

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ

© Пальчевський Б.О., 2001

Запропонована методика оптимізаційного синтезу структури технологічного процесу, що ґрунтується на знаходженні його оптимального варіанта методом динамічного програмування.

It is offered a technique of optimizationel synthesis of structure of technological process which based of determined optimum variant a method of dynamic programming.

Основними рисами сучасної методики проектування, що надається для створення на її основі 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 варіанта. В цьому випадку процес проектування може бути представлений як ідентифікація або розпізнавання об'єкта із створеної множини його варіантів, що найкраще відповідає заданим вихідним умовам.

Можна виділити два варіанти задач проектування:

- За заданою функцією об'єкта (функціональна структура, елементами якої є елементарні функції) створити його конструкцію (технічну структуру із матеріальними або технічними елементами). Такі задачі виникають при проектуванні технічних систем (машин, апаратів, приладів).

- За заданою технічною структурою об'єкта створити функціональну структуру, яка її реалізує. Такі задачі виникають при проектуванні технологічних процесів.

Узагальнюючи, відзначимо, що процес проектування передбачає перехід від системи із елементами одного типу (функція чи технічний елемент) до системи із елементами іншого типу. Тоді для задачі проектування технологічного процесу можна виділити такі етапи:

системний аналіз задачі проектування; перехід від елементної структури, що описує виріб, до функціональної структури технологічного процесу; генерування множини можливих структурних варіантів технології виготовлення виробу; зменшення розмірності множини варіантів та визначення оптимального.

Процес проектування структури технологічного процесу механічної обробки розглянемо на прикладі. Нехай необхідно спроектувати оптимальний варіант структури технологічного процесу виготовлення корпусу опори [3]. Заготовка деталі – виливок із сірого чавуну СЧ-18, річна програма – 80 тис. штук.

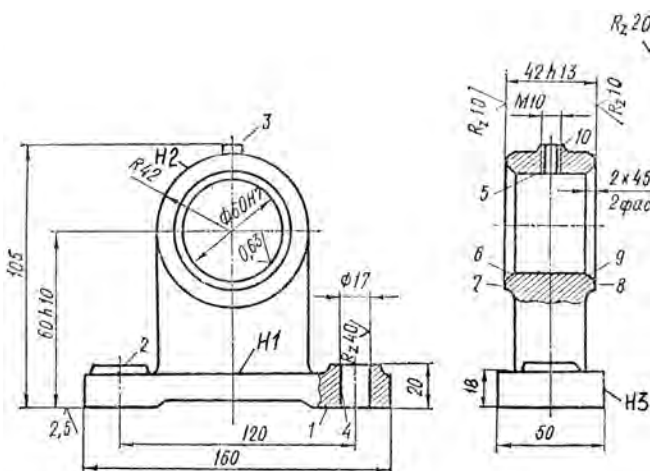


Рис. 1. Корпус опори, матеріал – СЧ-18

Перший етап – системний аналіз об'єкта виготовлення, визначення обмежень, що накладаються конструкцією деталі (рис. 1) та технологією механічної обробки. Визначимо також відповідність між елементами вихідної і спроектованої систем, тобто між окремою поверхнею чи конструктивним елементом деталі та елементарним технологічним переходом для її створення.



Рис. 2. Причинно-наслідкові зв'язки між технологічними переходами

Для формального визначення послідовності створення поверхонь деталі введемо поняття бінарного відношення передування π [4]. При побудові структури технологічного процесу виготовлення виробу на послідовність технологічних переходів накладаються відношення передування, які дають змогу визначити найкращу послідовність створення виробу. Під *відношенням передування* розумітимемо таке відношення двох чи більше об'єктів, для якого характерними виступають такі правила: 1) ніякий об'єкт не передує сам собі; 2) якщо об'єкт А передує об'єкту В, а об'єкт В передує об'єкту С, то об'єкт А передує також об'єкту С; 3) у будь-якій непустій множині об'єктів завжди знайдеться перший об'єкт, тобто об'єкт, що передує всім іншим об'єктам множини.

У найбільш загальному випадку на послідовність створення виробу та формування його параметрів якості впливають функціональні, конструкторські та технологічні обмеження, що дає змогу виділити три групи відношень передування, а саме:

- *функціональні відношення передування*, що накладаються умовами функціонування виробу;
- *конструкторські відношення передування*, що накладаються умовами просторового розташування деталей та окремих поверхонь в конструкції виробу;
- *технологічні відношення передування*, що накладаються умовами виготовлення виробу.

Визначимо причинно-наслідкові відношення передування конструктивних елементів виробу у вигляді графа $G\pi$ або його матриці $M\pi$. Матриця передування будується у такому вигляді. На перетині i -го стовпчика та j -го рядка ставиться одиниця, якщо i -й конструктивний елемент передує j -му, або нуль – в протилежному випадку. Матриця причинно-наслідкових відношень матиме вигляд:

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

	e11	e12	...	eij	...	e _{nm}
E11						
...	1					
E _{ij}	1	1			1	
...		1	1			
e _{nm}						

Кожен елемент матриці задовольняє такі вимоги:

$$d_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{– якщо } i\text{-й конструктивний елемент повинен бути} \\ & \text{створений перед } j\text{-го;} \\ 0 & \text{– в протилежному випадку.} \end{cases}$$

Оскільки конструктивні елементи виробу реалізуються відповідними технологічними переходами, то причинно-наслідкові зв'язки між цими елементами визначають відношення передування між технологічними переходами. Тоді вираз $F_i \pi F_j$, де $F_i, F_j \in \Pi$, читається

