

МАКРОМОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРОЕКТУВАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ДИСКРЕТНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ПОСЛІДОВНОГО АНАЛІЗУ

© Пальчевський Б.О., 1999

ДУ «Львівська політехніка», кафедра «Технологія машинобудування»

У статті аналізується проектування технологічних систем у вигляді послідовних етапів, кожен з яких містить процедуру генерування множини варіантів та процедуру їх аналізу і відбору за допомогою розроблених критеріїв, які забезпечують знаходження оптимального варіанта технологічної системи на основі поєднання послідовного аналізу і комбінаторних методів.

Проектування технологічної системи (ТС) має багатоступеневу структуру, що містить такі етапи: 1) проектування конструкції виробу B ; 2) вибір комплексу технологічних переходів T , необхідних для його виготовлення; 3) проектування транспортно-технологічної схеми (ТТС) виготовлення виробу; 4) вибір технічних засобів технологічної P і транспортної R підсистем та проектування структурно-компонувальної схеми ТС. Якщо вибір того чи іншого варіанта ТС розглядати як дискретну керуючу дію, то множина цих керуючих дій визначиться на множині можливих варіантів ТС

$$V = B \times T \times TTS \times P \times R, \quad (1)$$

де $B = \{B\}$ – множина конструктивних варіантів виробу; $T = \{T\}$ – множина комплектів технологічних переходів для формування його якості; $TTS = \{TTS\}$ – множина варіантів транспортно-технологічних схем виготовлення виробу; $P = \{P\}$ – множина варіантів технічних засобів технологічної підсистеми; $R = \{R\}$ – множина типів транспортної підсистеми.

Тоді задача дискретної оптимізації визначиться пошуком екстремуму функції f на скінченній множині V , тобто зведеться до задачі пошуку, наприклад, її мінімального значення

$$v_0 = \arg \min_{v \in V} f(v). \quad (2)$$

Оскільки ТС являє собою складний об'єкт проектування, то кількість варіантів множини V за виразом (1), які необхідно розглянути для пошуку оптимального, може бути надзвичайно великим. У таких умовах знаходження оптимального варіанта ТС шляхом повного перебору стає неприйнятним.

Для розв'язання задачі оцінки варіантів ТС із попереднім виключенням неперспективних у практиці оптимального проектування використовується багатоваріантність самого проектування [1, 2]. Оскільки етапи проектування будуються таким чином, що на кожному наступному етапі зростає обсяг необхідної інформації, то використання поетапних критеріїв ефективності для відсіювання неперспективних

варіантів проекрованої ТС дозволяє виключити їх із подальшого розгляду. Особливо суттєвим є скорочення кількості розглядуваних варіантів на початкових етапах проєтування. При такому підході процедура проєтування ТС ґрунтується на методах послідовного аналізу систем [1] і містить на кожному із етапів процедуру G генерування множини варіантів ТС з глибиною деталізації етапу і процедуру W вибору множини варіантів, які задовольняють критерії і обмеження цього етапу. На наступному етапі проєтування відібрані варіанти розвиваються до глибини деталізації наступного етапу і серед них знову здійснюється вибір тощо, тобто реалізується процедура, що містить послідовне проєтування, аналіз та відсіювання варіантів. Одним із правил відсіву безперспективних варіантів є принцип монотонної рекурсивності [2], що часто застосовується в розв'язанні задач дискретної оптимізації, коли функція мети на кожному етапі проєтування визначається через параметри та значення функцій мети на попередніх етапах.

Якщо варіант ТС задовольняє обмеження всіх етапів, то він вважається допустимим і входить у множину $D(V)$. Той із допустимих варіантів, який мінімізує функцію f , тобто задовольняє вимогу (2), буде оптимальним. Однак і в цьому випадку для розгляду залишається значна кількість варіантів ТС, для якої навіть виключення абсурдних і безперспективних варіантів стає трудомісткою операцією. Тому використання цієї процедури для проєтування конкретної ТС може здійснюватись тільки на основі змістовного аналітичного і експериментального дослідження об'єкта проєтування для визначення його відмінних рис. При цьому необхідно виявити найбільшу кількість ознак ТС, що легко перевіряються.

