

ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНЕ ПРОЄКТУВАННЯ МАШИН ПАКУВАННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ У КОНТЕКСТІ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАМКНЕНОГО ЦИКЛУ

О. М. Гавва, Л. О. Кривопляс-Володіна, С. В. Токарчук

Національний університет харчових технологій

При проєктуванні структури та визначенні параметрів процесу керування як важливою складовою забезпечення життєвого циклу пакувальної машини важливо враховувати умови її майбутньої експлуатації, технічного обслуговування та ремонту. Реалізація такого підходу можлива лише шляхом застосування функціонально-орієнтованих технологій проєктування. В основі цієї концепції лежить рекурентний зв'язок між етапами конструкторського й технологічного проєктування пакувальної машини (ПМ), а також планування її виготовлення і супроводу, що координуються спеціально призначеним для цього розподіленним інформаційним середовищем. При застосуванні концепції функціонально-орієнтованого проєктування вдається досягти перекриття всіх стадій життєвого циклу пакувальної машини, що забезпечує підвищення якості його функціональних і споживчих властивостей та ефективність швидкого виконання індивідуального замовлення. Функціональний підхід до процесу розроблення і створення нових пакувальних машин передбачає, що будь-який матеріальний об'єкт є певною сукупністю (матрицею) функцій, серед яких можна виділити корисні, шкідливі та нейтральні функції.

У статті описано функціональний підхід, який, на відміну від підходу предметного, ґрунтується на тому, що створюваний виріб повинен відповідати ряду функцій, які можуть забезпечуватися окремими матеріальними носіями, що є найдешевшими, або робота з якими є найменш витратною. Перспективним може бути такий технологічний процес проєктування, на переходах якого, одночасно з формуванням корисних функцій, відбувається ослаблення або ліквідація функцій шкідливих і, за можливості, усунення функцій нейтральних. Наведено аналіз ієрархічної структури окремої машини пакування дрібноштучних харчових продуктів. Розроблено схеми та моделі реалізації багатетапного покрокового багатокритеріального синтезу на прикладі функціонального мехатронного модуля (ФММ) подачі сипкого продукту в пакувальну машину, обґрунтовано доцільність використання функціонально-орієнтованого проєктування для різних компонентів ПМ. Результати теоретичних досліджень є підґрунтям для експериментальних досліджень.

Ключові слова: проєктування машин, пакування харчових продуктів, технології замкненого циклу, функціональний мехатронний модуль, показники ефективності.

Постановка проблеми. Базові принципи технологій замкненого циклу забезпечують зменшення енергоємності основних функціональних модулів пакувальної машини, спрощення їх конструкції та уніфікацію систем керування за технологічним процесом (Gavva, & Krivoplyas-Volodina, 2017). Стратегічний підхід до

організації машинобудівного виробництва здійснюється на основі інтегрованого комплексу корпоративних програмних засобів (системи CAD/CAE/CAPP/CAM). Це надає можливість колективно розробляти, поширювати та використовувати інформацію про виріб (пакувальна машина), а також керувати нею протягом усього його життєвого циклу (PLM-система).

