

УДК 658.52

Б.О. Пальчевський

Луцький національний технічний університет

## ПРИНЦИПИ КЕРОВАНОГО ОПТИМІЗАЦІЙНОГО СИНТЕЗУ ФУНКЦІОНАЛЬНО-МОДУЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН

*Принципи керованого оптимізаційного синтезу функціонально-модульної структури технологічних машин. Показано, що основою керованого оптимізаційного синтезу функціонально-модульної структури технологічних машин є використання керування процедурами комбінаторного синтезу і процедурами оптимізації. Ці процедури в різних комбінаціях утворюють керований процес багатоступового проектування.*

**Вступ.** Впродовж останнього десятиріччя вимоги, що висувуються до якості проектів і термінів їх виконання, виявляються все більш жорсткими, особливо в зв'язку зростання складності проєктованих технологічних машин і підвищення важливості виконуваних ними функцій. Існуюча на сьогодні технологія проєктування технологічного устаткування характеризується великим часом «реакції на помилку», тобто багато помилок виявляються тільки в результаті випробування і експлуатації. Вирішити протиріччя між зростанням складності проєктованих технологічних машин і необхідністю більш глибокого опрацювання їх проєктів можливо тільки на основі автоматизації проєктування за допомогою широкого застосування обчислювальної техніки. Однак проєктування технологічних машин стало областю інженерної діяльності, найбільш складною для автоматизації. Автоматизація проєктних робіт проходить стихійно. Автоматизовані головним чином креслярські і обчислювальні операції, пов'язані з конструюванням. В той же час проблеми вибору найбільш раціональних технологічних і конструкторських рішень, компоновки машин із складових елементів, підбір цих елементів залишаються поза межами автоматизованого розв'язання.

Розробка такої теорії проєктування технологічних машин, яка створила би можливості автоматизувати процес проєктування з використанням обчислювальної техніки, знаходиться ще в початковій стадії. Основна проблема створення технології проєктування – це відсутність аналітичних і логічних залежностей, що пов'язують функціональне призначення технічних засобів з їх структурою і характеристиками. Традиційний аналіз функціонування технічних засобів проводиться з метою виявити вплив різних чинників на точність, продуктивність і економічну ефективність їх роботи. Що ж стосується розв'язання зворотної задачі - синтезу технічних засобів на основі їх призначення із врахуванням характеристик зовнішнього середовища, в умовах якого функціонуватиме новий технічний засіб, то вона досліджена ще недостатньо.

Впродовж останнього десятиріччя проєктування технологічних машин для пакування розвивалось досить інтенсивно, результатом чого стала поява високопродуктивного, надійного і практично повністю автоматизованого обладнання. Однак, звертає на себе увагу той факт, що пакувальне обладнання відрізняється одноманітністю компоновальних рішень. Конкурентна боротьба між виробниками пакувальних машин ведеться в основному на рівні вдосконалення параметрів вже наявного парку пакувального устаткування та вдосконалення їх структури шляхом додавання до складу машин різних сервісних пристроїв. Можна вважати, що параметричне вдосконалення пакувальних машин фактично вичерпало себе, тож подальший розвиток пакувальної техніки стає можливим переважно за рахунок вдосконалення структури машини.

Нами була створена така теорія проєктування, що розв'язує проблематику завдань синтезу і оптимізації структури технологічних машин із функціонально закінчених елементів [1]. При її використанні кожен порівнюваний функціональний елемент відповідає цілому класу технологічно ізоморфних рішень. Теорія дозволяє укрупнити функціональні елементи структури машини і здійснювати їх порівняння на рівні заданої для проєктування інформації. Таке укрупнення зменшує працемісткість перебору і обчислювального процесу на декілька порядків і дозволяє ефективно проєктувати оптимальні функціонально-модульні структури технологічних машин. Центральне завдання нової технології проєктування – це можливість вже на найраніших етапах проєктування достатньо правильно вибрати основні параметри конструкції і оцінити різні характеристики її ефективності. І впродовж всього процесу проєктування контролювати зміну цих характеристик так, щоб в результаті пред'явити до випробувань конструкцію, що вже не вимагає доведень.

### 1. Особливості керованого оптимізаційного синтезу технічного об'єкту.

Технологія проектування – це процес, що розвивається в часі. Він як і всі процеси розчленовується на стадії, етапи, проектні процедури і операції. З цією метою представляється доцільним удосконалити технологію проектування в такому напрямі, щоб кожен крок, зроблений від задуму до готового проекту, був керованою інформаційною процедурою над множиною моделей об'єкта проектування.

