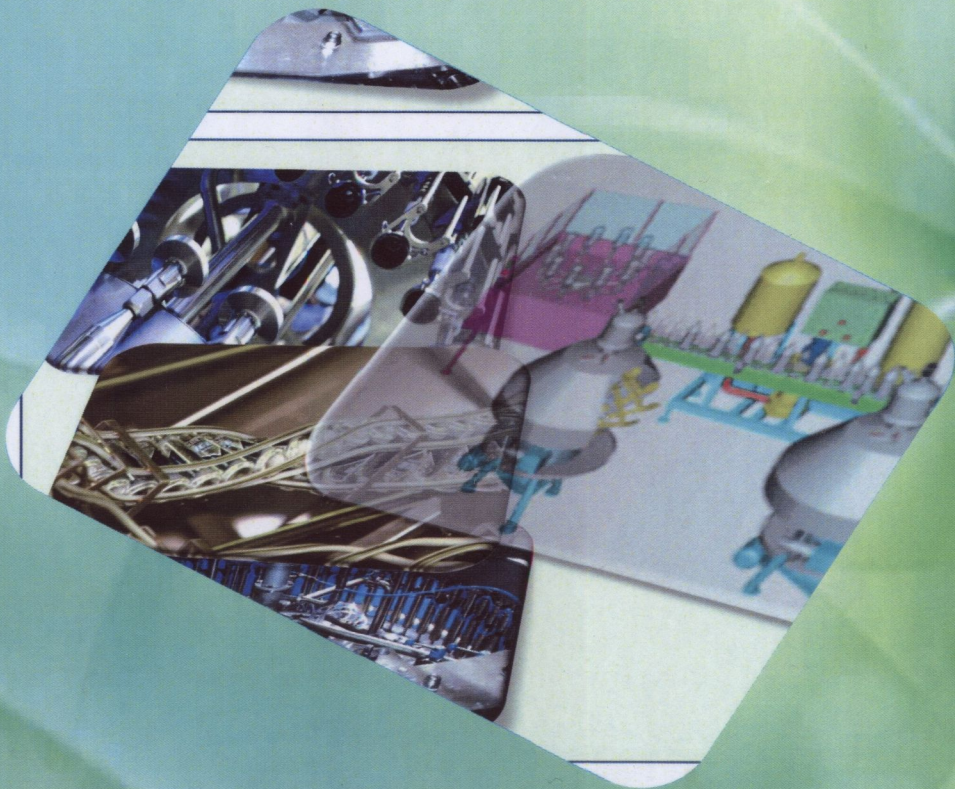


ФУНКЦІОНАЛЬНО-МОДУЛЬНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ПАКУВАЛЬНИХ МАШИН



Міністерство освіти і науки України
Національний університет харчових технологій

**О.М. Гавва, Л.О. Кривопляс-Володіна, С.В. Токарчук,
О.О. Кохан, В.Б. Захаревич, А.І. Волчко, М.В. Якимчук,
А.В. Деренівська**

**Функціонально-модульне проектування
пакувальних машин**

Монографія

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

Київ, 2015

УДК 621.798
ББК 30.61
Ф 94

Рекомендовано Вченою радою НУХТ
(Протокол № 11 від 20 травня 2015 р.)

Рецензенти:

Хомічак Л.М. доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НААН України, заст. директора Інституту продовольчих ресурсів НААН України;

Штефан Є.В. доктор технічних наук, професор, зав. кафедри Національного університету харчових технологій;

Регей І.І. доктор технічних наук, професор, зав. кафедри Української академії друкарства

Ф94. Функціонально-модульне компонування пакувальних машин [Текст]: моногр. / О.М. Гавва, Л.О. Кривопляс-Володіна, С.В. Токарчук та ін. – К.: Видавництво «Сталь», 2015. – 547 с.

ISBN 978-617-676-079-5

Наведено методологічні засади компонування машин для пакування продукції у споживчу упаковку на основі функціональних модулів. Запропоновано вибір раціонального компонування здійснювати на основі синтезу структури пакувальної машини та одно і багатofакторної її оптимізації. У десяти розділах монографії сформульовані: методи підвищення ефективності проектування пакувальних машин; основні фізико-механічні та хіміко-біологічні властивості харчових продуктів як об'єктів пакування; технології та способи пакування продукції у споживчу тару з урахуванням її генетичного розвитку; структурні схеми пакувальних машин із виділенням типових функціональних модулів; методика моделювання функціональних модулів; метод опису структури пакувальної машини; критерії ефективності роботоздатності пакувальних машин та результати досліджень функціонального зв'язку між критеріями ефективності і структурою пакувальної машини.

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

Видано в авторській редакції

УДК 621.798
ББК 30.61

ISBN 978-617-676-079-5

© О.М. Гавва, Л.О. Кривопляс-Володіна,
С.В. Токарчук, О.О. Кохан,
В.Б. Захаревич, А.І. Волчко,
М.В. Якимчук, А.В. Деренівська

2015

ЗМІСТ

| | Сторінки |
|--|----------|
| Передмова | 9 |
| Розділ 1 Шляхи та методи підвищення ефективності проектування пакувальних машин | 12 |
| 1.1 Стан автоматизації проектування пакувальних машин | 12 |
| 1.2 Тенденції розвитку методів проектування пакувальних машин | 20 |
| 1.3 Моделі та методи рішення задачі структурно-параметричного синтезу пакувальних машин | 27 |
| 1.3.1 Модель етапу зовнішнього проектування пакувального обладнання | 28 |
| 1.3.2 Методи структурно-параметричного синтезу та прийняття рішення | 30 |
| 1.3.3 Вибір множини альтернатив | 31 |
| 1.3.4 Аналіз методів прийняття рішень у процесі структурно-параметричного синтезу | 33 |
| 1.4 Наукове обґрунтування комбінаторно-логічного методу синтезу машин для пакування харчових продуктів | 37 |
| Розділ 2 Дослідження та аналіз основних фізико-механічних та хіміко-біологічних властивостей продукції як об'єкту пакування | 47 |
| 2.1 Загальна характеристика впливу фізичних, механічних, хімічних та біологічних властивостей харчової продукції на технологію пакування | 47 |
| 2.2 Фізико-механічні властивості сипкої харчової продукції | 50 |
| 2.2.1 Механічні властивості сипкої харчової продукції | 57 |
| 2.2.2 Класифікація сипкої харчової продукції, як об'єкта пакування залежно від фізико-механічних властивостей | 68 |
| 2.3 Фізико-механічні властивості в'язкої та пластичної продукції | 73 |
| 2.4 Хіміко-біологічні властивості харчової продукції | 79 |

| | |
|---|-----|
| Розділ 3 Дослідження та аналіз технологій і способів пакування сипкої, в'язкої і пластичної харчової продукції у споживчу тару з врахуванням її генетичного розвитку | 83 |
| 3.1 Загальна характеристика технологій і способів пакування харчової продукції у споживчу тару | 83 |
| 3.2 Дослідження та аналіз видів споживчої упаковки для пакування сипкої харчової продукції | 116 |
| 3.2.1 Паперова та картонна упаковка | 116 |
| 3.2.2 М'яка полімерна упаковка | 128 |
| 3.2.3 Жорстка упаковка | 133 |
| 3.3 Пакування сипкої харчової продукції у споживчу упаковку | 136 |
| 3.3.1 Пакування в попередньо виготовлені паперові пакети | 136 |
| 3.3.2 Пакування з виготовленням паперових пакетів із рулонних матеріалів | 138 |
| 3.3.3 Пакування сипкої харчової продукції у картонну пачку | 140 |
| 3.3.4 Пакування сипкої харчової продукції у жорстку упаковку | 144 |
| 3.3.5 Пакування у м'яку полімерну упаковку | 145 |
| 3.4 Аналіз технологій і способів пакування в'язкої харчової продукції у споживчу тару | 148 |
| 3.4.1 Загальна характеристика технологічного процесу пакування в'язких харчових продуктів | 148 |
| 3.4.2 Пакування в'язких харчових продуктів у м'яку споживчу тару | 151 |
| 3.4.3 Пакування в'язких продуктів у напівжорстку тару | 158 |
| 3.4.4 Пакування в'язких продуктів у жорстку тару | 164 |
| 3.5 Аналіз технологій і способів пакування пластичної харчової продукції у споживчу тару | 167 |
| 3.5.1 Технологічний процес пакування пластичних харчових продуктів | 167 |

