характеристик ФММ подачі рулонного матеріалу в пакувальній машині:

1, 2 – електромеханічний привод рулонотримачів пакувального матеріалу (імітаційна система подачі матеріалу на етап формування споживчої упаковки), 3 – датчик переміщення робочої каретки (система зворотнього зв'язку по координаті), 4 – програмований логічний контролер; 5 – безштоковий пневмоциліндр; 6 – прецизійний датчик регулювання вхідного тиску; 7 – пропорційний регулятор тиску для формування заданого закону руху робочої каретки безштокового пневмоциліндра із нажяжним ролик 10 (здійснює коливальний рух за заданою амплітудою і частотою); 8 – система стабілізації вхідного тиску – бустер; 9 – ЕОМ із програмою роботи ФММ

Метою цих експериментальних досліджень є визначення динамічних характеристик керованої частини ФММ пакувальної машини, перевірка адекватності реалізації законів руху виробів та упаковки, керування пневмосопловими ежекторами, системою подачі гнучкого пакувального матеріалу й штучних виробів. Для проведення експериментальних досліджень спроектовані та виготовлені оригінальні лабораторні стенди (рис.14,15,16) на базі електропневматичного привода із замкненою за системою зв'язку, з додатковою корекцією сигналу за швидкістю (враховуючи додатковий контур регулювання із системою підведення тиску).

Експериментально доведено, що під час застосування ФММ на базі безштокового пневмоциліндра та пропорційної системи керування відхиленням від заданого закону руху ролика натягування стрічки пакувального матеріалу мають суттєво зменшені значення гістерезису порівняно із класичними системами з коливальним роликом із пневмомеханічним або електромеханічним керуванням.

Для проведення досліджень було спроектовано та виготовлено спеціальний стенд, який дозволяє моделювати різні режими роботи ФММ подачі споживчої упаковки в зону фасування дозатора шибєрного типу (рис.14).

Досліджені та проаналізовані в роботі два режими роботи функціонального мехатронного модуля обумовлюють їх функціональні можливості в пакувальних машинах при формуванні споживчих упаковок із рулонного матеріалу. Запропоновані режими із синусоїдальним законом зміни прискорення є оптимальними за швидкодією і забезпечують максимальну продуктивність мехатронного модуля під час виконання операції натягування стрічки пакувального матеріалу.

Послідовність роботи одного із експериментальних зразків обладнання для дозування дрібно-штучних харчових продуктів із мехатронним модулем для позиціонування споживчої упаковки наведено на рис. 15, де поетапно показано операцію позиціонування споживчої упаковки на етапі фасування.

Характерні етапи дозування продукції шибєрними дозаторами складаються: 1 – відкривання верхньої шибєрної заслінки та наповнення мірної рухомої ємності; 2 – закривання верхньої шибєрної заслінки із одночасним переміщенням мірної ємності на етап фасування; 4 – переміщення продукту у споживчу упаковку, яка підводиться позиційним електропневмоприводом; 5 – повернення мірної ємності в початкове положення і подача наступної споживчої упаковки на етап фасування

Кінематичні та силові параметри операції подачі рулонного плівкового матеріалу за допомогою ФММ на основі безштокового пневмоциліндра представлено на рис.16. Вихідні дані: зведена маса рулону $m = 3$ кг; хід штока до позиції зупинки по координаті $s = 300$ мм (при максимальному ході 400 мм); магістральний тиск повітря $P_M = 0,8$ МПа, амплітуда коливань тиску на пропорційному регуляторі керування ФММ подачі пакувального матеріалу $A = 1,7$ бара; частота наданого імпульсу до $p_j = 3$ Гц. Величина вхідного тиску на вході у пневматичний підсилювач (бустер) у межах до 4 бар. Максимальне прискорення $\ddot{S} = 3,8$ м/с². Математико-статистична модель, за критерієм Фішера адекватна процесу та має вигляд:

$$t = 0,685 - 0,001S - 0,003m + 0,015S^2 - 0,007m^2 + \dots + 0,009 f_{\text{тер}}^2 + 0,007Sm - 0,002S f_{\text{тер}} + 0,008m f_{\text{тер}}$$

Дана аналітична модель може бути використана під час проектування ФММ подачі рулонного плівкового пакувального матеріалу.

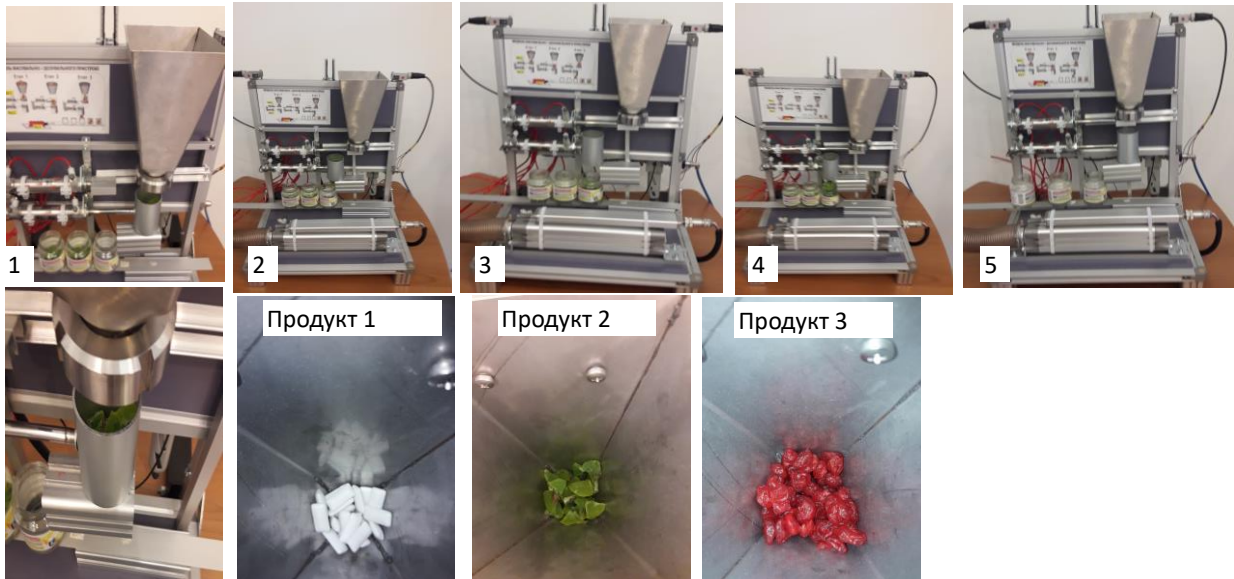


Рис. 15. Експериментальний зразок машини для дозування дрібно-штучних харчових продуктів із ФММ позиціонування споживчої упаковки під час фасування і послідовність етапів дозування продукції: продукт 1 – жувальна гумка; 2 – ківі сушений; 3 – вишня сушена

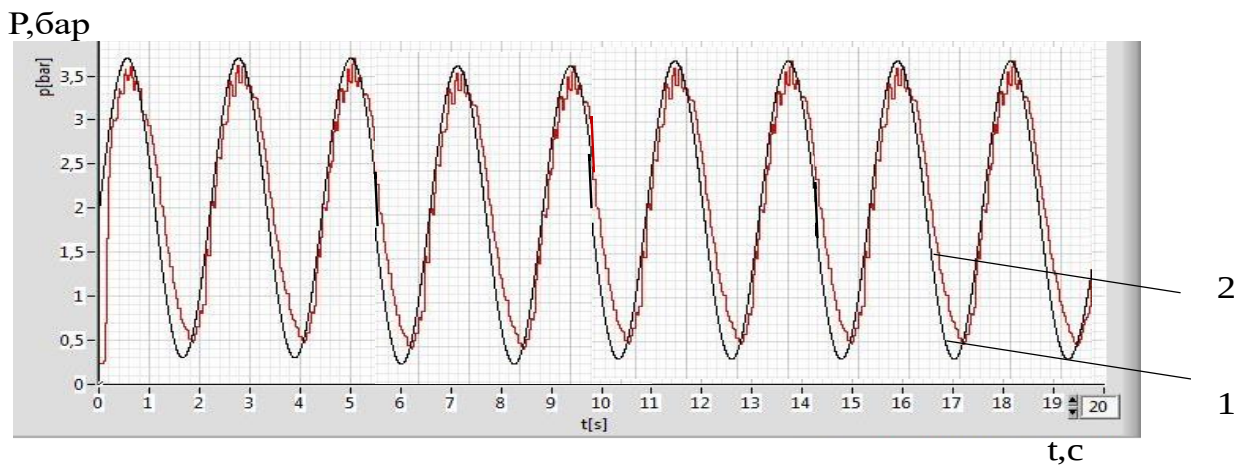


Рис.16. Результати експериментальних досліджень ФММ подачі стрічки пакувального матеріалу: 1- заданий занон зміни тиску в системі керування натяжного ролика пакувального матеріалу; 2 – реальні зміни тиску в робочій камері привода

Критерієм налаштування контура керування є мінімальна тривалість часу позиціонування вихідної ланки пневмоциліндра до заданої точки та мінімальна тривалість зміни режимів роботи привода при малих швидкостях режимів подачі споживчої упаковки на фасування. Під час дослідження у контурі регулювання швидкості виявлено, що при вхідному сигналі забезпечення швидкості 1 м/с, спостерігаються коливальні процеси переміщення ($S=f(t)$), зокрема максимальне значення швидкості коливається від 1,5м/с до 2,2м/с, прискорення зростає до 0,25м/с². Отримані коливання в системі пневмоциліндра свідчать що при досягненні кінцевої точки зупинки $t=0.1$ с, запрограмованої заданим законом руху споживчої упаковки,

поршень не досягає усталеної швидкості руху в умовах слабкого демпфування на контурі швидкості, наявності сил тертя, а також втручанні перешкод від датчика місцеположення і аналогового диференціатора (рис.16).

