

МОНОГРАФІЯ

**СИСТЕМНА
ІНЖЕНЕРІЯ
ПАКУВАЛЬНИХ
МАШИН-АВТОМАТІВ**

**Міністерство освіти і науки України
Національний університет харчових технологій**

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

СИСТЕМНА ІНЖЕНЕРІЯ ПАКУВАЛЬНИХ МАШИН-АВТОМАТІВ

Монографія

**За редакцією доктора технічних наук,
професора Гавви О.М.**

Київ 2023

Рецензенти:

Регей І.І., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри поліграфічних і пакувальних машин та технологій пакування Української академії друкарства;

Сгоров В.Б., доктор технічних наук, професор Одеського національного технологічного університету

Іващук В.В., доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління Національного університету харчових технологій

Системна інженерія пакувальних машин-автоматів [Текст]: моногр. / О.М. Гавва, Л.О. Кривопляс-Володіна, С.В. Токарчук, Л.В. Марцинкевич, О.О. Гавва – К.: Видавництво «Сталь», 2023. – 466 с.

ISBN

Наведено основні методологічні підходи системної інженерії пакувальних машин-автоматів, які включають декомпозицію технологічних схем пакування продуктів із врахуванням часових і просторових ознак, морфологічний аналіз і синтез структури машин і їх основних функціонально-мехатронних модулів, багатокритеріальний і багатопараметричний синтез типових функціональних модулів, результати імітаційного моделювання роботи типових функціональних модулів, аналіз фізичного моделювання операцій пакування на пілотних зразках типових функціональних модулів та алгоритм функціонально-орієнтованого проєктування пакувальних машин-автоматів із врахуванням замкнених технологій виробництва.

Монографія корисна науковим працівникам, конструкторам та інженерно-технічним фахівцям, що працюють у сфері пакувального машинобудування й технічного обслуговування пакувальних машин, а також аспірантам і студентам вищих навчальних закладів.

Видано в авторській редакції.

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

ЗМІСТ

Передмова	6
Розділ 1. Стан та тенденції розвитку методів проєктування пакувальних машин-автоматів як основний фокус системної інженерії	10
1.1. Аналіз структури методів проєктування пакувальних машин.....	10
1.2. Методологія проєктування пакувальних машин із врахуванням їх життєвого циклу.....	20
1.3. Аналіз стану використання САПР для проєктування пакувальних машин.....	26
1.4. Основні підходи функціонально-орієнтованого проєктування пакувальних машин.....	30
1.5. Методи структурно-параметричного синтезу функціональних мехатронних модулів пакувальних машин.....	34
1.6. Особливості вирішення багатокритеріальних задач синтезу пакувальних машин.....	55
1.7. Методи порівняння та оцінки багатокритеріальних альтернатив.....	57
Висновки.....	60
Розділ 2. Декомпозиція структури пакувальних машин за функціональним призначенням	62
2.1. Методологія критеріальної декомпозиції структури пакувальних машин.....	62
2.2. Декомпозиція структури машин.....	64
2.2.1. Машини пакування сипкої продукції у споживчу тару.....	64
2.2.2. Машини пакування в'язкої та в'язко-пластичної продукції у споживчу тару.....	99
2.2.3. Машини пакування дрібно-штучної та штучної продукції у споживчу тару.....	123
2.2.4. Машини групового пакування пакувальних одиниць.....	131
2.2.5. Машини формуванн збільшених вантажних одиниць.....	141
Висновки	153
Розділ 3. Морфологічний аналіз та синтез структури типових функціональних модулів пакувальних машин-автоматів	154
3.1. Особливості морфологічного аналізу структури функціональних модулів пакувальних машин-автоматів.....	154
3.2. Морфологічний аналіз структури функціональних модулів пакувальних машин-автоматів.....	156

3.2.1. Аналіз структури машин пакування сипкої продукції у споживчу тару.....	156
3.2.2. Аналіз структури машин пакування в'язкої та в'язко-пластичної продукції у споживчу тару.....	166
3.2.3. Аналіз структури машин групового пакування	189
3.2.4. Аналіз структури машин формування збільшених вантажних одиниць	198
3.3. Алгоритм морфологічного синтезу структури пакувальних машин..	207
3.4. Морфологічний синтез пакувальних машин-автоматів.....	212
3.4.1. Синтез машин пакування сипкої продукції у споживчу тару.....	212
3.4.2. Синтез машин пакування в'язкої продукції у споживчу тару.....	225
3.4.3. Синтез машин групового пакування.....	234
3.4.4. Синтез машин формування збільшених вантажних одиниць.....	248
Висновки.....	259
Розділ 4. Багатокритеріальний та багатопараметричний синтез типових функціональних модулів пакувальних машин-автоматів..	261
4.1. Багатопараметричний синтез типових функціональних модулів машин пакування сипкої продукції у споживчу тару.....	261
4.2. Багатокритеріальний синтез типових функціональних модулів машин-автоматів пакування дрібно-штучних і штучних продуктів у споживчу тару.....	273
Висновки.....	304
Розділ 5. Імітаційне моделювання роботи типових функціональних модулів пакувальних машин-автоматів із максимальним виконанням корисних функцій.....	306
5.1. Алгоритми імітацій функціонування типових функціональних модулів пакувальних машин.....	306
5.2. Імітаційні моделі роботи типових функціональних модулів машин.....	315
5.2.1. Моделі роботи функціональних модулів машин-автоматів пакування сипкої продукції у споживчу тару.....	315
5.2.2. Моделі роботи функціональних модулів машин-автоматів пакування в'язких та в'язко-пластичних продуктів у споживчу тару....	328
5.2.3. Моделі роботи функціональних модулів машин-автоматів пакування дрібно-штучних і штучних продуктів у споживчу тару.....	343
Висновки	369
Розділ 6. Реалізація проєктів системної інженерії та результати їх експериментальних досліджень.....	370

6.1.Проект типового функціонального модуля дозування рідких харчових продуктів.....	370
6.2. Проект типового функціонального модуля мікродозування із застосуванням пневмосоплового ежектора.....	387
6.3.Проект типового функціонально-мехатронного модуля пневмосоплового оброблення споживчої упаковки.....	390
6.4. Проект типового функціонального модуля живлення і дозування дрібно-штучних продуктів	395
6.5. Проект типового функціонального модуля переміщення і позиціонування споживчої тари під час фасування дрібно-штучних продуктів.....	400
6.6.Проект типового функціонального модуля вертикального та горизонтального переміщення.....	405
6.7.Проект типового функціонального мехатронного модуля захоплювання із комбінованими елементами утримання.....	412
Висновки.....	430
Розділ 7. Рекомендації впровадження системної інженерії пакувальних машин-автоматів, основою якої є функціонально орієнтований підхід.....	431
Висновки.....	438
Список використаних джерел.....	440

ПЕРЕДМОВА

Сучасні пакувальні машини (ПМ) – це складні багатоопераційні технічні системи, до складу яких входять механічна, енергетична та кібернетична складові.

Проблема комплексного забезпечення конкурентоздатності пакувальних машин є першочерговою для машинобудування. Конкурентоздатність на всіх етапах життєвого циклу визначається такими факторами: співвідношення «ціна-якість виробу»; запланований термін служби; витрати на експлуатацію; витрати на профілактичне обслуговування; ремонтпридатність; характеристики ресурсозбереження; екологічні характеристики; можливість ефективної утилізації тощо [1].

У сучасних умовах найсуттєвішим способом забезпечення конкурентоздатності виробів машинобудування є швидке оновлення продукції, підвищення її якості за рахунок реалізації науково-технічних розробок, що можливо при одночасному зростанні технічного рівня виробництва, яке обумовлює технічну можливість створення високоякісної продукції та зменшення необхідних витрат на її проектування та утилізацію [2].

Ефективність таких рішень забезпечується можливістю осмисленої й цілеспрямованої оперативної зміни вимог до кожного етапу життєвого циклу пакувальної машини.

Під життєвим циклом ПМ розуміють відрізок етапу часу, який вимірюється з моменту проведення науково-дослідних робіт з обґрунтування техніко-економічних показників машини до зняття її з виробництва [3].

Тривалість життєвого циклу – змінна функція, що залежить від двох груп факторів. Перша група включає: технічні (новизна, складність, надійність, потреба і т.д.); економічні (собівартість, рентабельність, потреба і т.д.); організаційні (серійність, характер обслуговування, управління і т.д.). друга група – перехід на вироблення нової продукції; зміна технічних вимог

замовника; поява нових ринків збуту і т.д.

Життєвий цикл сучасних ПМ умовно можна навести сукупністю таких етапів: формування вимог до ПМ та формування технічного завдання на її розробку; проектування машини; серійне виробництво; експлуатація; модернізація машини; утилізація.

Перший етап називається зовнішнім проектуванням. При цьому виявляється мета, заради якої створюється машина, уточнюється коло розв'язуваних нею задач, визначаються умови роботи машини, формуються вимоги до технічних показників машини.

На другому етапі проектування визначаються структура і параметри машини, варіанти побудови та способи практичної реалізації, конструкція, технологія виготовлення функціональних модулів та машини загалом.

При розробленні, випробуваннях й експлуатації пакувальних машин виникає завдання визначення оптимальних значень конструкційних і технологічних параметрів, раціональних експлуатаційних режимів, що забезпечують надійне функціонування машини при дії на неї множини дестабілізуючих факторів (волога, температура, рівень вібрації, абразивність середовища тощо).

На сьогодні є актуальною інтеграція функції розроблення й експлуатації складних технічних систем, таких як ПМ, у рамках мегасистеми «наука-техніка-виробництво-експлуатація». Для ефективної такої інтеграції в провідних машинобудівних компаніях світу впроваджують комп'ютерні технології CALS. CALS-технології в машинобудуванні – це єдине інформаційне середовище для всіх етапів життєвого циклу машини, яке забезпечує інтеграцію не тільки інформаційних технологій, але й різних електронних технологій опису машини на одному й тому самому етапі життєвого циклу з урахуванням умов різних виробництв [4].

Ефективність застосування CALS-технологій у машинобудуванні проявляється в підвищенні якості та конкурентоздатності продукції, більш

швидкому виході на ринок за рахунок скорочення тривалості виробничого циклу, зменшення витрат на проектування, виготовлення та експлуатацію машини.

Процес, який забезпечує керування підсистемами великої системи, до якої відносять пакувальні машини, є складовою системної інженерії. Основною метою системної інженерії є проектування та управління системами, щоб вони були ефективними. Ефективність методів системної інженерії визначається усуненням негативних та непередбачуваних ризиків, що виникають під час реалізації етапів життєвого циклу машин.

Метою написання цієї монографії є обґрунтування розробленої науково-технічної концепції функціонально-орієнтованого проектування пакувальних машин-автоматів із високими показниками життєвого циклу та критеріями ефективності.

Системний принцип реалізації життєвого циклу пакувальних машин вимагає безпосереднього зв'язку технологічного етапу проектування та виготовлення з експлуатаційним етапом.

Перекриття усіх стадій життєвого циклу пакувальних машин забезпечує підвищення якості їх функціональних і споживчих властивостей та ефективність швидкого виконання індивідуального замовлення.

Архітектоніка монографії включає 7 розділів, в яких розглянуто: декомпозицію технологічних схем пакування продуктів із врахуванням часових і просторових ознак; на основі морфологічного аналізу та синтезу за критеріями виконання корисних функцій виділено оптимальні структури функціональних модулів пакувальних машин; методологію багатокритеріального синтезу функціональних модулів; імітаційні моделі роботи типових функціональних модулів пакувальних машин; результати досліджень пілотних зразків типових функціональних модулів машин та концепцію функціонально-орієнтованого проектування пакувальних машин із врахуванням замкнених технологій виробництва.

Під час написання монографії для повноти представлення методології системної інженерії пакувальних машин, автори використали результати деяких опублікованих наукових праць проф.Пальчевського Б.О. та доц.Шаповал О.М. із відповідним посиланням, за що їм щиро вдячні

Автори вдячні рецензентам докторам технічних наук, професорам Регею І.І., Єгорову В.Б. та Іващуку В.В. за згоду висловити свої зауваження та побажання при підготовці рукопису до друку.

Особливу вдячність автори висловлюють компанії ТОВ «ТАС ЕВОТЕК» за сприяння виходу цієї монографії та особисто к.т.н. Пригодію Д.В. за доречно внесені уточнення у формулювання основних стадій життєвого циклу пакувальних машин й організацію видавництва.

Усі зауваження та побажання читачів будуть прийняті авторами із вдячністю та враховані у подальшій роботі.

РОЗДІЛ 1. СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ ПРОЄКТУВАННЯ ПАКУВАЛЬНИХ МАШИН-АВТОМАТІВ ЯК ОСНОВНИЙ ФОКУС СИСТЕМНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

1.1 Аналіз структури методів проєктування пакувальних машин

Одним із підходів до створення новітніх пакувальних машин є технологія паралельного (спільного) інжинірингу [5]. Паралельний інжиніринг – це підхід у технологіях підтримки життєвого циклу, що замінює тривалий лінійний процес проєктування і дорогих дослідно-конструкторських робіт на паралельний.

Метод паралельного (спільного) інжинірингу виник на основі ідеології Lean Manufacturing (ощадливе виробництво) [6], яка передбачає розроблення сучасної пакувальної техніки здійснювати в умовах жорстких обмежень фінансових ресурсів.