Можна вважати, що з ускладненням проектованої машини відбувається лавиноподібне наростання числа проміжних варіантів, які відбраковуються на різних стадіях проектних робіт і, отже, дорожчим та тривалішим стає процес її створення. Кожен проміжний варіант перед відбором проходить певні етапи проектною розробки і вимагає відповідних витрат ресурсів. Враховуючи, що ресурси на проектування, завжди обмежені, швидке зростання числа проміжних варіантів і пов'язаних з ними витрат різко знижує продуктивність проектних робіт. Для принципового вирішення цієї проблеми напрошується очевидне рішення – зменшення числа розглядуваних варіантів у міру підвищення складності проекту. Проте в цьому випадку знижується вірогідність отримання рішень, що максимально задовольняють поставлені цілі, тобто оптимальних чи близьких до них.

Системний підхід у поєднанні з функціонально-модульним представленням будови технологічного устаткування створили передумови до систематизованого використання при проектуванні інформаційних технологій аналізу і синтезу технічних систем, їх оптимізації, процедур декомпозиції, ієрархічної будови, моделювання та інших, більш специфічних, технологій і процедур [2, 3].

До початкових стадій проектування (аван-проектування) відносять стадії проектних досліджень, розробки технічного завдання і технічної пропозиції. До конструкторського проектування – стадії розробки ескізного, технічного, робочого проектів, випробувань і впровадження технологічної машини.

Проектна процедура - це частина етапу проектування, яка включає дії, виконання яких закінчується проектним рішенням. Така процедура може уніфікуватися, тоді це буде проектна процедура, алгоритм якої залишається незмінним для різних об'єктів проектування або різних стадій проектування одного і того ж об'єкту. Дрібніші складові частини процесу проектування, що входять до складу проектних процедур, називають проектними операціями. Проектна операція – це сукупність дій, що становлять частину проектною процедури, алгоритм яких залишається незмінним для ряду проектних процедур.

Проектна процедура називається типовою, якщо вона призначена для багаторазового застосування при проектуванні багатьох типів об'єктів. Розрізняють типові проектні процедури аналізу і синтезу. Синтез полягає в створенні опису об'єкту на основі описів його елементів і зв'язків між ними, а аналіз – в визначенні його характеристик і показників.

Очевидно, що проектування включає як процедури синтезу варіантів структур, так і процедури їх оцінки і відбору, причому як при функціональному проектуванні, так і при конструюванні об'єкта. Як бачимо при цьому реалізуються процедури синтезу об'єкта із частин та оцінка і вибір кращого результату синтезу. Синтез є проектною процедурою, метою якої є з'єднання різних елементів, властивостей, сторін об'єкта в єдине ціле, в систему. В результаті синтезу створюються проектні рішення, що мають нову якість щодо своїх елементів. Структуру класу об'єктів, що мають однаково функціональне призначення, прийнято називати узагальненою. Узагальнена структура є «комбінаторним простором», в якому здійснюється пошук нових поєднань елементів. Вона складається на основі знань про дану наочну сферу, аналізу масиву існуючих рішень (аналогів і прототипів) і узагальнення досвіду проектування.

Процес проектування ґрунтується на наявності схеми проектування, в якій чергуються проектні процедури двох типів - синтезу і оптимізації технічних рішень. Множина технічних рішень, отриманих при синтезі, аналізується і її потужність знижується при оптимізації на кожному кроці проектування. Це забезпечує зниження кількості варіантів, що передаються до наступного етапу [1].

Тому представляється доцільним удосконалювати технологію проектування в напрямі використання інформаційних технологій комбінаторного синтезу і оптимізації. Використання технології комбінаторного синтезу при проектуванні започаткував ще Лейбніц. Комбінаторику він розумів вельми широко, саме, як складову будь-якого дослідження, будь-якого творчого акту, що передбачає спочатку аналіз (розчленовування цілого на частини), а потім синтез (з'єднання частин в ціле). Комбінаториці Лейбніц передрікав блискуче майбутнє, широке вживання. Вибором

об'єктів і розташуванням їх в тому або іншому порядку доводиться займатися мало не у всіх областях людської діяльності, наприклад, конструктору, що розробляє нову модель машини чи механізму, ученому-агрономові, що планує розподіл сільськогосподарських культур на декількох полях тощо.

Використання інформаційної технології комбінаторного синтезу в поєднанні з технологією аналізу і оптимізації технічного рішення є науковою основою будь-якого творчого процесу проектування. У зв'язку з розвитком обчислювальної техніки різко розширилися можливості перебору і підвищився інтерес до дискретних моделей, що зумовило новий підхід комбінаторної математики, особливо в галузі систем автоматизованого проектування технічних об'єктів, в тому числі технологічних машин.