| | |
|---|-----|
| 3.5.2 Пакування пластичних харчових продуктів у м'яку споживчу тару | 168 |
| 3.5.3 Пакування пластичних харчових продуктів у напівжорстку та жорстку споживчу тару | 179 |
| Розділ 4 Структурні схеми машин для пакування сипкої продукції у споживчу тару, виділення типових функціональних модулів | 181 |
| 4.1 Структурні схеми машин для пакування сипкої продукції у м'яку упаковку, виготовлену із термозварних пакувальних матеріалів | 181 |
| 4.1.1 Машини-автомати періодичної дії вертикального типу | 181 |
| 4.1.2 Машини-автомати безперервної дії вертикального типу | 182 |
| 4.1.3 Машини-автомати періодичної дії горизонтального типу | 193 |
| 4.1.4 Машини-автомати безперервної дії горизонтального типу з лінійно-роторним компонованням | 194 |
| 4.2 Структурні схеми машин для пакування сипкої продукції у м'яку попередньо виготовлену упаковку | 195 |
| 4.3 Структурні схеми машин для пакування сипкої продукції у картонні пачки | 199 |
| 4.4 Структурні схеми машин для пакування сипкої продукції у жорстку споживчу тару | 208 |
| 4.5 Структурні схеми машин для пакування сипкої продукції у багатокомпонентну споживчу упаковку | 209 |
| Розділ 5 Структурні схеми машин для пакування в'язкої і пластичної продукції у споживчу тару та виділення типових функціональних модулів | 216 |
| 5.1 Загальна характеристика структурних схем машин для пакування в'язких та пластичних продуктів у споживчу тару | 216 |
| 5.2 Структурні схеми машин для пакування в'язких та пластичних харчових продуктів у м'яку упаковку | 220 |
| 5.3 Структурні схеми машин для пакування в'язких та пластичних | |

| | |
|---|-----|
| харчових продуктів у напівжорстку упаковку | 223 |
| 5.4 Структурні схеми машин для пакування в'язких та пластичних харчових продуктів у жорстку упаковку | 227 |
| Розділ 6 Дослідження функціональних модулів обладнання для пакування сипких продуктів у картонну пачку та полімерну плівку | 229 |
| 6.1 Класифікація і структура дозувально-фасувальних модулів | 229 |
| 6.2 Дослідження дозувально-фасувальних модулів за допомогою методу критеріального аналізу | 231 |
| 6.3 Оптимізація параметрів лінійних вагових дозаторів дискретної дії | 262 |
| 6.3.1 Шляхи підвищення точності дозування | 262 |
| 6.3.2 Дослідження процесу витікання сипкої харчової продукції з випускного каналу бункера | 265 |
| 6.3.3 Дослідження процесу витікання сипкої харчової продукції з бункера із приводною заслінкою | 270 |
| 6.3.4 Визначення раціонального розташування зважувальної ємності | 273 |
| 6.3.5 Орієнтування падаючої в мірну місткість струмини продукції | 277 |
| 6.3.6 Комплексне оцінювання технічних характеристик дозувального пристрою | 283 |
| 6.4 Вибір раціональних компоновочних схем внутрішньомашинних транспортних систем | 285 |
| Розділ 7 Дослідження типових функціональних модулів машин для пакування в'язких та пластичних харчових продуктів у споживчу тару | 300 |
| 7.1 Класифікація і структура дозувально-фасувальних пристроїв | 300 |
| 7.2 Дослідження дозувально-фасувальних пристроїв за допомогою методу критеріального синтезу | 303 |
| 7.3 Дослідження поршневого дозатора | 325 |

| | |
|--|-----|
| 7.4 Визначення точності виконання виконавчих механізмів поршневого дозатора | 332 |
| 7.5 Вибір раціональних компоновочних схем внутрішньомашинних транспортних систем машин для пакування в'язкої і пластичної продукції | 345 |
| Розділ 8 Метод опису структури машини для пакування харчових продуктів у споживчу тару | 373 |
| 8.1 Напрями і методи вдосконалення конструювань пакувальних машин | 373 |
| 8.2 Методологія побудови моделі пакувальної машини ієрархічної структури | 377 |
| 8.2.1 Моделі ієрархічної структури машин для пакування сипкої продукції | 379 |
| 8.2.2 Моделі ієрархічної структури машин для пакування в'язкої харчової продукції у споживчу тару | 393 |
| 8.2.3 Моделі ієрархічної структури машин для пакування пластичної харчової продукції у споживчу тару | 408 |
| 8.3 Формалізований опис структури пакувальних машин | 408 |
| Розділ 9 Наукове обґрунтування та вибір критеріїв ефективності пакувальних машин | 430 |
| 9.1 Основні положення теорії ефективності | 430 |
| 9.2 Показники ефективності роботи пакувальної машини | 437 |
| 9.3 Системне оцінювання технічного рівня пакувальної машини | 456 |
| Розділ 10 Функціональний зв'язок між критеріями ефективності і структурою пакувальної машини | 464 |
| 10.1 Математична модель структури пакувальної машини | 464 |
| 10.2 Показники ефективності та експертне їх оцінювання | 466 |
| 10.2.1 Надійність машин для пакування сипкої продукції | 467 |
| 10.2.2 Надійність машин для пакування в'язкої та пластичної | |

| | |
|---|------------|
| продукції | 480 |
| 10.3 Побудова структурної схеми пакувальної машини | 496 |
| Література | 505 |

Передмова

На сьогодні пакувальна індустрія стрімко розвивається та набуває широкого розповсюдження. Відповідно до міжнародних інформаційних даних структура використання упаковки підтверджує найбільше її використання для харчових продуктів (55-60 %) [1]. А тому тенденції розвитку упаковки і харчової продукції подібні.

Характерною тенденцією розвитку сучасного харчового виробництва є концентрація виробничих потужностей і виготовлення значного асортименту типових продуктів харчування, пакованих у різні види і типи тари та упаковки.

Для реалізації таких умов виробництва потрібно їх оснастити їх надійним, універсальним, гнучким до переналаштування пакувальним обладнанням.

У найближчі роки у відповідь на радикальні зміни в економіці, екології, тощо, які безпосередньо впливають на людські відносини, розвиток пакування швидше прийме форму революції, ніж простої еволюції, особливо, коли мова йде про споживчий ринок, продаж товарів та продуктів.

А тому головною метою сучасного пакувального машинобудування є виготовлення машин високої якості за короткий термін і за мінімальних капіталовкладень на проектування і виготовлення при постійному ускладненні форми і конструкції упаковки, технології пакування, вимог точності функціонування робочих органів, умов експлуатації тощо. Протягом тривалого часу основним напрямком вирішення цієї проблеми була модернізація існуючих пакувальних машин, спрямована на удосконалення функціональних модулів та збільшення виконуваних ними допоміжних функцій. Однак, такий підхід поступово вичерпує свої можливості. Використання застарілих методів проектування призводить до зниження ефективності пошуку кращого результату серед можливих альтернатив. Застосування відомих методів синтезу автоматизованого проектування зводиться, в основному, до створення електронних моделей пакувальних машин і має обмежені можливості вибору оптимальної конструкції.

Але для вирішення цієї проблеми потрібно розробити наукові засади створення пакувальних машин нового покоління на основі модульного компонування і мехатронної системи керування.

Інтенсивний еволюційний розвиток агрегатно-модульного програмно керованого швидкопереналагоджувального пакувального обладнання здійснюється в параметричному співвідношенні уніфікації елементної бази і багатоваріативністю компоновочних реалізацій, обумовлених різними фізико-механічними та хіміко-біологічними властивостями продукції, типами та видами упаковки, технологіями пакування, просторовими композиціями функціональних машинних модулів.