На *першому етапі* проєтування генеруються можливі варіанти конструкції виробу B , які реалізують службову функцію. Для цього проводиться декомпозиція службової функції виробу FB до рівня простих технічних функцій f , тобто $FB = \{f_1, f_2, \dots, f_j, \dots, f_J\}$. Для кожної простої технічної функції є очевидними конструктивні елементи e виробу, що можуть їх здійснити. Оскільки проста функція виробу f_j може бути реалізована різними типами конструктивних елементів виробу, що зададуться підмножиною $E_j = \{e_{jk}\}$, де $(k_j = 1, 2, \dots, K_j)$, то множина можливих варіантів виробу B генеруватиметься за допомогою морфологічної матриці $M\{a_{jk}\}$ додаткової змінної, що задана як:

$$a_{jk} = \begin{cases} 1 - \text{якщо } j\text{-та функція виробу реалізується } k\text{-м} \\ \text{елементом конструкції;} \\ 0 - \text{в протилежному випадку.} \end{cases}$$

Проєтування кожного варіанта конструкції виробу опишеться за допомогою виразу

$$B = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{K_j} a_{jk} \cdot e_{jk}; \quad (3)$$

із врахуванням обмеження на дублюючі елементи конструкції виробу $\sum_{k=1}^{K_j} a_{jk} = 1$. У результаті створюється множина варіантів конструкції виробу $B = B_1 \times B_2 \times \dots \times B_J$, кількість членів якого визначиться як $N(B) = \prod_j K_j$. Для відсіювання неперспективних

варіантів було створено критерії оцінки функціональності і технологічності виробу та його деталей [3, 4]. До елементів конструкції виробу, що утворюють в ньому окремі деталі та зв'язки між ними, належать функціональні модулі поверхонь (ФМП), геометричні (sg) та механічні зв'язки (ss) між ними, тобто $e \in E\{\text{ФМП} \cup \text{sg} \cup \text{ss}\}$.

Розчленування виробу на деталі та створення механічних зв'язків між ними ще не є достатньо формалізованим, тому варіанти об'єднання функціональних модулів поверхонь в окремі деталі визначаються досвідом проєктувальника. При цьому на варіант конструкції виробу накладаються такі обмеження:

- кожна деталь виробу оцінюється за допомогою трьох комплексних критеріїв Q , W , V , які узагальнюють дев'ять характеристик кожної з деталей виробу, заданих у вигляді таблиць відповідності [4]. Якщо $Q \geq 0,5$, то деталь є придатною до автоматичного завантаження із бункера; якщо $0,2 < Q < 0,5$ – то до автоматичного завантаження з магазина, а якщо $Q < 0,2$; $W < 0,4$; $V > 0,4$ – то до автоматичного виготовлення при складанні;

- придатність самого виробу до автоматичного складання визначиться умовами мінімізації кількості деталей в ньому та механічних зв'язків між ними [3]:

$$n(\text{деталей}) \rightarrow \min; n(\text{ss}) \rightarrow \min.$$

При ранжуванні отриманих варіантів конструкції виробу за кількістю деталей та кількістю механічних зв'язків між ними, а також врахування комплексних показників характеристик деталей, кількість варіантів, що залишаються для розгляду на другому етапі проєктування, скорочується до декількох.

