

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет харчових технологій

ЧУПРИНА АНАТОЛІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 663/664.04.3

**НАУКОВЕ ОБГРУНТУВАННЯ РОЗРОБКИ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ
МОДУЛІВ ПАКЕТОФОРМУВАЛЬНИХ МАШИН
ДЛЯ ПРОДОВОЛЬЧИХ ВАНТАЖІВ**

Спеціальність 05.18.12 – процеси й обладнання харчових, мікробіологічних
і фармацевтичних виробництв

АВТОРЕФЕРАТ
на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2004

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор **Гавва Олександр Миколайович**,
Національний університет харчових технологій,
професор кафедри технічної механіки і пакувальної техніки.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Пушанко Микола Миколайович**,
Національний університет харчових технологій, професор кафедри
технологічного обладнання харчових виробництв

доктор технічних наук, професор **Маламен Георгій Дмитрович**,
Одеська національна академія харчових технологій,
професор кафедри інженерної та комп'ютерної графіки

Провідна установа: Національний університет „Львівська політехніка”,
Міністерства освіти і науки України, м. Львів

Захист відбудеться „ ___ ” лютого 2005 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої
ради Д 26.058.02 в Національному університеті харчових технологій. Україна, м. Київ, вул.
Володимирська, 68.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного університету харчових
технологій (Україна, м. Київ, вул. Володимирська, 68)

Автореферат розісланий „ ___ ” січня 2005 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Зав'ялов В.Л.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Розширення і вдосконалення пакетного способу оброблення тарно-штучних продовольчих вантажів є резервом для зниження витрат на їх виробництво, складування, транспортування, виконання НРТС робіт, а також зниження втрат продукції під час виконання логістичних операцій. Однак, темпи розширення застосування пакетного способу перевезень тарно-штучних вантажів стримуються, в основному, відсутністю достатньої гами вітчизняних серійних зразків відповідного типу машин.

У зв'язку з великою різноманітністю типів вантажів, вимогами по продуктивності напрямками вантажопотоків та іншими особливостями виробництва у кожного окремого замовника, виникає потреба у швидкій модернізації конструкції пакетоформувальних машин (ПФМ). Існуючі методи і методики проектування пакувальної техніки у цілому та ПФМ зокрема не забезпечують потрібної ступені гнучкості. Індивідуальне проектування спеціальних машин вимагає значних фінансових витрат, витрат часу та пов'язане з ризиком помилок.

Завданням даної роботи є наукове обґрунтування методу модульного проектування ПФМ для продовольчих вантажів та визначення раціональних параметрів їх функціональних блоків.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась відповідно до пріоритетного напрямку робіт НУХТ кафедри “Технічна механіка і пакувальна техніка” “Розробка наукових основ тепломасообмінних та інших робочих процесів харчових виробництв, в тому числі з урахуванням впливу фізичних полів, з метою створення нового високоефективного обладнання, засобів механізації та автоматизації для переробних галузей” у 1996-1997 рр. та “Розробка наукових основ технологічних процесів харчових виробництв, в тому числі з урахуванням впливу фізичних полів, з метою створення нового високоефективного обладнання, засобів механізації та автоматизації для переробних галузей” у 1998-1999 рр., а також у зв'язку з виконанням господарчої роботи “Визначення раціональних параметрів основних механізмів і пристроїв базової універсальної ПФМ”.

Робота виконувалась також згідно держбюджетних планів НУХТ кафедри технічної механіки і пакувальної техніки і відповідає Закону України від 11 липня 2001 р. № 2623-3 “Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки”.

Автором особисто розроблено структурний, потоково-енергетичний та сигнальний графі технологічного процесу формування транспортних пакетів, визначено раціональну структурну схему пакетоформувальної машини.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є наукове обґрунтування вибору методів модульної системи проектування та визначення раціональних параметрів ПФМ, що сприяє

зниженню енерговитрат під час формування транспортних пакетів.

Для досягнення цієї мети розв'язані такі задачі:

- проаналізовано технологічні процеси формування транспортного пакета;
- досліджено енергетичні та масові потоки у ПФМ і побудовано їх математичні моделі на основі теорії графів;
- розроблено динамічну модель підйально-опускного механізму з електромеханічним приводом і сформульовано показник якості, що виражає енерговитрати у механізмі;
- визначено раціональне значення маси противаги підйально-опускного механізму та функцію керування, що надають показнику якості мінімального значення;
- експериментально визначено логарифмічний декремент затухання динамічної системи досліджуваного підйально-опускного механізму пакетоформувальної машини ПС;
- розроблено математичну модель процесу профілювання м'якої транспортної тари із сипкою харчовою продукцією;
- експериментально визначено відсутні у літературі реологічні характеристики типових видів сипкої харчової продукції (солі, цукру, пшона);
- визначено діаметр валка, який мінімізує витрати енергії на виконання операції профілювання м'якої транспортної тари із сипкою продукцією.

Об'єктом досліджень є технологічні операції та робочі органи машини для формування транспортних пакетів із тарних вантажів із харчовою продукцією.

Предметом дослідження є математичні моделі, що відображають процес пакування і робочі органи пакетоформувальних машин.

Методи досліджень. Для розв'язання поставлених задач використаний комплексний метод досліджень. Для аналізу параметрів масових та енергетичних потоків у ПФМ використані: теорія графів і математичне програмування; основні положення динаміки електроприводу; теорія машин і механізмів; деталі машин і підйально-транспортні машини; теорія реології сипкої продукції. У процесі проведення експериментальних досліджень використані теорія математичної статистики і основи активного і пасивного експерименту, що дозволили визначити значення логарифмічного декременту затухання динамічної системи для розрахунку енерговитрат і реологічні характеристики солі, цукру та пшона. Експериментальна частина роботи виконана в лабораторіях НУХТ та Укр НДІ Сіль (м. Артемівськ).

Наукова новизна одержаних результатів:

- застосовано топологічний метод для аналізу та синтезу структурних і конструктивних схем пакетоформувального обладнання за умови мінімізації енерговитрат;
- отримано в аналітичному вигляді розв'язок задачі мінімізації показника якості (енерговитрат) у електромеханічному приводі підйально-опускного механізму ПФМ;

- визначено параметри, що дають можливість оптимізувати енерговитрати приводів функціональних модулів пакетоформувальних машин;
- визначено раціональні параметри руху платформи підйально-опускного пристрою за умови виконання заданих кінематичних обмежень на триділянковому переміщенні. Для цього поетапно розглянута динамічна модель механізму. Використавши теорію оптимального керування отримані: функції керування процесом на етапах розгону, руху з постійною швидкістю та гальмування і система рівнянь двоточкової граничної задачі, рішення якої дає можливість оптимізувати рух механізму на покроковому переміщенні з навантаженням, що дискретно змінюється в процесі усього технологічного циклу;
- розроблено методи вибору раціональних структурних та конструктивних схем пакетоформувальної машини;
- розроблено математичну модель процесу профілювання м'якої транспортної тари з сипкою харчовою продукцією.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується реалізацією методу модульного проектування під час створення базової уніфікованої пакетоформувальної машини та методик визначення раціональних параметрів підйально-опускного пристрою та пристрою профілювання м'якої тари з сипкою харчовою продукцією.

Наукове значення роботи. Результати теоретичних та експериментальних досліджень доповнюють наукову базу в галузі застосування методів модульного проектування техніки, поглиблюють основні теоретичні положення динамічного аналізу електромеханічного приводу підйально-опускних механізмів; а створена математична модель процесу профілювання м'якої транспортної тари з сипкою харчовою продукцією дає можливість відобразити реологію процесу.