Розвиток цього підходу базується на використанні раніше накопиченого досвіду під час проєктування нового пакувального обладнання та розроблення методів пошукового структурно-параметричного його синтезу.

Пошукова задача структурно-параметричного синтезу під час розроблення нової пакувальної машини виникає на концептуальній стадії проєкту, тобто на етапі зовнішнього проєктування [7]. Цей етап можна характеризувати неповнотою і неточністю інформації. Дані на цій стадії проєктування мають багатопараметричний й багатозначний характер.

Для ефективного керування мультипроєктом розробляють моделі, які дають можливість урахувати й застосувати раніше накопичений досвід під час проєктування нових пакувальних машин, що продовжують лінійку виробів виробничої програми [7].

Цей підхід до етапу зовнішнього проєктування пакувальних машин базується на таких системних принципах:

- кастомізація;

- зворотне проектування.

Принцип кастомізації передбачає виготовлення машини під конкретне замовлення споживача шляхом її комплектації додатковими елементами.

Пакувальна машина, на яку може поширюватися кастомізація повинна характеризуватися [8]:

- загальним для всіх моделей функціональним центром, що не змінюється залежно від бажання замовника;

- широким спектром опцій, які може вибирати замовник, серед яких можуть бути як функціональні характеристики, так і суб'єктивні характеристики відповідно до вподоби замовника.

Зворотне проектування – це дослідження пакувальної машини, а також документації на неї з метою зрозуміти принцип її роботи й, найчастіше, відтворити машину з подібними властивостями, але без копіювання як такої. Принцип зворотного проектування вивчає діяльність уже існуючого рішення, після чого результати аналізу можуть бути використані для покращення машини або для розроблення нових рішень [9]. Для реалізації цього принципу пропонується наступне:

- використовувати сукупність раніше отриманого досвіду рішень, у рамках яких на етапі зовнішнього проектування можна було б провести процес адаптації на конкретну машину відносно до вимог замовника.

Принцип, за яким множина характеристик X^* конкретної машини, що задаються «технічними вимогами» замовника до проектованої машини, ставиться у відповідність із множиною вихідних характеристик раніше розроблених машин X (машини-прототипи).

Нехай задана множина X , що містить « n » характеристик із дискретними і безперервними параметрами вихідної системи, і множина X^* , що містить « n^* » характеристик, що описують «технічні вимоги» до конкретного рішення

$$X = \bigcup_{i=1}^n X_i \text{ та } X^* = \bigcup_{i=1}^{n^*} X_i^*.$$

Для спрощення, без втрати спільності рішення, можна прийняти $n=n^*$, тобто привести у відповідність перелік характеристик конкретного рішення до характеристик рішення – прототипу.

Рішення з максимальним використанням раніше накопиченого досвіду

$$X^M = X \cap X^*$$

буде існувати й буде економічно виправданим, якщо виконуються такі умови.

Перша умова – можливість створення рішення X^M визначається наявністю або відсутністю перетинання множини рішення-прототипу X із множиною необхідної конкретної реалізації X^* . Інакше пропонувану модель на базі рішення-прототипу на етапі зовнішнього проектування можна використовувати, якщо при однакових зовнішніх впливах на певному інтервалі часу виконується умова:

$$X \cap X^* \neq \emptyset$$

Друга умова – якщо варіювати множину X різними значеннями технічних показників, що відповідають функціонально-повним варіантам компоновання й комплектації так, щоб множина характеристик рішення прототипу X покривала погоджені із замовником технічні вимоги конкретного рішення X^* , тобто область економічно виправданого рішення X^M може бути визначена.

Для ефективного використання прийнятої моделі, потрібно розробити методи прийняття рішення в процесі пошуку, формування й вибору прототипу пакувальної машини, що відповідає вимогам замовника.

Прийняття проектних рішень охоплює широке коло завдань і процедур – від вибору варіантів до задач творчого характеру, що не мають формального способу рішення. Однією із задач творчого характеру є структурно-параметричний синтез. Оскільки всі об'єкти і системи на певному рівні розгляду мають структуру, а елементи, що становлять структуру, мають

параметри, то практично будь-яка задача проектування може бути зведена до задачі структурно-параметричного синтезу. Ці завдання ставляться до тих об'єктів, що найбільш важко формалізуються. Саме із цієї причини структурно-параметричний синтез виконується за допомогою ПЕОМ.

Постановка й методи вирішення завдань структурно-параметричного синтезу в зв'язку із труднощами формалізації не досягли ступеня узагальнення й деталізації, властивій математичному забезпеченню процедур аналізу. Досягнутий ступінь узагальнення виражається у встановленні типової послідовності дій і використовуваних видів описів при їхніх перетвореннях у САПР. Вихідний опис, зазвичай, це технічне завдання (ТЗ) на проектування, згідно з ним складають опис на деякій формальній мові, що є вхідною мовою використовуваних підсистем САПР. Потім виконують перетворення описів, а одержуваний підсумковий для даного етапу опис документують [10].

Прийняття проектних рішень у процесі структурно-параметричного синтезу включає такі етапи:

- формалізація вихідного опису й подання множини альтернатив (X);
- оцінювання поєднань і сумісності елементів;
- вибір критеріїв (K) для оцінювання ефективності отриманого рішення;
- визначення моделі розрахунку якості альтернатив за заданими критеріями ($X \rightarrow K$);
- визначення правил вибору оптимального рішення.

Для вирішення завдань, що виникають на кожному з наведених етапів, розроблено ряд методів. Формування комплексного методу ухвалення рішення в процесі структурно-параметричного синтезу нової машини, що відповідає вимогам замовника, з максимальним використанням накопиченого досвіду проведемо на основі аналізу цих методів із визначенням найбільш перспективних із них.

Кожній альтернативі конкретного зразка машини можна поставити у відповідність значення впорядкованої множини (набору) атрибутів $X = \langle x_1,$

$x_2 \dots x_n$), що характеризують властивості альтернативи. При цьому x_i може бути величиною типу real, integer, boolean, string (в останньому випадку величину називають предметною або лінгвістичною) [6]. Множину X називають записом (у теорії баз даних), фреймом (у штучному інтелекті) або хромосомою (у генетичних алгоритмах).

Властива проектним завданням невизначеність та нечіткість вихідних даних, а іноді й моделей, диктують використання спеціальних методів кількісного формулювання вихідних не кількісних даних і відносин. Ці спеціальні методи або відносять до області побудови вимірювальних шкал, або є предметом теорії нечітких множин.

Вимірювальні шкали можуть бути:

- абсолютними;
- номінальними (класифікаційними) – значення шкали представляють класи еквівалентності, прикладом може бути шкала кольорів; такі шкали відповідають величинам не кількісного характеру;
- порядковими, якщо між об'єктами A й B встановлено одне з наступних відносин: простого порядку яке відповідає, якщо A краще B , то B гірше A , і дотримується транзитивність; або слабкого порядку, тобто або A не гірше B , або A не краще B ; або часткового порядку;
- інтервальними, що відображають кількісні відносини інтервалів.

Найпростіший спосіб задання множини альтернатив A – явне перерахування всіх альтернатив. Семантика й форма опису альтернатив істотно залежать від прикладного аспекту. Для подання таких описів у пам'яті ПЕОМ і доступу до них використовують інформаційно-пошукові системи (ІПС). Кожній альтернативі в ІПС відповідає пошуковий образ, що складається зі значень атрибутів x_i , ключових слів і вербальних характеристик [10, 11].

Явне перерахування альтернатив при поданні множини альтернатив можливо лише при малій потужності X . Тому в більшості випадків використовують неявний опис X у вигляді способу (алгоритму або набору

правил) синтезу проектних рішень із обмеженого набору елементів.

У більшості випадків структурно-параметричного синтезу математична модель у вигляді алгоритму, що дає можливість по заданій множині X й заданій структурі об'єкта розрахувати вектор критеріїв K , виявляється невідомою. У такому випадку намагаються використовувати підхід на базі систем штучного інтелекту.

Якщо всі керовані параметри альтернатив, позначені у вигляді множини X , є кількісними оцінками, то використовують наближені методи оптимізації. Якщо у X входять також параметри не кількісного характеру й простір X неметризуємий, то перспективними є еволюційні методи обчислень, серед яких найбільш розвинені генетичні методи. Нарешті, під час відсутності обґрунтованих моделей їх створюють, ґрунтуючись на експертних знаннях у вигляді деякої системи штучного інтелекту.

Основні методи прийняття рішень у процесі структурно-параметричного синтезу пакувальних машин, що задовольняє вимогам замовника з максимальним використанням раніше накопиченого досвіду наведені в табл. 1.1.

Серед методів, що наведені в табл. 1.1, найбільш перспективними є методи морфологічного аналізу і синтезу, альтернативні І-АБО-дерева, генетичні алгоритми й методи, теорії нечітких множин.

Вибір цих методів обумовлений наявністю алгоритмів для вирішення кожного з перерахованих етапів задачі ухвалення рішення в процесі структурно-параметричного синтезу.

Ці методи найбільшою мірою задовольняють вимогам універсальності, обліку багатокритеріальності вибору, вони одержали широке втілення в системах комп'ютерної підтримки, мають мінімум обмежень.

Таблиця 1.1 — Критичний аналіз методів прийняття рішень у процесі структурно-параметричного синтезу

№ 1	Призначення методу 2	Назва методу 3	Суть методу 4	Обмеження 5
1	Подання множини альтернатив	Морфологічні таблиці [8, 9]	Множина альтернатив представляється у вигляді відносин M , що називаються морфологічною таблицею $M = \langle P, A \rangle$, де P — множина характеристик або функцій, властива об'єктам, що розглядаються, n — число цих властивостей, $A = \langle A_1, A_2, \dots, A_n \rangle$; A_i — множина значень (способів реалізації) i -ї характеристики	Надмірність можливих варіантів; немає обліку залежностей множини A_i
		Альтернативні І-АБО-деревця [12]	У цьому методі функції представлені вершинами І, значення функцій — вершинами АБО	Використання методу ускладнено для виробів, що складаються із щільно скомпонованих елементів та взаємно переплітаються
		Генетичні алгоритми (ГА) [13]	Властивості об'єктів представлені значеннями параметрів, що поєднані у запис, який називають хромосомою. У ГА оперують підмножиною хромосом, які називають популяцією	Сусідні числа в бітовому поданні можуть різнитися в декількох позиціях, що ускладнює функціонування генетичного алгоритму

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5
		<p>Метод висновку по прецедентах (СВТІ-метод) [10]</p>	<p>У більшості випадках для подання прецедентів досить простого параметричного подання: CASE=$(x_1, x_2, \dots, x_n, R)$, де x_1, \dots, x_n- параметри ситуації, що описує даний прецедент; $x_1 \in X_1, x_2 \in X_2, \dots, x_n \in X_n$, де n - кількість параметрів для опису прецеденту, а X_1, \dots, X_n - області припустимих значень відповідних параметрів, R - рішення</p>	<p>Некомпактне (без узагальнення) зберігання інформації.</p>
		<p>Метод аналізу ієрархій [9]</p>	<p>Будується ієрархія, що включає мету, розташовану в її вершині, проміжні рівні (критерії) і альтернативи, що формують самий нижній ієрархічний рівень</p>	<p>Трудомісткість процесу</p>
		<p>Методи теорії нечітких множин [14]</p>	<p>У нечіткій логіці альтернативи представляються нечіткими множинами.</p>	<p>Неможливість математичного аналізу нечітких множин існуючими методами</p>
2	Оцінка поєднань та сумісності елементів	<p>Альтернативні І-АБО-дерева</p>	<p>Вводяться таблиці сумісності вершин І-АБО-дерева. Ці таблиці призначені для визначення вершин, які не можуть з'явитися в описі технічного рішення (ТР) одночасно</p>	<p>Трудомісткість процесу</p>
		<p>Методи теорії нечітких множин [14]</p>	<p>Вводяться правила, що відображають заборони на сполучення певних компонентів структур, певних значень параметрів</p>	<p>Трудомісткість процесу</p>
		<p>Метод висновку по прецедентах</p>	<p>Вводяться правила, що відображають заборони на сполучення певних компонентів структур, певних значень параметрів</p>	<p>Трудомісткість процесу</p>

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5
3	Вибір критеріїв (К) для оцінювання ефективності отриманого рішення. Оцінка альтернатив	Метод експертних оцінок [15]	Суть методу базується на проведенні експертами інтуїтивно логічного аналізу проблеми з кількісною оцінкою суджень і формальним обробленням результатів. Отримана в результаті оброблення узагальнена думка приймається як рішення проблеми	Обмежена здатність мозку порівнювати більше, ніж 7 ± 2 альтернатив одночасно
4	Визначення моделі розрахунку якості альтернатив за заданими критеріями (X→K)	Морфологічний синтез Альтернативні I- АБО- дерева	За отриманими експертними даними визначається вектор пріоритетів альтернатив і розраховується цільова функція Модель оцінки варіантів TP ґрунтується на обчисленні значень показників I- вершин, які виражають зв'язок між списком вимог і конструктивних ознак в I-АБО-дереві. Показники I- вершин обчислюються через показники їхніх приймачів, при цьому використовуються п'ять способів згортки й обчислення показників: згортка «сума», «мінімум», «максимум», «середньозважена» і «класифікаційна»	Трудомісткість процесу
		Генетичні методи [16]	Існує декілька методів наблизеної побудови множини Парето на основі генетичних алгоритмів. Найбільш ефективний і простий у реалізації метод FFGA. Цей метод використовує процедуру ранжирування індивідів (альтернатив), засновану на Парето-домінуванні. При цьому ранг кожного з індивідів визначається кількістю домінуючих його інших індивідів даної популяції (так що чим нижче ранг, тим	Мають потребу в значних обчислювальних ресурсах