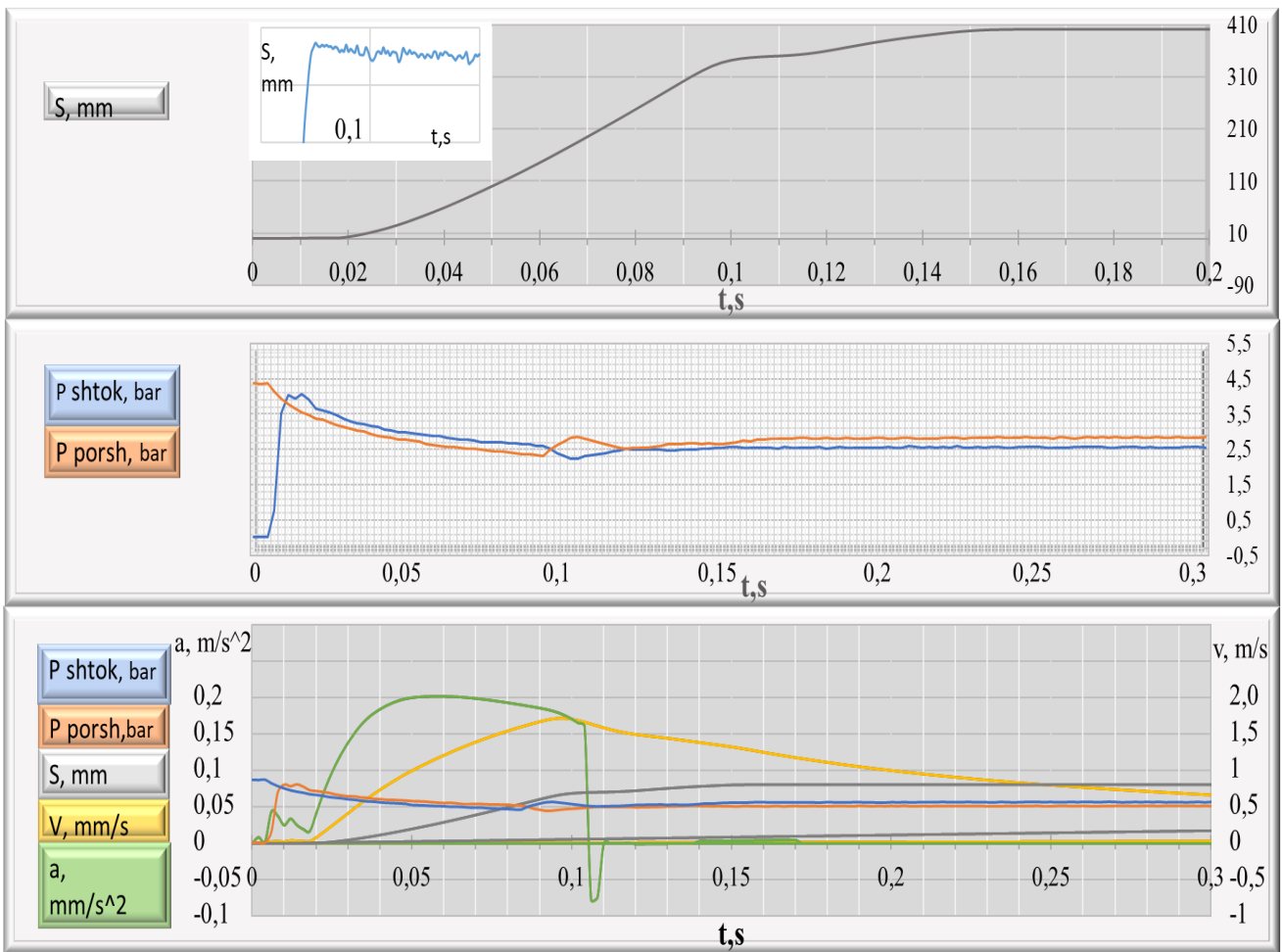


Рис.17. Узагальнена кінематична характеристика роботи вихідної ланки ФММ подачі споживчих упаковок на етапі фасування піл час реалізації заданого закону руху поршня, наближеного до оптимального за швидкістю дії: діаметр трубопроводу 0,008м, $f_1^e=5.027 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$, x – координата переміщення поршня 0,4м; діаметр поршня пневмоциліндра 0,032м; штока 0,016м; робочий тиск – 0,5 МПа

Під час введені корегуючих параметрів зворотнього зв'язку: перепаду тиску та його похідних із зовнішнім мехатронним пневматичним регулятором в циліндрі, переміщенні і позиціювані упаковки – отримано покращені характеристики роботи модуля. Швидкість упаковки стабілізується ($V=1,1 \text{ м/с}$), рух поршня при досягненні кінцевої заданої точки – має суттєво зменшені коливання $S=f(t)$ в межах 0,1с.

Для дослідження ФММ оброблення споживчої упаковки було спроектовано та виготовлено спеціальний стенд (рис.18), який дає можливість моделювати різні режими роботи поршневого мікродозатора із пневмосопловим ежектором. В ході дослідження контролювалась стійкість процесу регулювання тиску в ресивері, від якої залежить похибка дозування на виході із мікродозатора.

Загальний вид конструкції експериментального стенда у складі із ФММ підведення мікродозатора у зону фасування, наведено на рис.18.

У результаті експериментальних досліджень, встановлено характер та тривалість перехідних процесів регулювання тиску на виході МРТ, та їх подальший вплив на формування дози із ресивера. Величина сформованої дози продукту (газ, рідина) та швидкість струмینی на виході із соплової частини дозатора, залежать від процесів регулювання тиску на вході, пропускної здатності робочого каналу, та робочого тиску в керуючій частині модуля.