Практичне значення отриманих результатів. Результати проведених теоретичних та експериментальних досліджень реалізовані за наступними напрямками:

Розроблені структурний граф, граф зв'язків та сигнальний граф технологічного процесу формування транспортного пакета, застосування яких дозволяє у кожному окремому випадку обрати оптимальну структурну та конструктивну схеми ПФМ за умови мінімальної вартості її виробництва та експлуатації.

Запропонована методика вибору раціональних параметрів підйально-опускного пристрою пакетоформувальної машини ПС дозволила знизити енерговитрати у пристрої за цикл формування транспортного пакета на 48 %.

Розроблена математична модель операції профілювання м'якої транспортної тари із сипкою харчовою продукцією дозволяє визначити раціональні геометричні та кінематичні

параметри пристрою за умови мінімальних витрат енергії.

Особистий внесок здобувача. Автором особисто розроблено: структурний граф, граф зв'язків та сигнальний граф технологічного процесу формування транспортного пакета; динамічну модель підйимально-опускного механізму з електромеханічним приводом з урахуванням дисипативної складової та використання противаги; математичну модель процесу профілювання м'якої транспортної тари з сипкою харчовою продукцією; постановку і проведення експериментів та обробку їх результатів; формулювання висновків та пропозицій.

Апробація результатів дисертації. Основні положення теоретичних і експериментальних досліджень доповідались і отримали позитивну оцінку на: Всеукраїнській науково-технічній конференції “Розробка та впровадження прогресивних технологій та обладнання у харчову та переробну промисловість” (Київ, 1995); міжнародній науково-технічній конференції “Розроблення та впровадження прогресивних ресурсощадних технологій та обладнання в харчову та переробну промисловість” (Київ, 1997); VII Міжнародній науково-технічній конференції „Приоритетні напрями впровадження в харчову промисловість сучасних технологій, обладнання і нових видів продуктів оздоровчого та спеціального призначення” (Київ, 2001); 61 і 63 наукових конференціях УДУХТ (1995, 1997).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані в 14 наукових працях, в тому числі: 9 статей в наукових фахових виданнях, 1 стаття депонована в ДНТБ України, 5 – тези доповідей.

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків.

Робота викладена на 157 сторінках, має 31 рисунок (на 27 сторінках), 2 таблиці (на 1 сторінці), 3 додатки, 110 літературних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, показано її народногосподарське значення, сформульовані мета і задачі досліджень та викладено її загальну характеристику.

У першому розділі проаналізовано інформаційні та технічні джерела з питань застосування модульної системи проектування технічних систем у різних галузях народного господарства та методи визначення раціональних параметрів функціональних модулів ПФМ.

Питанням застосування модульної системи проектування у різних галузях народного господарства присвячені наукові праці А.Л. Васильєва, Л.А.Золотухіної, Л.К. Озола, А.К.Нонікова, О.Ф. Пославського та ін., у яких наводяться методи розробки конструкцій функціональних модулів, основи уніфікації, теорії наслідування та впорядкування структури

методами багатовимірної класифікації.

Фундаментальні теоретичні та експериментальні дослідження в області пакетних перевезень і пакетоформуальної техніки виконані Буровим А.А., Вацуро А.М., Гаввою О.М., Єгоровим В.Т., Кривоплясом О.П., Меньшеніним А.И., Ріделем А.Е., Ріделем Е.І., Шкуріним В.А., Щегловим В.Ф. та іншими. Аналіз цих досліджень та розробки відомих закордонних фірм “Möllers”, “Baumer”, “Leifeld+Lemke”, “KHS”, “Krones” (Німеччина), “Iwema” (Швеція) та ін. дали змогу узагальнити основні конструктивні схеми та параметри пакетоформуальних машин у цілому і окремих їх пристроїв та механізмів.

У другому розділі проаналізовані основні та допоміжні операції технологічних процесів формування транспортних пакетів із продовольчих вантажів та методом декомпозиції визначені однотипні операції та пристрої, що їх виконують. Застосування топологічного методу дозволило формальним чином встановити функціональний зв'язок між технологічною топологією (схемою виконання технологічного процесу) та кількісними характеристиками функціонування системи у вигляді матеріальних та енергетичних навантажень (масова продуктивність та потужність, що споживається) на елементи технічної системи. Для розгляду всіх можливих схем технологічних процесів формування пакета із тарно-штучних вантажів розроблено структурний граф технологічного процесу.

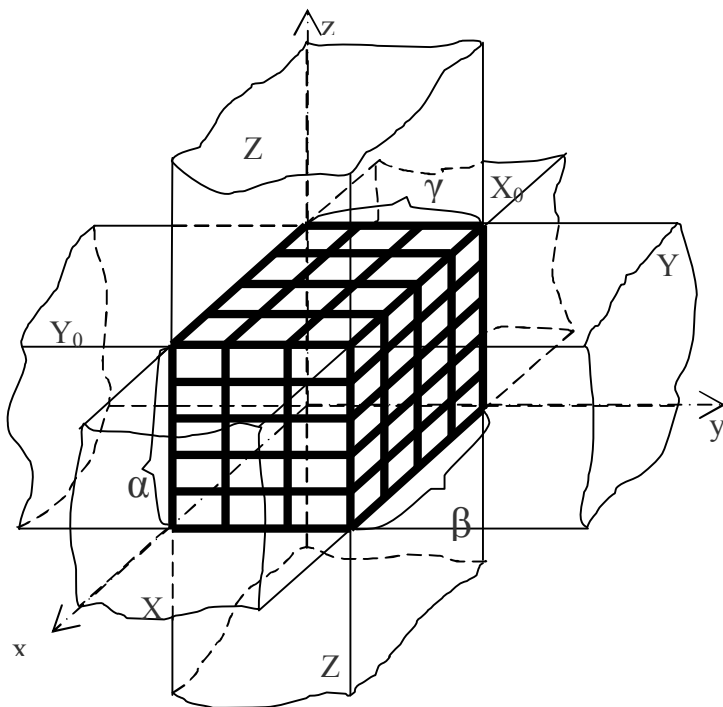


Рис. 1. Схема для визначення кількості операцій під час формування транспортного пакета

їх укрупнення у ряди, шари, штабелі. Виконаний аналіз дозволив визначити схему формування, що забезпечує мінімальну кількість операцій. Під час формування пакета з одиничних вантажів кількість переміщень визначається:

Для визначення уніфікованої структурної схеми машини для виконання технологічного процесу пакування продовольчої продукції, у різній транспортній тарі, було виконано аналіз структурного графа технологічного процесу з визначенням видів і кількості операцій, які необхідно виконати для формування транспортного пакета. Розрахункова схема для аналізу кількості операцій, наведена на рис. 1.

Розглянуті всі можливі напрямки подачі вантажу, види вантажів та можливість попереднього

- якщо вантаж знаходиться поза позиціями Y_0, X_0, Y, X, Z та Z_0 : $N = 3 \beta \gamma \alpha$ (1)

- якщо вантаж знаходиться на одній з площин граней пакета: $N = 3 \beta \gamma \alpha - \beta \gamma$, (2)

де α, β, γ – відповідно кількість вантажів по висоті, ширині та довжині пакета, N – кількість операцій переміщення під час формування пакета.

Проведено аналіз побудованого графа зв'язків та сигнального графа (рис.2), які є іконографічною математичною моделлю технологічного процесу формування транспортного пакета, що відображає взаємозв'язок між масовим потоком через систему та витратами енергії в системі та топологією процесу.