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5
		<p>Методи теорії нечітких множин</p>	<p>індивід ближче до множини Парето). Придатність індивіда обчислюється на основі величини, зворотної його рангу. Отже, придатність індивіда визначається не значенням цільової функції, а рангом кожного індивіда в популяції</p>	<p>Слабка стійкість результатів щодо вихідних даних</p>
5	<p>Визначення моделі розрахунку якості альтернатив за заданими критеріями ($X \rightarrow K$)</p>	<p>Морфологічний синтез</p>	<p>Експертні оцінки альтернативних варіантів за критеріями можуть бути надані як нечіткі множини, виражені за допомогою функцій приналежності</p>	
6	<p>Визначення правил вибору оптимального рішення</p>	<p>Генетичні методи</p>	<p>Варіанти TP упорядковуються в напрямку зменшення значень цільової функції.</p>	
		<p>Методи теорії нечітких множин</p>	<p>Чим нижче ранг, тим індивід ближче до множини Парето (метод FFGA)</p>	
		<p>Альтернативні I-АБО-дерева</p>	<p>Для різних методів теорії нечітких множин існують різні правила вибору. Для багатокритеріального вибору альтернатив на основі перетинання нечітких множин кращою вважається альтернатива, що має найбільшу функцію приналежності.</p>	
			<p>Вибирається TP у вигляді I-дерева, якщо всі вершини сумісні й показники обраного (синтезованого) TP відповідають вимогам T3, то запам'ятовується значення критеріїв якості. Якщо значення якості наступного TP краще попереднього, то фіксується наступне TP і його значення критеріїв якості. Наприкінці алгоритму мають краще TP.</p>	

1.2. Методологія проєктування пакувальних машин із врахуванням їх життєвого циклу

На сьогодні розвиток багатоменклатурного автоматизованого виробництва, до складу яких входять пакувальні машини, привів до створення комп'ютеризованого інтегрованого виробництва, концепція якого передбачає:

- використання комп'ютерних технологій для автоматизації технологічних процесів та операцій;

- інформаційну інтеграцію процесів, яка досягається за рахунок використання спільних баз даних при розробленні та проєктуванні машин, підготовці виробництва, його матеріально-технічному забезпеченні, планування та керування ним;

- наявність інтегрованої автоматизованої керування (JASK), яка виконує функції автоматизації процесів проєктування, підготовки виробництва, виготовлення машин та керування підприємством, а також забезпечення інформаційної інтеграції процесів.

Реалізація комп'ютеризованих інтегрованих виробництв передбачає автоматизацію усіх видів робіт та інтегровану інформаційну підтримку рішень із допомогою сучасних інформаційних технологій та інтегральних систем на усіх стадіях життєвого циклу (ЖЦ) виробу. Створення реконфігурованих виробничих систем РВС (RMS – Reconfigurable manufacturing system), здатних змінювати просторово-часову організацію (архітектуру) виробничої системи, дає можливість задовольняти ринковий попит на продукцію.

За визначенням, наведеним у стандарті ISO 9004-1, життєвий цикл продукції – це сукупність процесів, що виконуються від моменту виявлення потреб суспільства у певній продукції до моменту задоволення цих потреб та утилізації продукції. До основних стадій життєвого циклу відносять: маркетинг; проєктування і розроблення продукції; планування і розроблення процесів; закупівля матеріалів і комплектуючих; виробництво та надання послуг; пакування і зберігання; реалізація; монтаж і введення в експлуатацію;

технічна допомога і сервісне обслуговування; післяпродажна діяльність або експлуатація; утилізація і переробка по завершенні корисного терміну службу.

Для підтримки життєвого циклу виробів створена інтегрована система PLM (Product Lifecycle Management). [17]

До PLM відносять практично всі засоби і системи автоматизації: конструкторські та технологічні САПР (CAD/ CAM/CAE), засоби керування взаємодією з клієнтами – CRM (Customer Relationship Management), ланцюг поставок – SCM (Supply Chain Management), технічним обслуговуванням і т.д. Сюди ж відноситься система управління даними про виріб – PDM (Product Data Management), яка є основою PLM і відіграє ключову роль в організації інформаційної взаємодії усіх учасників життєвого циклу виробу через інтегроване інформаційне середовище (ІІС).

Реалізація стратегії PLM передбачає виконання трьох груп методів [18]:

- Технології аналізу та реінжинірингу бізнес-процесів, які включають організаційні методи реструктуризації способу функціонування машини з метою підвищення його ефективності. Ці технології потрібні для переходу від паперового до електронного документообігу і впровадження нових методів розробки машин (виробів).

- Технології представлення даних про виріб в електронному вигляді, передбачають набір методів для подання в електронному вигляді даних про виріб, що відносяться до окремих процесів його життєвого циклу. Ці технології призначення для автоматизації окремих процесів ЖЦ.

- Технології інтеграції даних про виріб, включають набір методів для інтеграції автоматизованих процесів ЖЦ та належних до них даних, наведених в електронному вигляді.

Концепція реконфігурованих виробничих (технічних) систем є альтернативою гнучким виробничим системам.

В США, Німеччині та Японії основною концепцією розвитку машинобудівного виробництва є створення реконфігурованих виробничих

систем – РВС. Реконфігуровані виробничі системи – це нові системи із змінною архітектурою, які вчасно можуть адаптувати свою структуру, мають для цього швидкі і надійні процеси планування та впровадження змін і можуть розвиватися разом із зростаючою динамікою ринку [19].

РВС базуються на таких принципах [20]:

- проектування і впровадження у виробництво машин із переналагоджувальною структурою;
- проектування технічної системи навколо групи деталей з економічно ефективною гнучкістю, необхідного для виробництва всіх виробів цієї групи (скорочує витрати системи).

На відміну від традиційних вузькоспеціалізованих технічних систем виробничі можливості РВС можуть змінюватись плавно, залежно від вимог виробника і кінцевого споживача.

В сучасних умовах найважливішими засобами забезпечення конкурентоздатності продукції є її оновлення, підвищення якості з рахунок реалізації науково-технічних розробок. Це можливо при одночасному рості технічного рівня виробництва, яке обумовлює технологічні можливості створення високоякісної продукції і зменшення необхідних витрат на її виробництво. Особливо це важливо для пакувальних машин, які працюють у важких умовах (високі швидкості, знакозмінні навантаження, температурні градієнти тощо).

Аналіз життєвого циклу потрібний для встановлення раціональності і пропорційності розподілення ресурсів по етапах життєвого циклу, тривалості роботи на цих етапах і знаходження резервів ресурсозбереження.

Під час експлуатації пакувальних машин відбуваються важко прогнозовані зміни їх параметрів. Це обумовлено впливом багаточисельних факторів, які діють на експлуатаційні характеристики не ізольовано, а комплексно і знаходяться в складній залежності один від другого. Їх умовно можна диференціювати на три групи: конструктивні; технологічні;

експлуатаційні. В сукупності всі фактори за відповідний період експлуатації пакувальних машин суттєво на них діють.

За деяких умов експлуатації машин виникають локальні несправності, які в подальшому розвиваються дуже швидко. Це призводить до різкого зниження роботоздатності всієї машини.

А тому пакувальні машини оцінюють на предмет їх стійкості до нормальної (заданої) тривалості експлуатації.

При розробленні, випробуваннях і експлуатації пакувальних машин виникає потреба у визначенні оптимальних значень конструкційних і технологічних параметрів, раціональних експлуатаційних режимів, які забезпечують надійне функціонування машини при дії великої кількості дестабілізуючих факторів (температура, вологість, дисперсність абразивного середовища, рівень вібрації тощо). Під час вирішення цих задач потрібно визначити:

- перелік експлуатаційних факторів, що впливають на досліджуваний показник надійності (якісна оцінка);
- залежність (функціональна або стохастична) між показниками надійності і встановленим переліком експлуатаційних факторів (кількісна оцінка).

Число можливих факторів, від яких в тій чи іншій мірі залежить надійність функціональних модулів і машини загалом, практично необмежено. Їх можна навести у вигляді таких груп: конструкційні, технологічні, експлуатаційні, організаційні, спеціальні та ін.

Сьогодні є потребою інтеграція функцій розробки і експлуатації складних технічних систем, до яких відносять пакувальні машини, в рамках мега системи – наука – техніка – виробництво – експлуатація.

Складові цієї системи розглядаються не тільки як послідовний ланцюг, який складається із просторово-часових автономних компонентів (структурно-функціональні), але і як органічно поєднана система. Об'єднання такої системи

базується загальною метою її функціонування.

Поряд із цим найважливішою і найскладнішою метою, що об'єднує завдання, які вирішуються на етапах життєвого цикла машини є забезпечення її технологічності.

Забезпечення технологічності конструкції машини заключається в досягненні оптимальних трудових, матеріальних і енергетичних витрат на проектування, виготовлення, монтаж, технологічне обслуговування і ремонт, при забезпеченні заданих показників якості машини.

В загальному вигляді ефективність управління стратегіями життєвого цикла визначаються як ефективний обмін і перерозподілення вхідних і вихідних ресурсів в конкретній машині.

Основними факторами, що визначають роботоздатність пакувальної машини та її стан, є параметри якості, продуктивності і економічної доцільності [9].

Умова роботоздатності за параметром продуктивності має вигляд:

$$(\exists \Pi_{ni})(\forall \Pi_i)(\Pi_i \subset \bar{\Pi}_i) \Rightarrow v_n \subset \bar{V}_n,$$

де Π_{ni} – нормативне значення i -го параметра продуктивності; \bar{V}_n – область допустимих значень вихідних із системи V - ресурсів за параметром продуктивності.

Умова роботоздатності за параметром якості:

$$(\exists q_{ni})(\forall q_i)(q_i \subset Q_i) \Rightarrow v_k \subset \bar{V}_n,$$

де q_{ni} – нормативне значення i -го показника якості; Q_i – область допустимих і недопустимих значень Q ; v_k – ресурси, що залежать від параметрів якості.

Ймовірність роботоздатного стану системи в момент t до рівнів:

$$P(t) = P\{X_0 \cdot X_{t_0} = 1; \quad X(t) \subset \bar{X}; \quad U_{(t-t_0)} \subset \bar{U}; \quad v(t) \subset \bar{V}\}$$

або

$$P(t) = P\{X(t) \subset \bar{X} | X_0 \cdot X_{t_0} = 1; \quad U_{(t-t_0)} \subset \bar{U}; \quad v(t) \subset \bar{V}\},$$

де

$$X_0 = \begin{cases} 1 - \text{машина після періода підготовки, виробництва знаходиться} \\ \quad \text{в роботоздатному стані, в момент } t = 0 \\ 0 - \text{машина в момент } t = 0 \text{ є нероботоздатною.} \end{cases}$$

$$X_{t_0} = \begin{cases} 1 - \text{машина після чергової підналадки знаходиться} \\ \quad \text{в роботоздатному стані в момент } t = t_0 \\ 0 - \text{машина після чергової підналадки знаходиться в} \\ \quad \text{нероботоздатному стані.} \end{cases}$$

Узагальнивши вирази запишемо:

$$P(t) = P \begin{cases} X(t) \subset \bar{X} | X_0 \cdot X_{t_0} = 1; \\ (\forall_i)(\Pi_i(t) \geq \Pi_H); \\ (\forall_i)(B_i(t) \leq B_H); \\ (\forall_{i,j})(q_{i,j}(t) \subset \bar{Q}), \end{cases}$$

де i – кількість видів операцій, що виконуються машиною; Π_i, Π_H – величини нормативної і миттєвої продуктивності; $B_i(t)$ – вартість i -го виду операції; $q_{i,j}(t)$ – показник якості i -го виду операції.

Для етапів проектування і виготовлення машини важливо враховувати і досліджувати оптимальні відношення собівартості і ймовірності виготовлення якісних деталей [21].

Математичне очікування вартості дефектних виробів:

$$CM(Y) = \frac{1}{P_S} (PC(1 - P_S)),$$

де C – витрати на виробництво одного виробу (по кільком варіантам). При варіанті C' ймовірність виконання завдання за показником якості дорівнює P'_S . Параметр $M(Y)$ – середнє число виробів для забезпечення програми виготовлення якісних Π виробів.

Встановлено, що для кожного P'_S є межа, яку не можна перевершити даже при безмежному збільшенні вартості виробів.

Таким чином, з точки зору впливу на витрати за весь життєвий цикл машини, етап виробництва і технологічного опанування займає одне із важливих місць.

Завершальні етапи життєвого циклу – експлуатація і утилізація машини мають найбільшу тривалість із всіх етапів. На етапі експлуатації машина дає

економічний ефект.

Поряд із цим потрібно враховувати і той факт, що з моменту експлуатації відбувається зношування деталей і проявляються несправності, зв'язані з експлуатацією машини, перевершують корисну віддачу наступає момент її утилізації.