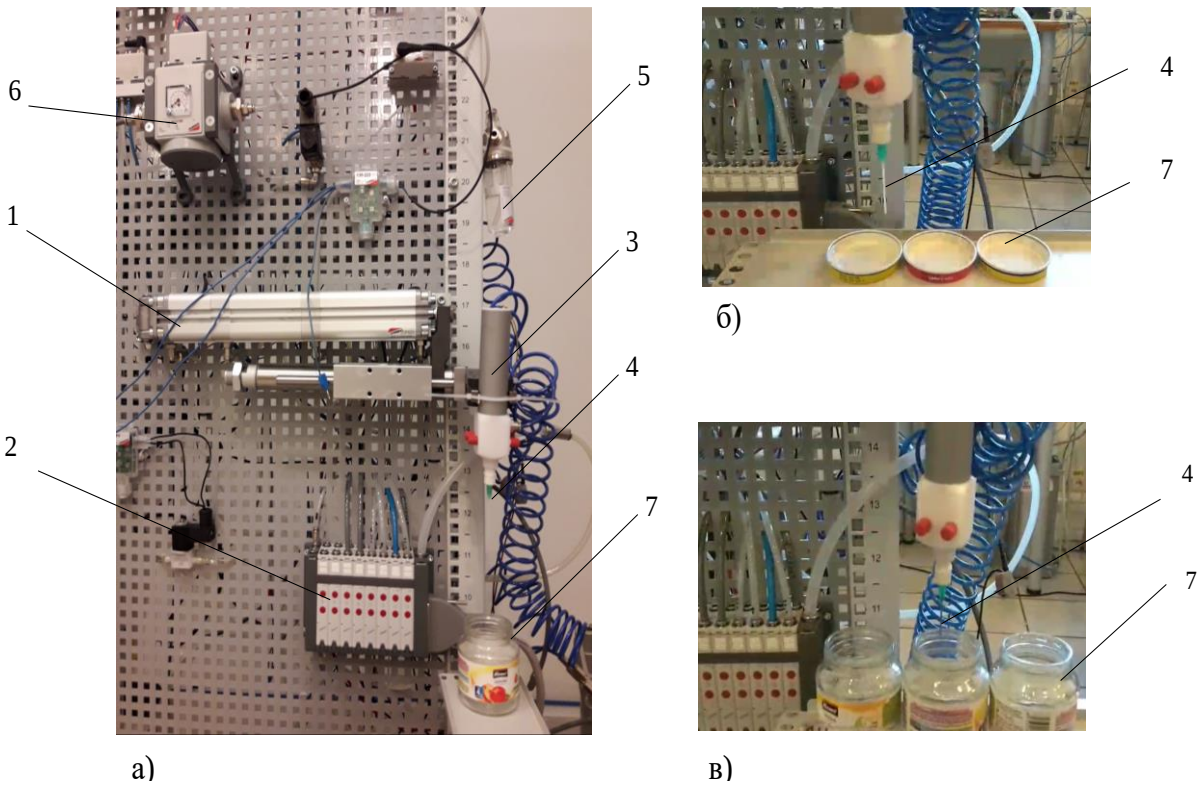


Рис. 18. Загальний вид експериментального стенда поршневого мікродозатора із пневмосопловим ФММ: 1 -мультіпозиційний пневмоциліндр; 2 – блок керування електропневматичний острів; 3 – мікродозатор, зв'язаний через ежектор із ресивером 5; 4 – змінні насадки (більш детально описані у розділі 2 дисертації); 6 – МРТ; 7 – споживча упаковка; а) обробка пневмосопловою насадкою внутрішньої поверхні упаковки; б) обробка закупорювальних засобів; в) дозування рідких харчових продуктів

Отримані результати повторюваності дози продукції, при роботі мікродозатора за синусоїдальним законом подачі на розпилення:

- продукт - Dewar's12 (віскі) – густина 942 кг/м^3 ; діаметр трубопроводу $0,004 \text{ м}$, робочий тиск – 1,8 бар, амплітуда коливань 1,2бара; частота змінюється у межах: 18...36Гц; похибка дози продукту у межах 2,2%;
- продукт - SouthernComfort (лікер) – густина 994 кг/м^3 ; діаметр трубопроводу $0,004 \text{ м}$, робочий тиск – 1,8 бар, амплітуда коливань 1,2бара; частота змінюється у межах: 18...36Гц; похибка дози продукту у межах 1,5%;
- продукт - Monin (сироп) – густина 1300 кг/м^3 ; діаметр трубопроводу $0,004 \text{ м}$, робочий тиск – 1,8 бар, амплітуда коливань 1,2бара; частота змінюється у межах: 18...36Гц; похибка дози продукту у межах 1,0%.

Результати експериментальних досліджень підтвердили адекватність розроблених математичних моделей типових ФММ пакувальних машин із відхиленням у межах

до 5%, та дали можливість одержати нові ефективні рішення керування робочими органами ФММ.

У сьомому розділі *«Практичні аспекти використання результатів досліджень»* наведено прикладні аспекти впровадження у виробництво методології компонування пакувального обладнання із залученням функціональних мехатронних модулів для пакування харчових продуктів у споживчу упаковку. Виконано порівняння значення коефіцієнта ОЕЕ для пакувальної машини ТОВ «ПАКУВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ» до та після впровадження розробленої концепції. Відзначено суттєве підвищення ОЕЕ коефіцієнту на 35%. Описані технічні пропозиції використані під час проектування нового пакувального обладнання та модернізації існуючого на підприємствах: ТОВ «КАМОЦЦІ», ТОВ «ПАК СЕРВІС», ТОВ «Понінківська картонно-паперова фабрика УКРАЇНА», ТОВ «ПАКУВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ».

Розрахунковий сумарний економічний ефект від впровадження розробок пов'язаних із дисертаційною роботою складає 231 тис. грн. на впровадження окремих функціональних мехатронних модулів в одній потоково-технологічній лінії пакування харчових продуктів.

ВИСНОВКИ

Дисертація спрямована на вирішення актуальної науково-прикладної технічної проблеми розроблення наукової концепції багатокритеріального синтезу пакувального обладнання харчових виробництв із використанням адаптованого до специфіки пакувальних процесів математико-програмного апарату.

1. На підставі результатів проведеного аналізу відомих конструкцій пакувальних машин, методів та методик математичного, фізичного моделювання операцій пакування, а також структурного синтезу й параметричної оптимізації функціональних модулів – запропоновано гіпотезу комплексної багатокритеріальної оцінки як модулів, так і машини загалом за заданими характеристиками і у взаємозв'язку з поточними лініями виробництва харчових продуктів.

2. Розроблено та реалізовано наукову концепцію багатокритеріального синтезу пакувальних машин поточних ліній харчових виробництв, яка полягає у встановленні наукових підходів до вибору функціональних мехатронних модулів (ФММ) пакувальної машини із типових моделей кластерної бібліотеки й ефективного поєднання системи керування рухами виконавчих пристроїв.

Запропоновано оцінювати пакувальне обладнання за комплексним критерієм ОЕЕ для різних компонувань ФММ машин. Використання критерію ОЕЕ, який обґрунтовують сукупність властивостей та відображає узагальнену оцінку ФММ із максимальним критерієм за принципом компромісу.

3. Розроблено методику багатокритеріальної оптимізації за принципами пошуку Парето – ефективних рішень, яка автоматично генерує усі можливі варіанти структури машини та будує 3D графік залежності часткових критеріїв оптимальності, кожний із яких відповідає варіантові, структури та містить інформацію про склад ФММ й сумарні числові значення по кожному з заданих критеріїв оптимальності. Запропоновано підпрограму – таблицю ПП Excel для розв'язання задач оптимізаційного синтезу.

4. За результатами узагальненої оптимізації методом Парето та ранжування послідовності характеристик (функція Харрінгтона), розроблено нову конструкцію

ФММ подачі плівки в пакувальній машині. З точки зору встановлених критеріїв узагальненої ефективності $OEE = 89,76\%$, критерію готовності $K_T = 0,99$, продуктивності $P = 95,97\%$ та порівняльного аналізу між собою шести варіантів компоновки приводу, - отримано оптимальні значення коефіцієнту значущості: 0,179 для електро-механічного приводу та 0,197 для електропневматичного приводу ФММ подачі рулонного пакувального матеріалу.

5. На основі застосування агентного моделювання динамічної системи розроблено метод оптимізації компоновки дозувально-фасувального модуля машини пакування дрібно-штучної продукції у тришовний пакет «flow pack» у просторі програми AnyLogic. Обґрунтовано області моделювання пакувальної машини: система управління; фізичні та механічні системи; система оброблення сигналів. Встановлено, що найбільш складною ділянкою оптимізації є фасувальний модуль, який поєднує матеріальні та інформаційні потоки від таких ФММ: гальмування рулонотримача, гальмування і натягування плівки рулонного пакувального матеріалу, утворення поздовжнього зварного шва та фасування.

6. Синтезовано в системі ПП MathCAD можливі закони руху робочих органів ФММ із слідкувальними електропневмоприводами (ЕПП) для виконання операцій пакування штучних виробів у м'яку упаковку, які дають можливість зменшити тривалість їх виконання та регулювати умову точності позиціонування в межах технічних характеристик вибраних мехатронних модулів.

7. Розроблено ФММ з використанням мікропроцесорного пристрою керування К8Р у складі з регулятором та підсилювачем тиску МХ енергоживлення пакувальної машини, який впливає на точність позиціонування жорсткої споживчої упаковки на стадії дозування дрібно-штучних харчових продуктів. Встановлено, що максимальне прискорення вихідної робочої ланки (штоку) таким ФММ складає 2 м/с^2 .

8. Отримано оптимальні характеристики нового ФММ подачі рулонного плівкового матеріалу з використанням мікропроцесорного пристрою керування К8Р, який забезпечує синусоїдальний закон руху натяжного ролика: максимальне прискорення вихідної робочої ланки (штоку) складає $4,5 \text{ м/с}^2$, амплітуда коливання $A = 2,0 \text{ мм}$; частота наданого імпульсу $n_j = 2,5$.