В цьому випадку кожен крок, зроблений від задуму до готового проекту, буде інформаційною процедурою над множиною моделей опису об'єкту проектування. Для технологічного устаткування ця вимога може бути реалізована шляхом використання взаємозв'язаних моделей виробу, робочого процесу його виготовлення і структури устаткування. Це створює передумови того, що, починаючи з перших і кінчаючи останніми етапами проекту, в ході проектування вся інформація з результатів одного етапу використовується на наступному.

Послідовність етапів робочого процесу задає конструкція виробу, послідовність встановлення функціональних елементів машини - задає її робочий процес (послідовність технологічних переходів). Процес проектування полягає в послідовному приєднанні до машини окремих функціональних елементів машини на кожному з етапів і оцінювання отриманого результату. Процедура оцінювання показана як логічна умова переходу до наступного етапу проектування (див. рис.).

Проектування із застосуванням технологій синтезу і оптимізації представляється як покрокове переведення опису проектного об'єкта із початкового в наступні етапи (рис. 1).

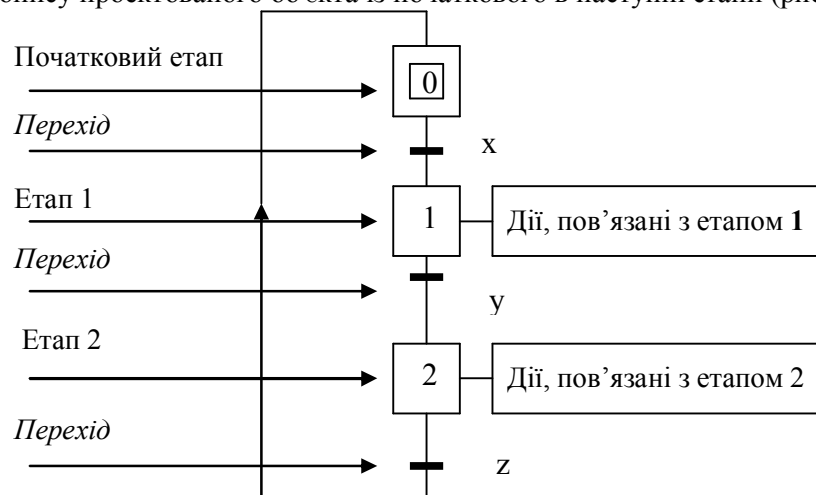


Рис. 1. Принцип побудови процесу керованого оптимізаційного синтезу

Для здійснення керування процесом проектування необхідно, щоби результати кожного кроку комбінаторного синтезу оцінювались і, на основі цього оцінювання, вибирався напрям наступного кроку проектування.

Для переходу до наступного етапу проектування необхідно виконати процедуру аналізу і оптимізації – тобто відібрати із множини можливих варіантів технічного рішення ті, які кращим чином відповідають вимогам. Ця процедура показана переходом до наступного етапу.

Слід зазначити деякі особливості такого графу проектування:

- граф може мати різний ієрархічний рівень, тобто етапами проектування можуть виступати виріб, процес його виготовлення, технологічна схема і компоновка машини;
- кожен етап проектування може бути розгорнутий на нижчому рівні, наприклад проектування компоновки включатиме етапи послідовного попережного приєднання окремих функціональних елементів, оцінювання результату на кожному переході;
- напрям проектування може здійснюватися по порядку реалізації технологічних переходів від першого переходу до останнього, або навпаки.

Як бачимо із схеми, представленої на рис. 1, в основу процесу комбінаторного синтезу покладено поєднання інформаційних методів технології синтезу варіантів рішень (генерування

варіантів) і технології оптимізації для обмеження різноманіття рішень і вибору кращого. Проектні процедури переводить опис проєктованого об'єкта в наступні етапи проєктування. Результатом реалізації проектних процедур на певній кількості етапів проєктування буде:

- сформована модель, на базі якої може бути проведений аналіз і обґрунтування вибраних варіантів проектних рішень;
- визначені змінні сформованої моделі, значення яких повинні бути узгоджені із значеннями змінних, сусідніх процедур, що є результатом;
- визначені правила обміну інформацією між взаємозв'язаними проектними процедурами, що забезпечують отримання узгоджених рішень, а також модель, що дозволяє «перерахувати», в що вливається ухвалення того чи іншого варіанта рішень, що погоджують на процедурах.