При проектуванні структури та призначенні параметрів процесу керування як важливої складової забезпечення життєвого циклу пакувальної машини важливо враховувати умови її майбутньої експлуатації, технічного обслуговування та ремонту. Реалізація цього підходу можлива лише завдяки впровадженню функціонально-орієнтованих технологій проектування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На основі аналізу літературних джерел, у яких описано функціонально-орієнтоване проектування машин пакування для окремих продуктів, встановлені необхідні вхідні параметри для синтезу інноваційних конструкцій. Потреба розробки загальної методики аналізу та синтезу конструктивних схем дозувального обладнання для газових і рідинних середовищ оброблення харчових продуктів (Gavva, & Kryvoplias-Volodina, 2017) обумовила завдання досліджень: забезпечення заданої продуктивності з мінімальними вартісними витратами, проектування систем автоматизованого дозування на основі використання методів вимірювання дози за непрямими параметрами, задіяння апаратури промислової пневмоавтоматики на пропорційній основі у вузлах управління. Але існуюча різноманітність конструкцій і варіантів виконання функціональних мехатронних модулів, наведена в працях (Буч, 1992; Khan, Khalid, & Iqbal, 2018), для дозування і підведення розпику рідинного або газового середовища до продуктів у робототехнічному модулі, не враховує вплив параметрів харчових продуктів, що фасуються, на умови фасування та вибір конструкції пакувальної машини. У (Formentini, 2021) неузгодженою є робота над проектними етапами синтезу конструкції технологічної системи та відсутні описи методологічного підходу до проектування пакувальних машин. Частково це питання висвітлюється у працях (Кривопляс-Володіна, 2017; Stamatis, 1998), але без конкретики щодо вхідних параметрів моделювання на етапі вибору модулів для загальної конструкції пакувальної машини. Здійснення оптимізаційного синтезу компонентів передбачає послідовне виконання ряду процедур, пов'язаних з ОЕЕ (Tsarouhas, 2007; Lindström, 2019). Кожна процедура передбачає розв'язання певної локальної задачі, результати виконання якої є початковими даними для наступної. Як приклад, наведено аналіз ієрархічної структури окремої функціональної модульної підсистеми для окремих видів функціонально-мехатронних модулів машини пакування дрібноштучних харчових продуктів. У праці (Busso, 2013) встановлено, що одним із перших у технологічному процесі починає працювати вузол подачі пакувального матеріалу, або упаковки, проте зв'язки з характеристиками харчових продуктів не розглядаються. Кожна група продуктів має певні властивості, тому під час їх транспортування у пневматичній магістралі продуктопроводом необхідно визначити відповідні параметри. Йдеться про геометрію робочих трубопроводів і режим переробки, який багато в чому залежить і від системи управління тиском (Nelson, 2007). Цим пояснюється наявність на ринку досить великої різноманітності пневмотранспортного обладнання. При цьому відомі випадки, коли навіть найдосконаліші пневматичні продуктопрово-

ди при заміні виробника для однієї і тієї ж групи дрібноштучних продуктів пере-стають забезпечувати необхідну продуктивність транспортування, тому моделю-ванню процесів пневмотранспортних установок протягом багатьох десятиліть приділяється значна увага (Ron, 2006). Застосування емпіричних методик (Relkar, & Nandurkar, 2012) не може забезпечити повного розрахунку установок, включаючи зміну характеристик двокомпонентного потоку за різних режимів роботи установки (Marlene Silva de Moraes, 2017; Jacobs, 2003). Теоретичний опис процесу пневмотранспортування у (Zhang, & Liu, 2012) з використанням склад-ної системи диференціальних рівнянь лише ускладнює пошук шляху вирішення проблеми. Залишилися невирішеними питання, пов'язані з аналітичним описом процесів взаємодії частинок під час транспортування між собою та зі стінками каналу. Все це дає змогу стверджувати, що фізичне моделювання сприяє вирі-шенню складних завдань функціонально-орієнтованого проєктування машин па-кування харчових продуктів у контексті технологій замкненого циклу.

Мета дослідження: розроблення і апробація методологічної основи форму-вання технологічних процесів проєктування на основі принципів функціонально-орієнтованого підходу для забезпечення заданих властивостей нової пакувальної машини (ПМ).

Матеріали і методи. У процесі дослідження було проведено математико-ста-тистичний аналіз технічних і технологічних характеристик основних функціональ-них модулів пакувальних машин. Застосовані методи концепції функціонально-орієнтованого проєктування.