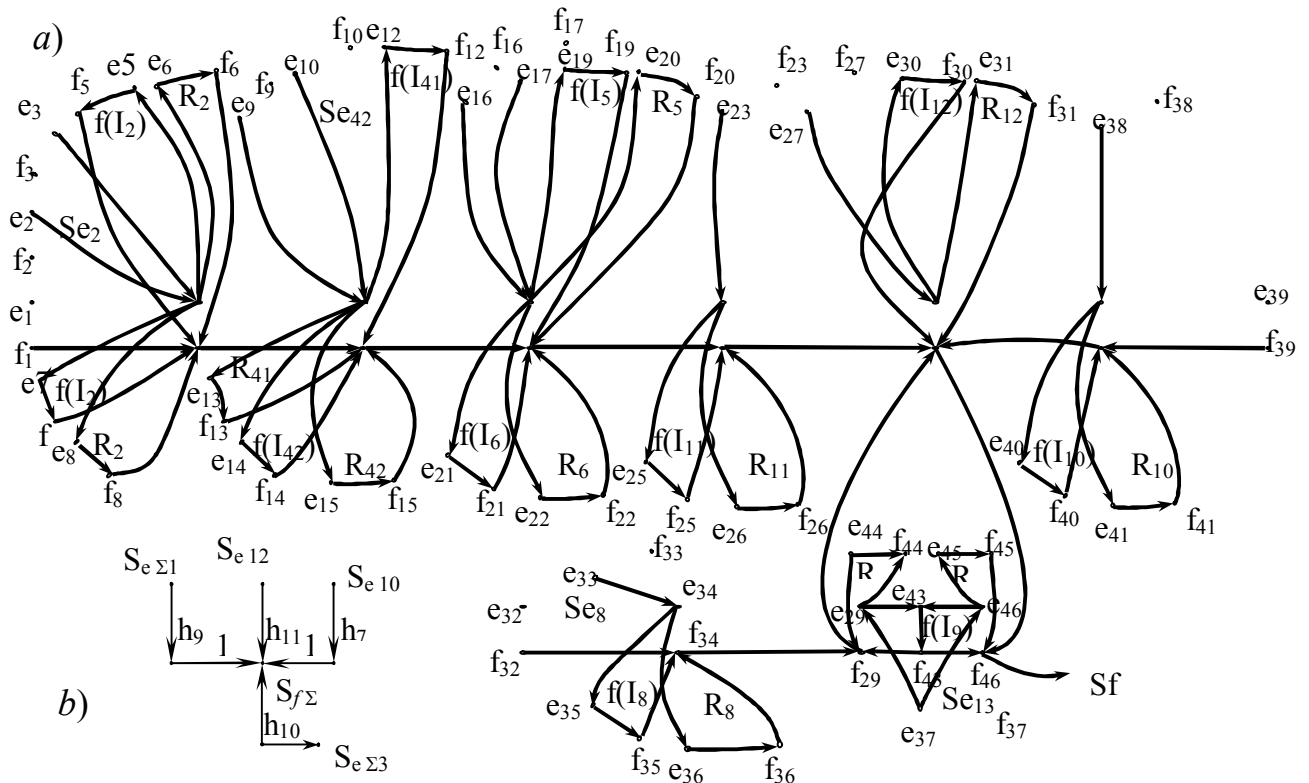


Рис. 2. а) Сигнальний граф технологічного процесу формування транспортного пакета; б) елементарний зведений вид сигнального графа

Виходячи з кінцевого компонентного рівняння системи, масово-енергетичні потоки в системі співвідносяться між собою за наступними залежностями:

$$S_{e\Sigma} = (h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 + h_8)S_{f\beta} + (h_5 + h_7 + h_8)S_{f\gamma} + (h_5 + h_6 + 2h_8)S_{f\alpha}, \quad (3)$$

де $S_{e\Sigma}$ – загальне споживання енергії; $S_{f\beta}, S_{f\alpha}, S_{f\gamma}$ – масові потоки вантажу, засобів пакування та піддонів через технічну систему; h_1-h_8 – передаточні функції гілок сигнального графа відповідно: передаточна функція витрат енергії на конвеєрі подачі, на конвеєрі орієнтування вантажів, на конвеєрі накопичення вантажів, на пристрої вкладання шару, у підйімально-опускному пристрої, у пристрої виділення одиничного піддону, у пристрої забезпечення засобами пакування, у конвеєрі транспортування одиничного піддону та сформованого пакета.

На рис. 3 наведена оптимізована за енерговитратами осцилограма сумарної потужності приводів уніфікованої ПФМ ПС за цикл формування транспортного пакета з

мішків з сипкою продукцією, масою 50 кг, схема формування – трійник, 8 шарів у пакеті, продуктивність – 800 мішків на годину.

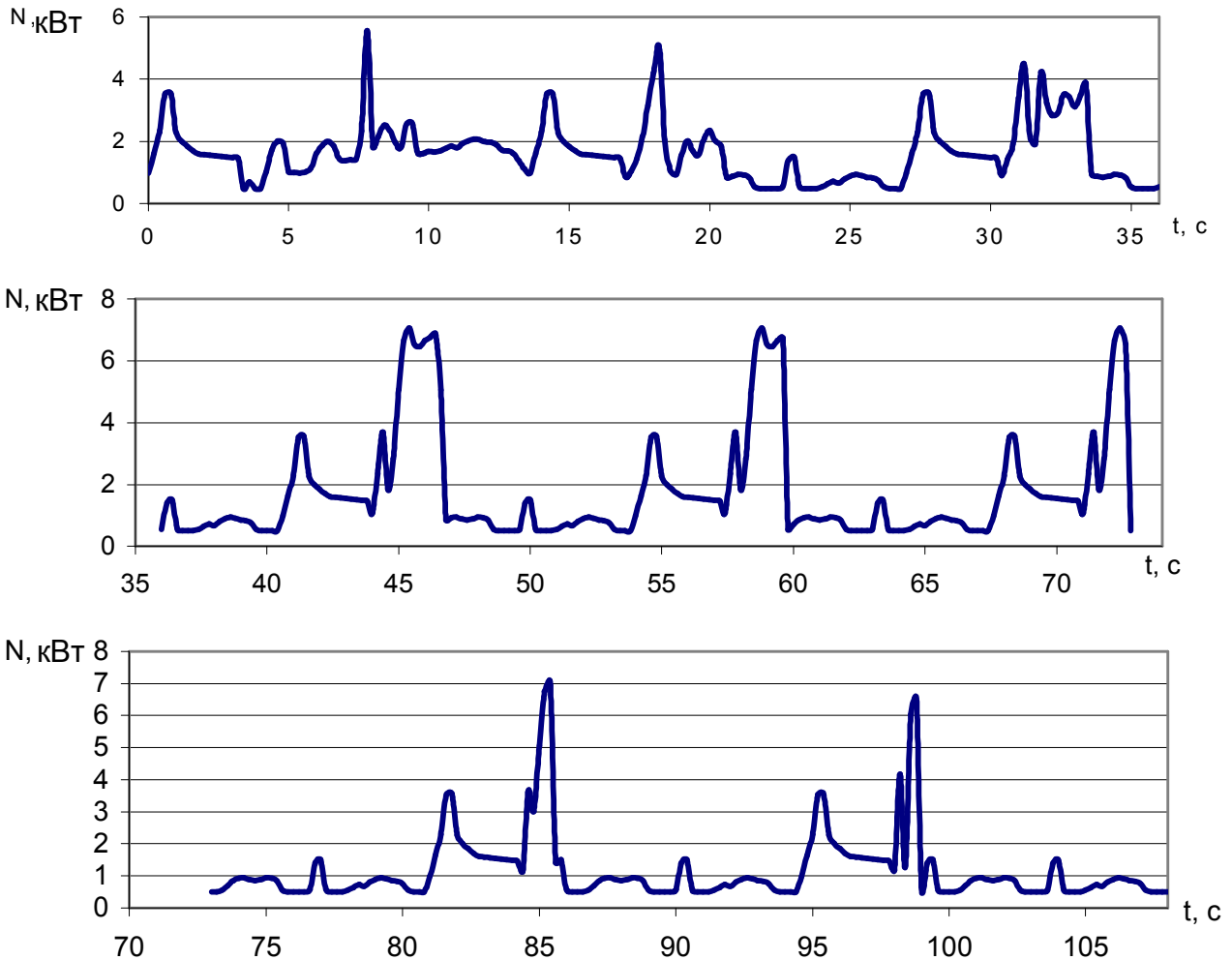


Рис. 3. Осцилограма сумарної потужності приводів уніфікованої пакетоформувальної машини ПС