## **2. Керований оптимізаційний синтез функціонально-модульної структури технологічних машин.**

Останніми роками значущість модульного підходу до проєктування технічних систем різко зросла, оскільки в багатьох прикладних галузях створені і створюються специфікації компонентів, з яких будується технічний об'єкт. Такі компоненти можна одержати не тільки з каталогу розробника, але і за рахунок пошуку в «Інтернеті», або в іншій базі даних. В цьому випадку проєктування технічної системи ґрунтується на підборі окремих типів компонент, їх композиції в декілька проектних варіантів результуючої технічної системи і вибору кращої з них.

Принциповою основою для використання сучасних інформаційних технологій в проєктуванні технологічної машини є перехід від традиційних методів до оптимізаційного синтезу її структури із обмеженого набору функціональних елементів різного ієрархічного рівня. Основною закономірністю функціонально-модульного проєктування є об'єднання процедури синтезу із функціональних елементів конструкцій із заданими властивостями і процедури відбору кращої за заданими критеріями.

Відповідно до загальної теорії систем технологічне устаткування як ціле отримує певні неадитивні властивості тільки тоді, коли правильно узгоджено вимоги, що висуваються до її функціональних елементів. Для цього повинні виконуватися три умови:

- функціональна автономія елементів;
- децентралізація інформації і керування;
- інваріантність структури елемента по відношенню до технологічної машини.

При застосуванні схеми керованого оптимізаційного синтезу для отримання функціонально-модульної структури технологічної машини відзначимо деякі особливості виконання його етапів (див.рис.1). Початковий етап полягає в визначенні послідовності етапів проєктування та конкретизації вимог до технологічної машини. При проєктуванні технологічного обладнання послідовність етапів робочого процесу задає конструкція виробу, послідовність встановлення функціональних елементів - задає робочий процес, що реалізується (послідовність технологічних переходів). Тоді фінальний етап процесу проєктування полягатиме в послідовному приєднанні до машини окремих функціональних елементів на кожному з етапів.

Як бачимо, в основу процесу оптимізаційного синтезу покладено опис технологічної машини на рівні функціональних модулів. Функціонально-модульна структура технологічної машини як об'єкта проєктування характеризується наступними положеннями. Технологічний процес чи операція, що реалізуються технічними засобами технологічної машини чи системи технологічних машин, представляє собою впорядковану множину технологічних функцій трьох типів – робочих  $f_{1i}$ , контрольних  $f_{2i}$  і допоміжних  $f_{3i}$ , тобто

$$S(F) = \{f_{11}, f_{12}, f_{13}, \dots, f_{21}, f_{22}, f_{23}, \dots, f_{31}, f_{312}, f_{33}, \dots\}.$$

При функціонально-модульній будові технологічної машини, носіями цих технічних функцій є функціональні модулі відповідного типу. Якщо визначити технологічну машину як множину таких модулів, тобто

$$TM = \{m_1, m_2, \dots\},$$

то в результаті топологічного множення цих множин, ми отримаємо структуру технологічної машини як множину функціональних елементів чи модулів, кожен з яких виконує певну технічну функцію:

$$S(TM) = F \times M = \{f_{11}m_1, f_{12}m_2, \dots, f_{21}m_j, \dots, f_{3i}m_{j+k}, \dots\}.$$

Визначаючи технологічну машину як сукупність елементів, створених для виконання необхідної службової функції, яка реалізується робочим процесом в машині, ми підкреслюємо, що, з одного боку, технологічна машина – це матеріальне утворення, з іншого боку – технологічна машина набуває цінності тільки тоді, коли її робочий процес реалізує необхідну функцію.

Основна трудність проектування сучасної технологічної машини пов'язана з тим, що робочий процес в ній є достатньо складним і компетенції проектувальника недостатньо для того, щоб вибрати якнайкращий набір функціональних елементів для його реалізації. Підвищення ефективності проектних рішень відбувається на підставі аналізу тенденцій розвитку і спроби уявити вплив цих тенденцій на конструкцію технологічної машини, що проектується. Процес проектування включає ряд етапів, що включають формування потрібних описів технологічної машини на різних її ієрархічних рівнях і аспектах, а саме для технологічної машини передбачають етапи аван-проектування, функціонального і структурного (технічного) проектування.

Під час аван-проектування уточнюється мета створення технологічної машини, формулюється її службова функція, обґрунтовуються початкові дані і обмеження на застосування, визначаються принципи побудови для забезпечення заданої якості виробу. На цьому етапі отримують множину простих технічних функцій, які забезпечують виконання робочого процесу технологічної машини. Множина технічних функцій може бути отримана двоюко: 1) шляхом декомпозиції службової функції на прості технічні функції; 2) шляхом аналізу структури виробу, визначення його конструктивних елементів і необхідних для їх реалізації технологічних перетворень, які асоціюються із простими технічними функціями.