Функціональний підхід процесу розроблення і створення нових пакувальних машинописано в (Gavva, & Kryvoplias-Volodina, 2017; Khan, Khalid, & Iqbal, 2018), де зазначається, що будь-який матеріальний об'єкт є певною сукупністю (матрицею) функцій, серед яких можна виділити корисні, шкідливі та нейтральні функції. При цьому функціональний підхід, на відміну від підходу предметного, передбачає, що створюваний виріб повинен відповідати ряду функцій, які мо-жуть забезпечуватися окремими матеріальними носіями, що є найдешевшими, або робота з якими є найменш витратною. Перспективним може бути такий тех-нологічний процес проєктування, на переходах якого, одночасно з формування функцій корисних, відбувається ослаблення або ліквідація функцій шкідливих і, за можливості, усунення функцій нейтральних.

Викладення основних результатів дослідження. Під час проведених дослі-джень на етапі проєктування проаналізовано сукупність функцій, що має забез-печувати пакувальна машина. Визначено головні функції та поєднані з ними ко-рисні, нейтральні та шкідливі функції (якщо вони чітко не задані). Виділено три рівні існування пакувальної машини в контексті життєвого циклу (рис. 1).

Розроблено методи моніторингу етапу, коли відбувається попереднє віднов-лення матеріальних носіїв (модулів) функцій і з'єднання їх між собою. За запро-понованою методикою проведено дослідження наступних етапів квантифікації і розроблення окремого функціонального мехатронного модуля (ФММ) пакуваль-ної машини: визначення основних принципів функціонування майбутнього ФММ, формування теоретичного підґрунтя для синтезу; пошук технічного рішення в рам-ках заданих умов технологічного процесу для ФММ, розроблення пілотного зраз-

ка і проведення експериментальних досліджень; верифікація отриманих результатів дослідження, послідовне покрокове оформлення технічної документації.

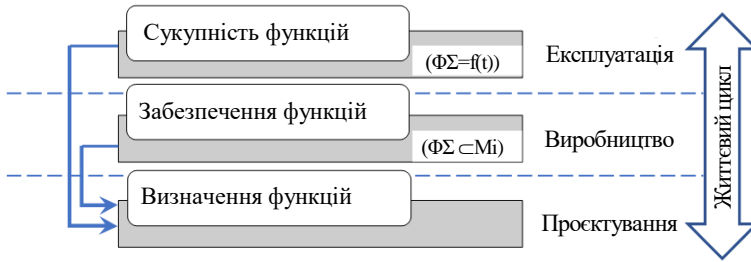


Рис. 1. Рівні існування пакувальної машини

Приклад схеми життєвого циклу пакувального обладнання наведено на рис. 2. У процесі проектування ПМ складно формалізувати процедури структурного синтезу, тому завдання, які вирішуються перед структурним синтезом, класифікують за такими ознаками (Gavva, & Kryvoplias-Volodina, 2017; Kryvoplias-Volodina, Gavva, & Derenivska 2018; Jacobs, 2003): стадія проектування, можливість формалізації, тип структури. До задач структурного синтезу, залежно від формалізації, відносять п'ять рівнів (Буч, 1992; Formentini, 2021): 1-й рівень складності характеризують задачами для розроблення параметричного синтезу (на цьому рівні структура об'єкта вже визначена); 2-й рівень складності характеризують задачами повного перебору відомих рішень (до таких відносять комбінаторні задачі); 3-й рівень складності характеризують комбінаторними задачами, які неможливо розв'язати шляхом повного перебору за заданий час при використанні існуючих програм; 4-й рівень складності характеризують задачами пошуку варіантів структур у множинах невідомої або необмеженої потужності; 5-й рівень складності характеризують задачами, розв'язання яких є проблематичним.