Під час аналізу функціональних модулів ПФМ для вантажів у м'якій транспортній тарі із сипкою продукцією встановлено необхідність в дослідженнях параметрів пристрою профілювання м'якої транспортної тари з сипкою харчовою продукцією, а також в удосконаленні методики визначення раціональних параметрів підйально-опускного механізму за умови мінімізації енерговитрат як пристрою, що є найбільшим споживачем енергії у пакетоформувальній машині. Це і обумовило постановку задач у розділах 3 та 4.

У третьому розділі виконано аналіз конструктивних схем підйально-опускного пристрою ПФМ з електромеханічним приводом, розроблено його динамічну модель. На рис. 4 наведено типову схему підйально-опускного пристрою. Використання противаги у даній конструкції пристрою перетворює динамічну модель системи у тримасову, у порівнянні із загальноприйнятою двомасовою.

Рух тримасової системи описується системою диференційних рівнянь:

$$\begin{cases} I_1 \ddot{\varphi}_1 + b_{12} (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) + c_{12} (\varphi_1 - \varphi_2) = M(t); \\ I_2 \ddot{\varphi}_2 - b_{12} (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) - c_{12} (\varphi_1 - \varphi_2) + b_{23} (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) + c_{23} (\varphi_2 - \varphi_3) = \mp M_2; \\ I_3 \ddot{\varphi}_3 - b_{23} (\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_3) - c_{23} (\varphi_2 - \varphi_3) = \pm M_3; \end{cases} \quad (4)$$

де $\varphi_1 \dots \varphi_3$, $\dot{\varphi}_1 \dots \dot{\varphi}_3$, $\ddot{\varphi}_1 \dots \ddot{\varphi}_3$ - відповідно приведені до трьох мас кутове переміщення, швидкість та прискорення; b_{12} , b_{23} - коефіцієнти демпфування гнучкого зв'язку відповідно між масами 1, 2 та масами 2, 3; c_{12} - коефіцієнт жорсткості гнучкого зв'язку відповідно між масами 1 та 2 та масами 2 та 3; $I_1 \dots I_3$ - відповідно приведені моменти інерції приводу, маси платформи та маси противаги; M_2 та M_3 - відповідно приведені статичні моменти опору руху платформи та противаги; $M(t)$ - залежно від режиму, що розглядається - крутний момент двигуна на етапі пуску, або момент гальма - функція керування $M(t)$.

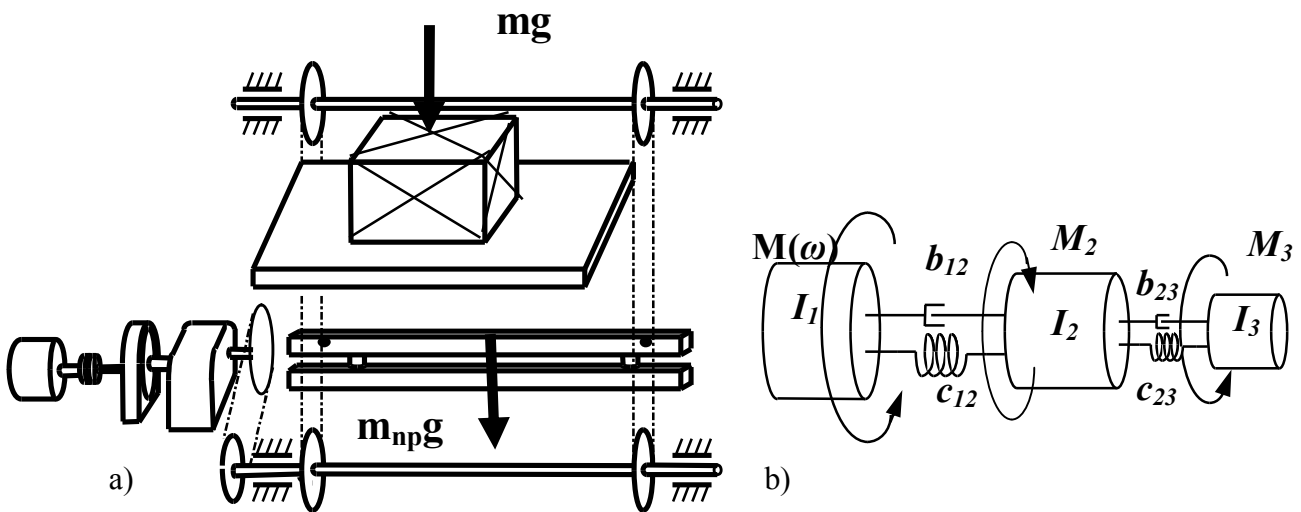


Рис.4. Схема підйимально-опускного механізму ПФМ:
а) типова кінематична схема; б) схема динамічної моделі

Оскільки функція $M(t)$ перетворює систему (4) в нелінійну, розв'язок останньої можна знайти відомими чисельними методами. Так, розв'язок системи рівнянь (4) наведено у вигляді графіків залежності швидкості від часу для режимів: піднімання платформи та покрокового переміщення до низу з кількістю шарів вантажів від 1 до 8 (рис.5).

Розроблена математична модель дозволила вибрати раціональні значення параметрів пристрою за критерієм мінімізації енерговитрат. Задача полягала у тому, щоб на етапі пуску та усталеного руху визначити, які параметри і яким чином впливають на витрати енергії у двигуні, і на етапі гальмування - припустиму функцію керування $M(t)$, яка б мінімізувала показник якості

$$J = -t_r (P_2 + P_3) + \int_0^{t_r} P_4 (M(t)) dt, \quad (5)$$

де J - показник якості, t_r - час гальмування, P_2 , P_3 і P_4 - потужність, що споживається відповідно двигуном за час пуску, усталеного руху та гальмом за цей же час та електроприводом гальма під час гальмування.