1.3 Аналіз стану використання САПР для проектування пакувальних машин

Сучасні умови виробництва вимагають підвищення параметрів якості та універсальності пакувального обладнання, що призводить до ускладнення його конструкції, системи керування і, як наслідок, збільшення об'єму та удосконалення проектних робіт. З іншого боку зменшення фінансування цих робіт призводить до необхідності скорочення тривалості та зменшення трудомісткості процесу проектування [22]. Це зумовлює необхідність застосування систем автоматизованого проектування (САПР), які б дали можливість підвищити ефективність робіт, пов'язаних із проектуванням пакувальних машин.

Отже, головним завданням у створенні САПР є розроблення нової технології проектування, яка б дала можливість на основних етапах проектування правильно вибирати основні параметри конструкції машини та оцінити різні характеристики її ефективності, а також упродовж усього процесу проектування контролювати зміни цих характеристик так, щоб у результаті випробувань була відсутня доцільність проведення будь-яких доведень [23].

Основною особливістю сучасної методики проектування, на основі якої створюється САПР, є застосування системних принципів опису як мети проектування, так і його результату – об'єкта проектування, з одного боку, а також можливість застосування сучасних математичних методів для знаходження оптимального варіанту, що є інтелектуальною технологією проектування.

Алгоритмізація процесу синтезу компонування стала можливою тільки після створення систем їх формалізованого опису з різною мірою конкретизації. Існує ряд методів кодування функцій, технічних характеристик і компонувань машин [24] — [28]. Зокрема, в роботі [24] запропоновано описувати компонування за допомогою структурних формул, побудованих згідно принципів алгебри і теорії множин, що відображають структуру машини та розміщення функціонального модуля в координатному просторі.

Графічний метод опису і синтезу компонувань пакувальної машини, наведений в роботах [28, 29] полягає в побудові моделей її структури у вигляді принципово-структурних схем, що описують не лише склад та просторове розташування функціональних модулів, а й зв'язки між ними та траєкторію переміщення робочих органів функціональних модулів, що надає більш повну інформацію про пакувальну машину порівняно із структурними формулами.

У роботі [30] описані чотири різні типи кодування – координаційний, елементний, блоковий і конструктивний, що відповідають різним етапам проектування. Запропонована система кодування дає можливість повно, однозначно та з різною мірою конкретизації описувати компонування. Проте система (особливо її конструктивний код) є надто детальною для різних етапів проектування і більшою мірою призначена для використання на стадії технічного проекту.

Можливість проектування компонувань із застосуванням ЕОМ наведена в роботах [25], [27], [31]. Кожне компонування аналізується по ряду параметрів для вибору варіанту, який найкраще задовольняє умовам виробництва, за допомогою ряду спеціально розроблених програм.

САПР, які найчастіше використовуються для проектування пакувальних машин, є САД-системи, призначені для створення 3-и вимірних віртуальних моделей машини та її типових функціональних пристроїв у графічному середовищі відповідних програм. Для цього використовують три типи даних про пакувальну машину: множина віртуальних моделей функціональних

модулів, множина ознак чи характеристик пакувальних машин (геометричні, фізичні, технічні та техніко-економічні); множина відношень між функціональними модулями та ознаками чи характеристиками пакувальної машини. Визначальним для якості майбутньої машини є розробка системи правил для об'єднання електронних моделей функціональних модулів у загальну модель машини, які б враховували можливість оцінки отриманого варіанту компонування за відповідними критеріями оптимальності для порівняння його з іншими можливими і вибору кращого [32, 33].

Аналіз робіт у області автоматизації проектування технологічних машин свідчить про те, що автоматизовані, головним чином, креслярські і обчислювальні операції пов'язані з їх конструюванням. У той же час проблеми вибору найбільш раціональних технологічних і конструкторських рішень компонувань машин із складових елементів, підбір цих елементів залишаються поза межами автоматизованого розв'язання [23], [34]. Це істотно обмежує можливості створення нових конструкцій пакувальних машин на основі синтезу їх компонувань, тому потребує подальшого опрацювання.

Таким чином, для нових автоматизованих методів проектування новітніх пакувальних машин потрібно створити системи програмних процедур у САПР пакувальних машин, які б дали можливість конструктору на основі обмеженої інформації про пакувальну машину виконати завдання синтезу, моделювання, оцінки, оптимізації та відбору альтернатив.

Поряд із цим потрібно враховувати і той факт, що пакувальні машини нового покоління з функцією гнучкості для переналаджування потребують нових робочих органів та їх приводів, які б відповідали новим вимогам експлуатації. Це мають бути керовані і контрольовані приводи. Четверте покоління пакувального обладнання має електронні системи керування, які ґрунтуються на спільному використанні компонентів різної фізичної природи. У пакувальному обладнанні розрізняють три основних функціональних блоки, які характеризуються з'єднанням відповідних функціональних елементів в

системи: механічну, електричну та апаратно-програмну. Таке взаємопроникнення електричної системи в механічну та синергетична апаратно-програмна інтеграція складових елементів утворюють мехатронний об'єкт.

Мехатронний підхід до проектування нового пакувального обладнання полягає в тому, що такі об'єкти повинні створюватися як органічно-цілісні електро-механо-гідро-електронні технічні системи, що включають електронно-комп'ютерну апаратуру автоматичного управління [35 — 37].

Аналіз літературних та інформаційних джерел [24], [36] — [38] стосовно проектування пакувального обладнання з мехатронних модулів показав, що цілісної науково-обґрунтованої методології їх формування не існує. Під поняттям методології в такому випадку можна розуміти цілісну систему знань, яка відображає об'єктивну реальність та дає можливість глибоко проникнути в сутність феномену «формування пакувального обладнання з мехатронних модулів».

Потреба в такій методології проектування пояснюється збільшенням функціональних вимог до новітнього пакувального обладнання. Аналіз сучасного стану функціональних можливостей нових модуль-елементів засвідчує їх стрімкий розвиток у напрямках: вирішення функціональних задач шляхом широкого застосування покровкових та серводвигунів, безштокових пневматичних циліндрів та ін.; впровадження нових систем керування апаратних модулів на рівні застосування мікропроцесорного керування різної структури з можливістю реалізації логічного інтелекту; впровадження безперервного інформаційного зв'язку на прикладі впровадження модулів для забезпечення зворотного зв'язку шляхом використання значної кількості датчиків різних груп та видів.

Слід констатувати, що сьогодення розвитку методів та методик проектування пакувального обладнання характеризується здебільшого критичним відставанням від потреб споживачів і потребує переходу на нову

концепцію проектування, що базується на функціонально-орієнтованих підходах.

1.4. Основні підходи функціонально-орієнтованого проектування пакувальних машин

Функціонально-орієнтований підхід до створення новітніх пакувальних машин передбачає виявлення сукупності корисних, нейтральних та шкідливих функцій машини на її життєвому циклі та оптимізація її структури й параметрів із можливістю реалізації тільки корисних функцій і унеможливлення появ функцій шкідливих та нейтральних. Функціональний підхід, на відміну від підходу предметного (об'єктного), виходить із того, що створюваний виріб повинен реалізовувати низку функцій, які можуть забезпечуватися окремими матеріальними носіями, що є найдешевшими, або робота з якими є найменш витратною. На рис 1.1 наведена класифікація функцій виробу [39].

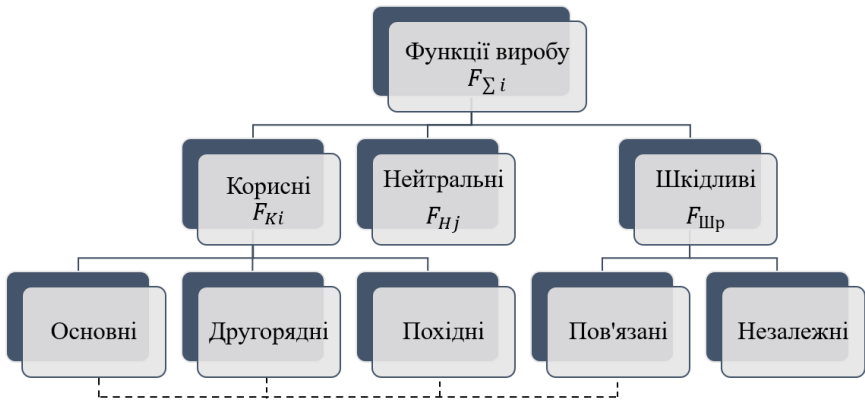


Рисунок 1.1 – Класифікація функцій виробу

Цей підхід відкриває значні перспективи в сучасному машинобудуванні.

Шкідлива функція присутня у виробі в тому чи іншому вигляді, однак для споживача важливими є виключно функції корисні, а не шкідливі, з якими слід боротися.

При цьому шкідливі функції можуть бути ослаблені або повністю усунені відповідним підбором відповідних матеріальних і енергетичних носіїв, які з мінімальними витратами забезпечують потрібне виконання корисних функцій і зменшують, або, в ідеальному випадку, унеможливають появу функцій шкідливих та нейтральних.

Ефективність пошуку алгоритмів розв'язку проблеми комплексного забезпечення конкурентоздатності пакувальних машин забезпечується можливістю осмисленої й цілеспрямованої оперативної зміни вимог до кожного етапу їх життєвого циклу.

В узагальненому вигляді життєвий цикл машини життєвий цикл машини можна навести сукупністю трьох характерних етапів, на яких закладаються матеріальні носії функцій (рис.1.2)

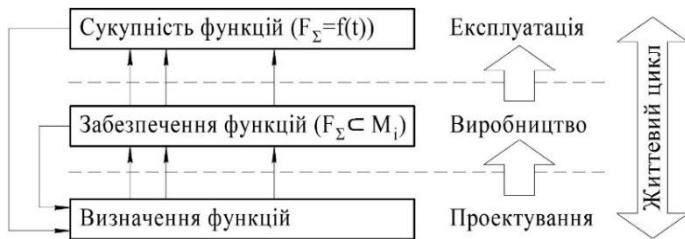


Рисунок 1.2 – Етапи життєвого циклу виробу

На етапі створення аналізується сукупність функцій, що має реалізувати виріб, визначається головна функція, з'єднані з нею корисні, нейтральні та шкідливі функції, а також відбувається попереднє встановлення матеріальних носіїв функцій та зв'язки їх між собою. При цьому можлива поява нових ефектів (нових функцій), що мають позитивний або негативний характер. Використання морфологічного аналізу або інших методів аналізу сукупності властивостей складних технічних систем дає можливість виявити можливі раціональні комбінації матеріальних носіїв.

На етапі виробництва відбувається реалізація закладених технологічних процесів, направлених на матеріалізацію потрібних функцій готового виробу.

На етапі експлуатації готовий виріб виявляє свої корисні функції (головні та другорядні), нейтральні та шкідливі; однак протягом роботи рівні його функцій змінюються. Пошкодження виробу відбувається тоді, коли корисні функції вже не проявляються на рівні, обумовленому технічними або технологічними вимогами; або навпаки, шкідливі функції, неподолані під час проектування та виробництва, починають набувати характеру превалюючих, що також веде до виходу виробу із ладу. Тобто параметрична відмова виробу проявлятиметься як зниження рівня корисних функцій, функціональна – як раптова подія, що призведе до зміни сукупності функцій, закладених при проектуванні та виготовленні.

Здебільшого для типових виробів машинобудування із позицій функціонального підходу формування конкретної корисної споживчої функції F_K пов'язане із появою нейтральних F_H та шкідливих $F_{\text{ш}}$ функцій. Тож ідеальним з точки зору експлуатації є виріб, що несе тільки корисні у певних конкретних умовах функції. Отже можна записати умову ідеального виробу:

$$F_K = F_{Ki}; \quad F_{\text{ш}} = 0; \quad F_H \rightarrow \min, \quad (1.1)$$

де F_{Ki} – задані корисні властивості виробу.

Тоді споживчі властивості виробу (його фізико-механічні, геометричні параметри тощо) визначатимуться:

$$P = \sum_{i=1}^l F_{Ki} + \sum_{j=1}^m F_{Hj} + \sum_{k=1}^n F_{\text{ш}p}. \quad (1.2)$$

Тож оптимізація рівняння (1.2) і обмеження (1.1) дають можливість виконати пошук найбільш раціональних матеріальних носіїв та методів їх отримання.

Якщо припустити, що

$$1 = F_K + F_{\text{ш}} + F_H, \quad (1.3)$$

$$\text{то } F_{\text{ш}} = p \cdot F_K, \quad \text{а } F_H = q \cdot F_K.$$

Наявність функціонального зв'язку (1.3) дає можливість записати вираз (1.2) у такому вигляді:

$$P = \sum_{i=1}^l W_K \cdot F_{Ki} + \sum_{j=1}^m W_H \cdot q \cdot F_{Kj} + \sum_{k=1}^n W_{\text{ш}} \cdot p \cdot F_{Kk}. \quad (1.4)$$

де W_F – складова технологічного процесу, що формує конкретну функцію.