9. Поглиблено математичну модель динамічного синтезу пневмопривода зі східчасто змінним навантаженням, під час реалізації заданого закону руху поршня ЕПП та виконання умови реалізації заданої продуктивності ФММ пакувальної машини для штучних продуктів. У кінцевому положенні переміщення штучного продукту при різних перерізах ефективної площі вихлопного отвору f_1^e одержано різний час зупинки продукту на останньому етапі переміщення, згідно з отриманими результатами: загальний час: $T_1 = 0,31 \text{ с}$; $T_2 = 0,35 \text{ с}$; $T_3 = 0,48 \text{ с}$; $T_4 = 1,6 \text{ с}$. Результати досліджень дають можливість розробити ФММ із найбільш вдалою компоновкою з точки зору динамічних складових і загального часу операції. Отримані результати рекомендовані як один із способів забезпечення раціональних режимів для переміщення штучних продуктів слідкувальним ЕПП.

10. Змодельовано перехідні процеси в ФММ ПМ із змінним навантаженням на триетапному переміщенні упаковки на стадії фасування дрібно-штучних продуктів. Отримано кінематичну характеристику процесу гальмування вихідної ланки приводу при: досягненні приводом координати початку гальмування $x_t = 0,91S = 0,36 \text{ м}$ (в момент часу $t = 0,6 \text{ с}$); досягненні приводом координати початку гальмування

$x_t = 0,91S = 0,36$ м (в момент часу $t = 0,85$ с); досягненні приводом координати початку гальмування $x_t = 0,91S = 0,368$ м (в момент часу $t = 0,65$ с). Для обмеження впливу деструктивних явищ запропоновано методику визначення оптимального кінематичного навантаження з урахуванням фізико-механічних властивостей штучного харчового продукту та споживчої упаковки. Результати доцільно використовувати під час проектування дозувально-фасувального модуля, у складі якого є слідкувальний ЕПП.

11. На основі імітаційного моделювання розроблено нову конструкцію ежектора з можливістю використання у пневмосоплових ФММ ПМ для робочого середовища: повітря ($N_2 + O_2 + Ar + CO_2$); азот N_2 ; кисень O_2 . Отримано аналітичні залежності щодо витратних характеристик і зміни тиску в системі L-подібного ежектора: зміна тиску в перехідному відрізку перерізу; порівняння об'ємних витрат залежно від розрідження в перерізі сопла ежектора діаметром - 0,5;0,7;1;2мм. Результати досліджень дають можливість встановити межі використання пневмосоплової системи під час підведення газу до продукту або упаковки. Визначена зона оптимального використання ежектора, коли газодинамічна система переходить у надзвуковий деструктивний режим подачі напрямленого струменя. Тим самим визначити умови раціональної роботи ФММ пакувальної машини.

12. Апробацією розроблених математичних моделей типових функціональних мехатронних модулів пакувальних машин харчових виробництв на оригінальних експериментальних стендах та в промислових умовах підтверджена адекватність отриманих результатів математичного моделювання із відхиленням у межах похибки до 7% для різних технологічних операцій.

13. Результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджені під час проектування новітнього пакувального обладнання та модернізації існуючих конструкцій й одержано позитивний ефект на таких підприємствах: ТОВ «Понінківська картонно-паперова фабрика – Україна», ТОВ «ПАК СЕРВІС», ТОВ «Пакувальні технології», ТОВ «КАМОЦЦІ». Значення коефіцієнта ОЕЕ для розроблених ФММ знаходяться в межах 0,97 – 0,99, а нової пакувальної машини для штучних харчових виробів – 0,985. Передбачуваний сумарний економічний ефект від реалізації розробок, пов'язаних із дисертаційною роботою, складає 231 тис. грн. при впровадженні окремих функціональних мехатронних модулів в одну поточкову лінію пакування харчових продуктів. Результати досліджень доцільно використовувати в навчальному процесі на кафедрі мехатроніки та пакувальної техніки НУХТ.

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гавва, О.М. Функціонально-модульне проектування пакувальних машин/ О.М.Гавва, Л.О. Кривопляс-Володіна Л.О., С.В. Токарчук – Друк. **Моногр.**, К.:Видавництво «Сталь», 2015. 547с.ISBN 9786176760795 (*Особистий внесок: написання розділів 5 та 6*).

2. Якимчук, М.В. Проектування пакувального обладнання із мехатронних модулів./ М.В. Якимчук, О.М. Гавва, А.П.Беспалько, Л.О.Кривопляс-Володіна – Друк. **Моногр.**, К: Видавництво «Сталь», 2017. –515 с.ISBN 9786176761297 (*Особистий внесок:участь у формуванні теоретичного матеріалу, огляд та аналіз конструкцій, розробка креслень*).

3. Кривопляс-Володіна, Л.О., Основи наукових досліджень у прикладних задачах/Л.О.Кривопляс-Володіна, О.М.Гавва, В.Л.Яровий, С.В. Токарчук – Друк. **Навч. посібник** для студентів вищ. Навч. закл., К.: Сталь, 2016р. -272с., ISBN 9786176760979

4. Kryvoplias-Volodina, L.O., Structuralparametric synthesis of hydromechanical drive of hoisting and lowering mechanism of packageforming machines / L.Kryvoplias-Volodina, O.Gavva, N.Yakymchuk // EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies (ISSN 17293774) № 5/7 (89) 2017.– P. 38 – 44 (входить до Переліку міжнародних наукометричних баз **Scopus**, Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus (Польща), DOAJ). *(Особистий внесок: аналітичні дослідження)*.

5. Mikulionok, I. Modeling the process of polymers processing in twinscrew extruders/I. Mikulionok, O.Gavva, L.Kryvoplias-Volodina // EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies (Прикладна фізика)(ISSN 17293774) № 4/5 (94) 2018.– P. 35 – 44.(входить до Переліку міжнародних наукометричних баз **Scopus**, Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus (Польща), DOAJ). *(Особистий внесок:формування понять та визначень, участь у критеріальній оптимізації)*.

6. Кривопляс-Володіна, Л.О., Дослідження електропривода з лінійним двигуном для пакетоформувальних машин/Л.О. Кривопляс-Володіна, О.М.Гавва, С.В. Токарчук //Харчова наука і технології (ISSN 24097004 (Online)) Volume 11 Issue 2 / 2017. – С. 111 – 118. (входить до Переліку міжнародних наукометричних баз **Web of Science (WoS)**, Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, Open Academic Journals Index (OAJI), DOAJ). *(Особистий внесок: структурні схеми мехатронних модулів, математичні моделі формування обладнання, експериментальні дослідження)*.

7. Mikulionok, I. Modeling of melting process in a single screw extruder for polymer processing / I. Mikulionok, O.Gavva, L. Kryvoplias-Volodina// Eastern European Journal of Enterprise Technologies (Прикладна фізика) (ISSN 17293774) № 2/5 (92) 2018.– P. 4 – 11. (входить до Переліку міжнародних наукометричних баз **Scopus**, Ulrich's Periodicals Directory, Index Copernicus (Польща), DOAJ). *(Особистий внесок: розробка положень, термінів)*.

8. Kryvoplias-Volodina, L. Dynamics of mechatronic function modules drives of flow technological lines in food production/L.Kryvoplias-Volodina, O.Gavva, S.Volodin, T.Hnativ//Ukrainian Journal of Food Science . Kyiv, Ukraine Ukrainian Food Journal, 2018, Volume 7, Issue 4 - P.726 - 738 (Included in the List of International Science Centers **Web of Science (WoS)**). *(Особистий внесок: викладання теоретичного матеріалу, проведення експериментальних досліджень)*.

9. Кривопляс-Володіна, Л.О. Обґрунтування вибору ежекторів для пакувального обладнання. // Харчова промисловість. 2018. - № 23. - С.68-79. (входить до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, затвердженого ВАК України).

10.Гавва, О.М.Багатокритеріальний структурнопараметричний синтез функціональних модулів потоковотехнологічних пакувальних систем/ О.М.Гавва, Л.О. Кривопляс-Володіна, А.В. Деренівська //Наукові праці НУХТ. – Київ, 2017. – № 5.Частина1 – С 70-76.(входить до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, затвердженого ВАК України). *(Особистий внесок: рівняння для визначення динамічних та кінематичних параметрів роботи)*.

11.Якимчук М.В. Вакуумні захоплювальні пристрої в пакувальних машинах (деякі особливості застосування) / М.В.Якимчук, О.М.Гавва, Л.О. Кривопляс-Володіна //Упаковка, №1, 2017. – С.39 – 43. (входить до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, затвердженого ВАК України). *(Особистий внесок: аналіз конструкцій, класифікація, узагальнення теоретичних положень)*.