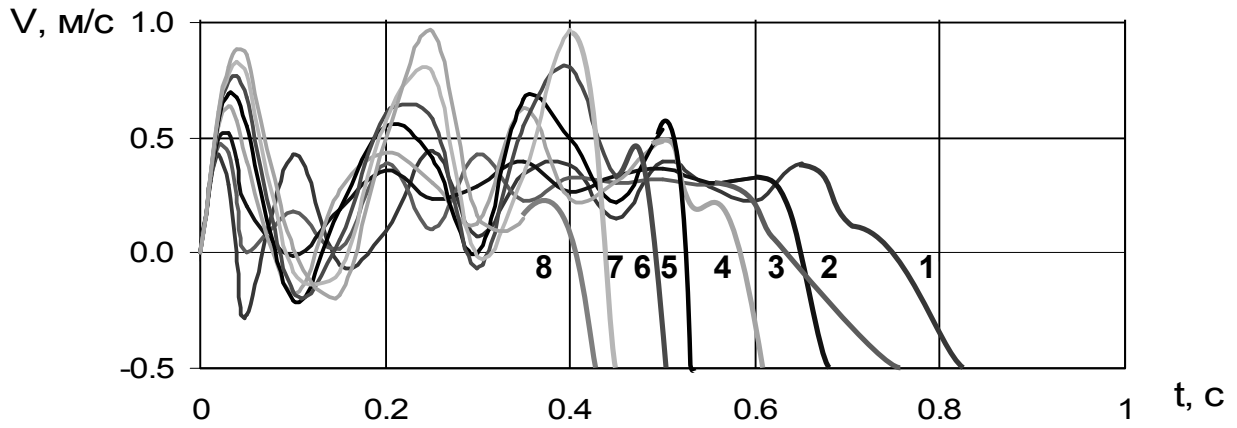


Рис. 5. Зміна швидкості другої маси (платформи) на етапі розгону та усталеного руху: 1 – з 8-ма шарами вантажів на платформі; 2 – з 7-ма шарами; 3 – з 6-ма шарами; 4 – з 5-ма шарами; 5 – з 4-ма шарами; 6 – з 3-ма шарами; 7 – з 2-ма шарами; 8 – з одним шаром вантажів на платформі

Дана задача відноситься до класу оптимальних задач з параметрами. Систему (4) було записано у фазових координатах. Далі до фазової системи було введено ще одну координату x_0 , закон зміни якої має вигляд

$$\dot{x}_0 = P_4(M(t)) \quad (6)$$

Було складено функцію Гамільтона-Понтрягіна

$$H(x, M, \lambda, t) = \sum_{\alpha=0}^4 \lambda_{\alpha} F_{\alpha}(x, M) = \lambda_0 P_4(M) + \lambda_1 x_2 + \lambda_2 (M / I_1 - b / I_2 \cdot x_4 - c / I_1 \cdot x_3) + \lambda_3 x_4 + \lambda_4 (M / I_1 + M_2 / I_2 - b(I_1^{-1} + I_2^{-1})x_3 - c(I_1^{-1} + I_2^{-1})x_3) \quad (7)$$

де, $\lambda_i, i = \overline{0,4}$ задовольняє спряжену систему

$$\dot{\lambda}_i = - \sum_{\alpha=0}^4 \frac{\partial F_{\alpha}(x, M)}{\partial x_i} \lambda_{\alpha} \quad (8)$$

записану у загальному вигляді. У таких функціях позначення $F_i, i = \overline{1,4}$ відповідає правій частині i -го рівняння фазової системи, а F_0 - лівій його частині.

Для визначення оптимальної маси противаги за теорією екстремальних задач з параметрами (у нашому випадку параметр - m_{np} , маса противаги) була застосована рівність

$$\sum_{\alpha=0}^4 \int_0^{t_r} \lambda_{\alpha}(t) \frac{\partial F_{\alpha}(x(t), M(t), m_{np})}{\partial m_{np}} dt = 0 \quad (9)$$

Розв'язок задачі керування звівся до складної двоточкової граничної задачі.

$$\begin{cases} x_1(0) = 0; x_2(0) = \omega_y; \dot{x}_2(0) = 0; x_3(0) = x_{30}; x_4(0) = x_{40}; x_2(t_r) = 0; \dot{x}_2(t_r) = 0; \\ \xi + \omega_y t_r - x_1(t_r) = 0; \int_0^{t_r} F(M(t_r), x(t_r), \lambda(t_r), t_r, m_{np}) dt = 0; \\ \lambda_3(t_r) x_4(t_r) + \lambda_4(t_r) M(t_r) / I_1 - a c x_3(t_r) + (M_2 / I_2 - a b x_4(t_r)) + \\ + p M^2(t_r) + q M(t_r) + r - (P_2 + P_3) + \lambda_1 \omega_y = 0; \end{cases} \quad (10)$$

де $x_1 \dots x_4$ – фазові координати розв’язку системи (4); ξ – коефіцієнт при відповідних функціях змінної t в записі $x_4(t)$; ω_y – швидкість обертання ротора двигуна під час усталеного руху; λ_i – розв’язки спряженої системи функції Понтрягіна-Гамільтона; a, b, c – коефіцієнти, введені для спрощення запису під час розв’язку системи (4) за умови мінімізації показника якості (5); $m_{пр}$ – маса противаги; p, q та r – коефіцієнти параболічного вирівнювання для отримання аналітичного вигляду функції P_4 .

В результаті проведених аналітичних досліджень були отримані рівняння, які дають можливість одержати оптимальні значення параметрів підйимально-опускних пристроїв за умови мінімізації енерговитрат.

На рис. 6 наведено осцилограму потужності приводу з оптимізованими значеннями параметрів підйимально-опускного механізму машини для формування транспортних пакетів із м’якої транспортної тари.

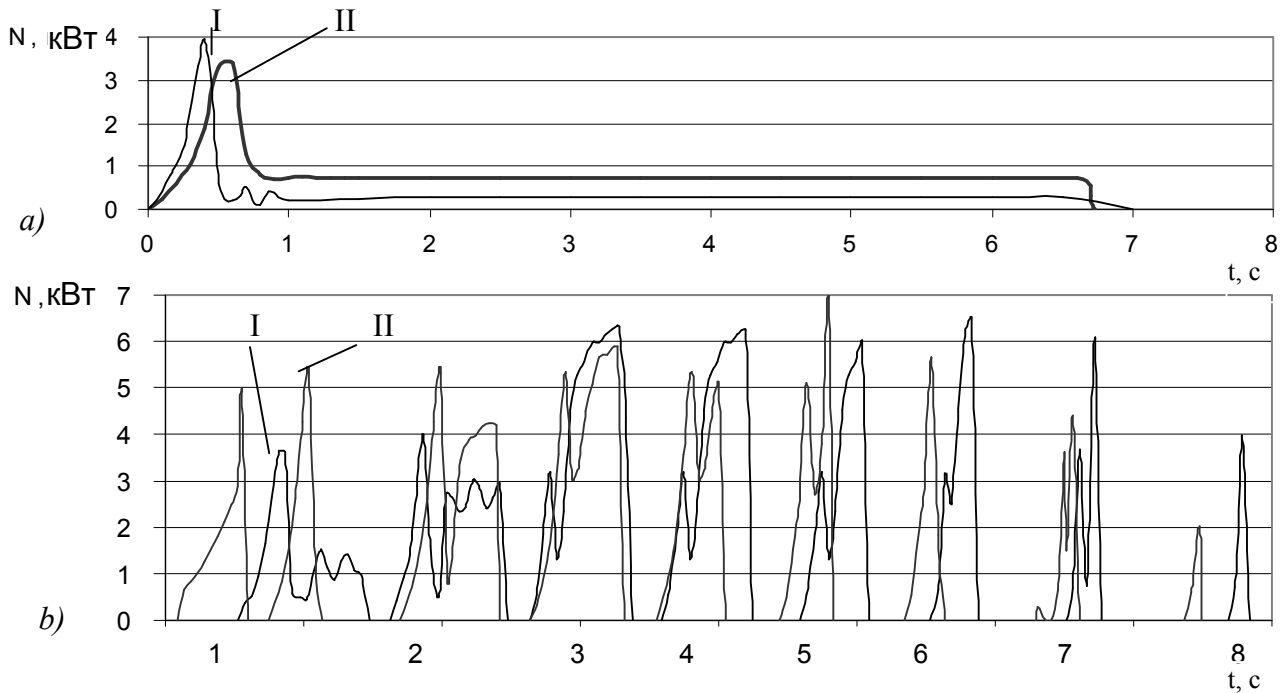


Рис. 6. Осцилограма потужності приводу підйимально-опускного механізму ПФМ ПС (I – з противагою масою 200 кг, II – без противаги): а) піднімання порожньої платформи; б) переміщення платформи донизу: 1...8 – з відповідною кількістю шарів вантажів.