Мінімізація зайвих властивостей дає змогу записати вираз, що відображає наближення реального виробу до ідеального через сукупність його властивостей:

$$P = \sum_{i=1}^l \overline{W}_K \cdot F_{Ki} + \sum_{j=1}^m \overline{W}_K \cdot q \cdot F_{Kj} + \sum_{k=1}^n \overline{W}_K \cdot p \cdot F_{Kk}. \quad (1.5)$$

При виконанні певних перетворень матимемо вираз:

$$P = \sum_{i=1}^l F_{Ki} (\overline{W}_K + \overline{W}_K \cdot q + \overline{W}_K \cdot p). \quad (1.6)$$

Наближення виробу із сукупністю властивостей (1.6) до ідеального передбачає перетворення складових в нуль, що можливо за умови відсутності функціонального зв'язку між корисними та шкідливими властивостями або за умови, що процес формування функції з обраним матеріальним носієм одночасно є інверсним до створення шкідливої функції.

Наявність та взаємозв'язок між окремими елементами технологічного процесу дає можливість записати вираз (1.6) у вигляді:

$$P = \sum_{i=1}^l F_{Ki} (W_K + \overline{W}_K + \overline{W}_K \cdot q + \overline{W}_K \cdot p + \overline{W}_K (p + q)). \quad (1.7)$$

Оскільки створення конкретного виробу завжди передбачає певну кількість альтернатив, отримана залежність має бути доповненою кількісними ознаками кожної із функцій (як корисних, так і шкідливих), які формуватимуть інтегральний показник якості виробу J [39].

$$J = \sum_{i=1}^l F_{Ki} (b_{ki} \cdot W_{Ki} - \overline{b}_{vi} \cdot \overline{W}_{Ki} \cdot p - \overline{b}_{ri} \overline{W}_{Ki} (p + q)), \quad (1.8)$$

за умови, що $\overline{b}_{ni} \cdot \overline{W}_{Ki} \cdot q = 0$. Тут b_{ki} - відповідні вагові коефіцієнти кожної із корисних функцій, \overline{b}_{vi} - вагові коефіцієнти кожної зі шкідливих функцій, \overline{b}_{ri} - вагові коефіцієнти взаємодії незалежних елементів, що виявляють резерви у зміні вихідних властивостей готового виробу.

Успішне вирішення задач функціонально-орієнованого проектування пакувальної машини можливе лише на основі різностороннього цілісного розгляду системи та її розвитку в процесі взаємодії із зовнішнім середовищем

та іншими технічними системами. Лише системний підхід може привести до істинно творчих, новаторських проектних рішень.

1.5 Методи структурно-параметричного синтезу функціональних мехатронних модулів пакувальних машин

В основі розділення описів по ступеню деталізації ПМ та відображення її властивостей і характеристик є блочно-ієрархічний підхід до проектування пакувального обладнання, (недолік – абстрагування ПМ) із різними прийомами аналізу та синтезу. Евристичний прийом синтезу – це неформалізований прийом, який використовується при синтезі технічних об'єктів, що дає змогу визначити у якому напрямі шукати потрібне технічне рішення (недолік - зберігаються у спеціальних фондах баз даних: «змінити напрям обертання», «перейти від однорідних матеріалів до композиційних»). Багатоваріантний аналіз полягає у дослідженні властивостей об'єкту в деякій області простору внутрішніх параметрів. Такий аналіз вимагає багатократного рішення систем рівнянь (багатократного виконання одноваріантного аналізу). Індуктивний підхід - має виявити закономірності в структурних рішеннях найбільш вдалих технічних конструкцій, систематизувати і надати рекомендації для вдосконалення структури конкретної конструкції

Однак, порівняльна оцінка конструкцій ускладнюється внаслідок значної їхньої кількості (рис.1.3) і складності вдосконалення або недосконалості структури машини у сукупності з іншими чинниками, що впливають на цей процес.

У технологічну систему виробу потрапляють по вхідному потоку V , а вивантажуються крізь вихідний потік W . Напрямки стрілок вказують на рух блоків технологічного впливу в кожному модулі технологічного процесу. Таким чином, такий теоретичний підхід дає можливість створювати нетрадиційні прогресивні технології.

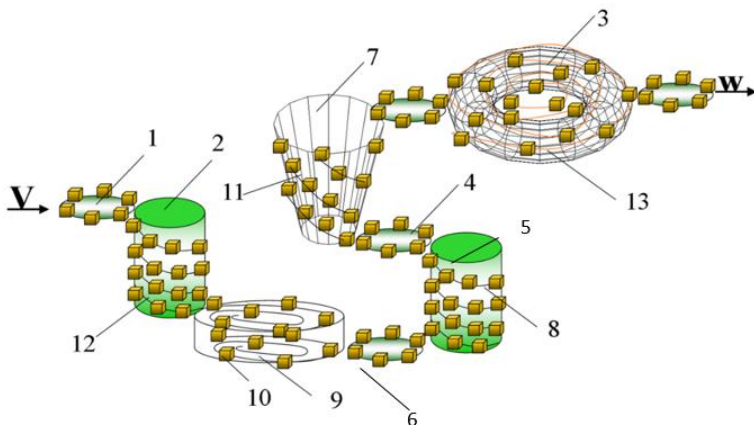


Рисунок 1.3 – Узагальнена структура побудови потокової лінії пакування продуктів на основі функціональних мехатронних модулів: 1- транспортний ротор, 2, 5 – потоково-витрааний технологічний модуль, 3 – потокова система технологічних модулів, 4, 6 – транспортний ротор, 7 – потоково-просторовий технологічний модуль, 8 – потокова межа технологічного модуля, 9 - блок технологічного впливу, 10 – виробу, 11 – просторова траєкторія руху блока технологічного впливу, 12 – потік блоків технологічного впливу, 13 – замкнені рекурентні траєкторії руху блоків технологічного впливу

Це дає можливість суттєво підвищити техніко-економічні показники виготовлення виробів пакувального машинобудування на базі технологій і технологічних систем нового виду.

В умовах інтенсивного розвитку комп'ютерних технологій, динамічної зміни внутрішнього і зовнішнього середовища для задоволення вимог замовників необхідні принципово нові підходи щодо використання інформаційних, матеріальних та енергетичних ресурсів, які є об'єктами відповідних перетворень у межах пакувальних процесів. У зв'язку з цим особливий інтерес мають сучасні стратегії, методи і технології в управлінні процесом проектування і розроблення нових виробів і модернізації існуючих. Передумовою розвитку пакувального обладнання є аналіз і синтез існуючих конструкцій машин і ліній, виділення переваг і недоліків окремих функціональних модулів. Одним із напрямків вирішення проблеми створення

нового покоління пакувального обладнання є залучення принципу модульного проектування, у відповідності з яким будь-яка частина системи синтезується із окремих елементів (модулів). Модульне проектування обладнання узгоджується з еволюційним підходом і надає виробнику обладнання можливість проектувати складні технічні системи з послідовними і паралельними, плоскими і просторовими внутрішньо-машинними транспортними системами [13, 40-42]. Сукупність функціонально зв'язаних між собою модулів утворює модульну структуру машини. Одним із важливих параметрів при проектуванні технологічних потоково-транспортних систем є коефіцієнт використання технологічного простору на всіх ієрархічних рівнях:

$$K_p = V_k / V_{0p} , \quad (1.9)$$

де V_k – об'єм простору, в якому розташовують обладнання (технологічні елементи); K_p – коефіцієнт використання технологічного простору на p – рівні; V_{0p} – загальний об'єм простору, який обмежує функціональну технологічну одиницю.

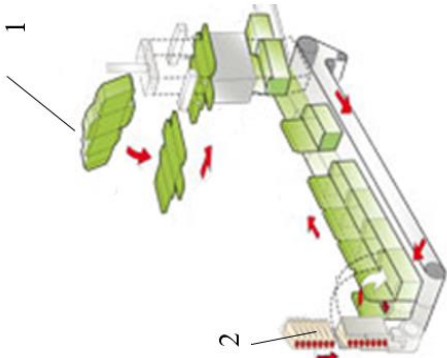
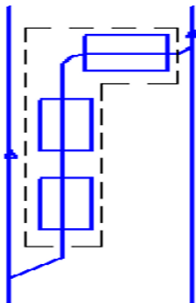
Принцип роботи фасувально-пакувального обладнання базується на взаємопов'язаному русі кількох матеріальних потоків - потоку пакувального матеріалу, допоміжних пакувальних засобів, тари та продукції. Якщо проектуються складні технологічні системи з n - потоково-просторових модулів, потрібно їх компоувати у просторі формуючи виробничі ділянки, а потім ділянки просторово компоувати відносно всього об'ємного простору виробничого цеху [43]. При цьому потрібно зауважити, що їх розміщення проводять із розрахунку підвищення щільності потоково-просторових функціональних модулів у виробничому цеху. Можливі шляхи підвищення ефективності роботи пакувального обладнання і напрямки його розвитку проаналізуємо на основі внутрішньо машинних зв'язків і ліній пакування. Внутрішньо машинні зв'язки відображають структуру пакувальних машин і залежать від їх класу, групи та виду [44]. Клас машини-автомата визначається співвідношенням тривалості робочого T_p , технологічного T_m , і кінематичного

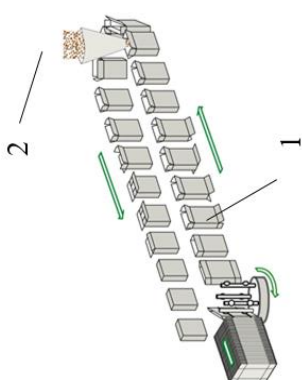
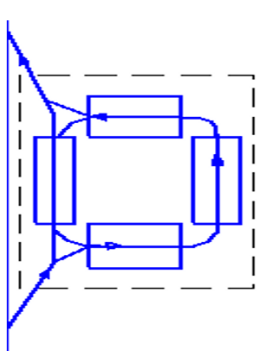
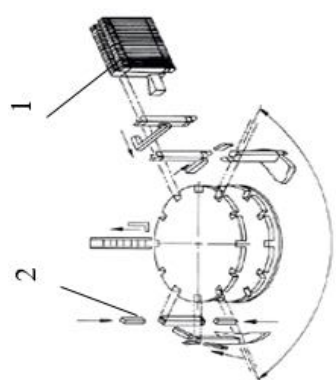
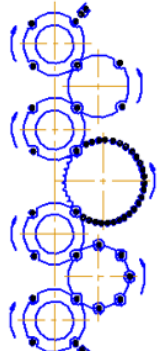
Тк циклів машини.

Однотипна група машин-автоматів характеризується способом переміщення продукції, тари та упаковки. Розрізняють дві групи машин-автоматів: машини першої групи характеризуються тим, що продукція та упаковка переміщуються послідовно робочими органами, з одночасним виконанням технологічних операцій; машини другої групи здійснюють технологічні переміщення спеціалізованим робочим органом (транспортними схемами). Вид машин-автоматів залежить від траєкторії переміщення продукції та упаковки. Виокремлюють чотири види машин-автоматів: перший вид – переміщення здійснюються по лінійній траєкторії, другий по дузі і по колу, третій по комбінованим траєкторіям, четвертий по складним траєкторіям [45].

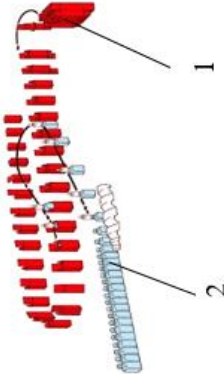
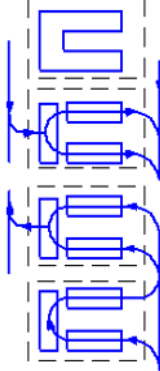
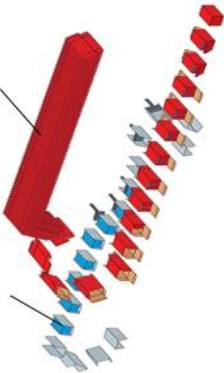
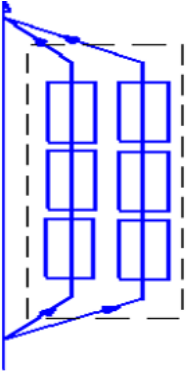
На основі аналізу роботи і конструкції пакувального обладнання встановлено, що найбільш ефективним способом транспортування об'єктів оброблення (пакування) – є транспортні засоби напрямленої дії, з вільним режимом (ритмом) роботи. В цьому випадку всі робочі органи можуть проявити власні індивідуальні характеристики. Основним принципом побудови внутрішньо машинного транспортування продукції є безперервність його подачі на етап оброблення. Крім цього, для зручності обслуговування потрібно обирати мінімальну кількість видів транспортних засобів для оброблення одного матеріального потоку – тобто потоку продукції та упаковки [46]. Під час складання компоновки пакувального обладнання (машини або лінії), при розробленні внутрішнього циклу оброблення продукції, потрібно враховувати можливі варіанти переміщення продукції у внутрішньо машинному транспортному модулі. Причому внутрішні зв'язки і напрямки матеріальних потоків у модулі можуть суттєво відрізнятись (табл. 1.2).