Пакувальні машини є складними технічними системами множина варіантів їх структури є надзвичайно великою і вивчити та оцінити ці варіанти евристичними методами за відносно короткий термін практично не реально. А тому для структурного синтезу компонувань пакувальних машин потрібно розробити наукоємну систему їх проектування, що включає поєднання синтезу можливих варіантів рішень з їх аналізом для організації пошуку найкращого варіанту.

Метою написання цієї монографії є висвітлення новітніх комбінаторних технологій проектування пакувальних машин, що базуються на методах оптимізаційного синтезу та еволюційного пошуку функціонально-модульних структур.

Архітектоніка монографії включає десять розділів, в яких розглянуто:

методи та шляхи підвищення ефективності проектування пакувальних машин; фізико-механічні та хіміко-біологічні властивості харчової продукції як об'єкту пакування; технології та способи пакування сипкої, в'язкої та пластичної харчової продукції у споживчу тару з урахуванням її генетичного розвитку; аналіз структурних схем пакувальних машин для пакування сипкої, в'язкої та пластичної продукції із виділенням типових функціональних модулів; методика моделювання функціональних модулів для пакування сипких та в'язких продуктів у споживчу тару; методику опису структури пакувальної

машини для пакування харчових продуктів у споживчу тару; обґрунтування та вибір критеріїв ефективності роботи пакувальних машин; функціональні зв'язки між критеріями ефективності і структурою пакувальної машини.

Автори вдячні рецензентам докторам технічних наук, професорам Хомічаку Л.М., Штефану Є.В., Регею І.І. за згоду висловити свої критичні зауваження і побажання при підготовці рукопису до друку.

1. ШЛЯХИ ТА МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ ПАКУВАЛЬНИХ МАШИН

1.1 Стан автоматизації проектування пакувальних машин

Сучасні умови харчового 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 і зменшення трудомісткості процесу проектування [38]. Це зумовлює необхідність застосування систем автоматизованого проектування (САПР), які б дали можливість підвищити ефективність робіт, пов'язаних із проектуванням пакувальних машин [30].

Отже, головним завданням у створенні САПР є розробка 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 [28].

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 [3, 14, 16, 25, 34, 40]. Зокрема в [3] 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 компоновки пакувальної машини, наведений в [34, 40] 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 [25] описані чотири різні типи кодування – координаційний, елементний, блоковий і конструктивний, що відповідають різним етапам проектування. Запропонована система кодування дає можливість повно, однозначно і з різною мірою конкретизації описувати компоновку. 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 компонок із застосуванням ЕОМ показана в роботах [1, 14, 17, 37]. Кожне компоновку аналізується по ряду параметрів для вибору варіанту, який найкраще задовольняє умовам виробництва, з допомогою ряду спеціально розроблених програм.

САПР, які найчастіше використовуються для проектування пакувальних машин, є САД-системи, призначені для створення 3-х 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, 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 компоновання за відповідними критеріями оптимальності для порівняння його з іншими можливими і вибору кращого [15, 29].

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 компоновань машин із складових елементів, підбір цих елементів залишаються поза межами автоматизованого розв'язання [10, 12, 27]. Це істотно обмежує можливості створення нових конструкцій пакувальних машин на основі синтезу їх компоновань, тому потребує подальшого опрацювання.

Таким чином, для створення 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 і відбору альтернатив.

Поряд із цим потрібно враховувати і той факт, що пакувальні машини нового покоління з функцією гнучкості для переналаштування 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.

За визначенням [32] мехатроніка – це галузь науки і техніки, заснована на синергетичному об'єднанні вузлів точної механіки з електронними,

електротехнічними і комп'ютерними компонентами, що забезпечує проектування і виробництво якісно нових модулів систем і машин із інтелектуальним управлінням їх функціональними рухами. Мехатроніка є своєрідною сучасною філософією проектування складних керованих технічних об'єктів. Науково-технічне рішення можна вважати мехатронним, якщо компоненти не просто взаємодіють один з одним, але при цьому утворена система має нові властивості, які не були характерні її складовим.

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 [9, 11].

Аналіз літературних та інформаційних джерел [2, 3, 18, 32] 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».

Розробка такої методології потребує вирішення таких завдань: формування понять, визначень та термінів; встановлення зв'язків і загальних об'єктивних закономірностей процесу формування мехатронних модулів; розроблення методів погодження установочних та приєднувальних розмірів для з'єднання з іншими мехатронними модулями з метою створення складної технічної системи; розроблення методик створення параметричних та типорозмірних рядів мехатронних модулів із однією або декількома функціональними властивостями; розроблення та опис послідовності формування пакувального обладнання з мехатронних модулів на базі критеріїв оцінювання ефективності функціонування технічних систем.

Слід зазначити, що концепція створення наукових основ формування пакувального обладнання з мехатронних модулів передбачає новий погляд на технічний об'єкт як на досить складну систему.

За визначенням [32] мехатронний модуль є функціонально і конструктивно самостійним виробом. Таке визначення мехатронного модуля не дає повної картини сучасного підходу до проектування мехатронних модулів пакувального обладнання. Більш точним терміном визначення мехатронного модуля може бути таке формулювання: мехатронний модуль – цілісна технічна система, яка є конструктивно і функціонально закінченим самостійним виробом, має автоматизовану систему керування роботою робочих органів із гнучким програмним забезпеченням зміни технологічного процесу та зворотній зв'язок у вигляді використання різних типів датчиків, які забезпечують можливість сприймання інформації про зміну характеристик зовнішнього середовища; характеризується конструктивно визначеними каналами механічного, енергетичного та інформаційного зв'язку для синергетичного з'єднання з іншими мехатронними модулями. На основі створення однотипних функціональних мехатронних модулів можна формувати базу даних модулів. Під базою даних мехатронних модулів розуміють сукупність конструкцій однотипних мехатронних модулів із різними функціональними та конструктивними типорозмірами, які відповідають заданому параметричному ряду. Конструктивне об'єднання типових мехатронних модулів утворює мехатронну систему. Надалі мехатронну систему можна вважати складною технічною системою, створену на базі мехатронних модулів, об'єднання яких підлягає певним функціональним закономірностям для вирішення поставленого виробничого завдання та утворює багаторівневу інтелектуальну систему керування з розгалуженою мережею зворотних зв'язків, здатну адаптуватись до зміни умов виробництва.

Якщо мехатронна система створена з мехатронних модулів одного типу та різних типорозмірів, то вона називається однорідною. Мехатронна система, створена з модулів різних типів та типорозмірів – неоднорідна. Для

проектування мехатронних систем пропонується використовувати модульний принцип формування, який передбачає сукупність кроків описаних математичною послідовністю вибору мехатронних модулів із їх великої кількості, економічно та технічно обґрунтованих типорозмірів та побудови з них технічних систем із великою гамою змінних характеристик. Послідовність формування мехатронних систем можна навести у вигляді такого алгоритму (рис. 1.1).