Для визначення декременту коливань у підйимально-опускному механізмі з електро-механічним приводом проведено експериментальні дослідження. Було також виконано оцінку адекватності результатів, отриманих на основі теоретичних досліджень, з реальними.

Об’єктом експериментальних досліджень був підйимально-опускний пристрій пакетоформувальної машини ПС, розробленої УДУХТ (НУХТ) для УкрНВО Сіль (м. Артемівськ) (без противаги).

Із деформації, що реєструвалась в часі, визначався параметр демпфування – ε . Згідно рівнянь руху двомасової моделі, постійна затухання дорівнює:

$$\varepsilon = -b(I_1 + I_2)/2I_1I_2. \quad (11)$$

Встановивши за результатами експерименту відношення амплітуд коливань, отримаємо параметр демпфування:

$$b = \sqrt{c \cdot \xi^2 / ((I_1 + I_2)/(I_1 \cdot I_2) \cdot (\pi^2 + \xi^2/4))}. \quad (12)$$

Встановлений в результаті експериментальних досліджень коефіцієнт демпфування двомасової коливальної системи знаходиться в межах 0.51 ... 0.55, може використовуватись під час проведення потрібних розрахунків і для три масової системи на відповідних етапах проектування ПФМ.

У четвертому розділі наведена методика визначення раціональної конструктивної схеми пристрою для виконання операції профілювання м'якої тари з сипкою харчовою продукцією та розрахунку основних його параметрів. За розрахункову схему прийнято одно-валковий привідний пристрій, як найбільш широко використовуваний. Методика базується на математичному моделюванні процесу профілювання у вигляді проблемно-орієнтованої програмної системи, яка дозволяє розраховувати формозміну вантажу, ущільнення продукту, напружено-деформовані стани продукту в об'ємі тари в залежності від геометричних та кінематичних параметрів валка, фізико-механічних характеристик продукту.

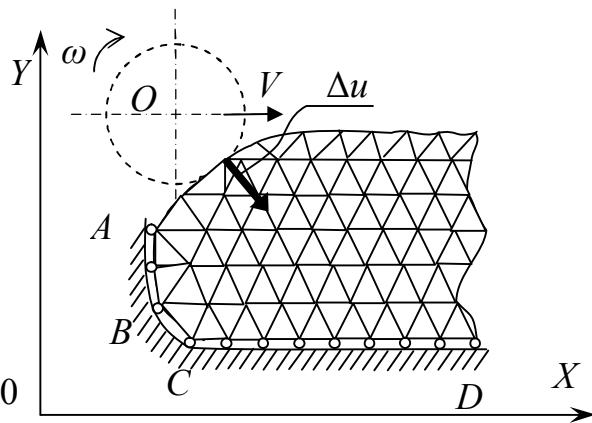


Рис.7. Схема графічного задання граничних умов

Для розв'язання поставленої задачі застосовано проекційно-сіткові процедури у вигляді методу скінченних елементів: вихідна область, яка заповнюється тілом, апроксимується сукупністю трикутних елементів із скінченим числом вузлових точок (або вузлів) (рис.7).

Дискретна скінченно-елементна форма рівнянь рівноваги мас має вигляд:

$$[k] \cdot \{\dot{u}\} - \{\dot{R}\} = 0, \quad (13)$$

де $[k]$ – матриця жорсткості ансамблю елементів, $\{\dot{u}\}$ – швидкість переміщень у межах кожного елемента, $\{\dot{R}\}$ – вектор швидкості зміни еквівалентних вузлових сил.

Інтегрування рівнянь рівноваги дає систему рівнянь рівноваги в приростах:

$$[k] \cdot \{\Delta u\} - \{\Delta R\} = 0. \quad (14)$$

Результати розрахунків у вигляді полів напружень дозволили визначити навантаження на робочий орган механізму профілювання, продукт та несучу поверхню

конвеєра, що в свою чергу надало змогу розрахувати потужність, що споживається приводом механізму профілювання та конвеєра.

Потужність привода обертання вала валка визначалась за формулою:

$$N = N_{xx} + (N_{коч} + N_{тер})/\eta, \quad (15)$$

де $N_{коч}$ – потужність, що витрачається на подолання сил опору перекочуванню валка по мішку з продуктом; $N_{тер}$ – потужність, що витрачається на подолання сил тертя ковзання валка по мішку; N_{xx} – потужність холостого ходу; η - коефіцієнт корисної дії привода.

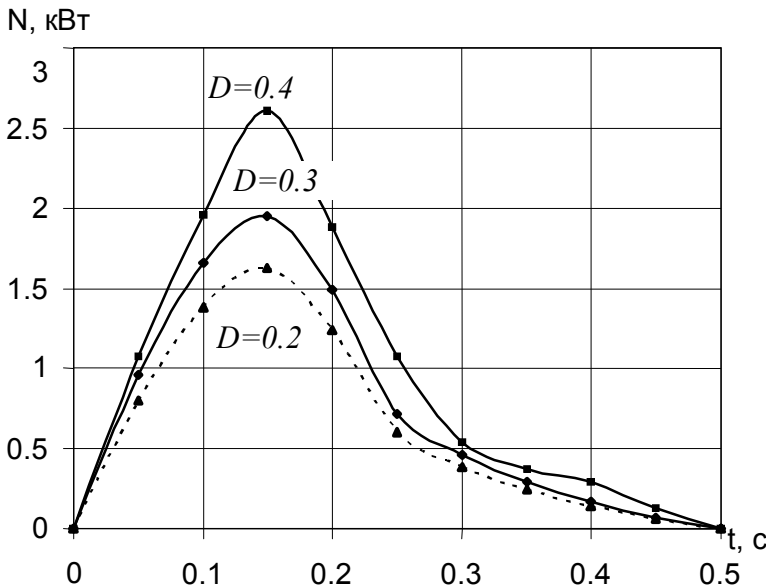


Рис. 8. Графік зміни потужності привода валка механізму профілювання від часу.

На основі проведеного чисельного експерименту на прикладі мішків із сіллю були отримані залежності потужності привода робочого органу пристрою профілювання від часу для різних значень діаметра валка (рис. 8). Рациональним значенням діаметру валка можна прийняти $D=0.3$ м.

Для перевірки адекватності створеної математичної моделі процесу профілювання мішків із сипкою продукцією реальним

процесам, а також – для визначення параметрів фізико-механічних характеристик найбільш характерних видів сипкої харчової продукції були проведені експериментальні дослідження.

Внаслідок проведених досліджень були визначені реологічні характеристики сипкої продукції, наведені у таблиці.

Отримані реологічні параметри використовувались у подальших чисельних експериментах з розробленою математичною моделлю.

Таблиця 1

Реологічні характеристики харчових вантажів

Продукт	Напруження текучості, МПа	Модуль Юнга, МПа	Пористість, %
Сіль	3	5000	76
Цукор	2,8	1500	71
Пшоно	2,5	2500	65

У п'ятому розділі наведено основні положення методу модульного проектування пакетоформувальних машин та приклади впровадження методики.