Під час функціонального проектування розробляється множина можливих варіантів структури робочого процесу, елементами яких є відповідні технічні функції, здійснюється за певними локальними критеріями пошук кращої і створюється технологічна схема виготовлення виробу, яка включає набір видів функціональних елементів, необхідних для реалізації обраного робочого процесу.

Технічне проектування або конструювання вирішує задачі компоновки і розміщення функціональних елементів, розробки міжелементних зв'язків для забезпечення надійності, продуктивності, функціональної точності тощо проектованого технологічної машини. Під час цього етапу розробляється множина компоновок технологічної машини із конкретними функціональними елементами і здійснюється пошук оптимального варіанта конструкції обладнання за певними критеріями якості. Тут визначають варіанти виконання кожного функціонального елемента і кожного міжелементного зв'язку, аналізують і визначають компоновку, геометричні форми і параметри об'єкта. На цьому етапі проектування розробляють технічну документацію, необхідну для виготовлення і експлуатації технологічної машини. Конструкторське проектування включає питання конструкторської реалізації результатів функціонального проектування, тобто питання вибору форм і матеріалів оригінальних деталей, вибору типорозмірів уніфікованих деталей, просторового розташування складових частин, що забезпечує задані взаємодії між елементами конструкції. В основу цих процедур покладено оцінювання отриманих варіантів технологічної машини і вибір кращої.

Проте головним питанням, що визначає ефективність проектування є проблема автоматизації початкового етапу проектування, так званого аван - проектування. У цій проблемі основна наша увага зосереджується на виборі альтернативних варіантів при зав'язці проекту, тобто при формуванні структурної компоновки технологічної машини. Аван-проектування — це якраз та область, де хороша наукова основа, тобто застосування передових методів наукового аналізу і структурної оптимізації, може компенсувати відносну слабкість обчислювальної техніки.

Проблема проектування компоновки є, ймовірно, не тільки найбільш важкою, але і вузловою проблемою проектування технологічної машини. Насправді, адже помилка у виборі структури технологічної машини не може бути потім виправлена ні досконалістю вибору вузлів машини, ні досконалістю методів інженерних розрахунків при визначенні режимів функціонування технологічної машини, ні графічною технікою.

Пошук оптимального варіанту структури технологічної машини повинен дозволити по заданих вхідних даних сформувати загальну сукупність технічно доцільних варіантів і шляхом їх оцінки і відбору з використанням як евристичних методів так і ЕОМ вибрати той, що для заданих умов виробництва забезпечить задану якість і програму випуску виробів за певними критеріями якості, наприклад за найкращими економічними показниками. На цьому етапі значну роль відіграють математичні моделі, які представляють собою, по суті, опис взаємозв'язку характеристик технологічної машини з її структурою у вигляді формул, графіків, таблиць,

придатних для використання при проектуванні. Мета наукового аналізу – визначення закону перетворення матеріалів, енергії і інформації у виріб заданої якості для технологічної машини різної функціонально-модульної структури.

Отже, успіх проектування складної технологічної машини визначається, перш за все, тим, як ми зможемо розкласти завдання функціонування машини, тобто сумарне технологічне перетворення заготовки в виріб, на ряд простих перетворень і вибрати для кожного з них відповідну технічну функцію. Ці технічні функції представляють собою, по суті, елементарні технологічні переходи, об'єднання яких дозволяє утворити технологічну операцію, що повинна реалізовувати машина. Слід, проте, мати на увазі, що ніяких загальних рекомендацій про способи розділення технологічної операції на елементарні технічні функції немає. Ця процедура визначається, перш за все, природою технологічних перетворень заготовки в виріб і кваліфікацією проєктанта, бо розділення складного процесу на ланцюжок простіших — це завжди деяка евристична процедура, що вимагає знань і винахідливості.

Отже, центральним завданням технології проектування – це розробка такої стратегії оптимізаційного синтезу, яка дозволяла б вже на найраніших етапах проектування достатньо правильно вибрати основні варіанти структури, головні параметри конструкції і оцінити характеристики її ефективності. І впродовж всього процесу проектування контролювати зміну цих характеристик так, щоб в результаті пред'явити до випробувань конструкцію, що вже не вимагає доведень. Така вимога передбачає послідовну побудову системних моделей виробу, процесу його виготовлення та технологічного устаткування для реалізації процесу, а також розробку правил переходу від моделей з одним видом елементів та зв'язків до моделей з елементами іншого виду (модель виробу – модель процесу його виготовлення – модель устаткування).