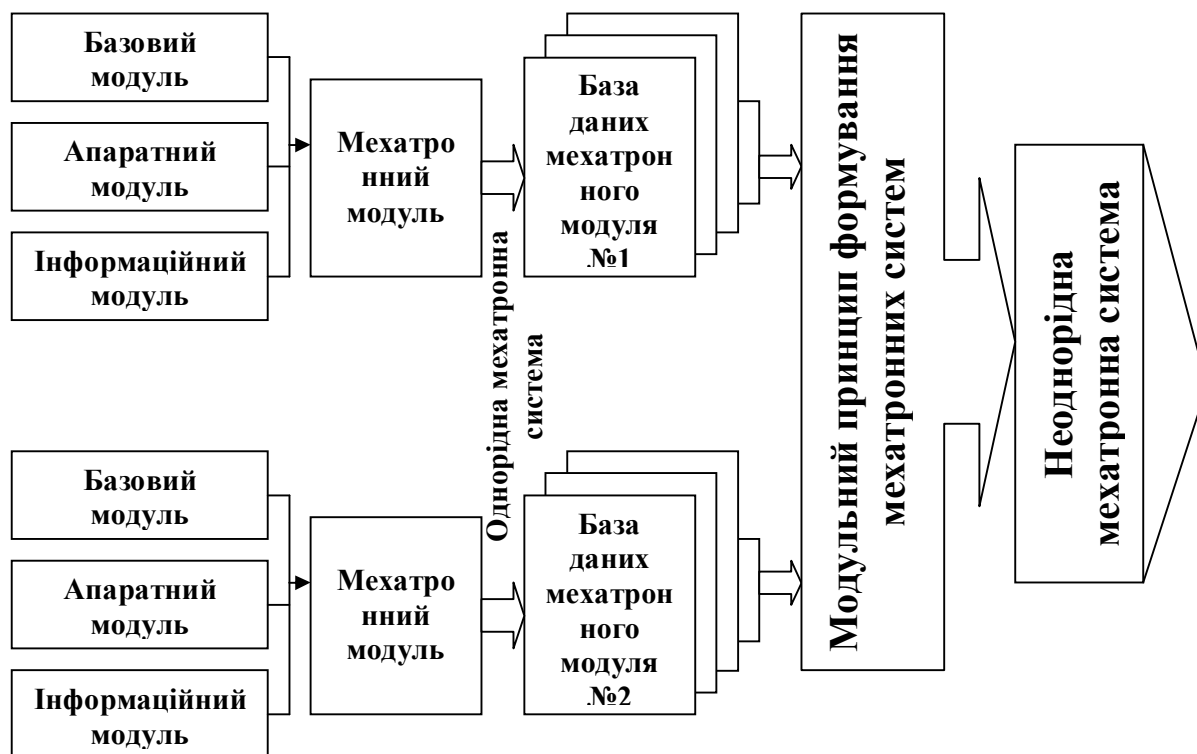


Рис. 1.1 Алгоритм формування неоднорідної мехатронної системи

Потреба в такій методології проектування пояснюється збільшенням функціональних вимог до новітнього пакувального обладнання.

Для створення наукових основ методології проектування пакувальних машин із мехатронних модулів, використовуючи теорію еволюції структурного проектування [18, 32], проведено аналіз сучасних методів проектування пакувального обладнання шляхом порівняння стану двох основних компонентів – елементного та логічного структурного проектування. Під елементами проектування розуміють технічні та технологічні можливості комплектуючих,

що використовуються для нового обладнання. Постійний розвиток технологій та матеріалів призводить до їх модернізації та появи нових конструкцій. Використання таких елементів під час проектування наступних зразків однотипного обладнання забезпечує розширення наявних та реалізацію нових технологічних та технічних можливостей. Логічне проектування об'єднує можливі методології, методики та методи систем проектування нового пакувального обладнання. Розвиток систем проектування відбувається завдяки суперечностям, котрі виникають між елементним та логічним проектуванням. Одним із напрямків поглиблення таких суперечностей є постійне удосконалення елементного проектування, яке призводить до створення однотипного нового пакувального обладнання з постійно удосконаленими характеристиками, які з часом переростають в революційний характер розвитку. Здебільшого такі явища мають стрибкоподібний випереджувальний характер. У такому випадку в системі проектування утворюється потенціал для розвитку логічного проектування у вигляді удосконаленої методології проектування. На певному етапі удосконалення призводить до зміни філософії процесів проектування, яка забезпечує його перехід на новий щабель розвитку. Така еволюція є шляхом від індивідуального проектування обладнання до типового, а далі до модульного [36].

Аналіз сучасного стану елементного структурного проектування пакувального обладнання засвідчує його стрімкий розвиток у напрямках: функціональних модулів шляхом широкого застосування покрокових та серводвигунів, безштокових пневматичних циліндрів та ін.; апаратних модулів на рівні застосування мікропроцесорних систем керування різної структури з можливістю реалізації логічного інтелекту; інформаційних модулів для забезпечення зворотного зв'язку шляхом використання значної кількості датчиків різних груп та видів. Сьогодні розвиток логічного проектування пакувального обладнання характеризується критичним відставанням від елементного і потребує переходу на нову концепцію проектування.

Алгоритм послідовності операцій проектування за такою методикою передбачає виконання семи етапів (рис. 1.2).



Рис. 1.2 Алгоритм виконання етапів проектування нового пакувального обладнання з мехатронних функціональних модулів

Така методологія передбачає завчасне утворення бібліотек (баз даних) мехатронних модулів із різним функціональним призначенням та конструктивними типорозмірами, які відповідають заданим параметричним рядам. Наслідком використання такої методології є отримання нового обладнання з технічними характеристиками, що відповідають технічному завданню на проектування та прийнятим критеріям оцінювання ефективності функціонування технічної системи і можливістю забезпечення його швидкого переналаштування при зміні технологічних або технічних умов роботи.

1.2 Тенденції розвитку методів проектування пакувальних машин

Основною проблемою створення нової технології проектування є відсутність аналітичних і логічних залежностей, що пов'язують функціональне призначення пакувальної машини з її структурою і характеристиками.

Така теорія дасть можливість укрупнити елементи структури пакувальної машини і здійснювати їх порівняння на рівні заданої для проектування інформації. При цьому кожен порівнюваний елемент відповідає цілому класу технологічно ізоморфних рішень. Таке укрупнення перебору зменшує працемісткість обчислювального процесу на декілька порядків і дає можливість ефективно проектувати оптимальні технологічні системи [19].

Основним напрямом автоматизації проектування є не автоматизація окремих етапів проектування, не створення алгоритмів інженерних розрахунків, а розроблення такої технології проектування, яка охоплювала б етапи від технічного завдання на проект до завершення конструкторської документації з проведенням заводських випробувань [19].

Створення системи комп'ютерного проектування пакувальних машин передбачає системний аналіз розвитку принципів їх побудови і проектування.

Системний підхід до проектування передбачає представлення пакувальної машини як системи, елементи структури якої – функціональні модулі, виконують процес пакування, що відповідає за змістом головній службовій функції.

Застосування функціонально-модульного принципу побудови пакувальної машини дає можливість синтезувати із обмеженого набору уніфікованих функціональних модулів найрізноманітніші за фізикою процесу пакування [36].

В основу функціонально-модульного принципу проектування пакувальних машин покладені такі вимоги [29]:

- пакувальні машини однакового функціонального призначення виконують приблизно однакову кількість операцій (технологічних функцій);
- задана службова функція пакувальної машини є фізичним процесом (пакування), що виконується кінцевою множиною функціональних модулів;
- функціональні модулі в пакувальній машині можна поділити на види, залежно від функціональної ознаки:

основні технологічні (ТФМ) модулі;

допоміжні функціональні (ДФМ) модулі;

додаткові або керуючі функціональні (КФМ) модулі.

Основні технологічні модулі виконують основні операції – подача і оброблення продукції, дозування та фасування тощо. Допоміжні модулі виконують операції подачі, формування і оброблення упаковки, її транспортування тощо. Додаткові модулі виконують контрольні-вимірні і керуючі операції.

Структура пакувальної машини формується шляхом забезпечення між функціональними модулями зв'язків. Ці зв'язки забезпечують передачу матеріальних, енергетичних та інформаційних потоків [36].

Можна допустити, що технологія проектування пакувальних машин складається із таких основних етапів:

- опис пакувальної машини на основі функціонально-модульного принципу;
- застосування системного підходу, який дає можливість поєднати синтез та аналіз технології пакування з проектуванням структури пакувальної машини;

- дискретної оптимізації технологічної схеми пакування та структури пакувальної машини;

- на основі інформаційних технологій проведення геометричного синтезу функціональних модулів та пакувальної машини із створенням робочих креслень.

Поєднання інформаційних технологій із функціонально-модульним принципом проектування дає можливість успішно вирішити весь комплекс завдань, що виникають при створенні нових пакувальних машин, - оптимізувати на основі математичних методів структуру машини і технологічний процес в ній, побудувати твердотільні моделі складальних одиниць машини та розробити робочі креслення.

Новітні технології проектування пакувальних машин передбачають проектування їх із набору уніфікованих функціональних модулів, що характеризуються раціональними геометричними, кінематичними та іншими технічними параметрами.