На другому етапі генерується множина T варіантів комплекту елементарних технологічних переходів T , що є необхідними для створення J конструктивних елементів виробу. Оскільки кожен з цих елементів може бути створений підмножиною різних за видом технологічних переходів $T_j = \{\tau_{j1}, \tau_{j2}, \dots, \tau_{ji}, \dots, \tau_{jlj}\}$, то множина T створюється за допомогою генеруючої матриці $M\{b_{ji}\}$, яка задає значення додаткової змінної b_{ji} як

$$b_{ji} = \begin{cases} 1 - \text{якщо } i\text{-й перехід може реалізувати } j\text{-й} \\ \text{конструктивний елемент;} \\ 0 - \text{якщо не може реалізувати.} \end{cases}$$

Невпорядкований комплект технологічних переходів T отримують за виразом

$$T = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I_j} b_{ji} \cdot \tau_{ji} \quad (4)$$

таким чином. Починаючи з першого, розглядають по чергово рядки матриці $M\{b_{ji}\}$.

Якщо на цьому кроці розгляду виконуються умови $\sum_{i=1}^{I_j} b_{ji} = 1$, а $e_j \notin B$, то технологічний перехід входить у комплект. Розгляд продовжується до отримання повного набору елементів конструкції виробу.

Множина варіантів комплекту технологічних переходів визначиться як $T = T_1 \times T_2 \times \dots \times T_J$, а кількість її елементів – $N\{T\} = \prod_j I_j$. Кожний варіант комплекту містить J технологічних переходів із тривалістю реалізації t_j . Відсів неперспективних

варіантів проведемо, здійснивши ранжування отриманих варіантів за критерієм сумарного часу виконання цих переходів $\sum_{j=1}^J t_j \Rightarrow \min$.

На *третьому етапі* проектується транспортно-технологічна схема виготовлення виробу. Вхідними даними цього етапу виступають один або декілька відібраних в результаті аналізу варіантів комплекту із J технологічних переходів, тобто $T = \{ \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_J \}$. Для комплекту необхідно визначити порядок технологічних переходів та розподілити їх поміж робочими позиціями ТС. Оскільки кількість можливих варіантів впорядкування множини із J технологічних переходів визначиться як $N(T) = J!$, то для скорочення розмірності множини варіантів ТТС визначимо обмеження, що накладаються на порядок технологічних переходів конструкцією виробу, умовами його експлуатації та виготовлення. Ці обмеження створюють функціональні, конструкторські, технологічні відношення передування, що впливають на порядок створення елементів конструкції виробу [5]. Особливістю математичної сторони процедури впорядкування технологічних переходів є те, що структура виробу задається моделлю, в якій конструктивні елементи виробу, які необхідно реалізувати, описуються вершинами графу, для послідовності створення яких необхідно ввести порядкову функцію. При введенні порядкової функції цей граф перетвориться в послідовний граф, порядок рівнів вершин якого задасть послідовність етапів виготовлення конструктивних елементів виробу, тобто послідовність зв'язаних з ними технологічних переходів. Для виконання процедури введення порядкової функції для графу, що описує структуру виробу, нами було запропоновано використати матрицю передування, що узагальнює всі види відношень передування у вигляді:

$$M(\pi) = |E \times E| =$$

	e_1	e_2	...	e_J
e_1				
e_2	1			
...	1	1		
e_J		1	1	

$$=$$

	τ_1	τ_2	...	τ_J
τ_1				
τ_2	1			
...	1	1		
τ_J		1	1	

На перетині i -го стовпчика та j -го рядка ставиться одиниця, якщо i -й матеріальний елемент виробу передує j -му, або нуль – в протилежному випадку, тобто кожен елемент матриці задовольняє такі вимоги:

$$c_{ij} = \begin{cases} 1 - \text{якщо } i\text{-й елемент конструкції повинен бути створений} \\ \text{поперед } j\text{-го;} \\ 0 - \text{в протилежному випадку.} \end{cases}$$