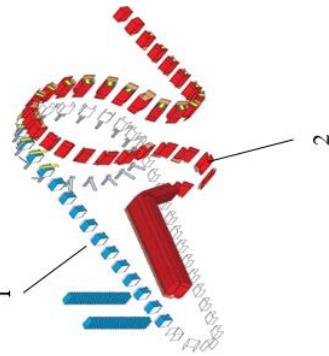
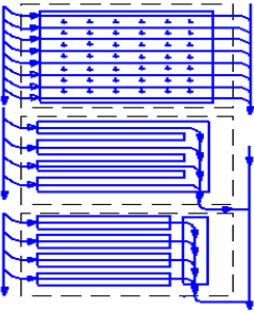
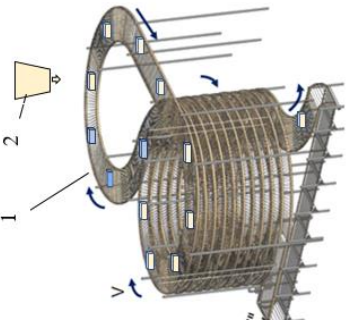
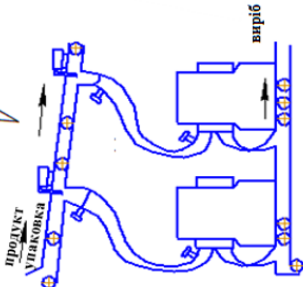
Таблиця 1.2 – Класифікація внутрішньо машинних транспортних зв'язків у просторових структурах пакувального обладнання

п/п	Технологічна схема пакувального процесу	Загальна схема руху матеріалів і продукту	Опис
1	 <p>1 – улаковка; 2 – продукт;</p>	3	4
1		 <p>Схема однопотокового руху матеріалів і продукту під прямим кутом</p>	<p>Плоскі внутрішньо машинні транспортні потоки ПМ, на прикладі технологічної схеми модуля формування плоских заготовок в картонну пачку з подальшим пакуванням штучних харчових продуктів</p>

1		3	 <p>Циклічна схема руху матеріалів і продукту</p>	4	<p>Плоскі внутрішньо машинні транспортні потоки на прикладі технологічної схеми машини-автомату для пакування сипкої продукції в чотири-клапанні пачки.</p>
3		3	 <p>Схема колового руху матеріалів і продукту</p>	4	<p>Плоскі внутрішньо машинні транспортні потоки на прикладі технологічної схеми пакувальної машини-автомату роторного типу для сипких та дрібношугучних продуктів</p>

Продовження таблиці 1.2

1		2	 <p>Схема однопотокового руху матеріалів і продукту по складній траєкторії</p>	3	<p>Плоскі внутрішньо машинні транспортні потоки на прикладі пакувальної машини-автомату зі складним плоским рухом споживчої упаковки та продукту.</p>	4
5		2	 <p>Схема багатопотокового прямолінійного руху матеріалів і продукту</p>		<p>Просторові внутрішньо машинні транспортні потоки на прикладі технологічної схеми пакувальної машини-автомату для штучних продуктів</p>	

1		3	4
6		 <p>Схема багато-потокowego складного руху матеріалів і продукту</p>	<p>Об'єднання і компонування транспортних модулів дає можливість утворити різноманітну конфігурацію внутрішньо машинних транспортних систем, з можливістю швидкого переналадження і адаптації під різні види продукту та упаковки</p>
7		 <p>Схема багатопотокowego комбінованого руху матеріалів та харчових продуктів</p>	<p>Транспортні та технологічні модулі пакувального обладнання із просторовою схемою компонування, з можливістю швидкого переналадження і адаптації під різні види продукту і упаковки.</p>

Будь-яке виробництво має ієрархічну структуру, а отже, і процеси, які відбуваються в ньому, мають таку ж структуру.

На сьогодні значна кількість фірм розробляє повнофункціональні системи автоматизованого проектування (САПР) — лінійки взаємозалежних програм (модулів), що підтримують більшість проектних процедур у певних областях проектування.

Основним недоліком цих пакетів програм є те, що в них запропоновані для користування типові методи одно- і багатокритеріальної оптимізації, кожен з яких має свої обмеження щодо застосування, точності та швидкості отримання результату. Це не дає можливість комплексно, з єдиних позицій, оцінювати якість майбутнього виробу на різних стадіях проектування, оптимізувати його структуру й параметри одночасно.

Методикам і прикладним аспектам багатокритеріальної оптимізації технологічних машин і пакувальних машин-автоматів присвячено ряд наукових праць [47-72]. Методи та концепції наскрізного проектування інтенсивно розробляється і впроваджуються зарубіжними вченими (Concurrent Technology) — одночасне проектування обладнання, окремих функціональних модулів (ФМ) і побудова технологічного процесу [72-90].

Результатами наукових досліджень встановлено, що найскладніше формалізувати в процесі проектування саме процедури структурного синтезу. Тому задачі, які потрібно вирішити перед структурним синтезом, класифікують за такими ознаками [57, 74, 76, 92-95]: за стадією проектування; за можливостями формалізації; за типом структур, що синтезують.

Розрізняють такі процедури залежно від стадії проектування:

- визначення основних принципів для функціонування майбутньої пакувальної машини;
- визначення технічного рішення в рамках заданих принципів функціонування машини для пакування продукції і окремих ФМ ПМ;
- послідовне покрокове оформлення технічної документації.

До задач структурного синтезу, залежно від формалізації, відносять задачі п'яти рівнів складності [57, 74, 96-99]:

1-й – характеризують задачами для проведення параметричного синтезу. За цим рівнем структура об'єкта вже визначена;

2-й – характеризують задачами повного перебору вже відомих рішень — до таких відносять комбінаторні задачі;

3-й – характеризують комбінаторними задачами, які неможливо розв'язати шляхом повного перебору за встановлений час при використанні існуючих пакетів програм;

4-й – характеризують задачами пошуку варіантів структур у множинах невідомої або необмеженої потужності;

5-й – характеризують задачами, розв'язання яких є проблематичним.

За типом структур, які синтезують, задачі поділяють на задачі одновимірної, схемної та геометричної синтезу.

Формалізацію процедур структурного синтезу здійснюють на основі одного з таких підходів [63, 64, 66, 77, 100-113]: перебір; послідовний синтез; трансформація опису різних аспектів. Пошук раціонального рішення при заданому технологічному процесі пакування і обраному принципі дії окремих ФМ ПМ і є задачею оптимального структурного синтезу. Формальна процедура, що регламентує цей процес, на сьогодні не розроблена. Тому при розв'язанні конкретних задач потрібно в кожному окремому випадку будувати свій алгоритм. Аналізуючи узагальнену структуру машини для пакування продуктів і виконуючи паралельно покроковий опис технологічного процесу пакування, можна провести структурний синтез пакувального обладнання загалом і окремих ФМ. Загальний підхід побудови схеми структурного синтезу машини для пакування продукції, наведено на рис.1.4. Вихідним пунктом для оптимального синтезу пакувальної машини є аналіз технічних вимог щодо її впровадження у промислове виробництво і економічність доцільність.

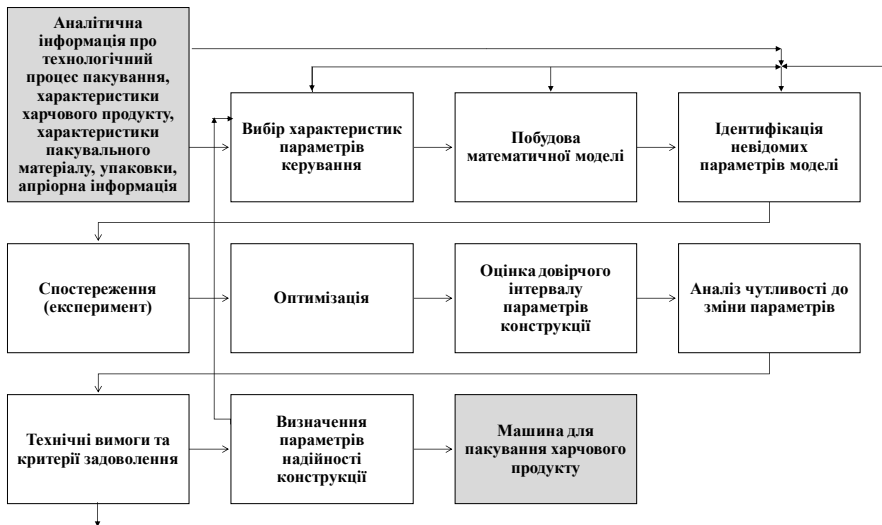


Рисунок 1.4 – Блок-схема алгоритму оптимального синтезу пакувальної машини

Алгоритми перебору передбачають перебір лише довершених готових структур ФМ ПМ. Такі структури створюють заздалегідь (використовують бази даних) 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: вибір і генерування наступного варіанта; оцінку варіанта; прийняття рішення. 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 ФМ ПМ, або вибраних з обмеженої множини готових структур ФМ ПМ.

В алгоритмах перебору особливе місце належить алгоритмам дискретного математичного програмування (ДМП) [95, 96]. Подібні алгоритми застосовують і для задач структурного синтезу пакувальних машин. У загальному вигляді задачу структурного синтезу можна звести до наступного математичного опису:

$$z_D = \{z \in D \mid \varphi(z) \geq 0, \psi(z) = 0\}, \text{extr}_{z \in z_D} f(z), \quad (1.10)$$

де D — дискретна множина; $\varphi(z)$ та $\psi(z)$ — вектор-функції.

Застосування задач ДМП обґрунтовано для пошуку ознак таких структур, які виражено кількісно, а також для визначення функції цих ознак.

Подібні ознаки об'єднують у вектор z , а розроблену формулу переваги представляють у вигляді функції мети (цілі) $f(z)$.

Враховуючи, що задачі структурного синтезу до ДМП не є підставою для успішного її розв'язання (тому що існуючі методи ДМП не є універсальними та економічними в реалізації) – цей метод синтезу для машин пакування потребує доопрацювання із залученням сучасних прикладних програмних пакетів, наприклад: AnyLogic, LogicX, ScadaSistem та інші. При використанні послідовних алгоритмів пошуку технічного рішення для пакувальної машини, характерним є поетапне розв'язання задачі синтезу ФМ ПМ з оцінкою отриманих проміжних структур. Існують два способи побудови структур ФМПМ [58, 59, 74, 96, 102, 114 - 119]: нарощування; вилучення.

При нарощуванні структури ФМ ПМ здійснюють почергове додавання нових елементів до певної початкової структури. При задіянні алгоритму вилучення – відкидають певні зайві елементи із деякої надлишкової узагальненої структури пакувальної машини.

Подібний підхід можна застосовувати лише тоді, коли вже сформована узагальнена структура машини для пакування продукції.

При формуванні структури пакувальних машин складної будови (для гнучких виробничих систем, робототехнічних комплексів, слідкувальних і позиційних систем, тощо) доцільно застосовувати варіантний метод побудови структури та метод варіації складу засобів ФМ [95].

Розв'язок задач структурної оптимізації пакувальних машин, зокрема для ДМП, формують методами: відсікання, комбінаторними і широкого спектру наближення [50, 120, 121].

Структурний синтез сучасних пакувальних машин ще не в повній мірі формалізований, у більшості випадків його виконують евристичним методом,

який в основному визначається переважно ерудицією і інтуїцією конструктора. Поряд із структурним синтезом проводять параметричний синтез.

Параметричний синтез – частина процесу проектування, яка вирішує задачу визначення основних конструктивних (геометричних і механічних) параметрів машин у цілому, її окремих механізмів, пристроїв і робочих органів. Вибір здійснюють не тільки з умови правильності функціонування системи, а й з умови забезпечення оптимальності за прийнятими критеріями якості. Задачу оптимального параметричного синтезу часто називають задачею параметричної оптимізації. Виділяють дві математичні моделі задач оптимального параметричного синтезу [9, 71, 72, 98, 116, 118, 122 – 136, 137 – 146.]: скалярна (однопараметрична, багатопараметрична) і векторна.

Задача скалярного багатопараметричного синтезу в загальному вигляді формулюється так: знайти вектор $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, який забезпечить мінімум (максимум) функції мети [98, 103, 126, 136, 71, 147 – 151]:

$$\begin{aligned} & \min_{x \in R^n} f(x) \\ & \text{за обмежень} \\ & g_i(x) = 0, i = 1, 2, \dots, m_e; \\ & g_i(x) = 0, i = m_e + 1, \dots, m; \\ & x_L \leq x \leq x_U, \end{aligned}$$

де x — вектор оптимізаційних параметрів ($x \in R^n$); $f(x)$ — скалярна функція мети (цілі) векторного аргумента; $g_i(x)$ — скалярні функції-обмеження векторного аргумента.

Задача максимізації функції мети зводиться до задачі мінімізації заміною $f(x)$ на $-f(x)$.

Ефективність і точність розв’язання поставленої задачі залежить від кількості параметрів, обмежень і функції мети. Якщо функція мети та обмеження лінійні, то для розв’язання задачі застосовують методи лінійного програмування [52, 152]. У випадку лінійних обмежень, але квадратичної функції мети, оптимізаційна задача є задачею квадратичного програмування [133, 144, 151]. У загальному випадку — це задача нелінійного програмування

[89, 153 – 155].

Залежно від математичної моделі, при розв'язанні задач оптимального синтезу застосовують: класичні аналітичні методи дослідження функцій; метод множників Лагранжа; варіаційне числення; принцип максимуму Понтрягіна; лінійне програмування, нелінійне програмування, динамічне програмування; методи випадкового пошуку.

Основні методи параметричного синтезу, які можна застосувати при дослідженні ФМ ПМ наведені в таблиці 1.3.