12.Кривопляс-Володіна, Л.О., Оптимізація компоновки пакувальних технологічних ліній/ Л.О.Кривопляс-Володіна, С.В.Токарчук, Г.Р. Валіулін //Харчова промисловість . – 2016. – № 19. – С. 100-105. (входить до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, затвердженого ВАК України). *(Особистий внесок: викладання теоретичного матеріалу).*

13.Гавва О.М. Струйные потоки в упаковочных технологиях/ О.М.Гавва, Л.О. Кривопляс-Володіна // Упаковка, №6, 2015. – С.4 – 8. (входить до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, затвердженого ВАК України). *(Особистий внесок: аналіз конструкцій, класифікація, узагальнення теоретичних положень).*

14.Kryvoplias-Volodina, L. Invistigation of servo piloted electropneumatic actuar system for air lifting dosing // L. Kryvoplias-Volodina, O.Gavva, A.Vasilchenko // European cooperation Warsaw: Poland, 2016. - Vol 1(8) – P.90 - 97, ISSN(PRINT) 24497320 (входить до Переліку міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Open Academic Journals Index (OAJI), DOAJ). *(Особистий внесок: рівняння для визначення динамічних та кінематичних параметрів роботи, розробка нової структурної схеми керування, експериментальні дослідження).*

15.Гавва О.М. Синтез просторових потоковотранспортних систем ліній пакування харчових продуктів/ О.М.Гавва, Л.О.Кривопляс-Володіна, А.В.Деренівська, М.В.Якимчук, С.В. Токарчук //Scientific Works of ONAFT 2016. - Volume 80, Issue 1, P. 131 – 138 (входить до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, затвердженого ВАК України). *(Особистий внесок: проведення структурного синтезу, експериментальні дослідження).*

16.Volodin S. Invistigation of servo piloted electropneumatic actuar system for air lifting dosing / S.Volodin, V.Myronchyk, L.Kryvoplias-Volodina / European cooperation Warsaw: Poland, 2016. Vol 4 (11) – P.42 - 48, ISSN(PRINT) 24497320 (входить до Переліку міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Open Academic Journals Index (OAJI), DOAJ). *(Особистий внесок: рівняння для визначення кінематичних параметрів, розробка нової структурної схеми керування, експериментальні дослідження).*

17.Gavva, O.M. Ways to increase dosing precision of granular food products the batcher of discrete action / O.Gavva, L.Kryvoplias-Volodina, O.Kohan //Journal of Food and Packaging Science Technique and Technologies.Bulgaria. 2016. – Year 5,№ 9. P. 111 - 116.(входить до Переліку міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Open Academic Journals Index (OAJI)). *(Особистий внесок розробка нової структурної схеми керування, експериментальні дослідження).*

18.Володин С. Анализ систем трубопроводного транспорта сахарных заводов с элементами автоматического регулирования/ С.Володин, В.Мирончук, Л. КривоплясВолодіна // Automation of technological and business processes. – Volume 7. – Issue 4/2015. – P. 40 - 47. (входить до Переліку міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Open Academic Journals Index (OAJI)). *(Особистий внесок: залежності для визначення кінематичних параметрів процесу, розробка нових структур керування, експериментальні дослідження).*

19.Гавва, О.М. Шляхи інтенсифікації орієнтування тарних вантажів у пакетоформувальних машинах // О.М.Гавва, Л.О.Кривопляс-Володіна, М.В. Головей– Упаковка, - 2014.- №2.С. 54 -59. (входить до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, затвердженого ВАК України). *(Особистий внесок: аналіз конструкцій, класифікація, визначення робочих параметрів).*

20.Любімов, В.М.Дослідження процесу переміщення сирних блоків у перевантажувальному пристрої із приводною заслінкою// Любімов В.М., Кривопляс-Володіна

Л.О., Деренівська А.В./ Харчова промисловість. – Київ, 2010. – №9. – С. 95 -97.(входить до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, затвердженого ВАК України). *(Особистий внесок: рівняння для визначення динамічних та кінематичних параметрів роботи, експериментальні дослідження).*

21.Гавва О.М. Деякі підходи до мінімізації енерговитрат у підіймально-опускному пристрої пакетоформуальної машини// О.М.Гавва, О.О.Кохан, Л.О.Кривопляс-Володіна// Вібрації в техніці та технологіях. – 2014. – № 4(76). – С. 118 -129.(входить до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, затвердженого ВАК України). *(Особистий внесок: проведення структурного синтезу, експериментальні дослідження).*

22.Кривопляс-Володіна, Л.О., Захаревич В.Б. Відновлювальна функція реверсивної логістики для пакувальної галузі // Науковий журнал «Харчова промисловість». – 2014. – № 16. – С. 104 -111 (входить до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, затвердженого ВАК України). *(Особистий внесок: викладання теоретичного матеріалу, проведення експериментальних досліджень).*

23.Gavva O., Scientific bases of method of synthesis for the structure of machines that provide packing process by foodstuffs / O.Gavva, L.Kryvoplias-Volodina, M. Maslo //Journal of Food and Packaging Science Technique and Technologies. – Bulgaria, 2014. – Vol.2–Is.1. P. 89 -98.(входить до Переліку міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Open Academic Journals Index (OAJI)). *(Особистий внесок: викладання теоретичного матеріалу, експериментальні дослідження).*

24.Kryvoplias-Volodina, L. Ways to reduce dosing error of granular products in linear weight dosing machines /L.Kryvoplias-Volodina, O.Gavva // Journal of Food and Packaging Science Technique and Technologies. – Пловдив, Year II.№2.2013. – С. 232 - 237.(входить до Переліку міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Open Academic Journals Index (OAJI)). *(Особистий внесок: залежності для визначення кінематичних та динамічних параметрів мехатронних модулів, розробка нової конструкції модуля).*

25.Гавва, О.М.Аналіз компонування і методологія синтезу пакувального обладнання/Гавва О.М., Кривопляс-Володіна, Л.О. // Упаковка, №3, -2013. – С.41 – 47. (входить до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, затвердженого ВАК України). *(Особистий внесок: розроблено математичні моделі та обґрунтовані запропоновані компоновки пакувального обладнання).*

26.Гавва О.М., Оптимізація параметрів синхрограми пакувальних машин / О.М.Гавва, В.В.Халайджі, Л.О.Кривопляс-Володіна//Упаковка,- 2007.- №4.С.50 -51. (входить до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, затвердженого ВАК України). *(Особистий внесок: аналіз конструкцій, класифікація, визначення робочих параметрів).*

27.Кривопляс-Володіна, Л.О. Синтез інтегрованих моделей ежекторів для функціональних модулів пакувальних машин/Упаковка,- №3, 2018. – С.3 – 7. (входить до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, затвердженого ВАК України).

28. Gavva,O.M. There search mechanical dynamic of model of the a synchronous enginein systems of continuous transport/ O.Gavva, M.Yakymchuk, L.Kryvoplias-Volodina// Праці інституту електродинаміки НАН України, випуск 44, - 2016. - Р.94 -99 (входить до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, затвердженого ВАК України). *(Особистий внесок: огляд та аналіз конструкцій).*

29. Gavva, O.M. Reasons for the main directions of enhancement of mechanisms of orientation of tare loads in a packet creating machines/ O.Gavva, L.Kryvoplias-Volodina,

Е.Кохан //Technological complexes (scientific journal) - 2014.- №2(10). – Р. 9 -19.(входить до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, затвердженого ВАК України). *(Особистий внесок: рівняння для визначення динамічних та кінематичних параметрів роботи).*

30.Gavva, A. The criterion analysis of technological schemes and structures of vehicles forming transport packets from packing of goods/ A.Gavva, L.K rylvoplias-Volodina, E.Kokhan // Journal of Food and Packaging Science, Technique and Technologies, №12, - 2017 .- Р. 5 – 10. (входить до Переліку міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Open Academic Journals Index (ОАЖІ)). *(Особистий внесок: розробка нової структурної схеми керування, експериментальні дослідження).*

31.Volodin A. The integrated layout decisions for automatic control of packing systems / A.Volodin, L.Kryvoplias-Volodina // Automation of technological and business processes. – Volume 9. – Issue 1/2017. – Р. 22 -28. (входить до Переліку міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Open Academic Journals Index (ОАЖІ)). *(Особистий внесок: залежності для визначення кінематичних параметрів процесу, розробка нових структур керування, експериментальні дослідження).*

32. Gavva, O.M. Methodological aspects of the mathematical theory of friction it is applicable to bearing surfaces of overload devices/O.M. Gavva, L.Kryvoplias-Volodina// Journal of Food and Packaging Science Technique and Technologies. – Пловдив, - 2013. – С. 189 -193.(входить до Переліку міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Open Academic Journals Index (ОАЖІ)). *(Особистий внесок: теоретичні домлідження, розробка нової структурної схеми , експериментальні дослідження).*