### **3. Використання моделей виробу, робочого процесу і устаткування для керування процесом проектування.**

Моделювання є інформаційною технологією, яка виступає інструментом синтезу і дослідження технологічних систем. При проектуванні технологічної машини моделювання передбачає побудову взаємопов'язаних системних моделей виробу, процесу його виготовлення та структури технологічної машини. Під системними моделями розумітимемо такі, які описують елементний склад об'єкта і зв'язки між його елементами. Важливим питанням, що визначає ефективність проектування, є також проблема застосування комп'ютерної техніки під час роботи з відповідною системою моделей, особливо на початкових етапах проектування. Саме правильне використання системи взаємопов'язаних моделей виробу, процесу його виготовлення і конструкції технологічної машини, а також правил переходу від моделей одного виду до моделей іншого типу дозволяє визначити напрям пошуку оптимального технічного рішення.

Системна модель технічного об'єкта описує елементи об'єкту і зв'язки між ними. Процес проектування значно спрощується при побудові відповідних системних моделей та визначенні шляхів переходу від моделей з одними елементами до моделей з іншими. При переході від однієї моделі до іншої зберігається інваріантна складова – елементи або зв'язки. Якщо змінюються елементи при незмінних зв'язках, то це перехід до іншої моделі. Якщо ж змінюються тільки зв'язки при незмінних елементах – то це модифікація моделі. Для використання при проектуванні системні моделі повинні бути побудовані за ідентичними правилами, що дозволить переходити в процесі проектування від одних, як правило більш загальних моделей, до інших, конкретніших. Тоді здійсниться покрокова конкретизація проектного рішення, кожен крок якого полягатиме у побудові системної моделі відповідного рівня (виробу, процесу чи компонування) і вирішенні певної локальної задачі, результати виконання якої будуть вихідними даними для наступної. Для такої покрокової конкретизації проектних рішень необхідно розробити правила переходу від моделей з одним видом елементів до моделей з елементами іншого виду (модель виробу – модель процесу виготовлення – модель устаткування). Ці правила переходу повинні враховувати специфіку технологічного устаткування, тобто вони можуть бути тільки евристичними, однак навіть тут, як покажуть подальші приклади, потрібна хороша наукова основа і застосування передових методів наукового аналізу.

Для технологічної машини ця множина моделей включає взаємозв'язані моделі виробу, процесу його виготовлення і структури устаткування. Вся інформація з результатів одного етапу повинна бути використана на наступному. У основу розробки принципів проектування на основі інформаційних технологій покладено функціонально-модульний опис проєктованої технологічної машини.

Процедура проектування включає декомпозицію сумарного технологічного перетворення і створення множини цих перетворень  $E = \{e_1, e_2, \dots\}$ , що складається із окремих елементарних перетворень  $e_i$ . Ці технологічні перетворення мають між собою певні зв'язки (просторові, часові, порядку, передування тощо).

Далі створюється нова множина  $E \times F$ , елементами якої є кортежі  $\langle e_i, f_j \rangle$ , на її основі створюється множина  $F$  технічних функцій, що відповідають технологічній операції машини. Наступною процедурою проектування є створення проміжної множини  $F \times M$ , елементами якої є кортежі  $\langle f_j, m_k \rangle$ .

Як бачимо, в загальному випадку при проектуванні технологічної машини ми маємо справу з трьома взаємопов'язаними моделями множин елементів:

- множина технологічних перетворень, необхідних для надання вихідній заготовці чи напівфабрикату властивостей готового виробу  $E = \{e_1, e_2, \dots\}$ ;
- множина технічних функцій, необхідних для реалізації цих перетворень  $F = \{f_1, f_2, f_3, \dots\}$ ;
- множина функціональних елементів для реалізації цих функцій  $TM = \{m_1, m_2, \dots\}$ .

Процес синтезу відповідних технічних рішень опишеться як послідовне відображення елементів і їх зв'язків однієї структури на відповідні елементи і їх зв'язки іншої. Кожна структурна модель представляє собою опис елементів структури (множина  $A$ ) і зв'язків між ними (множина  $B$ ). Задамо опис впорядкованої множини технологічних перетворень як  $E$ , а множини зв'язків між ними  $Y$ , робочий процес технологічної машини множиною елементів процесу  $F$  і множиною зв'язків між ними  $G$ , а опис структури технічних засобів – множиною елементів  $M$  і множиною зв'язків між ними  $R$ .

Тобто

$$\pi : E \rightarrow F,$$

$$\tau : F \rightarrow M_T,$$

$$\rho : Y \rightarrow G,$$

$$\psi : G \rightarrow R_T,$$

де  $M_T$  – множина ТФМ, а  $R_T$  – зв'язки між ними.