Щоб зменшити кількість недоліків для методів спрямованого пошуку створено комбіновані алгоритми, де на першій стадії застосовують пасивний пошук, а далі — один із методів спрямованого пошуку. Існуючі складнощі розв'язання задач оптимізації з багатьма змінними й складними функціями мети, а також поява сучасних прикладних програмних пакетів для моделювання, обумовили широке впровадження для розв'язання задач оптимізації та синтезу пакувальних машин методів на модульному принципі. Для таких пошукових методів, задачі не потребують обчислення похідних від функції мети.

Ці методи поділяють на дві групи: пасивного пошуку (сканування, статистичних випробувань); спрямованого пошуку (одностадійні – градієнтні, випадкового пошуку; багатостадійні – динамічне програмування, покоординатний пошук). Розробник ФМ та пакувальних машин зіштовхується із складними задачами які, переважно, не можна віднести до однокритеріальних, тому недостатньо застосувати апарат дослідження операцій. Всі ФМ ПМ є складними технічними системами і характеризуються багатьма властивостями, що визначають їх споживчу якість та вартість. Зв'язок і припущення між окремими суттєвими характеристиками ФМ ПМ спонукає йти на компроміс і вибирати для кожної характеристики не максимально можливе, а дещо менше – раціональне значення, за якого усі інші важливі характеристики матимуть прийнятну величину

Таблиця 1.3 – Класифікація методів параметричного синтезу ФМ ПМ

№ п.п	Назва методу синтезу ФМ ПМ	Особливості алгоритму	Особливості застосування
1	2	3	4
1.	<p><i>Метод класичного функціонального аналізу</i></p>	<p>Дані знаходять з необхідної умови її існування — похідну в точці екстремума яка дорівнює нулю [18]. Тоді оптимальний розв'язок Z^* можна знайти з системи рівнянь: $\frac{\partial f(z)}{\partial z_i} = 0; i = 1, 2, \dots, n$.</p> <p>Для визначення, яким екстремумом (максимумом чи мінімумом) є точка Z^*, застосовують достатню умову існування екстремума.</p> <p>У випадку опису пакувальної машини функціями із складних нелінійних рівнянь, систему рівнянь розв'язують числовими методами на комп'ютері або методами нелінійного програмування, звівши задачу до мінімізації функції: $\xi(z) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f(z)}{\partial z_i} \right)^2$.</p>	<p>Застосовують переважно для розв'язання складних задач оптимізації без обмежень.</p>
2	<p><i>Метод множників Лагранжа</i></p>	<p>Полягає у введенні p невідомих множників $\lambda_j (j=1, 2, \dots, p)$ та побудові функції Лагранжа $L = f(z) - \sum_{j=1}^p \lambda_j g_j(z)$.</p> <p>Для визначення оптимальних значень змінних $x_i (i=1, 2, \dots, n)$ розв'язують систему з $n+p$ рівнянь: $\frac{\partial L}{\partial x_i} = 0, i=1, 2, \dots, n; g_i(x) = 0; j=1, 2, \dots, p$ відносно незалежних z і λ.</p> <p>Метод є ускладненням при класичному функціональному аналізі, зокрема, у випадку наявності нелінійних рівнянь.</p>	<p>Дає можливість розв'язувати задачі оптимізації такої ж складності, але з обмеженнями типу рівностей [118, 156].</p>
3	<p><i>Принцип максимуму Понтрягіна</i></p>	<p>Принцип максимуму Понтрягіна — це необхідна умова оптимальності процесів, які описуються системами диференціальних рівнянь:</p>	<p>Застосовують в основному для задач керування і меншою мірою для задач</p>

		$\frac{dx_i(t)}{dt} = f_i[x(t), u(t)], \quad i=1, 2, \dots, n,$ <p>де $\mathbf{x}(t)$ — вектор змінних стану або фазових координат; $\mathbf{u}(t)$ — вектор керування.</p> <p>Дас можливість визначити оптимальне керування, яке приводить систему з початкового стану $\mathbf{x}(t_0)$ в кінцевий стан $\mathbf{x}(t_1)$ і мінімізує інтеграл</p> $I = \int_{t_0}^{t_1} f_0[x(t), u(t), t] dt,$ <p>при граничних умовах $\mathbf{x}(t_0)=\mathbf{x}_0$, $\mathbf{x}(t_1) \in S$, де S — цільова множина, і обмеженнях на керування $\mathbf{u}(t) \in U$ для всіх t, де U містить допустимі керування.</p>	оптимального проектування [163].
4.	<i>Методи варіаційного числення</i>	<p>Використовують для пошуку функцій, які надають екстремуму функціоналу, поданому у вигляді деякого інтеграла, наприклад, такого вигляду [126, 158]:</p> $I = \int_{z_1}^{z_2} F[z, \dot{z}] y_z(z) dz,$ <p>де підінтегральна функція залежить від z явно і неявно, оскільки вкладає функцію $y(z)$ та її першу похідну $y_z(z)$. Задача полягає у визначенні такої функції $y(z)$, коли функція набуває максимального або мінімального значення.</p>	Застосовують для пошуку функцій, які надають екстремуму функціоналу, поданому у вигляді деякого інтеграла, наприклад [126, 158]:
5.	<i>Лінійне програмування</i>	<p>Для розв'язання задач лінійного програмування переважно застосовують симплекс-метод [52], який за скінченну кількість ітерацій дає можливість знайти оптимальний розв'язок. $f(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^n C_j x_j$ за таких обмежень: $x_j \geq 0$, $j=1, 2, \dots, n$; $\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i$, $i=1, 2, \dots, m_1$; $\sum_{j=1}^n a_{kj} x_j \leq b_k$, $k=1, 2, \dots, m_2$; $\sum_{j=1}^n a_{lj} x_j \leq b_l$, $l=1, 2, \dots, m_3$, де C_j, a_{ij}, a_{kj}, b_i, b_k, b_l — задані дійсні числа; x_j — параметри оптимізації.</p>	Розв'язання задач пошуку екстремуму функції мети [52, 152]

6	<p>Метод динамічного програмування.</p>	<p>Рівнями системи можуть бути окремі складальні одиниці та агрегати машини чи устаткування. Критерії оптимальності багатостадійних і багаторівневих систем здебільшого подають у вигляді адитивної або мультіплікативної функції критеріїв для окремих стадій функціонування чи рівнів системи.</p> <p>В основу динамічного програмування покладено принцип оптимальності Белмана, відповідно до якого оптимальна стратегія наділена такою властивістю, що якими не були б початкові стан і розв'язок, наступні розв'язки треба вибирати, виходячи з оптимальної стратегії з урахуванням стану, обумовленого першим розв'язком. Математично принцип оптимальності для дискретних процесів записують так [132]: $f_N(x_1) = \max_{u_1 \in U} \{Q_1(x_1, u_1) + f_{N-1}[\phi_1](x_1, u_1)\}$, де U – множина допустимих керувань; $f_N(x_1)$ – максимальне значення критерію оптимальності для N стадій процесу; x_1 та x_2 – вектор параметрів стану відповідно на першій та другій стадіях; u_1 – вектор керування на першій стадії;</p> <p>$Q_1(x_1, u_1)$ – значення критерію оптимальності на першій стадії; $f_{N-1}(x_2)$ – максимальне значення критерію оптимальності для $N-1$ стадії процесу від останньої стадії; ϕ_1 – деяка функція, що описує залежність x_2 від x_1 та u_1.</p> <p>Сутність методу динамічного програмування полягає в тому, що розв'язок початкової задачі N-стадійного процесу зводиться до розв'язання за допомогою рекурентної формули (1.6) низки задач: дво-, три-, ..., n-стадійної.</p>	<p>Для оптимізації багатостадійних процесів або складних багаторівневих систем [143, 118, 159]. При цьому під рівнем системи розуміють складові частини, на які її можна поділити, кожна з яких характеризується сукупністю параметрів. Недоліком методу динамічного програмування є складність його застосування для задач великої розмірності навіть при використанні сучасних комп'ютерів, оскільки для розв'язання такої задачі потрібна висока швидкість та великий об'єм пам'яті.</p>
---	---	---	---

Продовження таблиці 1.3

<p>Нелінійне програмування (НЛП)</p>	<p>Метою є пошук екстремуму функції мети $f(z)$, $z \in \mathbb{R}^n$ за обмежень: $g_k(z) \leq 0, j=1, 2, \dots, m_1; g_k(z) \leq 0, k=1, 2, \dots, m_2$. На відміну від лінійного програмування функція мети й обмеження в загальному випадку є нелінійними функціями. Залежно від обмежень методи НЛП поділяють на дві групи: методи безумовної та умовної оптимізації. Першу групу застосовують для розв'язування задач без обмежень на параметри оптимізації, другу — для задач з обмеженнями. Методи безумовної оптимізації, в свою чергу, поділяють на методи, в яких застосовуються похідні від функції мети за змінними, та методи без застосування похідних (пошукові методи). До методів з використанням похідних відносять такі методи [160, 162]: градієнтні, Ньютона, спряжених напрямів, змінної метрики (квазіньютонівські). Градієнтні методи ґрунтуються на аналізі першої похідної від функції мети й реалізації руху до оптимального її значення в напрямі градієнта, що збігається з напрямом найвидшого зростання (при пошуку максимуму) або зменшення вектора (при пошуку мінімуму) функції мети. Компонентами вектора градієнта $\nabla f(z)$ є часткові похідні від функції мети за всіма змінними:</p> $\nabla f(z) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f(z)}{\partial z_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial f(z)}{\partial z_n} \end{bmatrix}$	<p>Не існує універсальних методів розв'язання, що обумовлено різноманітністю математичних моделей задач оптимізації в нелінійній постановці та їхньою складністю. Разом з тим, для певних класів задач, часткових випадків НЛП, розроблені загальні підходи та ефективні алгоритми розв'язання задач відповідних класів</p>
--------------------------------------	--	---

		<p>На кожній k-тій стадії розрахунків перехід з положення $z(k)$ в положення $z(k+1)$ здійснюється за такою формулою: $z(k+1) = z_k + \Delta z_k$, де $\Delta z(k)$ — величина кроку на k-тій стадії.</p> <p>Залежно від способу визначення кроку $\Delta z(k)$ існують різні методи НЛП. Одним з найрозповсюдженіших градієнтних методів є метод найвидшого опускання [135, 162], відповідно до якого перехід з положення $\Delta z(k)$ в положення $\Delta z(k+1)$ відбувається за формулою</p> $z_i^{(k+1)} = z_i^{(k)} - \lambda^{(k)} \frac{\frac{\partial f(z)}{\partial z_i^{(k)}}}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial f(z)}{\partial z_i^{(k)}}\right)^2}},$ <p>$i=1, 2, \dots, n$, де $\lambda(k)$ визначається розв'язком одновимірної задачі мінімізації функції $f(z(k+1))$ відносно $\lambda(k)$. Для цього можна застосовувати один з таких методів одновимірної оптимізації: золотого перерізу, дихотомії, Кіфера, Девіса, Свена, Кемпі, Пауела [155].</p>	
--	--	---	--

Пасивний пошук для синтезу ФМ ПМ часто базується на рівномірному перегляді певної кількості варіантів проекту, що належать наперед заданій області в просторі параметрів оптимізації. При цьому ніяк не враховується інформація на попередніх кроках пошуку. До таких методів відносять: метод сканування, який передбачає обхід вузлів n -мірної сітки, побудованої в області зміни параметрів; метод L_π -пошуку, за допомогою якого порівнюють значення функції мети в точках, сформованих за допомогою L_{π_t} - послідовностей [57, 95].

Залежно від того, в якому вигляді є дія різних критеріїв, багатокритеріальні задачі поділяють на декілька класів [116, 168]: множина якостей, множина об'єктів, множина умов функціонування, множина стадій функціонування, множина варіантів постановки задачі, комбінація перерахованих класів. Задачу багатокритеріального оптимізаційного синтезу подають у такому вигляді [95]:

$$f_i(x) \rightarrow \min_x; x \in D (i = \overline{1, k}); D = \left\{ x \in R^n \mid g_i(x) \leq 0; g_i(x) = 0 (i = \overline{1, m}); \right. \\ \left. (i = \overline{m+1, s}); a_j \leq x_j \leq b_j (j = \overline{1, q}) \right\}. \quad (1.31)$$

Задача багатокритеріального синтезу передбачає мінімізацію кожного з вихідних критеріїв f_i . У межах множини допустимих розв'язків виконуються прямі, функціональні та критеріальні обмеження, наведені у вигляді системи рівностей і нерівностей. Вона не є стандартною, оскільки включає векторний критерій оптимальності. Тому, у більшості випадків для її розв'язання переважно шукають відповідні методи зведення до однокритеріальної задачі, для якої розроблені ефективні числові методи. Проблемі пошуку оптимального розв'язку багатокритеріальних задач присвячено наукові праці [163, 164, 118, 130, 165, 62, 110, 137, 151, 166-172]. Разом із тим, на шляху створення теорії багатокритеріальної оптимізації існують певні труднощі. Перша проблема, яка виникає при розв'язуванні багатокритеріальних задач, полягає у визначенні області зміни часткових критеріїв якості, де

розташований оптимальний розв'язок, та пошук області компромісу часткових критеріїв. Пошук області компромісу є надзвичайно важливим, оскільки дає можливість досліджувати не всю множину допустимих розв'язків, а лише її незначну частину, де наперед відомо, що там є оптимальний розв'язок. Область компромісу, залежно від характеру зміни часткових критеріїв, може бути у вигляді неперервної межі або дискретних точок чи відрізків, розташованих на ній. Як вважають автори праць [173, 174], практично всі відомі методи векторного синтезу оптимальних конструкцій безпосередньо або опосередковано зводяться до скалярного синтезу. Тобто, часткові критерії певним способом об'єднують в інтегральний критерій, який потім максимізують (або мінімізують). Якість оптимізації конструкції пакувальної машини в таких випадках суттєво залежить від встановлення об'єктивно існуючої залежності між частковими та інтегральним критеріями, що надзвичайно важко, а іноді просто неможливо зробити. Тому на практиці інтегральний критерій утворюють формальним поєднанням часткових критеріїв, що неминуче призводить до суб'єктивності отриманого оптимального розв'язку. На думку авторів [125, 137] багатокритеріальну задачу синтезу можна зводити до однокритеріальної, але робити це доцільно тільки на завершальній стадії проектування. Для розв'язання цих задач застосовують також мінімаксні критерії, пов'язані з використанням контрольних показників t_1, t_2, \dots, t_k , записаних у правих частинах критеріальних обмежень [55, 162]: $f_i(x) \leq t_i$.