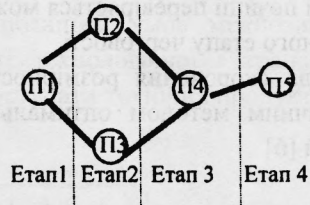
Формалізовану процедуру введення порядкової функції розглянемо на прикладі впорядкування множини елементарних технологічних переходів механічного оброблення. На кожному переході обробляється одна поверхня. Структура деталі $B1$ опишеться як поєднання поверхонь $P1, P2, P3, \dots$, для яких необхідно визначити логічну послідовність їх оброблення. Для визначення загальної кількості зв'язків для кожної з поверхонь, яку треба обробити, просумуємо одиниці в кожному рядку матриці, а суму запишемо в її стовпчику, що вказує степінь технологічної залежності обробленні даної поверхні від інших поверхонь деталі. Просумувавши одиниці в кожному

стовпчику матриці, запишемо їх суму в її рядку, що характеризуватиме ступінь технологічного наслідування поверхонь, тобто їх вплив на оброблення інших поверхонь. Оскільки рядок для поверхні $П1$ має ступінь залежності $П1=0$, то з неї треба почати оброблення деталі, тобто це буде вершина першого рівня послідовного графу поверхонь деталі.

		Етапи оброблення									
		П1	П2	П3	П4	П5	В1-0	В1-1	В1-2	В1-3	В1-4
П1							0	П1			
П2	1						1	0	П2		
П3	1						1	0	П3		
П4		1	1				2	2	0	П4	
П5				1			1	1	1	0	П5

Після оброблення поверхні $П1$ будуть реалізовані всі відношення передування, що є в стовпчику $П1$. У стовпчику матриці передування після виконання першого етапу оброблення залишаться різниця стовпчиків $В1-0$ і $П1$, що відповідатиме нереалізованим відношенням передування. На другому етапі обробляють поверхні, для яких стали відсутні зв'язки передування після реалізації поверхонь попереднього рівня ($П2=0$, $П3=0$). Повторюючи процедуру, визначаємо поверхні для наступних етапів оброблення. Як бачимо, деталь може бути оброблена в чотири етапи $В1-1 : В1-2 : В1-3 : В1-4$, згідно з матрицею, що формує етапи оброблення.

Ми отримали за допомогою формалізованої процедури послідовність технологічних переходів оброблення поверхонь деталі, яка задана послідовним графом (див. рисунок). Введення процедури впорядкування послідовності технологічних переходів дозволяє їх розподілити по k етапам, на кожному з яких може знаходитись декілька переходів однакової черговості. Тоді комплект переходів T опишеться послідовним графом їх черговості, який задасть розподіл переходів поміж K впорядкованими етапами



Введення функції порядку на послідовність переходів оброблення поверхонь $П1-5$.

$$T = T_1 \cup T_2 \cup \dots \cup T_k \cup \dots \cup T_K); \quad (5)$$

$$T = \bigcup_{k=1}^K T_k = \bigcup_{k=1}^K \bigcup_{l=1}^{L_k} \tau_{kl}, \quad (k=1, 2, \dots, K), \quad (l=1, 2, \dots, L_k). \quad (6)$$

Після виконання процедури відсіву варіантів, в яких послідовність технологічних переходів не задовольняє визначений функцією (5) порядок, залишиться скорочена множина варіантів, які відрізнятимуться тільки порядком технологічних переходів в межах кожного з етапів $T = T_1 \times T_2 \times \dots \times T_K$.

Для створення транспортно-технологічної схеми виготовлення виробу необхідно розподілити комплект $T=(\tau_j)$, ($j = 1, 2, \dots, J$) технологічних переходів частково впорядкованих на k етапах T_1, T_2, \dots, T_K , поміж робочими позиціями, що задані множиною $P=(p_i)$, ($i = 1, 2, \dots, n$). Отримані варіанти ТТС відрізнятимуться між собою кількістю робочих позицій, поміж якими розподілятимуться технологічні переходи та кількістю цих переходів на кожній із позицій. Нехай t_j є час реалізації j -го переходу.