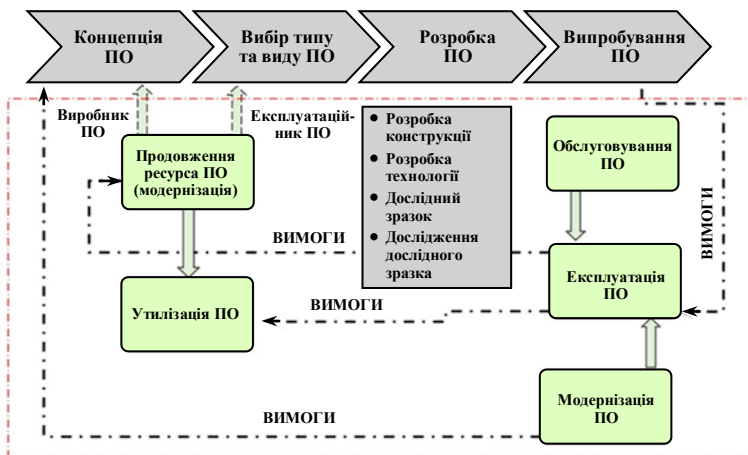


Рис. 2. Приклад схеми функціонально-орієнтованого проектування пакувального обладнання

За типом структур, що синтезують, задачі поділяють на задачі одновимірного, схемного та геометричного синтезу. Формалізацію процедур структурного синтезу здійснюють на основі одного з таких підходів (Khan, Khalid, & Iqbal, 2018; Formentini, 2021): 1) перебір; 2) послідовний синтез; 3) трансформація опису різних аспектів.

Пошук раціонального рішення при заданому технологічному процесі пакування й обраному принципі дії окремих ФММ ПМ і є задачею оптимального структурного синтезу. Формальна процедура, що регламентує цей процес, не розроблена, тому при розв'язанні конкретних задач необхідно щоразу будувати свій алгоритм. Алгоритм передбачає перебір лише довершених готових структур. Аналізуючи узагальнену структуру машини пакування харчових продуктів (рис. 3) і виконуючи паралельно покроковий опис технологічного процесу пакування, можна провести структурний синтез пакувального обладнання й окремих ФММ. Загальний алгоритм побудови структурного синтезу машини пакування харчових продуктів наведено на рис. 4. Вихідним пунктом оптимізації рішень синтезу пакувальної машини є аналіз технічних вимог щодо її впровадження у промислове виробництво й економічна доцільність. Такі структури створюють заздалегідь (використовують бази даних типових модулів виробника обладнання) або генерують за відомими правилами з певного заданого набору елементів. Алгоритми перебору рекомендовано реалізовувати лише для відносно простих пакувальних систем, при цьому вони включають такі складові частини: 1) вибір і генерування наступного варіанта; 2) оцінка варіанта; 3) прийняття рішення.