33.Деренівська А.В. Переміщення картонних пачок шнековими конвеєрами у пакувальних машинах // А.В. Деренівська, Л.О. Кривопляс-Володіна, О.М.Гавва//Упаковка,- 2012.- №4.- С. 46 -50. (входить до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, затвердженого ВАК України). *(Особистий внесок: аналіз конструкцій, класифікація, визначення робочих параметрів).*

34.Кривопляс-Володіна, Л.О., Двигатель в упаковочной технике/Л.О.Кривопляс-Володіна, О.М. Гавва //Упаковка - №1. -2016. – С.32 – 38. (входить до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, затвердженого ВАК України). *(Особистий внесок: аналіз конструкцій, класифікація, узагальнення теоретичних положень).*

35.Кривопляс-Володіна, Л.О. Забезпечення заданої інтенсивності переміщення сипкої продукції із бункера в лінійних вагових дозаторах/ Л.О.Кривопляс-Володіна, О.М.Гавва //Вібрації в техніці та технологіях. – 2012. – № 4(68). – С. 103 -109.(входить до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, затвердженого ВАК України). *(Особистий внесок: проведення структурного синтезу, експериментальні дослідження).*

36. Кривопляс-Володіна, Л.О. Дослідження кінематики операції переміщення упаковки у формі паралелепіпеда за допомогою шнекового конвеєра в пакувальних машинахавтоматах/ О.М.Гавва, Л.О.Кривопляс-Володіна//Харчова промисловість. – 2012 . – № 13. – С. 180 -184. (входить до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, затвердженого ВАК України). *(Особистий внесок: викладання теоретичного матеріалу).*

37. Кривопляс-Володіна, Л.О. Методологія синтезу компоновочних рішень// Л.О.Кривопляс-Володіна, О.М.Гавва, А.І. Волчко // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. – Київ - 2013. – № 3. – С. 178 -182.(входить до

Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, затвердженого ВАК України). *(Особистий внесок: викладання теоретичного матеріалу, проведення експериментальних досліджень).*

38.Кривопляс-Володіна, Л.О. Основи вибору технологічного обладнання в пакувальних лініях харчових виробництв/Л.О. Кривопляс-Володіна, О.М.Гавва, А.В. Дерев'яська //Наукові праці НУХТ том 22. – 2016.- №6 С. 140 -151. . *(Особистий внесок: розробка методики вибору технологічного пакувального обладнання)*

39.Кривопляс-Володіна Л.О. Дослідження функціональних мехатронних модулів у структурі синтезу пакувальних машин /Додаток до ж-лу «Упаковка». Новітні технології пакування: матеріали доповідей XVII Науковопрактичної конференції молодих вчених, 20 квітня 2018р. - С.60 -64

40.Kryvoplias-Volodina, L. Development of mechatronic modules for packaging machines on the basis of synergetic integration elements/ L. Kryvoplias-Volodina, O. Gavva, T. Hnativ 56th Annual Science Conference of Ruse University «Industry 4.0. Business environment», Volum 56, book 10.2. - 2017, Ruse, Bulgaria. – P. 75 – 77. *(Особистий внесок: підготовка математичної моделі, узагальнення теоретичних положень).*

41. Кривопляс-Володіна Л.А., Гавва А.Н., Токарчук С.В. Синтез пропорціональних регуляторів тиску в функціональних модулях упаковочних машин// Сборник статей III Международной научно-практической конференции. БГФТУ. Минск, - 23 - 24 марта 2017г. - С.198 – 200

42.Гавва А.Н., КривоплясВолодіна Л.А., Кохан Е. Методологические подходы к оценке оптимальной компоновке упаковочного оборудования // University of Ruse “Angel Kanchev” – Научная конференция «PY&CY 15»Научные труды. Том 54. – серия 10.2. Bulgary, Ruse, Razgrad. – 2015, P.85 -91*(Особистий внесок: розробка математичної моделі,узагальнення понять та визначень).*

43.Володін С., Гнатів Т., Кривопляс-Володіна Л.О. Синтез мехатронної системи функціонального модуля пакувальної машини з пропорційним регулятором тиску // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XXII Міжнародної науковотехнічної конференції 23 -26.05.2017р. - НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». С.111 -114. *(Особистий внесок: розробка методології).*

44.Kryvoplias-Volodina, L. Synthesis dispensing system using piloted electro pneumatic actuator system / L.Kryvoplias-Volodina, O.M. Gavva // 8th Central European for Well-being Kyiv, Ukrain. Book of abstracts– 23-26 травня. – 2017, P.241 *(Особистий внесок: розробка математичної моделі,узагальнення понять та визначень).*

45.Кривопляс-Володіна, Л.О., Параметричні моделі технологічних процесів харчових виробництв / Л.О.Кривопляс-Володіна, О.М.Гавва, В.Б. Захаревич //Ресурсо- та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції основні засади її конкурентоздатності»: II Міжнародна спеціалізована науковопрактична конференція, К.: НУХТ, 2013 р. – С. 33 -35. *(Особистий внесок: аналіз конструкцій, класифікація, визначення робочих параметрів).*

46.Гавва О.М., Кривопляс-Володіна Л.О., Волчко А.І. Аналіз вібраційнозавантажувальних пристроїв машини для пакування дрібноштучних продуктів та шляхи удосконалення їх компоновочних рішень// 3rd International Specialized Scientific and Practical Conference, september 11. – Kyiv, NUFT. - 2014. - № 3. С. 1217. *(Особистий внесок: викладання теоретичного матеріалу, проведення експериментальних досліджень).*

47.Gnativ T. Study characteristics linear induction motor in the transport system package forming machines / T.Gnativ, O.Volodin, L.Kryvoplias-Volodina, O.Gavva //University of Ruse “Angel Kanchev”. Proceedings of Scientific Session. – Bulgaria, Ruse, 2017.

– Р. 21-25. (входить до Переліку міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Open Academic Journals Index (OAJI)). *(Особистий внесок: залежності для визначення кінематичних та динамічних параметрів мехатронних модулів).*

48.Кривопляс-Володіна Л.О., Багатокритеріальний структурно-параметричний синтез функціональних модулів поточковотехнологічних пакувальних систем/ О.М.Гавва, Л.О.Кривопляс-Володіна, А.В.Деренівська // Міжнародна науковотехнічна конференція –Scientific Works of NUFT Volume 23, Issue 5, Part 1, 7 -8 листопада 2017р. - Р. 98 – 109 (входить до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук, затвердженого ВАК України). *(Особистий внесок: проведення структурного синтезу, експериментальні дослідження).*

49.Кривопляс-Володіна, Л.О., Функціональні мехатронні модулі в структурі пакувального обладнання/ Л.О.Кривопляс-Володіна, С.В. Токарчук //«Modern scientific challenges and trends» Sciencecentrum.PL Warsaw: "iScience", 2018. Issue 5 – р.88 -95, ISBN 9788394940331.(входить до Переліку міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Open Academic Journals Index (OAJI), DOAJ). *(Особистий внесок: рівняння для визначення динамічних та кінематичних параметрів роботи, розробка нової структурної схеми керування, експериментальні дослідження).*

50.Кривопляс-Володіна, Л.О., Процеси моделювання внутрішніх транспортних і перевантажувальних модулів пакувальних машин для сипких харчових продуктів / Л.О.Кривопляс-Володіна, О.М. Гавва// НААН України. Інт прод. ресурсів. – II міжнародна науковопрактична конференція, 11 листопада 2014 р. - К.: НУХТ, – С.124-127. *(Особистий внесок: аналіз конструкцій, класифікація, визначення робочих параметрів).*

51.Гавва, О.М. Технічна досконалість пакувальних машин для реалізації ініціативи SaveFood / О.М. Гавва , М.В. Якимчук, Л.О. Кривопляс-Володіна // Пакувальна індустрія (технічні рішення в рамках ініціативи SaveFood»: XI Міжнародна науковопрактична конференція, 2017. - Львів. – С.200 -209. *(Особистий внесок: формалізація математичних моделей)*

52.Деренівська, А.В. Методика моделювання внутрішніх транспортних і перевантажувальних модулів машин для пакування продукції в картонну пачку/ А.В.Деренівська, Л.О.Кривопляс-Володіна, О.М. Гавва // Збірник праць за підсумками IV Міжнародної науковопрактичної конференції вчених, аспірантів і студентів. – Київ: НУБіП України, 2014 р. – С. 121 -122. *(Особистий внесок: розробка методології).*