Введемо додаткову змінну d_{ij}

$$d_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{— якщо } \tau_j \text{ може бути реалізований на } p_i; \\ 0 & \text{— якщо не може бути реалізований.} \end{cases}$$

Накладемо обмеження синхронізації операцій на тривалість i -ї технологічної операції, що об'єднує переходи на i -й робочій позиції, у вигляді:

$$t_{oi} = \sum_{j=1}^J d_{ij} \cdot t_j \cong \frac{t_0}{n}. \quad (7)$$

На сформовану множину варіантів ТТС, окрім обмеження (7), накладаються вимоги забезпечення заданих послідовним графом (6) зв'язків між технологічними переходами, а також відсутності дублювання переходів: $\sum_{i=1}^n d_{ij} = 1$, де $i = 1, 2, \dots, n$.

При створенні варіанта ТТС проводиться об'єднання в операцію технологічних переходів одного етапу черговості до моменту, коли сумарна тривалість об'єднаних переходів наблизиться до значення $\frac{t_0}{n}$. Якщо кількість переходів одного рівня виявиться недостатнім для необхідної тривалості технологічної операції, то на цій робочій позиції перевіряється можливість її дозавантаження технологічними переходами наступного етапу черговості.

Для скорочення розмірності множини варіантів ТТС попередньо визначається аналітичним методом оптимальна за технічною продуктивністю кількість робочих позицій [6]

$$n_{opt} = \sqrt{\frac{t_0}{t_T} \cdot \frac{1 + \left(\frac{1}{K_{PM}} - 1\right)}{\left(\frac{1}{k_{TM}} - 1\right)}}, \quad (8)$$

де K_{PM} — коефіцієнт готовності технологічної підсистеми ТС; k_{TM} — коефіцієнт готовності одного технічного засобу транспортної підсистеми для міжпозиційного транспортування; t_0 — загальна сумарна тривалість реалізації J технологічних переходів, $t_0 = \sum_{j=1}^J t_j$,

де t_j — тривалість реалізації j -го технологічного переходу; t_T — час транспортування заготовки між робочими позиціями.

Оскільки варіанти ТТС відрізнятимуться не тільки кількістю та типом технологічних переходів, що концентруються на кожній робочій позиції, але і їх взаємодією між собою, а також їх узгодженням із транспортними операціями для міжпозиційних переміщень заготовок, то на цьому етапі генерування варіантів ТТС та попередній вибір перспективних варіантів здійснюється групою спеціалістів із широким використанням евристичних методів.

На четвертому етапі проектування ТС генерується множина можливих варіантів технічних засобів технологічної та транспортної підсистем. Оскільки кожна техно-

логічна операція може бути реалізована різними технічними засобами, встановленими на i -й робочій позиції $P_i = \{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iS_i}\}$, то множина варіантів технологічної підсистеми визначиться як $P = P_1 \times P_2 \times \dots \times P_n$. Введемо додаткову змінну

$$h_{is} = \begin{cases} 1 & \text{— якщо } s\text{-й тип технічного засобу входить у} \\ & \text{технологічну підсистему;} \\ 0 & \text{— якщо ні.} \end{cases}$$

Тоді кожен варіант технологічної підсистеми опишеться виразом

$$P = \sum_{i=1}^n \sum_{s=1}^{S_i} h_{is} \cdot p_{is},$$

де
$$\sum_{s=1}^{S_i} h_{is} = 1,$$

а структурно-компонувальна схема ТС визначиться як $TC = P \times R$, де $R = \{R_1, R_2, \dots\}$ – множина можливих типів транспортної підсистеми.

Структурно-компонувальна схема ТС залежить від виду і кількості потоків заготовок, кількості і просторового розташування робочих позицій (на лінії, на площині, в об'ємі), вимогами до точності функціонування, наявністю додаткових функціональних умов. Тоді можливі варіанти ТС будуть відрізнятися якісним складом та кількістю технічних засобів, а кращий з них може бути визначений тільки з врахуванням ступеня концентрації технологічних переходів на робочих позиціях, умов міжпозиційного транспортування заготовок, характеристик надійності технологічної і транспортної підсистеми. Критерієм для вибору варіанта ТС може виступати технічна продуктивність ТС, що нами визначилась за виразом [6]:

$$Q = \frac{1}{\frac{t_0}{n} + t_T} \cdot \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{k_{Pi}} - 1 \right) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{k_{Ti}} \right)}, \quad (9)$$

де t_0 – сумарний час реалізації всіх технологічних переходів; t_T – час міжпозиційного транспортування; n – кількість робочих позицій; k_{Pi} , k_{Ti} – коефіцієнти готовності i -ї робочої позиції та i -го міжпозиційного транспорту, відповідно.