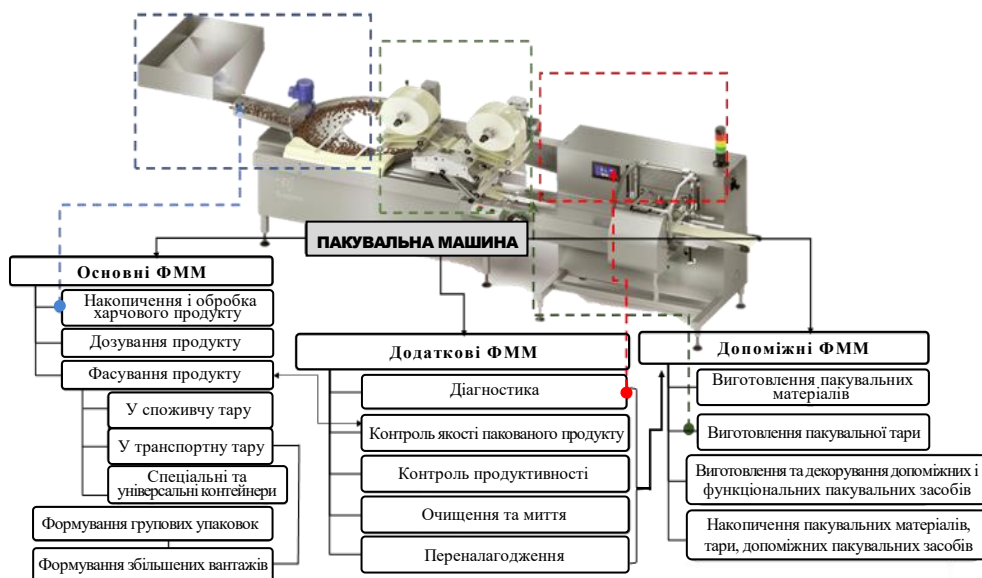


Рис. 3. Структура пакувальної машини

Щоб вирішити задачі синтезу 3-го та 4-го рівнів складності, потрібно обрати частковий перебір варіантів структур, які побудовано на основі часткової модифікації певних вихідних структур ФММ ПМ або вибраних з обмеженої множини

готових структур ФММ ПМ. В алгоритмах перебору особливе місце належить алгоритмам дискретного математичного програмування (ДМП) (Kryvoplias-Volodina, & Gavva, Derenivska, 2018).

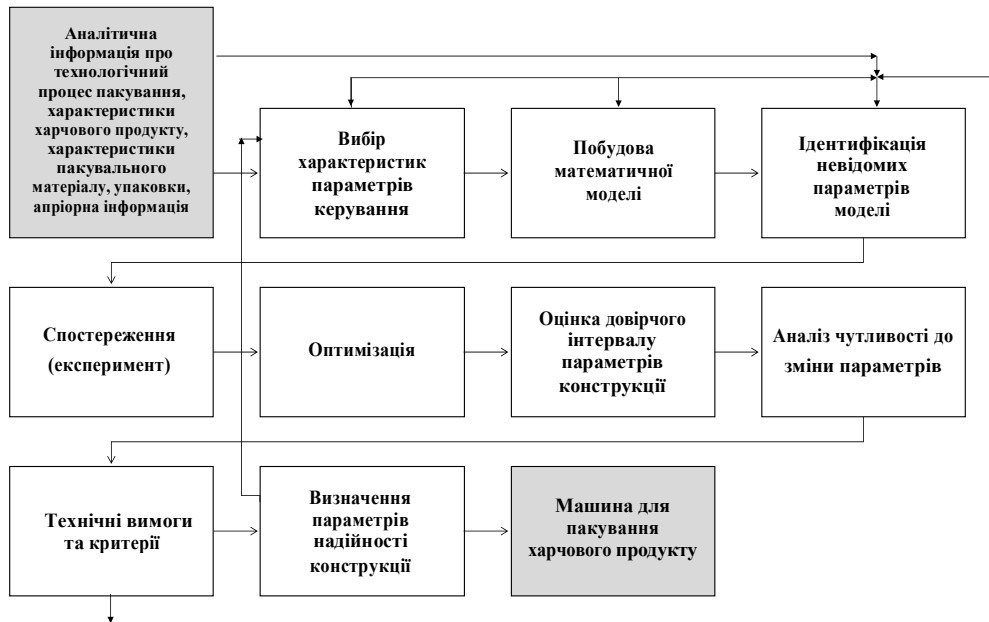


Рис. 4. Блок-схема алгоритму оптимізаційного синтезу пакувальної машини

Подібні алгоритми застосовують для задач структурного синтезу пакувального обладнання. Всі групи ФММ пакувальної машини диференційовані на дві множини елементів функціональної підсистеми: готові на момент часу t до оперативного використання і неготові. На множині неготових до оперативного використання щодо системи, яка задає функції, виділяються засоби двох видів: стримувальні й критичні. У системі засобів можуть бути елементи, які, з одного боку, забезпечують заданий діапазон параметрів, що визначають ефективність виконання заданої функції, а з іншого — виходять за нормативний період часу її реалізації, тобто засіб, неготовий до оперативного використання. Якщо заданий діапазон параметрів забезпечується лише цим засобом, то він є стримувальним. Якщо ж відносно певної функції існує лише один тип засобів, здатних виконувати цю функцію, і вони належать до стримувальних, то він є критичним. Система засобів будується за принципом взаємозв'язку рівнів: формується як множина елементарних засобів $\Phi\Pi = \{\Phi\Pi^0, \Phi\Pi^1, \dots, \Phi\Pi^{\mu-1}\}$, кожен з яких забезпечує виконання окремої елементарної функції множини для пакувальної машини у складі функціонального мехатронного модуля $\Phi = \{\Phi^0, \Phi^1, \dots, \Phi^{\mu-1}\}$. При аналізі функціональних підсистем спостерігається багатовимірність їх показників, тому в практичних розрахунках доречно використовувати кластерний аналіз разом з проведенням експериментальних досліджень.