ВИСНОВКИ

Аналіз конструктивних схем існуючого пакетоформувального обладнання виявив потребу в розробці уніфікованого ряду ПФМ, що дозволить забезпечити вимоги виробництва по продуктивності, схемах компоновання та якості формування транспортного пакета за мінімальних вартісних показників для широкої гами продовольчих тарних вантажів. Методичною базою для створення такого уніфікованого ряду конструктивних і структурних схем ПФМ запропоновано застосувати модульний принцип.

Виконаний у даній роботі комплекс досліджень дозволив розробити наукове обґрунтування вибору ефективної технологічної схеми ПФМ та визначити раціональні значення параметрів наступних пристроїв та механізмів: підйально-опускного та профілювання м'якої тари із сипкою продукцією.

На основі виконаних аналітичних та експериментальних досліджень зроблено наступні висновки:

1. Виконаний аналіз конструкцій та існуючих методик розрахунку ПФМ показав, що сучасний рівень проектування даних машин не враховує специфічні умови їх функціонування протягом всього технологічного циклу та не відповідає вимогам експлуатації щодо якісного формування пакета.
2. Топологічне дослідження ПФМ методом дослідження енергетичних та масових потоків і побудова її математичної моделі на основі теорії графів, дозволила визначити раціональні структурну та конструктивну схеми уніфікованої ПФМ.
3. Розроблена динамічна модель підйально-опускного механізму з електромеханічним приводом і сформульований показник якості, що виражає енерговитрати, дозволяють вирішити задачу оптимального керування, встановити функції раціонального значення гальмівного моменту і параметрів руху механізму на етапі вибору керуючої функції.
4. Розроблена методика розрахунку дає можливість визначити раціональні параметри підйально-опускних механізмів ПФМ на початкових етапах розробки, що знижує енерговитрати у пристрої за один цикл формування транспортного пакета на 30 % (в окремих випадках – на 50 %) та забезпечує високу якість сформованого пакета.
5. Встановлено, що витрати енергії у приводі підйально-опускного пристрою ПФМ за цикл формування одного транспортного пакета будуть мінімальними у випадку, якщо маса противаги буде більшою маси платформи. Наприклад, для підйально-опускного пристрою ПФМ ПС з масою платформи 150 кг маса противаги повинна бути 200 кг.

6. Результати експериментальних досліджень підйимально-опускного механізму дозволили визначити значення коефіцієнта затухання коливальної системи ($b = 0,53$), яке рекомендується для застосування в розрахунках математичних моделей.
7. Розроблена математична модель процесу профілювання м'якої транспортної тари із сипкою харчовою продукцією дозволила визначити раціональні геометричні параметри робочих органів пристрою профілювання за умови мінімальних витрат енергії. Так для пристроїв зі схемою одновалкової прокатки застосування валка з діаметром – 0,3 м, дозволяє скоротити витрати енергії на виконання операції на 20 % порівняно із існуючими зразками з діаметром 0,45 м.
8. Результати експериментальних досліджень дозволили визначити реологічні характеристики найбільш характерних типів сипкої харчової продукції, що були використані під час проведення чисельних експериментів з розробленою математичною моделлю процесу профілювання і підтвердили адекватність математичної моделі реальним процесам. Були визначені наступні характеристики сипких харчових продуктів: напруження текучості, модуль Юнга та пористість (наприклад, для солі вони відповідно дорівнюють $\sigma_T = 3$ МПа, $E = 5000$ МПа, ПОР = 76 %).
9. Розроблені методи і методики були використані УкрНВО „Сіль” під час розробки машини ПС та Вінницьким ПКТП під час розробки базової універсальної ПФМ. Зокрема, застосування методик визначення раціональних параметрів пристрою профілювання мішків з сіллю та підйимально-опускного механізму дозволило скоротити енерговитрати у вказаних механізмах відповідно на 30% та 20%. Методики досліджень впроваджено в навчальний процес: при читанні лекцій, виконанні курсових проектів із дисциплін „Розрахунок і конструювання пакувального обладнання”, „Підвищення ефективності роботи пакувального обладнання”, а також при виконанні дипломних проектів та магістерських робіт.
10. Запропонована методика модульного проектування ПФМ може також бути застосована для інших функціональних груп пакувального обладнання.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

1. Модульна система проектування пакетоформуючої техніки. А.В. Чуприна, О.М. Гавва, А.В. Гриб. – “Харчова та переробна промисловість”, № 6, с. 34-36, 1997р.
Особистий внесок: розроблено структурний граф процесу формування транспортного пакета, проаналізовано граф та оброблено результати, підготовлено матеріал до публікації.
2. Обладнання для скріплення пакетів плівкою, що розтягується. А.В. Гриб, О.М. Гавва, А.В. Чуприна. – “Харчова та переробна промисловість”, № 9, с. 33-36, 1997р.

Особистий внесок: розробка структурного графа технологічного процесу скріплення транспортного пакета плівкою, що розтягується.

3. Дослідження динамічних процесів та визначення раціональних параметрів пристроїв для переорієнтації пакетів вантажів. О.В. Чижик, А.В. Чуприна, А.В. Гриб. – Наукові праці ОДАХТ, т. 3, 1997 р.

Особистий внесок: участь в розробці динамічної моделі пристрою для переорієнтування транспортного пакета, підготовлено матеріал до публікації.

4. Мінімізація енерговитрат в підйомно-опускних пристроях пакетоформувальних машин. А.В. Чуприна, О.М. Гавва – Матеріали науково-технічної конференції “Проблеми та перспективи розвитку виробництва та споживання хлібопродуктів”, Наукові праці ОДАХТ, т. 3, 1997 р.

Особистий внесок: розроблено динамічну модель підйимально-опускного пристрою пакетоформувальної машини, виконано розрахунки.

5. Визначення раціональних параметрів пристрою профілювання м'якої транспортної тари з сипкими вантажами. А.В. Чуприна, О.М. Гавва, А.П. Беспалько. – Хімічна промисловість, № 5, 2001 р., с. 49-52.

Особистий внесок: виконано чисельне моделювання та визначено раціональні параметри пристрою профілювання м'якої транспортної тари з сипкою харчовою продукцією, підготовлено матеріал до публікації.

6. Дослідження механізованих систем для укрупнення вантажних одиниць готової харчової продукції методом топологічного аналізу. А.В.Чуприна, О.М. Гавва., А.П. Беспалько – Наукові праці УДУХТ, № 10, ч.2, 2001 р., с. 186.

Особистий внесок: розроблено графи обладнання для укрупнення тарно-штучних вантажів, підготовлено матеріал до публікації.

7. Дослідження процесу профілювання мішків із сипкими харчовими продуктами під час пакетування. А.В.Чуприна, О.М. Гавва., А.П. Беспалько – Наукові праці УДУХТ, № 10, ч.2, 2001 р., с. 187.

Особистий внесок: змодельовано кінематику взаємодії в системі робочий орган - продукт, створено числову модель процесу, оброблено результати числового моделювання, підготовлено матеріал до публікації.

8. Розробка методики визначення раціональних параметрів пристроїв пакетоформувальних машин. О.М. Гавва, М.В. Якимчук, А.В. Чуприна. – Харчова промисловість, № 2, с. 79-83, 2003 р.

Особистий внесок: розроблено потоково-енергетичний та сигнальний графи технологічного процесу формування транспортного пакета, виконано аналіз графів та обробку результатів,

підготовлено матеріал до публікації.