В інших випадках критерієм оптимальності можуть виступати наведені витрати або запропонований нами в [6] показник – вартість одиниці продуктивності:

$$V = (A + n \cdot G) \cdot \left(\frac{t_0}{n} + t_T \right) \left[1 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{k_{Pi}} - 1 \right) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{k_{Ti}} \right) \right], \quad (10)$$

який враховує вартість технологічної підсистеми A , яка є пропорційною до кількості реалізованих технологічних переходів, та вартість технічного засобу для міжпозиційного транспорту G .

Отже, проектування, що містить етапи генерування та аналізу варіантів ТС значно спрощується при застосуванні методики послідовного аналізу. Викладені міркування є достатньо загальними для широкого застосування запропонованої методики. Вона значно зменшує кількість розглядуваних варіантів ТС, дозволяє глибше вивчити для кожного з них вплив основних параметрів, скорочує терміни проектування ТС.

1. Вальд А. Последовательный анализ. М., 1960; 2. Михалевич В.С., Волкович В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. М., 1982. 3. Пальчевский Б.А. Применение структурного анализа для оценки технологичности конструкций изделия на этапе проектирования // Автоматизация производственных процессов в машиностроении и приборостроении: Респ. Межведомств. науч.-техн. сб. 1986. Вып.25. С.10-16. 4. Пальчевський Б.О. Функціональний і технологічний аналіз деталей виробу // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: Український міжвідомч. наук.-техн. зб. 1998. Вип.33. С.102-112. 5. Пальчевський Б.О. Технологічні основи гнучкого автоматизованого виробництва. Львів, 1994. 6. Пальчевський Б.О. Оптимізація структури автоматизованої технологічної системи // Вісн. ДУ «Львівська політехніка». 1998. № 321. С.67-73.

УДК 621.791

МЕТОД ТА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ У ПОКРИТТЯХ, НАНЕСЕНИХ МЕТОДАМИ ГАЗОТЕРМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ

© Гриньов В.Ф., 1999

ДУ «Львівська політехніка», кафедра «Технологія машинобудування»

Розглянуті переваги і недоліки методів визначення температур у покриттях, які формуються газотермічним напиленням. Показано схему пристрою для вимірювання температур у напилюваних покриттях за методом штучної термопари. Наведена математична модель для розрахунку температур в покриттях, яка враховує основні параметри напилення покриття.

Технологічні параметри процесів газотермічного напилення значною мірою визначають властивості і експлуатаційну поведінку покриття та виробів, на які вони нанесені. Найважливішими параметрами, які впливають на якість покриття, є продуктивність і теплова потужність джерела напилення, тиск транспортуючого газу, дистанція і швидкість переміщення напилюваної поверхні відносно джерела напилення. Відомо [1], що із збільшенням тиску газорозпилювача збільшуються швидкості польоту частинок матеріалу і їх кінетична енергія, внаслідок чого утворюється щільне покриття. Разом з цим із підвищенням продуктивності напилення збільшується теплова потужність металогазового потоку і зростає кількість тепла, яку одержує напилювана поверхня. Ці обставини спричиняють короблення напиленого шару та погіршення експлуатаційних характеристик виробу.

Існуючі [1, 2] теоретичні і експериментальні методи і моделі для визначення температур під час формування напилюваних покриттів дають можливість кількісно оцінити переважно інтегральне тепло, яке переносить металогазовий потік. Цього недостатньо при напиленні композиційних покриттів складних і відповідальних виробів