Розглянемо процес, схематично представлений в частині основних модулів (рис. 3), під час подачі системою пневмотранспортування сипких або дрібно-штучних харчових продуктів системою з керованими імпульсами стисненого повітря, які обумовлюють робочі режими. Потік повітря формується на вході в канал з продуктом за допомогою пневмоклапана, який управляється генерацією струму за функцією Хевісайда (одинична ступінчаста функція). Вимірне значення струму в мА (з 0,001 мА) щодо стандартної шкали I_{\max} , $I_{\min} = 4,20$ мА, зафіксоване в діапазонах 4,1 мА ... 19,9 мА; 12 мА ... 19,9 мА. Видаткова характеристика пневмоклапана в установці складає 180 Нл/хв. Тривалість періоду функції — до 0,3 с. У постановці завдання математичного моделювання розглянемо рух сферичної частинки радіуса r' щільністю ρ' в турбулентному газовому потоці за умови, що потік стаціонарний, газ нестисливий, кінематична в'язкість $\nu = \mu/\rho$, де μ — динамічна в'язкість газу (стисненого повітря), ρ — щільність повітря. Оскільки потік стисненого повітря турбулентний, то опір руху частинки відносно газу підпорядковується нелінійному закону. Тому на частинку діє сила тяжіння $G = \rho'q'$, (Н), де q' — вектор прискорення сили тяжіння. Вхідні параметри математичної моделі описано з урахуванням таких значень: радіус частинки $r' = 3 \cdot 10^{-3}$ (м); густина окремої частинки сипкого продукту $\rho' = 1,25 \cdot 10^{-3}$ (кг·м⁻³); густина повітря $\rho = 1,24 \cdot 10^{-3}$ (кг·м⁻³); прискорення вільного падіння $g = 9,81$ (м·с⁻²); максимальна швидкість потоку стиснутого повітря $v_m = 20$ (м·с⁻¹); динамічна в'язкість $\mu = 1,82 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с); радіус труби $b = 0,05$ м. У потоці стисненого повітря частка отримує обертальний рух, що обумовлює рівняння руху (рис. 5):

$$\frac{\pi}{6} (2r')^3 \rho' \frac{du_i}{dt} = D'(v_i - u_i) + G_i + F_s, \quad (1)$$

де $i = x, y, z$; v_i — проєкція вектора швидкості \bar{V} стисненого повітря; u_i — проєкція вектора швидкості \bar{u} частинки відносно нерухомої системи відліку x, y, z ; F_i — проєкції вектора сили Рубінова-Келлера на сферичну поверхню частинки з боку стисненого повітря під час обертання; G_i — проєкція вектора сили тяжіння на частинку, де

$$D' = 6\pi\mu r' \left(1 + 0,065 \left(\frac{2}{\mu} r' \rho' \sqrt{|\bar{u} - \bar{v}|} \right) \right)^{2/3}. \quad (2)$$

Рівняння обертового руху частинок разом з рівнянням руху має такий вигляд:

$$\begin{cases} \frac{4}{3} \pi (r')^3 \rho' \frac{du_x}{dt} = D'(v_x - u_x) + G_x + F_x; \\ \frac{4}{3} \pi (r')^3 \rho' \frac{du_y}{dt} = D'(v_y - u_y) + G_y + F_y; \\ J \frac{d\omega}{dt} = -\pi\mu (2r')^3 \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{dv_x}{dy} - \omega \right), \end{cases} \quad (3)$$