Для реалізації такої технології проектування пропонується виконати такі етапи:

- аналіз та декомпозиція службової функції пакувальної машини на елементарні технологічні функції і синтез із них технологічного процесу, що виконує пакувальна машина;

- виділення відповідно до функцій функціональних модулів та створення зв'язків між ними для утворення компонування пакувальної машини;

- генерування із конкретних типів конструкцій функціональних модулів множини варіантів пакувальної машини, їх оцінювання за певним критерієм та відбору оптимального (генерування і оцінювання варіантів можна проводити покроково);

- побудова електронних твердотільних моделей цих функціональних модулів та виконання робочої конструкторської документації.

Процедура поділу технологічного процесу на операції і відповідно на прості елементи визначається природою технологічних перетворень і

кваліфікацією проектанта. Здебільшого вважають, що одну операцію виконує один робочий орган. Проектування включає декомпозицію сумарного технологічного перетворення і створення множини цих перетворень $E = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_n\}$, що складаються із окремих елементарних перетворень e_i . Ці технологічні перетворення мають між собою певні зв'язки (просторові, часові, порядку, передування тощо) [19].

У подальшому створюється нова множина $E \times F$, елементами якої є кортежі $\langle e_i, f_j \rangle$, та на її основі створюється множина F технічних функцій, що відповідають технологічним операціям машини.

Наступною процедурою проектування є створення проміжної множини $F \times M$, елементами якої є кортежі $\langle f_j, m_k \rangle$. У загальному випадку множина варіантів компоновань пакувальної машини визначиться як [36]

$$ПМ = E \times F \times M. \quad (1.1)$$

Таким чином, у загальному випадку під час проектування пакувальних машин, мова йде про три взаємопов'язані множини елементів:

- множина технологічних операцій $E = \{e_1, e_2, e_3, \dots, e_n\}$;
- множина технологічних функцій $F = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_n\}$;
- множина функціональних модулів $M = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_n\}$.

На першому етапі проектування здійснюється аналіз службової функції пакувальної машини та реалізація принципу її роботи у вигляді технологічної схеми. Проводиться декомпозиція на елементарні технологічні функції, із яких здійснюється синтез технологічного процесу пакування таким чином, щоб для кожної технічної функції було б очевидно, який тип робочого органа функціонального модуля потрібен. Тут формується множина можливих типів технологічних схем.

Процес синтезу відповідних робочих органів можна описати як послідовне відображення елементів та їх зв'язків однієї структури на відповідні елементи і їх зв'язки іншої. Кожна структурна модель це опис елементів структури (множина A) і зв'язків між ними (множина B). Приймаємо за E впорядковану множину елементів технологічних операцій, а Y – множина

зв'язків між елементами операцій, F – множина операцій процесу пакування та G – множина зв'язків між операціями. Опис структури функціональних модулів – множиною M , множиною зв'язків між ними R [36, 38]

Тобто

$$\begin{aligned} \alpha &: E \rightarrow F ; \\ \beta &: F \rightarrow M_T ; \\ \gamma &: Y \rightarrow G ; \\ \psi &: G \rightarrow R_T . \end{aligned} \tag{1.2}$$

де M_T – множина технічних функціональних модулів, а R_T – зв'язки між ними.

Структура $F=\{f_1, f_2, f_3, \dots, f_n\}$, отримана на основі множини технологічних перетворень (операцій) доповнюється допоміжними та додатковими функціями, а структура пакувальної машини – допоміжними і додатковими функціональними модулями відповідно (M_D, M_K).

Доповнення структури пакувальної машини із врахуванням відповідних зв'язків між цими модулями відповідає:

$$\begin{aligned} M &= M_T \cup M_D \cup M_K ; \\ R &= R_T \cup R_D \cup R_K . \end{aligned} \tag{1.3}$$

Тоді компонування пакувальної машини (ПМ) можна описати як

$$ПМ = M \times R. \tag{1.4}$$

На другому етапі проектування визначають структурну схему – компонування пакувальної машини, вибравши на підставі критерію ефективності її роботоздатності оптимальну з множини можливих варіантів.

Структура пакувальної машини утворюється набором складових її елементів – функціональних модулів і зв'язків між ними. Структурний синтез або оптимізація структури пов'язані з варіюванням цих елементів. Завдання структурного синтезу полягає в пошуку оптимальної структури пакувальної машини. Основними структурними елементами пакувальної машини є функціональні модулі (ФМ) [36, 38].

$$F = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_n\};$$

$$M = \{m_1, m_2, m_3, \dots, m_n\},$$

в якій множини F і M складаються із елементів – технологічних операцій f_i та матеріальних елементів – модулів m_i .

Для утворення структурних моделей пакувальної машини потрібно описати відношення між елементами кожної із множин, які визначаються блочною матрицею [29]

$$[(F, M)] \times [(F, M)] = \begin{vmatrix} F \times F & F \times M \\ M \times F & M \times M \end{vmatrix}. \quad (1.8)$$

У цій матриці елементи $[F \times F]$ та $[M \times M]$, які також є матрицями, описують функціональну структуру процесу, що реалізується в пакувальній машині, як відношення між технічними функціями та структурою машини.

Блоки матриці $[F \times M]$ та $[M \times F]$ описують відношення між структурами різних множин. Їх використання дає можливість генерувати варіанти більш складних структур об'єктів синтезу, які включають декілька множин із різнотипних елементів.

Наступним етапом проектування є визначення найкращих (оптимальних) значень параметрів для вибраної структури. Математична модель пакувальної машини характеризується чисельними значеннями внутрішніх (конструктивних параметрів машини і технологічних режимів її роботи), зовнішніх (параметрів зовнішнього середовища, умов роботи, фізико-механічні характеристики продукції, пакувального матеріалу і упаковки) і вихідних (експлуатаційні параметри машини (продуктивність, надійність, точність дозування і т. ін.) [41].

Завершальним етапом проектування є проведення геометричного синтезу пакувальної машини і її компонентів із використанням твердотільних моделей.

У випадку обмеженої номенклатури віртуальних моделей функціональних модулів різноманітність компоновань пакувальних машин може забезпечуватись за рахунок різних з'єднань і взаємних їх положень у структурі машини.

Ідеологія функціонально-модульної будови пакувальної машини формує та вдосконалює систему проектування в міру накопичення досвіду і розширення банку електронних графічних моделей модулів [29].

Пошук оптимальної конструкції пакувальної машини пов'язаний з використанням високих ієрархічних рівнів опису як її елементів, так і зв'язків між ними. Перехід до загальноприйнятого представлення конструкції машини викликає потребу як у розробленні методів кодування різноманітної конструкторської документації та її перетворення в цифрову форму, з одного боку, так і перетворення кодованого варіанта конструкції в цифровій формі у графічне зображення машини, з іншого боку.

1.3 Моделі та методи рішення задачі структурно-параметричного синтезу пакувальних машин

Продукція пакувальних машинобудівних підприємств характеризується широким спектром номенклатури й високим рівнем унікальності. Для керування програмою проектів таких підприємств доцільно застосовувати мультипроектний підхід [43] з максимальним використанням раніше накопиченого досвіду розробок, виробництва та керування, що дасть можливість в умовах ринкових відносин забезпечити скорочення термінів виходу нового виробу на ринок із високими показниками якості й, таким чином, забезпечити його велику конкурентоспроможність.

Розробка сучасної пакувальної техніки в усьому світі здійснюється в умовах жорстких обмежень фінансових ресурсів. Однією із перспективних ідеологій при керуванні проектом створення пакувальної техніки в цих умовах є методологія Lean Manufacturing (ощадливе виробництво) [8]. Метою ощадливого виробництва є:

- скорочення трудовитрат;
- скорочення термінів розроблення нової пакувальної машини;
- скорочення виробничих і складських площ;
- гарантія поставлення машини замовнику;

- максимальна якість при мінімальній вартості.

Ще одним підходом до створення новітніх пакувальних машин є технологія паралельного (спільного) інжинірингу [21]. Паралельний інжиніринг – це підхід у технологіях підтримки життєвого циклу, що замінює тривалий лінійний процес проектування і дорогих дослідно-конструкторських робіт на паралельний.

Застосування цього підходу дає можливість мінімізувати час на розроблення, підвищити якість і, таким чином, підвищити конкурентоспроможність виробів.