Структура  $F = \{f_1, f_2, f_3, \dots\}$ , отримана на основі множини технологічних перетворень виробу, доповнюється допоміжними і контрольними функціями, а структура машини – допоміжними і контрольними функціональними елементами.

При проектуванні технологічної машини для виготовлення виробу, об'єктами системного моделювання і аналізу послідовно виступають сам виріб, робочий процес його виготовлення і технологічне устаткування, яке цей процес здійснює. Таким чином, системна модель виробу  $B$  за певними правилами може бути перетворена в системну модель робочого процесу його виготовлення  $F$  без втрати вхідної інформації про будову виробу. Елементами моделі робочого процесу  $F$  вже виступають окремі технічні функції. Далі модель робочого процесу після відповідної інформаційної обробки (впорядкування послідовності окремих функцій, їх синхронізація в часі тощо) може бути перетворена в модель компоновки технологічної машини  $M$ , елементами якої виступають функціональні елементи. Ланцюжок послідовних перетворень системних моделей  $B$ - $F$ - $M$  є складним і виконується за допомогою ряду проектних процедур і операцій. Стрижнем створення таких послідовних моделей є послідовний перехід від елементів одного виду до елементів іншого, або від зв'язків між елементами одного виду до зв'язків іншого. В цьому випадку здійснюється послідовний перехід від одних системних моделей до інших без втрати інформації попередніх моделей. Слід звернути увагу, що при одночасній заміні як елементів, так і зв'язків між ними одночасно, проходить поява нової моделі, яка може бути інформаційно відірваною від попередньої, тобто інформація, подана в попередній моделі, може бути втраченою.

В загальному випадку при проектуванні технологічної машини проєктант має справу з трьома множинами, елементами яких є:

- конструктивні елементи виробу  $E = \{e_1, e_2, e_3, \dots\}$ ;

- технічні функції, необхідні для виготовлення виробу  $F = \{f_1, f_2, f_3, \dots\}$ ;
- функціональні елементи технологічної машини, необхідні для реалізації технічних функцій  $M = \{m_1, m_2, m_3, \dots\}$ .

Порядок побудови цих системних моделей здійснюється в напрямі зростання конкретизації опису об'єкта проектування.

Найменш варіативним виступає опис виробу, модель якого є основою для побудови моделі робочого процесу в технологічній машині. Тому спочатку використовують модель виробу. Для цього її будують наступним чином: елементами моделі виступають конструктивні елементи виробу  $E = \{e_1, e_2, e_3, \dots\}$  (поверхні, геометричні елементи (ГЕ) як об'єднання поверхонь, їх з'єднання), а зв'язками між ними – геометричні, розмірні та інші відношення. Якщо кожному конструктивному елементу поставити у відповідність технологічне перетворення як дію його створення в заготовці, то такі перетворення і, тим самим конструктивні елементи виробу, можуть бути певним чином впорядковані [83].

Після отримання системної моделі процесу в технологічній машині необхідно здійснити вибір технічних засобів для реалізації технологічних і допоміжних елементарних функцій. Для цього у відповідність до кожної технічної функції ставимо типовий (узагальнений) функціональний елемент. При переході до моделі робочого процесу  $F = \{f_1, f_2, f_3, \dots\}$  кожному елементу виробу, ставиться у відповідність технічна функція, що його реалізує. Ми отримуємо таким чином модель робочого процесу, якщо між окремими функціями зберуться відношення із попередньої моделі, тобто вона задасть склад, послідовність і взаємодію технічних функцій. Далі створюється нова множина  $E \times F$ , елементами якої є кортежі  $\langle e_i, f_j \rangle$ . Кожен елемент кортежу  $\langle e_i, f_j \rangle$  задає для певного технологічного перетворення  $e_i$  елементарну технічну функцію  $f_j$ , яка може його реалізувати. Відзначимо принагідно, що для реалізації одного технологічного перетворення можна використати декілька різних технічних функцій. Із отриманої множини  $E \times F$  формується на основі певних критеріїв оцінки множина  $F$  технічних функцій, що реалізують робочий процес в технологічній машині.

Відповідно до принципу системного підходу при проектуванні, синтез варіантів структури процесу виготовлення виробу здійснюватимемо синтезом загальної функції технологічного устаткування із функцій технічних засобів, що виконують окремі операції і переходи. Модель робочого процесу в технологічній машині представляє собою множину технічних функцій  $F = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_n\}$ .

Однак модель процесу вже є багатоваріантною, оскільки кожен із конструктивних чи геометричних елементів виробу може бути реалізований різними технологічними методами, в різній послідовності тощо. В цьому випадку ми вже поставлені перед необхідністю пошуку кращих варіантів структури робочого процесу, тобто перед необхідністю застосування технології оптимізації.