де $\omega = \omega z$ — проєкція на вісь z вектора від кутової швидкості при обертанні частинки; J — момент інерції частинки відносно центральної осі, яка паралельна осі Oz :

$$J = \frac{\pi(2r')^5 \rho'}{60};$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = -\pi\mu(2r')^3 \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{dv_x}{dy} - \omega \right). \quad (4)$$

Розрахункова схема кінематичних характеристик частинки для встановленого режиму транспортування наведена на рис. 5.

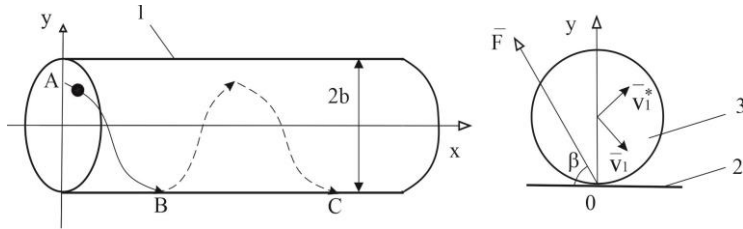


Рис. 5. Траєкторія руху частинки із загальними кінематичними характеристиками:
1 — продуктопровід; 2 — внутрішня стінка продуктопроводу; 3 — частка дрібношугучного продукту

У момент зіткнення частинок зі стінкою продуктопроводу необхідно розрахувати швидкості після відскоку від поверхні з урахуванням можливих траєкторій. Для розрахунку кінематичних параметрів поведінки частинок після ударного контакту об стінку продуктопроводу прийемо радіус сферичної частинки $r = d/2$, всі параметри після удару мають позначення *.

Характеристика частки під час удару ($M \in$ функцією від положення об'єкта):

$$M(\dot{x}_1^* - \dot{x}_1) = -|F| \cos \beta;$$

$$M(\dot{y}_1^* - \dot{y}_1) = |F| \sin \beta;$$

$$M(x_1(\dot{y}_1^* - \dot{y}_1) - y_1(\dot{x}_1^* - \dot{x}_1)) + J_1(\omega_z^* - \omega_z) = 0. \quad (5)$$

Після перетворень отримано значення ω_z^* кутової та \dot{x}_1^* лінійної швидкості переміщення частинки після удару:

$$\omega_z^* = \frac{J_{z1} + \frac{md^2}{4} k_\tau}{J_{z1} + \frac{md^2}{4}} \omega_z - \frac{1}{2} \left(\frac{md(1-k_\tau)}{J_{z1} + \frac{md^2}{4}} \right);$$

$$\dot{x}_1^* = k_\tau \dot{x}_1 + k_\tau \frac{d}{2} \omega = - \left\{ \frac{J_{z1} + \frac{md^2}{4} k_\tau}{J_{z1} + \frac{md^2}{4}} \cdot \frac{d\omega_z^2}{2} + \frac{1}{4} \left(\frac{md^2(1-k_\tau)}{J_{z1} + \frac{md^2}{4}} \right) \right\}. \quad (6)$$

Отримана математична модель описаного режиму при пневмотранспортуванні реалізується за допомогою приведення рівнянь руху до канонічного вигляду. Чисельні методи розрахунку з використанням теорії Рунге-Кутта з підпрограмою, заснованою на схемі четвертого порядку точності, надають можливість отримати початковий результат для проведення експериментів з дослідження критичних режимів пневмотранспортування сипких продуктів у ПМ.

Висновки

1. Розроблено схеми та моделі реалізації багатоступового покровоного багато-критеріального синтезу на прикладі ФММ для пакувальної машини з різними ФП_j, обґрунтовано доцільність їх використання для різних етапів задачі оптимізації.