Розвиток цих підходів може базуватися на використанні раніше накопиченого досвіду під час проектування 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 проекту на етапі зовнішнього проектування. Цей етап можна характеризувати неповнотою і неточністю інформації. Дані, на цій стадії проектування, мають багатопараметричний й багатозначний характер. Тому виникає необхідність у пошуку методів ухвалення рішення на початкових стадіях проектування.

1.3.1 Модель етапу зовнішнього проектування пакувального обладнання

В основі лінійки виробів пакувального машинобудування лежить ряд подібних підсистем і елементів. Для ефективного керування мультипроектном, доцільно розробити моделі, що дають можливість урахувати й застосувати раніше накопичений досвід під час проектування нових пакувальних машин, що продовжують лінійку виробів програми.

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

- кастомізація;
- зворотнє проектування.

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

Пакувальна машина, на яку може поширюватися кастомізація повинна характеризуватися [22]:

- 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 [23]. 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.

Проаналізуємо 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 запропоновану 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 компонування 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.

1.3.2 Методи структурно-параметричного синтезу та прийняття рішення

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 у зв'язку із труднощами формалізації не досягли ступеня узагальнення й деталізації, властивої математичному забезпеченню процедур аналізу. Досягнутий ступінь узагальнення виражається у встановленні типової послідовності дій і використовуваних видів описів при їхніх перетвореннях у САПР. Вихідний опис, як правило, це ТЗ на проектування, згідно з ним складають опис на деякій формальній мові, що є вхідною мовою використовуваних підсистем САПР. Потім виконують перетворення описів, і одержуваний підсумковий для даного етапу опис документують [24].

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

- формалізація вихідного опису й подання множини альтернатив (X);
- оцінка поєднань і сумісності елементів;
- вибір критеріїв (K) для оцінки 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 описаних етапів, розроблено ряд методів. У наступних пунктах проведено аналіз цих методів, визначено найбільш перспективні з них для формування комплексного методу ухвалення рішення в процесі структурно-параметричного синтезу нової машини, що відповідає вимогам замовника, з максимальним використанням накопиченого досвіду.

1.3.3 Вибір множини альтернатив

Кожній альтернативі конкретного зразка машини можна поставити у відповідність значення впорядкованої множини (набору) атрибутів

$X = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$, що характеризують властивості альтернативи. При цьому x_i може бути величиною типу real, integer, Boolean, string (в останньому випадку величину називають предметною або лінгвістичною) [24]. Множину X називають записом (у теорії баз даних), фреймом (у штучному інтелекті) або хромосомою (у генетичних алгоритмах).

Властива проектним завданням невизначеність і нечіткість вихідних даних, а іноді й моделей, диктують використання спеціальних методів кількісного формулювання вихідних нечітких 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 нечіткого 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 ; і ключових слів, вербальних характеристик [24, 46].

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.

1.3.4 Аналіз методів прийняття рішень у процесі структурно-параметричного синтезу

Проаналізуємо методи прийняття рішень у процесі структурно-параметричного синтезу. Зокрема, структурно-параметричного синтезу пакувальних машин, з метою знаходження синтезованого варіанта, що задовольняє вимогам замовника з максимальним використанням раніше накопиченого досвіду. Результати аналізу наведені в табл.1.1.

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

Вибір даних 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

| № | Призначення методу | Назва методу | Суть методу | Обмеження |
|---|-----------------------------|---|---|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | Подання множини альтернатив | Морфологічні таблиці [4, 5] | 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-дерева [33] | 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) [45] | Властивості об'єктів представлені значеннями параметрів, що поєднані у запис, який називають хромосомою. У ГА оперують підмножиною хромосомів, які називають популяцією. | Сусідні числа в бітовому поданні можуть різнитися в декількох позиціях, що ускладнює функціонування генетичного алгоритму. |
| | | Метод висновку по прецедентах (СВТІ- метод) [6] | 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. | Некомпактне (без узагальнення) зберігання інформації. |

Продовження таблиці 1.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|------------------------------------|--|--|
| | | Метод аналізу ієрархій [5] | Будується ієрархія, що включає мету, розташовану в її вершині, проміжні рівні (критерії) і альтернативи, що формують самий нижній ієрархічний рівень. | Трудомісткість процесу |
| | | Методи теорії нечітких множин [21] | У нечіткій логіці альтернативи представляються нечіткими множинами. | Неможливість математичного аналізу нечітких множин існуючими методами |
| 2 | Оцінка поєднань і сумісності елементів | Альтернативні І-АБО-дерева | Вводяться таблиці сумісності вершин І-АБО-дерева. Ці таблиці призначені для вказівки вершин, які не можуть з'явитися в описі технічного рішення (ТР) одночасно. | Трудомісткість процесу |
| | | Методи теорії нечітких множин [21] | Вводяться правила, що відображають заборони на сполучення певних компонентів структур, певних значень параметрів. | Трудомісткість процесу |
| | | Метод висновку по прецедентах | Вводяться правила, що відображають заборони на сполучення певних компонентів структур, певних значень параметрів. | Трудомісткість процесу |
| 3 | Вибір критеріїв (К) для оцінювання ефективності отриманого рішення. Оцінка альтернатив. | Метод експертних оцінок [26] | 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 ($X \rightarrow K$); | Морфологічний синтез | За отриманими експертними даними визначається вектор пріоритетів альтернатив і розраховується цільова функція. | |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|-------------------------------|---|--|
| | | Альтернативні І- АБО-дерева | <p>Модель оцінки варіантів ТР ґрунтується на обчисленні значень показників І- вершин, які виражають зв'язок між списком вимог і конструктивних ознак в І-АБО-дереві. Показники І- вершин обчислюються через показники їхніх приймачів, при цьому використовуються п'ять способів згортки й обчислення показників: згортка «сума», «мінімум», «максимум», «середньозважена» і «класифікаційна»</p> | Трудомісткість процесу |
| | | Генетичні методи [13] | <p>Існує декілька методів наближеної 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 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> | Мають потребу в значних обчислювальних ресурсах |
| | | Методи теорії нечітких множин | Експертні оцінки альтернативних варіантів за критеріями можуть бути надані як нечіткі множини, виражені за допомогою функцій приналежності. | Слабка стійкість результатів щодо вихідних даних |
| 5 | Визначення правил вибору оптимального рішення | Морфологічний синтез | Варіанти ТР упорядковуються в напрямку зменшення значень цільової функції. | |
| | | Генетичні методи | Чим нижче ранг, тим індивід ближче до множини Парето (метод FFGA) | |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|-------------------------------|---|---|
| | | Методи теорії нечітких множин | 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. | |
| | | Альтернативні І-АБО-дерева | Вибирається ТР у вигляді І-дерева, якщо всі вершини сумісні й показники обраного (синтезованого) ТР відповідають вимогам ТЗ, то запам'ятовується значення критеріїв якості. Якщо значення якості наступного ТР краще попереднього, то фіксується наступне ТР і його значення критеріїв якості. Наприкінці алгоритму мають краще ТР. | |

1.4 Наукове обґрунтування комбінаторно-логічного методу синтезу машин для пакування харчових продуктів

Широке впровадження мікропроцесорів та мехатронних систем керування дає можливість створювати пакувальні машини-автомати нового покоління, що характеризуються значним рівнем гнучкості до переналаштування на інший вид продукції, пакувального матеріалу, упаковки, технологій пакування [30]. Створення такого покоління пакувальних машин базується на ієрархічній їх побудові із функціонально-мехатронних модулів. У цьому випадку для оптимізації процесу пакування потрібно оптимізувати структуру машини із врахуванням мехатронних зв'язків.

У техніці синтезом прийнято вважати проектну процедуру, результатом якої здійснюється поєднання різних модулів (елементів) в єдине ціле - машину (систему) [35].

У технічних науках поняття синтезу поділяють на три складові: синтезу конструкції, синтезу параметрів і синтезу структури. У теорії автоматизованого

проектування процедура синтезу структури є однією із самих складних і мало досліджених [31].