53.Кривопляс-Володіна, Л.О. Інтегровані рішення функціональних мехатронних модулів в задачах синтезу пакувальних машин / Кривопляс-Володіна Л.О., Гавва О.М. //Гідроаеромеханіка в інженерній практиці: матеріали XXIII Міжнародної науковотехнічної конференції 19 - 22.06.2018р, НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». - С.164 -166. *(Особистий внесок: розробка методології).*

54.Гавва О.М. Моделювання розпилення газорідинної суміші струменевими фонтанками у функціональних модулях пакувальних машин / О.М.Гавва, Л.О.Кривопляс-Володіна, Г.Р. Валиулін //Наукові здобутки у вирішенні актуальних проблем виробництва та переробки сировини, стандартизації та безпеки продовольства: збірник праць VII Міжнародної науковопрактичної конференції вчених, аспірантів і студентів. – Київ, НУБіП, 2017.– С. 332 – 333. *(Особистий внесок: розробка методології, критерії оптимізації).*

55. Кривопляс-Володіна, Л.О., Інтегровані рішення компонувань пакувальних машиноавтоматів у технологічних системах /Л.О.Кривопляс-Володіна, О.М. Гавва// Нові-

тні технології пакування: XVI Науковопрактична конференція молодих вчених. Додаток до журналу «Упаковка». – Київ, 2017. – С. 51-53. (*Особистий внесок: розробка методології, понять та визначень, критерії оптимізації*).

56. Кривопляс-Володіна, Л.О., Критерії ефективності та синтез структури пакувальних машин/Л.О.Кривопляс-Володіна, О.М. Гавва, .О. О.Кохан// IVа Міжнародна спеціалізована науковопрактична конференція, 2015 р. – К. НУХТ, 2015. – С 118-120. (*Особистий внесок: підготовка математичної моделі*).

57. Кривопляс-Володіна Л.О., Гавва О.М., Валіулін Г.Р. Інтегровані рішення на базі модульної системи//VII Міжнародна спец. конф. «Ресурсо та енергоощадні технології виробництва і пакування харчової продукції – основні засади її конкурентноздатності» Київ, 2018. – С. 118 -120 (*Особистий внесок: узагальнення теоретичних положень, підготовка математичної моделі*).

58. Кривопляс-Володіна Л.О. Методи синтезу ежекторів у складі функціональних модулів пакувальних машин./ Л.О.Кривопляс-Володіна, А.В.Деренівська, О.М.Гавва, М.В.Якимчук, С.В. Токарчук // Proceedings of the III international scientific and practical conference international trends in science and technology June 30, 2018. – Warsaw, Poland, P.30 -36 (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка конструкції, узагальнення математичної моделі*).

59. Патент на винахід №95754 / Пристрій для переорієнтування сформованих пакетів / Гавва О.М., Кривопляс-Володіна Л.О., Деренівська А.В., Масло М.А., № а201013166; заявл. 05.11.2011; опубл. 25.08.2011, Бюл. №16 (*Особистий внесок: розробка конструкції, підготовка формули та опису*).

60. Патент на винахід № 97028 / Пристрій для фасування в'язких продуктів у ємності/ Кривопляс-Володіна Л.О., Тищенко Е.О., Валіулін Г.Р., № а201006750; заявл. 01.06.2010; опубл. 26.12.2011, Бюл. № 24 (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка конструкції, підготовка формули та опису*).

61. Патент на винахід № 99417 / Пристрій для переформування масивів з виробів циліндричної форми в один ряд / Валіулін Г.Р., Жарова С.І., Кривопляс-Володіна Л.О., Цвик М.М., № а201112394, заявл. 21.10.2011, опубл. 10.08.2012, Бюл. №15 (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка конструкції*).

62. Патент на винахід № 99501 / Пристрій для переорієнтування картонних пакетів / Гавва О.М., Кривопляс-Володіна Л.О., Деренівська А.В., Тищенко Є.О., № а201008450, заявл. 06.07.2010, опубл. 27.08.2012, Бюл. №16 (*Особистий внесок: участь у експерименті, підготовка формули та опису*).

63. Патент на винахід № 99977 / Пристрій для здійснення періодичного повороту вала стола фасувальної машини-автомата на заданий кут / Кривопляс-Володіна Л.О., Любімов В.М., Щербань Ю.О., № а201104857, заявл. 19.04.2011, опубл. 25.10.2012, Бюл. №20 (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка конструкції*).

64. Патент на винахід № 101119/ Пристрій для орієнтування виробів/ Кривопляс-Володіна Л.О., Халайджі В.В., Гавва О.М., Волчко А.І., Дороніна К.М., Павлов С.О., Волчко А.А. , № а201201191¹⁴, заявл. 06.02.2012, опубл. 25.02.2013, Бюл. №4 (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка конструкції, підготовка формули та опису*).

65. Патент на винахід № 77580 / Модуль переміщення вакуумзахоплюючого пристрою / Кривопляс-Володіна Л.О., Гавва О.М., Богославський І.О. , № u201207587, заявл. 20.06.2012, опубл. 25.02.2013, Бюл. №4 (*Особистий внесок: ідея конструкції, підготовка формули та опису*).

66. Патент на винахід № 80248 / Модуль захоплення, розкривання плоскоскладе-

них картонних заготовок з активною напрямною / Валіулін Г.Р., Жарова С.О., Кривопляс-Володіна Л.О., Кащенко В.С., № u201211182, заявл. 26.09.2012, опубл. 27.05.2013, Бюл. №10 (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка конструкції, підготовка формули та опису*).

67. Патент на винахід № 104387/ Пневмоциліндр поворотний / Волчко А.І., Волчко А.А. Гавва О.М., Кривопляс-Володіна Л.О., № a201301742, заявл. 13.02.2013, опубл. 27.01.2014, Бюл. №2 (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка конструкції*).

68. Патент на винахід № 104691/ Пневмоциліндр поворотний / Волчко А.І., Волчко А.А. Гавва О.М., Кривопляс-Володіна Л.О., № a201301745, заявл. 13.02.2013, опубл. 27.01.2014, Бюл. №4 (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка конструкції, опис*).

69. Патент на винахід № 108204 / Пристрій для орієнтування виробів / Волчко А.І., Волчко А.А. Гавва О.М., Кривопляс-Володіна Л.О., № a201201190, заявл. 06.02.2012, опубл. 10.04.2015, Бюл. №7 (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка ідеї*).

70. Патент на винахід № 109377/ Пристрій для здійснення періодичного повороту вала стола фасувальної машини-автомата на задані кут та час вистою / Кривопляс-Володіна Л.О., Любімов В.М., Легун А.В., №a201409760, заявл. 05.09.2014, опубл. 10.08.2015, Бюл. №15 (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка ідеї, опис*).

71. Патент на винахід № 109545 / Лінія для виготовлення петпляшок / Волчко А.І., Кривопляс-Володіна Л.О., Волчко А.А., № a201214244, заявл. 13.12.2012, опубл. 10.09.2015, Бюл. №17 (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка конструкції*).

72. Патент на винахід № 109620/ Пристрій для дозування штучних виробів сферичної форми / Волчко А.І., Волчко А.А. Гавва О.М., Кривопляс-Володіна Л.О., №a201411424, заявл. 20.10.2014, опубл. 10.09.2015, Бюл. №17 (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка конструкції, опис, участь в експериментальних дослідженнях*).

73. Патент на винахід № 112815 / Пневмоциліндр поворотний / Любімов В.М., Кривопляс-Володіна Л.О., №a201503461, заявл. 14.04.2015, опубл. 25.10.2016, Бюл. №20 (*Особистий внесок: розробка конструкції, опис, участь в експериментальних дослідженнях*).

74. Патент на винахід № 112637/ Бункер-живильник для сипких продуктів / Гавва О.М., Кривопляс-Володіна Л.О., №a201306660, заявл. 13.10.2011, опубл. 10.10.2016, Бюл. №19 (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка конструкції*).

75. Патент на винахід № 114850/ Закруточний механізм для загортання виробів у перекутку / Любімов В.М., Кривопляс-Володіна Л.О.; №a201512275, заявл. 11.12.2015, опубл. 10.08.2017, Бюл. №15 (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка ідеї, опис*).

76. Патент на винахід № 122444/ Вібраційний живильник: / Гавва О.М., Кривопляс-Володіна Л.О., Ковтун Р.О., Токарчук С.В., Володін С.О.; заявник Національний університет харчових технологій, № u201707210; заявл. 10.07.2017; опубл. 10.01.2018, Бюл. № 1 (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка конструкції, участь у проведенні експериментальних дослідженнях*).