2. Обґрунтовано використання блок-схеми алгоритму оптимізаційного синтезу пакувальної машини, що відображає узагальнену оцінку ФММ_i з можливістю вибору кожного наступного функціонального модуля ПМ.

3. Проведено оптимізаційний синтез структури пакувальної машини з аналізом окремого модуля для подачі (пневмотранспортування) сипких або дрібношпичних харчових продуктів у ФММ з керованими імпульсами стисненого повітря, які обумовлюють робочі режими для вибору компоновки модулів у пакувальному обладнанні. Результати теоретичних досліджень є підґрунтям для проведення експерименту і перевірки реальних технологічних процесів.

Література

Буч, Г. (1992). *Об'єктно-орієнтоване проєктування з прикладами використання*. Київ: Діалектика-Конкорд. Взято з: <http://www.kntu.kr.ua/doc/zbirnyki/2014/2.pdf>.

Busso, C. M. (2013). Análise da aplicação de indicadores alternativos ao Overall Equipment Effectiveness (OEE) nagestão do desempenho global de uma fábrica. *Produção*, São Paulo, 23 (2), 205—225.

Formentini, G. (2021). Engineering design in food-packaging industry: the case study of a tuna canning machine. *31st CIRP. Design Conference*, 100, 229—234. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.05.060>.

Gavva, O., Kryvoplias-Volodina, L. (2017). Structural-parametric synthesis of hydromechanical drive of hoisting and lowering mechanism of package-forming machines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5/7 (89), 39—44. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.111552>.

Jacobs, J. H. (2003). Characterization of operational time variability using effective process times. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, Eindhoven, 16 (3), 511—520. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/TSM.2003.815215>.

Khan, Z., Khalid, A., Iqbal, J. (2018). Towards realizing robotic potential in future intelligent food manufacturing systems. *Innovative Food Sci Emerg Technol*, 48, 11—24. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.05.011>.

Kryvoplias-Volodina, L. Gavva, O. Derenivska A. (2018). Optimization of the synthesis of packing machines by the efficiency criteria. *Наукові праці ВУХТ*, 24(5), 116—121. Взято з: <https://nuft.edu.ua/doi/doc/swnuft/2018/5/15.pdf>.

Lindström, J. (2019). Combining Simulation and Augmented Reality Methods for Enhanced Worker Assistance in Manual Assembly. *52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems. Procedia CIRP*, 81, 582—587.

Marlene Silva de Moraes, (2017). Experimental quantification of the head loss coefficient K for fittings and semi-industrial pipe cross section solid concentration profile in pneumatic conveying of polypropylene pellets in dilute phase. *Powder Technology*, 250—263. doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.039>.

Nelson, P. (2007). Evolutionary Programming to Improve Yield and Overall Equipment Effectiveness of casting industry. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2(12), 1735—1742.

Rajan, K. S. (2008). Experimental study of thermal effectiveness in pneumatic conveying heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 28, 14—15. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.12.004>.

Relkar, A. S., Nandurkar, K. N. (2012). Optimizing & Analysing Overall Equipment Effectiveness (OEE) Through Design of Experiments (DOE). *Procedia Engineering*, 38, 2973—2980. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.06.347>.

Ron, A. J. (2006). Systems Engineering Group, Department of Mechanical Engineering, Eindhoven University of Technology. *International journal of Production Research*, 44 (23), 4987—5003. <https://doi.org/10.1080/00207540600573402>.

Tsarouhas, P. (2007). Implementation of total productive maintenance in food industry: a case study. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 13(1), 5—18. <http://dx.doi.org/10.1108/13552510710735087>.

Zhang, H., Liu, M. (2012). Dense gas-particle flow in vertical channel by multi-lattice trajectory model. *Science in China. Series E: Technological Sciences*, 55 (2), 542—554. doi:<https://doi.org/10.1007/s11431-011-4578-7>.