9. Профілювання наповненої м'якої транспортної тари. А.В.Чуприна, О.М. Гавва. – Упаковка, № 5, 2003 р., с. 27-30.

Особистий внесок: розроблено математичну модель пристрою профілювання м'якої транспортної тари з сипкою харчовою продукцією, підготовлено матеріал до публікації.

10. Визначення раціональних параметрів підйимально-опускного пристрою пакетоформувальної машини за умови мінімізації енерговитрат. А.В.Чуприна, О.М. Гавва. Рук. деп. в ДНТБ України, № 530-Ук97 від 20.10.97.

Особистий внесок: виконано аналітичні розрахунки та чисельне моделювання, оформлено результати розрахунків, підготовлено матеріал до публікації.

11. Аналіз існуючих систем модульного проектування стосовно пакувальної техніки. А.В. Чуприна, О.М. Гавва, О.П. Кривопляс. – Тези доповіді 61 наукової конференції, УДУХТ, 1995 р.

Особистий внесок: виконано літературний пошук, аналіз систем модульного проектування, підготовлено матеріал до публікації.

12. Застосування модульної системи проектування для вузлів пакетоформувальної машини. О.П. Кривопляс, О.М.Гавва, А.В. Чуприна. – Тези доповіді на Всеукраїнській науково-технічній конференції “Розробка та впровадження прогресивних технологій та обладнання у харчову та переробну промисловість”. Київ, 1995 р.

Особистий внесок: встановлено особливості застосування систем модульного проектування для пакетоформувальних машин, підготовлено матеріал до публікації.

13. Визначення раціональних параметрів підйомно-опускного пристрою пакетоформувальної машини за умови мінімізації енерговитрат. А.В.Чуприна, О.М. Гавва, Л.О. Кривопляс, З.А. Бурова. – Тези доповіді 63 наукової конференції УДУХТ 1997 р.

Особистий внесок: встановлено вплив значення маси противаги для зниження енерговитрат у підйимально-опускному пристрої пакетоформувальних машин, підготовлено матеріал до публікації.

14. Створення математичної моделі процесу профілювання сипких вантажів у м'якій тарі. А.В. Чуприна, О.М. Гавва, Є.В. Штефан. – Тези доповіді міжнародної науково-технічної конференції “Розроблення та впровадження прогресивних ресурсощадних технологій та обладнання в харчову та переробну промисловість”, Київ, 1997 р.

Особистий внесок: виконано аналіз процесу взаємодії в системі робочий орган - продукт, застосовано проекційно-сіткові процедури для розробки математичної моделі технологічного процесу, розроблено алгоритм, підготовлено матеріал до публікації.

Анотація

Чуприна А.В. Наукове обґрунтування розробки функціональних модулів пакетоформувальних машин для продовольчих вантажів. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.08.12 - процеси й обладнання харчових, мікробіологічних і фармацевтичних виробництв. - Національний університет харчових технологій. - Київ, 2004.

Дисертація присвячена науковому обґрунтуванню вибору раціональної технологічної схеми уніфікованої пакетоформувальної машини, її структурної та конструктивної схем та визначенню раціональних значень параметрів підйально-опускного пристрою та пристрою профілювання за умови мінімізації енерговитрат.

Побудовано математичні моделі підйально-опускного механізму на основі тримасової динамічної коливальної системи з урахуванням дисипативної складової та пристрою профілювання м'якої транспортної тари з сипкими харчовими продуктами на основі проекційно-сіткових процедур.

Результати експериментальних досліджень дозволили: визначити коефіцієнт демпфування у динамічній системі підйально-опускного пристрою, який був використаний в розрахунках математичних моделей; реологічні характеристики для найбільш типових видів сипкої харчової продукції, що були використані під час проведення чисельних експериментів з розробленою математичною моделлю процесу профілювання.

Ключові слова: пакетоформувальна машина, функціональні модулі, енерговитрати, підйально-опускний пристрій, демпфування, сипкий продукт, реологічні характеристики, механізм профілювання.

Аннотация

Чуприна А.В. Научное обоснование разработки функциональных модулей пакетоформирующих машин для продовольственных грузов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.12 – процессы и оборудование пищевых, микробиологических и фармацевтических производств.- Национальный университет пищевых технологий. – Киев, 2004.

Диссертация посвящена вопросам разработки научного обоснования выбора рациональной технологической схемы унифицированной пакетоформирующей машины, ее структурной и конструктивной схем и определению значений параметров подъемно-опускного устройства и механизма профилирования мягкой транспортной тары с сыпучими пищевыми продуктами при условии минимизации энергозатрат.

Исследование энергетических и массовых потоков в технической системе и построение ее математической модели на основе теории графов, позволило определить рациональные структурную и конструктивную схемы унифицированной пакетоформирующей машины.

Разработанные математические модели подъемно-опускного устройства и устройства профилирования сыпучих грузов в мягкой таре позволили определить рациональные параметры устройств, которые позволяют снизить энергозатраты в указанных механизмах.

Для разработки выбора рациональных параметров подъемно-опускного устройства была создана трехмассовая динамическая система, которая позволила учесть влияние противовеса на работу системы. Разработанная математическая модель устройства учитывает также диссипацию энергии в колебательной системе, что значительно повысило адекватность модели реальным процессам в системе.

Математическая модель процесса профилирования мягкой транспортной тары с сыпучими пищевыми продуктами разработана на основе проекционно-сеточных методик и имеет вид проблемно-ориентированной программной системы, которая позволяет учесть изменение формы мягкой тары, уплотнение и напряженно-деформированные состояния продукта в объеме тары в зависимости от геометрических и кинематических параметров вала и физико-механических характеристик продукта. В результате числового эксперимента определены рациональные геометрические параметры рабочего органа устройства профилирования позволяющие снизить затраты энергии на выполнение операции профилирования. Разработанный алгоритм позволил смоделировать кинематику взаимодействия в системе рабочий орган – груз.

Результаты экспериментальных исследований позволили определить кинематические, динамические и энергетические параметры подъемно-опускного механизма, а полученные значения коэффициента демпфирования были использованы в расчетах математических моделей. Экспериментальными исследованиями определены реологические характеристики (напряжение текучести, модуль Юнга и пористость) для наиболее типичных видов сыпучей пищевой продукции, которые были использованы во время проведения числовых экспериментов с разработанной математической моделью процесса профилирования и подтвердили адекватность математической модели реальным процессам.

В работе наведены основные положения метода модульного проектирования пакетоформирующих машин и примеры внедрения методики.

Ключевые слова: пакетоформирующая машина, функциональные модули, энергозатраты, подъемно-опускное устройство, демпфирование, сыпучий продукт, реологические характеристики, механизм профилирования.

Summary

Chupryna A.V. Scientific substantiation of development of functional modules of palletizers for food loads.

The thesis for obtaining a scientific degree of Candidate of Technical Sciences, specialization 05.18.12 – machines and equipment for food, microbiological and pharmaceutical industries. – National university of food technology. – Kyiv, 2004.

The thesis is devoted to scientific substantiation of unified palletizer's rational technological scheme, its structural scheme and design and to definition of rational parameters of a lifting-dipping device and loads shaping device under conditions of energy consumption minimization.

Experimental research enabled: to define a damping factor for dynamic system of a lifting-dipping device, which was later used for simulating model calculations; to define rheological characteristics of typical food loose goods, which were used for numerical computations of worked out mathematical simulating model.

Keywords: palletizer, functional module, energy consumption, lifting-dipping device, damping, loose goods, rheological characteristics, shaping device.