У цьому випадку за скалярний критерій вибирають функціонал

$$J(x) = \min_i \alpha_i [t_i - f_i(x)] \rightarrow \max, \text{ або } J(x) = \max_i \alpha_i [f_i(x) - t_i] \rightarrow \min, \text{ на } x \in D,$$

де область допустимих розв'язків задається сукупністю функціональних і прямих обмежень.

Для задавання контрольних показників застосовують методи експертних оцінок, або розраховують їх, розв'язуючи k однокритеріальних задач: $t_i = \min_{x \in D} f_i(x)$. У літературі відомі й інші методи оптимізації та синтезу, які можна

використати для технологічного обладнання і ФМ ПМ [76, 175, 115, 100, 92, 93, 177, 176, 178, 179, 180, 181, 182, 192, 42, 43, 184, 67, 111, 139, 145, 153, 171, 185-210 та ін.]. Здебільшого вони адаптовані для оптимізації конкретних конструкцій і не набули ще широкого застосування, зокрема для багатокритеріального синтезу пакувальних машин. Надзвичайно актуальною і такою, що інтенсивно розробляється провідними фірмами світу у галузі систем автоматизованого проектування, є технологія наскрізного проектування (Concurrent Technology) — паралельне проектування виробу, технологічного процесу і виробничої системи. Основою такої технології є спільне проектування, суть якого полягає у послідовному виконанні таких чотирьох стадій [107, 184]:

1. Концептуальне проектування — декомпозиція об'єкта проектування і технології його виготовлення на складові елементи: функціонально-конструктивні (ФКЕ) та функціонально-технологічні (ФТЕ).

2. Структурне проектування — синтез ФКЕ і ФТЕ для генерування множини конструктивно-технологічних рішень.

3. Параметрична оптимізація — кількісна оцінка кожного конструктивно-технологічного рішення за обраними критеріями.

4. Вибір кращого варіанта конструктивно-технологічного рішення — рангування альтернативних варіантів.

Такий інтегрований підхід до проектування ще більше ускладнює процедуру вибору критеріїв оцінки якості майбутнього виробу, встановлення взаємозв'язку цих критеріїв із параметрами проектування, узгодження розмірностей; потребує комплексної оцінки якості пакувального обладнання.

1.6 Особливості вирішення багатокритеріальних задач синтезу пакувальних машин

Пошук оптимального рішення з декількома критеріями є актуальною задачею, адже у будь-якій технічній системі (пакувальна машина) є характеристики, кількісні значення яких бажано максимізувати, а є і такі, які

бажано кількісно всіляко зменшувати. Але між окремими характеристиками існує взаємна залежність і діє ряд обмежень. У результаті цього виявляється, що поза деякою областю збільшення одних характеристик неминуче тягне за собою зменшення інших, причому тих, чисельні значення яких бажано також збільшувати, і навпаки.

Залежно від того, в якому вигляді проявляється дія різних критеріїв, багатокритеріальні задачі можуть бути поділені на декілька класів.

- **Клас 1 - безліч якостей.** При виборі рішення мають прийматися до уваги кілька основних характеристик/якостей пакувальної машини. Прикладом завдання класу 1 може бути проектування оптимальної пакувальної машини для певної групи продуктів. За критерії оптимальності можна прийняти: масу, габарити, час переналагодження (ці параметри бажано мінімізувати), а також продуктивність, точність, термін служби тощо (ці характеристики потрібно по можливості максимізувати).

- **Клас 2 - безліч об'єктів.** Тут пакувальна машина складається з ряду функціональних модулів, якість функціонування кожного з яких - описується своїм одиничним критерієм, а ефективність машини визначається сукупністю одиничних критеріїв. Ця сукупність і є векторний критерій оптимізації. Фізична природа і розмірність одиничних критеріїв у задачах цього класу зазвичай однакові.

- **Клас 3 - безліч умов.** Пакувальна машина має функціонувати в різних умовах, для кожної з яких якість функціонування характеризується деяким одиничним критерієм. Ефективність пакувальної машини визначається при цьому сукупністю величин критеріїв для кожної з умов. Одиничні критерії в задачах цього класу мають однакову природу та розмірність.

- **Клас 4 - безліч етапів.** Пакувальна машина функціонує протягом ряду етапів (здебільшого тимчасових), причому якість функціонування на кожному етапі характеризується своїм окремим критерієм. Ефективність машини залежить від її функціонування на всіх етапах і, відповідно, виражається

векторним критерієм, складовими якого будуть одиничні, поетапні критерії.

- **Клас 5 - безліч варіантів постановки завдання.** У пакувальних машинах цього класу невизначеність виникає в самій постановці задачі, наприклад, якість функціонування машини залежить від значення деякого параметра, про який відома лише область його можливої зміни і залежність одиничного критерію від чисельного значення параметра. Якщо закон розподілу для параметра невідомий, то ефективність машини буде виражатися векторним критерієм, складовими якого будуть одиничні критерії для всіх можливих значень невідомого параметра. Розмірність одиничних критеріїв у задачах цього класу однакова.

Крім наведених класів задач можуть виникати також завдання, які містять риси двох або більше класів, або завдання, в яких складові векторного критерію ϵ , в свою чергу, не скалярні, а векторні одиничні критерії.

1.7 Методи порівняння та оцінки багатокритеріальних альтернатив

Основними методами порівняння та оцінювання багатокритеріальних альтернатив в умовах визначеності вихідної інформації є:

- попарне порівняння: розробник, який приймає рішення (ОПР) здійснює попарне порівняння альтернатив щодо кожного критерію. Кількість альтернатив невелика, критерії як якісні, так і кількісні;

- лексикографічний метод: згідно даного методу ОПР здатний впорядкувати розглянуті критерії за ступенем їх значущості. Далі задається мінімальне значення для кожного критерію. Потім критерії ранжуються за вагою, визначається найбільш значущий і щодо нього розв'язуються критеріальні рівняння. Якщо в результаті цього рішення залишається одна альтернатива, вона визнається найбільш раціональною, якщо ні - вирішується задача щодо наступного за важливістю критерію і так до тих пір, поки залишиться лише одна альтернатива. Кількість можливих для цього методу альтернатив будь-яка, критерії можуть бути будь-якими;

- метод лексикографічного напіввпорядкування: відрізняється від лексикографічного методу можливістю використання кількісних критеріїв. У цьому методі відсіювання альтернатив не таке жорстке, в безліч допустимих рішень можуть входити альтернативи, оцінки за критерієм яких не сильно відрізняються від максимальних. Кількість порівнюваних альтернатив невелика;

- метод перестановок: у цьому методі перевіряються всі можливі перестановки альтернатив за перевагами і вони порівнюються між собою. Для цього критеріям надають вагу та складається матриця прийняття рішень. Далі відбувається побудова варіантів усіх перестановок і побудова безлічі номерів критеріїв (для кожної пари альтернатив), значення яких узгоджуються з порядком альтернатив цієї перестановки. Потім виконують оцінювання кожної альтернативи. Можлива будь-яка кількість альтернатив, критерії можуть бути будь-якими.

Методи, що базуються на кількісному відображенні уподобань розробника на множині критеріїв:

- метод простих збільшень: метод полягає в тому, що після призначення або встановлення ОПР ваги критеріїв, альтернативи порівнюються за шкалою одного критерію. Використовуватись можуть критерії будь-якого типу, кількість альтернатив велика;

- метод аналітичних ієрархій: спочатку відбувається розрахунок ваги кожного критерію, а потім до них вираховується вартість альтернативи, чим більше вартість, тим краще альтернатива. Для розрахунку ваги критеріїв їх попарно порівнюють, отримуючи оцінку співвідношення пар критеріїв з яких утворюється найсиметричніша матриця.

Методи, що базуються на інформації про допустимі значення критеріїв:

- задання мінімально допустимих значень критеріїв: цей підхід використовує чисельні критерії, відповідно до значень ОПР встановлює певну межу найменших значень, в які має входити той чи інший варіант;

- аналіз альтернатив тільки за критеріями, при яких досягаються «найкращі» показники: цей метод встановлює завдання внесення мінімуму дозволених значень критеріїв, а крім того ОПР відокремлює варіанти, які задовольняють більшою мірою. Кількість альтернатив - це кожне значення, а критерії - кількісні.

Методи, які не потребують ранжирування критеріїв:

- критерій Харвіца: критерій пропонує компроміс у методах максимуму і максимуму. Критерій Харвіца вважається межею цих критеріїв, а мета полягає в приписуванні деякої ваги оцінкам. Помноживши підсумки на відповідну вагу та підсумовуючи їх, ОПР отримує єдину суму. Потім обирається інший варіант з максимальним значенням.

- метод максимуму: цей метод можна інтерпретувати як найбільший виграш із тих, які безпосередньо можуть бути досягнуті ОПР в найбільш прогративних для нього ситуаціях, і, таким чином, будуть гарантованим виграшем. Знаходження максимуму, як математичної операції, умовно складається в послідовному розв'язанні простих однокритеріальних завдань. Кількість альтернатив може бути будь-яким, а критерії кількісними.

- метод максимуму: цей метод є протилежністю методу максимуму, в даному методі відштовхуються не від найгіршого, а від найкращого варіанту.

Методи прийняття групових рішень:

- метод Дельфі: цей метод базується на тому, що експерти, які знаходяться в команді, не знаходяться у постійному контакті, а лише час від часу викладають і обговорюють власні пропозиції;

- метод ранжування альтернатив: ранжування альтернатив – це забезпечення ОПР загальною різноманітністю альтернатив вирішення проблеми. Після вивчення проблематики відбувається розподіл варіантів вирішення відповідно до рівня максимальної переваги і виявляються найбільш недоречні, які виключаються. У подальшому відбувається ранжування варіантів, які залишилися і знову відкидаються недоречні. Таким чином,

процес не зупиняється до отримання конкретного варіанту. Кількість альтернатив будь-яка, критерії не використовуються.

- метод парних порівнянь: почергове виділення ОПР пари альтернатив, розглянувши які фахівець змушений надати для будь-якої пари відповідне рішення. Потім відбувається ранжування відповідно до уподобань та потреб. У разі, якщо перелік із рішеннями досить великий, пропонується співставляти по 3 варіанти. Цей метод називається методом множинних порівнянь. Методи відрізняються тільки кількістю порівнюваних альтернатив.

- метод групового прийняття рішення за допомогою кластеризації експертних оцінок альтернатив: підхід базується на застосуванні кластеризації, тобто процедури об'єднання альтернатив у категорії, згідно принципу подібності за властивостями, ознакою. ОПР підбирає один із запропонованих способів кластеризації оцінок будь-якої варіації і здійснює кластеризацію відповідно до критеріїв. Головною перевагою цього методу є те, що в кінцевому оцінюванні враховуються всі без винятку кластери. При цьому вплив будь-якого із кластерів на остаточну оцінку відповідає його вазі. Кількість альтернатив і види критеріїв різні.

Висновки

1. Основною проблемою подальшого розвитку відомих методологій проектування є відсутність аналітичних і логічних залежностей, що пов'язують функціональне призначення пакувальної машини з її структурою, вимогами та умовами експлуатації й утилізації.

2. Проектування нового покоління пакувальних машин неможливе без створення нових систем програмних процедур у САПР технологіях, які б дали можливість конструктору на основі обмеженої інформації про пакувальну машину виконати всі етапи аналізу, синтезу, моделювання, оптимізації та відбору альтернатив.

3. Структурованість якості пакувальних машин є основою

функціонального принципу функціонально-кібернетичної еквівалентності. За такою технологією на етапі проектування аналізується сукупність функцій, що має реалізувати пакувальна машина, визначається головна функція, сполучені з нею корисні, нейтральні та шкідливі функції, а також встановлюються функціональні модуль-носії функцій та з'єднання їх між собою.

4. Для розв'язання складних сучасних умов виробництва пакованих продуктів доречним є застосування методів об'єктно-орієнтованого аналізу та дизайну й функціонально-орієнтованих технологій машинобудівного виробництва.

5. Пошук найкращого варіанта конструкції та структури пакувальної машини має базуватися на виконанні багатопараметричного синтезу як окремих функціональних модулів, так і машини загалом.