Серед багатьох підходів до вирішення задач структурного синтезу найбільшого поширення в системах автоматизованого проектування одержали методи під назвою комбінаторно-логічні. Ці способи базуються на загальній теорії комбінаторики [7, 39, 42]. Тобто для генерування структур використовується перебір та пошук нових поєднань у масиві аналогів і прототипів.

Результативним і ефективним цей метод буде при таких прийнятих припущеннях [20]:

- технічна система (пакувальна машина) має розвинену структуру з великою кількістю елементів та зв'язків;
- пакувальна машина як об'єкт належить до класу об'єктів, що мають однакове функціональне призначення;
- множина аналогів і прототипів має значну потужність для результативного пошуку нових поєднань у такому комбінаторному просторі;
- функціональні модулі пакувальних машин характеризуються достатньою комбінаторною здатністю.

Цей метод синтезу передбачає застосування таких засобів описання узагальнених структур пакувальних машин: табличні, алгебраїчні, логічні та мережні моделі [15,44].

Найширшого застосування серед цих моделей одержали морфологічні таблиці, багаточасткові графи (ТЧ - часткові), альтернативні дерева (А - дерева, І-АБО-дерева) та орієнтовані мультиграфи. Серед перерахованих способів описання структури пакувальної машини спосіб орієнтованих мультиграфів має найбільший потенціал та перспективу [47].

Орієнтовані мультиграфи це узагальнення орієнтованих графів. Вони утворюються із орієнтованих мультиребер, які у загальному випадку, можуть мати кілька входів та декілька виходів.

На рисунку 1.3 наведено мультиграфове представлення процесу пакування продукції у споживчу тару. Технологічний процес пакування складається із таких основних та допоміжних операцій. Z_1 – зовнішнє середовище; Z_2 – підготовка продукції; Z_3 – формування споживчої тари; Z_4 – дозування продукції; Z_5 – підготовка споживчої тари (упаковки) до фасування; Z_6 – фасування продукції; Z_7 – герметизація упаковки; S_1 – властивості продукції; S_2 – властивості пакувального матеріалу; S_3, S_4 – властивості обробленої продукції та пакувального матеріалу; S_5, S_6 – властивості дози продукції та сформованої упаковки; S_7 – властивості фасованої продукції та упаковки; S_8 – властивості пакувальної одиниці.

Реалізовані на практиці процеси пакування мають значну множину варіантів послідовності виконання технологічних операцій.

У наведеному прикладні технологічні операції є елементами, що формують комбінаторну надлишкову структуру процесу. Відповідно до розуміння мультиграфа операції є мультиребрами. Їх входи S_i ; описують умови виконання операцій, а виходи – їх послідовне виконання.

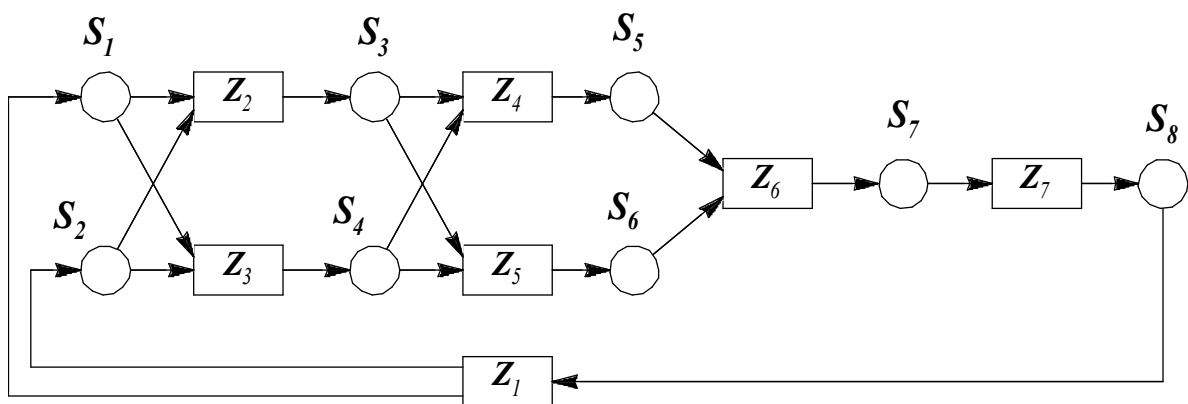


Рис. 1.3 Орієнтований мультиграф узагальненої структури технологічного процесу пакування харчової продукції у споживчу тару

Під час пакування продукції умовами застосування операції є фіксовані значення: точність дозування; геометричні параметри упаковки; міцність зварних або склеєних швів; точність і якість нанесення маркування, допоміжних пакувальних засобів тощо. Реалізація операцій змінює ці

характеристики, що дає можливість застосовувати інші операції. Операція пакування вважається завершеною якщо на черговому етапі будуть одержані числові значення параметрів.

Комбінаторно-логічна модель дає можливість одержати нові рішення за рахунок коректного поєднання елементів. Для мультиграфів із великим числом зв'язків і елементів комбінаторика поєднань дає можливість одержати велику кількість множин варіантів, які достатні для вирішення різних задач структурної оптимізації.

Компактна і упорядкована структура технологічного процесу (рис. 1.3) дає підставу вважати рішенням її деякий мультишлях, який веде із множини вершин (S_1, S_2) до множини S_8 .

Зважаючи на те, що на рисунку структура є узагальненою і на перший погляд відносно простою, то в реальних умовах процес пакування складається із множини етапів (елементів), які можуть бути реалізовані різними конструктивними виконаннями робочих органів. У такому випадку потрібно мати методику точного описання рішення.

Якщо через $in(Z)$ позначити входи дуги Z , а через $out(Z)$ – виходи Z і множину мультидуг – C , то $in(C)$ будуть входи структури C , а $out(C)$ її виходи.

Структуру називають мультициклом, якщо для неї виконується співвідношення $in(C)=0$, тобто вона має порожню множину входів. Рішенням задачі структурного синтезу є будь який ненадлишковий мультицикл, що містить елемент Z_i , тобто зовнішнє середовище. Врахування елемента Z_i гарантує глобальність мультицикла. Це означає, що він, відповідно технічного завдання на проектування пакувальної машини, з'єднує входи і виходи зовнішнього середовища і не замикається на деякий локальний елемент, що розташований усередині мультиграфа. Ненадлишковість означає, що мультицикл не містить зайвих елементів, які непотрібні для вирішення поставленої задачі.

Таким чином орієнтований мультиграф є гнучким, більш виразним поряд із іншими методами представлення структури. Будь яка узагальнена структура

може бути описана мовою мультиграфів без втрат інформації. Орієнтовані мультиграфи дають можливість синтезувати повноцінні структури в яких є зв'язки між елементами. Це достатньо важливі властивості мультиграфів, тому що морфологічні матриці, альтернативні дерева породжують самий простий тип структури.

Зв'язність, комбінаторна потужність, здатність описувати багатофункціональні елементи - всі ці властивості орієнтованих мультиграфів дають можливість вирішувати задачі оптимізації структури.

До недоліків орієнтованих мультиграфів відносять їх громоздкість та відсутність прямих засобів для описання елементів із обмеженою поєднувальністю [20]. Для усунення цих недоліків задачі синтезу структури машин вирішують у формі дискретного математичного програмування.

Під час застосування цього методу один клас пакувальних машин представляють у вигляді орієнтованого мультиграфа. У такому мультиграфі множиною мультидуг є $Z = \{Z_i\}, i = \overline{1, n}$, а множина вершини – $S = \{S_i\}$.

Формалізація задачі зводиться до наступного:

$$1. Z_i, i = \overline{1, n},$$

$$\text{де } Z_i = \begin{cases} 1, \text{ якщо дуга входить у рішення;} \\ 0, \text{ якщо дуга не входить у рішення.} \end{cases}$$

2. $y_{i,j}, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, r_i}$, де y_{ij} – вихід елемента Z_i під номером j , а r_i – загальна кількість виходів елемента Z_i .

Можна вважати що

$$y_{i,j} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } j \text{ вихідний зв'язок елемента } Z_i \text{ активований;} \\ 0, \text{ якщо } j \text{ вихідний зв'язок елемента } Z_i \text{ неактивований.} \end{cases}$$

3. $x_{i,k}, i = \overline{1, n}, k = \overline{1, m_i}$, де x_{ik} – k -тий вихід елемента Z_i , а m_i – загальна кількість виходів елемента Z_i .