77. Патент на винахід № 124394/ Пристрій для перевантаження дек візка роторної печі: / Гавва О.М., Кривопляс-Володіна Л.О., Токарчук С.В., Деренівська А.В.; заявник Національний університет харчових технологій, № u201709707; заявл. 04.10.2017, опубл. 10.04.2018, Бюл. № 7 (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка конструкції, підготовка формули та опису*).

78. Патент на винахід № 123312 /Пневмоциліндр двосторонньої дії з поворотним штоком /Валіулін Г.Р., Костюк С.В., Кривопляс-Володіна Л.О.; заявник Національний університет харчових технологій, № u201708115, заявл. 04.08.2017, опубл. 26.02.2018, Бюл. № 8 (*Особистий внесок: патентний пошук, розробка ідеї*)

79. Патент на винахід № 117424 /Універсальний пневмоциліндр з поворотним штоком /Валіулін Г.Р., Кривопляс-Володіна Л.О., Кушнір О.В.; заявник Національний університет харчових технологій, № a201705023, заявл. 24.05.2017, опубл. 25.07.2018, Бюл. № 14 (*Особистий внесок: патентний пошук, формування опису ідеї технічного рішення*)

80. Патент на винахід №116313/Пристрій для виймання горизонтально укладених пляшок з транспортної тари /Валіулін Г.Р., Кривопляс-Володіна Л.О., Кушнір О.В. ; заявник Національний університет харчових технологій, № a201612895, заявл. 19.12.2016, опубл. 26.02.2018, Бюл. № 4 (*Особистий внесок: патентний пошук, опис*)

АНОТАЦІЯ

Кривопляс-Володіна Л.О. Багатокритеріальний синтез мехатронних функціональних модулів машин пакування харчових продуктів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.18.12 "Процеси та обладнання харчових, мікробіологічних та фармацевтичних виробництв" (технічні науки). – Національний університет харчових технологій Міністерства освіти і науки України, Київ, 2019.

Дисертація присвячена розробленню концепції багатокритеріального синтезу пакувального обладнання за заданими характеристиками на основі системного підходу до оцінки їхньої якості та конкурентоспроможності в структурі харчових виробництв. Обґрунтовано доцільність та актуальність дисертаційної роботи. Відзначено важливість багатокритеріального синтезу технічних рішень компонування функціональних мехатронних модулів у складі пакувальних машин харчових виробництв. Виконано аналіз сучасних проблем багатокритеріального синтезу поточково-технологічних систем пакувальних ліній харчових виробництв.

Запропоновано, обґрунтовано та доведено ефективність концепції багатокритеріального синтезу на прикладі ФММ подачі рулонного матеріалу для пакувальної машини із різними функціональними пристроями, обґрунтовано доцільність їх використання для різних критеріїв задачі оптимізації. Запропоновано методику оцінки пакувального обладнання із комплексним критерієм оцінки ОЕЕ для різних компонувань ФММ найменш дослідженої групи машин для пакування штучних та дрібноштучних харчових продуктів. Розроблено методику багатокритеріальної оптимізації за принципом пошуку Паретоефективних рішень, яка включає програму, що автоматично генерує усі можливі варіанти структури машини та будує графік залежності значень часткових критеріїв оптимальності.

Проведено апробацію результатів дисертаційного дослідження в промислових умовах. Розроблено та захищено патентами нові конструктивні технічні рішення для пакувальних машин харчових продуктів.

Ключові слова: критерії, пакувальна машина, функціональні, модуль, мехатронна система, упаковка, споживча тара, математична модель.

ANNOTATION

Kryvoplias-Volodina L.O. Multicriteria synthesis of mechatronic functional modules of machines for food packaging. Qualification of scientific work on the rights of manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.18.12 "Processes and equipment of food, microbiological and pharmaceutical industries" (technical sciences). National University of Food Technologies of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to the development of new methods of multicriteria synthesis of packaging equipment on the basis of the given characteristics on the basis of a systematic approach to assessing their quality and competitiveness in the structure of food production.

The analysis of modern problems of multicriteria synthesis of flow technological systems of packing lines of food production. Based on the analysis, the following critical conclusions and perspectives of research are formulated:

- the effectiveness of known methods and algorithms of parametric optimization essentially depends on the type and nature of the change in the function of purpose and the presence of a type of restrictions;

- the solution of the problem of choosing a rational structure and optimal parameters of the packaging machine is mainly based on the technology of through design (Concurrent Technology) — parallel design of a packaging machine with an integrated approach to the selection of criteria for assessing the quality of future packaging equipment for food production.

- the consistent solution of the tasks of structural and parametric synthesis and the task of choosing the layout of the packaging machine does not make it possible to comprehensively evaluate potential possibilities of alternative variants of packaging equipment in the early stages of designing is carried out Overall Equipment Effectiveness (OEE). The description of the program of analytical and experimental research, the synthesis of the algorithm of action to achieve the aim, the substantiation of the object and subject of research, and determined the methods of experimental research.

The schemes and models of multistage step by step multicriterial synthesis realization on the example of FMM for feeding a roll packaging material for a packing machine with different FSS are presented, the expediency of their use for various criteria of optimization problem is substantiated. The technique of evaluation of packing equipment with the complex criterion of estimation of OEE for various combinations of FMM of the least studied group of machines for packing of artificial and fine food products is offered. The actuators dynamics characteristics and control system of power part of positional electro-pneumatic actuators were researched. The methods of mathematical and computer modeling, and methods of solving ordinary differential equations and partial differential equations and method of correlation analysis were used. The method of formation of the structure of the electropneumatic positional actuator is described on the basis of the principles of mechatronics with the analysis of the laws of motion, suitable for the pneumatic drive.

In the obtained results of modeling the kinematic load and the pressure of the working position pneumatic actuator, clearly observed that the inertial component increases in 4 stages (braking), during the narrowing the exhaust section of the working cylinder of the positional pneumatic actuator. The results of mathematical modeling for positional pneumatic actuators with the condition of changing the section of the exhaust hole allowed to track all the kinematic characteristics of the actuator. The obtained results allow to assign to the working body the law of motion, approximated to the optimal on the speed of action, not exceeding at the same time the maximum permissible dynamic influences for a moving artificial product. The integration of ejector models for functional mechatronic modules of packaging machines. The approaches of

simulation experiment with mathematical models of communication between kinematic and dynamic parameters are given. The characterization of the pressure and velocity distribution inside ejection systems with the change of the working medium type in singlephase pneumatic systems of packaging machines is described. Developed alternatives to empirical and semiempirical methods with approaches based on solid state mechanics, Computational Fluid Dynamics (CFD) methods when the NavierStokes or Reynolds equations are solved using numerical methods. The mathematical models with effective method of analysis of productivity of the ejector, as well as separate functional systems of packing machines with nozzle devices are constructed.

Definitely the kinematic and dynamic parameters of mechatronic systems in different modes of work during the study: the process of submitting the roll of packing material on the stage of the formation of flexible consumer packaging; of the dosage of the gas and liquid components when processing the packing material and food product; process of transportation of smallpiece products on the stage of the packaging.

Results of experimental researches are in the form of graphs with the comparative characteristic of the theoretical and actual process for each of the following options. To limit the influence of destructive phenomena, a method for determining the optimal kinematic load, taking into account the physical and mechanical properties of an artificial food product and consumer packaging, is proposed. The results should be used when designing a dosing-wrapping module, which has a traction drive.

The research results make it possible to determine the limits of the use of the pneumatic system during the gas delivery to the product or packaging. The zone of optimal use of the ejector is determined, when the gas-dynamic system passes into the supersonic destructive mode of filing of the directed jet. Thus, determine the conditions of rational operation of the FMM packaging machine. The approbation of the developed mathematical models of typical functional mechatronic modules of packaging machines of food production on original experimental stands and in industrial conditions confirmed the adequacy of the results of mathematical modeling with deviations within the limits of the error for various technological operations.

The applied aspects of production methodology for layout of packing equipment involving functional mechatronic modules for packaging food products in consumer packaging. Describes the technical proposals used during the designing of the new packing equipment and modernization of existing enterprises: LLC "CAMOZZI", LLC "PAK SERVICE", LLC "Poninkivska cardboard and paper mill-Ukraine", LLC "PACKAGING TECHNOLOGY".

The estimated economic effect of the implementation is 231 thousand hryvnia for individual packaging machines and the improvement of functional mechatronic modules.

Keywords: criteria, packaging machine, functional, module, mechanical system, packaging, consumer packaging, mathematical model.

Підп. до друку 13.03.19. Наклад 100пр. Зам.№7-19

НУХТ. 01601 Київ -33, вул. Володимирська, 68

Свідоцтво про реєстрацію серія ДК № 1786 від 18.05.04р.