Таким чином, при коректній побудові моделі робочого процесу (без апріорної прив'язки до технічних засобів) з'являється можливість зв'язати її елементи з відповідними функціональними елементами. В цьому випадку, і це методично украй важливо, функціонально-просторова структура стає результатом моделювання робочого процесу. Тоді кожен функціональний елемент технологічного устаткування буде характеризуватися:

1. надійністю при відтворенні технічної функції;
2. енерговитратами при відтворенні функції;
3. вартістю;
4. вартістю одноразового відтворення функції.

Побудова структурної моделі технологічного устаткування  $M = \{m_1, m_2, m_3, \dots\}$  здійснюється наступним чином. Кожній технічній функції ставиться у відповідність функціональний елемент, що її реалізує, а отримана раніше послідовність утворення виробу задає послідовність розміщення функціональних елементів по довж шляху переміщення виробу в технологічному устаткуванні. Для отримання структури технологічного устаткування, необхідно ввести для функціональних елементів просторові і функціональні відношення. Тому наступною



процедурою проектування є створення проміжної множини  $F \times M$ , елементами якої є кортежі  $\langle f_j, m_k \rangle$ . На цьому етапі визначається просторова зона реалізації кожної технічної функції і вид функціонального елементу. Результатом цієї процедури виступатиме просторово-структурна модель – компоновка технологічного устаткування. Технологічне устаткування представляє собою організовану матеріальну структуру, що складається із функціональних елементів (машина, агрегат, вузол). Ці функціональні елементи об'єднані між собою в просторі технологічного устаткування за допомогою просторових і функціональних зв'язків, тобто строго впорядкованим і взаємообумовленим чином. Структура технологічного устаткування реалізується за допомогою наступних проектних процедур:

- введення відповідності між елементами множини технічних функцій робочого процесу і функціональними елементами технологічного устаткування;
- знаходження множини функціональних елементів технологічного устаткування;
- введення зв'язків поміж функціональних елементів для отримання компоновки технологічного устаткування.

Далі здійснюється оптимізація складу цих функціональних елементів за одним або декількома критеріями оптимізації. Після вибору функціональних елементів здійснюється вибір допоміжних функціональних елементів, розміщення всіх елементів у просторі і формування компоновальної схеми устаткування.

Вельми важливим є наступний етап — формалізація об'єкту проектування. Від повноти формального опису об'єкту залежить вибір методу рішення задачі, а, отже, визначається можливість застосування при проектуванні засобів обчислювальної техніки. Якщо завдання не формалізоване, то конструктор надалі користується одним з евристичних методів рішення задачі. Коли завдання формалізоване повністю, тобто є повна математична модель об'єкту проектування, її можна вирішувати за допомогою ЕОМ автоматично. Якщо ж завдання формалізоване частково, тобто не всі зв'язки системної моделі вдалося виразити у вигляді аналітичних і логічних залежностей, то розробляється так званий діалоговий метод рішення, що включає варіант математичної моделі об'єкту і сценарій взаємодії конструктора і ЕОМ.

Після вибору одного з алгоритмічних методів рішення весь процес проектування можна формалізувати і розробити алгоритми автоматизованого конструювання.

Перед програмуванням великих проектно-конструкторських завдань необхідна розробка інформаційного забезпечення автоматизованого проектування, яке повинне забезпечувати всі проектні процедури необхідною постійною і змінною інформацією для безупинної роботи програм ЕОМ. Після програмування проектного завдання вибираються необхідні технічні засоби, на яких і розв'язується завдання. Результати проектно-конструкторського процесу документуються у вигляді текстових і графічних матеріалів.

Отже, для якнайповнішого і ефективнішого використання обчислювальної техніки в проектно-конструкторській діяльності інженерів необхідні глибокі знання розробників з питань теорії проектування, конструювання заданого сімейства машин, математичного моделювання, використання обчислювальних методів рішення проектних задач, теорії автоматизованої переробки інформації і застосування сучасних обчислювальних засобів.

1. Пальчевський Б.О. Інформаційні технології проектування технологічного устаткування. Монографія.-Луцьк: Луцький НТУ, 2012.– С. 572.
2. Дитрих Я. Проектирование и конструирование. Системный подход. Пер. с польск. – М.: Мир, 1981. – С. 456.
3. Koller R. Konstruktionsmethode fur den Maschinen – Gerate – und Apparatenbau. – Berlin: Springer-Verlag, 1976. – S. 184.
4. Пальчевський Б.О. Технологія системного моделювання виробу в проектуванні технологічних машин // Технологічні комплекси, 2010, №2. – С. 15–24.