Будемо вважати що

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } k\text{-тий вихідний зв'язок елемента } Z_i \text{ активований;} \\ 0, & \text{якщо } k\text{-тий вихідний зв'язок елемента } Z_i \text{ неактивований.} \end{cases}$$

Z_i, y_{ij}, x_{ik} - прийняті змінні для запису системи обмежень та цільової функції у задачі синтезу структури на елементах із обмеженим поєднанням. Якщо потрібно урахувати додаткові фізичні умови то вводять допоміжні аргументи.

Розв'язок задачі синтезу структури складається із активованих дуг орієнтованого мультиграфа. Дуга буде активована тоді коли активовані всі її виходи. Цю умову запишемо у вигляді такої системи рівнянь:

$$r_i \times Z_i = \sum_{j=1}^{r_i} y_{i,j}; i = \overline{1, n}. \quad (1.9)$$

Ця система рівнянь є сумісна тоді, коли $Z_i=0$ та всі змінні $y_{i,j}=0$, або $Z_i=1$ і всі $y_{i,j}=1$.

Для активування елемента структури потрібно збудити всі його вхідні зв'язки. Це значить, що $Z_i=1$ тоді і тільки тоді, коли $x_{ik}=1, k = \overline{1, m_j}$.

Якщо $x_{ik} = 0$, то $Z_i = 0$. Для запису цієї умови в алгебраїчному вигляді введемо n допоміжних змінних $u_i \in \{0,1\}, i = \overline{1, n}$. У такому випадку розглянемо систему нерівностей:

$$\sum_{k=1}^{m_i} x_{ik} - m_i \geq -m_i u_i; \quad (1.10)$$

$$Z_i - 1 \geq -u_i; \quad (1.11)$$

$$\sum_{k=1}^{m_i} x_{ik} \geq m_i Z_i; \quad (1.12)$$

$$\sum_{k=1}^{m_i} x_{ik} - m_i < 1 - u_i, \text{ де } i = \overline{1, n}. \quad (1.13)$$

Припустимо $Z_i = 1$. За цієї умови підсистема (1.11) виконується при будь-яких значеннях u_i . Із (1.12) виходить, що $x_{ik} = 1$, $k = \overline{1, m_j}$. Підсистема (1.13) приймає вигляд $\theta < 1 - u_i$, звідси $u_i = 0$, $i = \overline{1, n}$. І підсистема (1.10) виконується автоматично.

Якщо $Z_i = 0$, то система (1.12) виконується автоматично для будь-яких значень аргументів у лівій її частині. Підсистема (1.11) зводиться до виду $u_i \geq 1$, який має єдиний розв'язок $u_i = 1$, $i = \overline{1, n}$. Підставивши ці значення у вирази (1.10) та (1.13) одержимо:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{m_i} x_{ik} \geq 0; \\ \sum_{k=1}^{m_i} x_{ik} < m_i. \end{cases}$$

Для формалізації умови збурення входів елементів узагальненої структури пакувального процесу всі змінні виду x_{ik} та y_{ik} потрібно упорядкувати лексографічними методами за значеннями індексів. Після цієї операції кожна змінна x_{ik} (y_{ik}) одержить новий одиничний індекс $\alpha(i, k)$, $\beta(i, j)$, який показує номер змінної у лексографічному порядку.

Позначимо через:

$$M = \sum_{i=1}^n r_i \text{ та } K = \sum_{i=1}^n m_i.$$

Припустимо задана прямокутна матриця (0,1) $\theta P = \|p_{i,j}\|$ розміру $K \times M$, в якій

$$p_{i,j} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } x_i \text{ забезпечений виходом } y_j; \\ 0, \text{ якщо } x_i \text{ не забезпечений виходом } y_j. \end{cases}$$

Тоді систему нерівностей, що формалізують умову забезпечення збурення входів можна записати у такому вигляді:

$$\sum_{j=1}^M p_{i,j} \geq x_j, i = \overline{1, k}. \quad (1.14)$$

У цьому виразі i та j – номери змінних x_i, y_j у новому лексографічному порядку.

Якщо $x_i=1$, то в цій сумі знайдеться хоча б одна складова виду 1×1 . Це означає, що існує активований вихід, який забезпечить вхід x_i . Якщо $x_i = 0$, то нерівність виконується автоматично.

Будь яке вірне рішення задачі синтезу структури повинно виконувати поставлене технічне завдання і відповідати своєму функціональному призначенню. Для цього потрібно і достатньо включити в розв'язок елемент, що характеризує зовнішнє середовище. Цю умову можна записати у вигляді виразу:

$$Z_i = 1. \quad (1.15)$$

Система рівнянь і нерівностей (1.9) - (1.15) відображає основний фізичний смисл задачі синтезу структури по узагальненій структурі пакувальної машини, яка наведена у вигляді орієнтованого мультиграфа. Будь-який розв'язок цієї системи представляє собою допустимий варіант структури пакувальної машини. Система є відкритою, тому що допускає включення додаткових обмежень, що враховують особливості прийняття рішень у конкретній ситуації. За допомогою введених змінних можна формалізувати різні умови, що обмежують поєднання структурних елементів у загальному розв'язку.

Поряд із цим система рівнянь (1.9) - (1.15) є інваріантною, а тому її можна використати у поєднанні із різними цільовими функціями. Цільові функції, для вирішення значної кількості проектних ситуацій, можна записати у вигляді:

$$\sum_{i=1}^n Z_i \rightarrow \min; \quad (1.16)$$

$$\sum_{i=1}^n C_i Z_i \rightarrow \min; \quad (1.17)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{r_i} y_{ij} \rightarrow \min; \quad (1.18)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} \rightarrow \min; \quad (1.19)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{r_i} y_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} x_{ij} \rightarrow \min . \quad (1.20)$$

Проаналізуємо наведені цільові функції.

Функція (1.16) мінімізує кількість елементів структури. При всіх рівних умовах такий розв'язок дає можливість одержувати пакувальну машину із більш високими експлуатаційними властивостями і простішу у виготовленні.

Функція (1.17) мінімізує зважену суму структурних елементів. Ваговими коефіцієнтами можуть бути різні за фізичним смислом числові характеристики і показники. Наприклад, це можуть бути вартість, маса, габарити тощо, тобто ті що співставляються із параметрами елементів узагальненої структури.

Цільові функції (1.18) – (1.20) мінімізують загальне число входів, виходів, а також загальне число всіх зв'язків між вибраними елементами. При виконанні цих умов пакувальні машини будуть мати більш високі показники надійності і менші витрати на обслуговування.

Таким чином всі залежності, що характеризують узагальнену структуру, є лінійними, а областю визначення змінних є множина $\{0,1\}$. Поставлене завдання пошуку оптимальної структури пакувальних машин відноситься до задач лінійного булевого програмування. Методи розв'язку моделей цього типу достатньо глибоко відображені у результатах досліджень [43,44]. Загальна кількість змінних у таких моделях визначається із виразу $3n+K+M$, а кількість рівнянь і нерівностей у системі обмежень $-7n+K+L+1$, де n – загальна кількість елементів узагальненої структури пакувальної машини, K – число входів зв'язків, M – кількість вихідних зв'язків; L – кількість заборонених комбінацій.

Таким чином можна стверджувати, що серед багаточисельних методів синтезу структури пакувальних машин, що мають широкі можливості пошуку в просторі аналогів та прототипів, є і орієнтований мультиграф. Цей метод розв'язку задачі дає можливість отримувати структури пакувальних машин які є основою для проведення задач оптимізації структури. Для усунення основного недоліку мультиграфів – громіздкість і неможливість описати додаткові умови, покладені на вибір елементів, можна запропонувати звести проблему синтезу структури до задач дискретного лінійного програмування. Для цього сформульована система обмежень, яка визначає умови вибору елементів мультиграфової моделі, та цільові функції, що дають можливість оптимізувати різні структурні характеристики розв'язків.