як «технологічний перехід F_i передує технологічному переходу F_j , якщо обидва переходи входять до складу технологічного процесу». Використавши відповідність між конструктивними елементами виробу та технологічними переходами, які їх створюють, здійснимо перехід від матриці передування елементів конструкції $M\pi(e)$ до матриці передування технологічних переходів $M\pi(F)$, в комірках якої ставиться одиниця, якщо i -й технологічний перехід передує j -му, або нуль – в протилежному випадку. Матриця передування технологічних переходів набере вигляд

$$M\pi(F) = |F \times F| = \quad .$$

	F1	F2	...	F _n
F1				
F2	1			
...	1	1		
F _n		1	1	

Формалізована процедура визначення послідовності елементарних технологічних переходів значно спроститься, якщо використати граф геометричних зв'язків між поверхнями. Запишемо функціональні, геометричні та технологічні відношення передування, що накладаються на поверхні деталі, у вигляді матриці передування такого вигляду. Оскільки поверхня 5 – отвір $\varnothing 60H8$ обробляється двічі, начорно та начисто, то врахуємо наявність двох поверхонь отвору: поверхню 5-ч (після чорнкової обробки отвору) та поверхню 5-ф (після фінальної обробки отвору). Поверхні заготовки, які використовуються як чорнові бази, позначимо Н1, Н2, Н3 (необроблені). В цій матриці кожен зв'язок передування між двома поверхнями позначений одиницею. Для визначення загальної кількості таких зв'язків для кожної з поверхонь, яку треба обробити, підсумуємо одиниці в кожному рядку матриці, а суму запишемо в стовпчику, що вказує ступінь технологічної залежності обробки даної поверхні від інших поверхонь деталі. Просумувавши одиниці в кожному стовпчику матриці, запишемо їх суму, що характеризуватиме ступінь технологічного наслідування поверхонь, тобто їх вплив на обробку інших поверхонь.

При визначенні послідовності обробки будемо керуватись таким.

1. Першою по порядку обробляється поверхня, яка не вимагає попередньої обробки інших поверхонь, тобто має в стовпчику ступені залежності нульове значення (відсутність зв'язків передування).

2. При обробці цієї поверхні всі зв'язки передування, що знаходяться в стовпчику цієї поверхні, віднімаються від значень, вказаних в стовпчику сумарних ступеней залежності. Результуючі значення описують новий стан деталі після першого етапу обробки. Для визначення наступної поверхні для обробки повторюється етап п.1, опісля чого процедура повторюється.

3. При наявності одночасно декількох поверхонь з нульовим ступенем залежності вони можуть бути оброблені на одному етапі або бути впорядкованими, враховуючи наступні додаткові вимоги:

- спочатку обробляють поверхню з найвищим ступенем технологічного наслідування, що створює умови для мінімізації кількості перевстановлень деталі;
- з-поміж таких поверхонь, якщо їх декілька, найпершою слід обробити ту, яка має найвищу точність координуючого розміру;
- якщо таких поверхонь декілька, то спочатку обробляють ту, яка є ближчою до бази відрахунку розміру, що зменшує холості приміщення.

Таким чином, рядок для поверхні 1, який має ступінь залежності 0, показує, що поверхня 1 не вимагає попередньої обробки інших поверхонь. Тому з неї треба почати обробку деталі. Після обробки поверхні 1 будуть реалізовані всі відношення передування, що є в стовпчику 1. У стовпчику матриці передування після виконання першого етапу обробки залишиться різниця стовпчиків B0 і 1, що відповідатиме нереалізованим відношенням передування. На другому етапі обробляють поверхні, для яких стали відсутні зв'язки передування, тобто поверхні, які отримали нульові ступені залежності (2,3). Повторюючи попередню процедуру з визначенням різниці стовпчиків B1 та (2+3), визначаємо поверхні для наступних етапів обробки. Як бачимо, деталь може бути оброблена в шість етапів B1 : B2 : B3 : B4: B5 : B6 згідно з матрицею, що формує етапи обробки.

	H1	H2	H3	1	2	3	4	5-ч	5ф	6	7	8	9	10	B0	B1	B2	B3	B4	B5	B6
H1	■														0	■	■	■	■	■	■
H2		■													0	■	■	■	■	■	■
H3			■												0	■	■	■	■	■	■
1	1			■											1	0	■	■	■	■	■
2				1	■										1	1	0	■	■	■	■
3				1		■									1	1	0	■	■	■	■
4		1	1	1			■								3	1	0	■	■	■	■
5ч				1			1	■							2	2	1	0	■	■	■
5ф				1			1	1	■						3	3	2	1	0	■	■
6									1	■	1				2	2	2	1	1	1	0
7				1			1				■				2	2	1	0	■	■	■
8				1			1					■			2	2	1	0	■	■	■
9									1				1	■	2	2	2	1	1	0	0
10				1			1							■	2	2	1	0	■	■	■

Другий етап проектування – генерування варіантів реалізації кожного етапу обробки. Зауважимо принагідно, що розмірність множини варіантів технологічного процесу нам вдалось суттєво знизити завдяки введенням обмежень передування, накладених на технологічні переходи. Однак багатоваріантність структури технологічного процесу ще залишається. Враховуючи визначену на попередньому етапі послідовність переходів, використовуємо для генерування варіантів технологічних операцій мережеву модель. Оскільки на цій структурі можна побудувати багато варіантів технологічного процесу обробки, які відрізнятимуться видом механообробного обладнання, різним ступенем концентрації обробки, паралельним чи послідовним виконанням окремих операцій, то на наступному етапі оптимізаційного синтезу необхідно генерувати множину можливих варіантів (рис. 3). При створенні із переходів технологічних операцій слід дотримуватись двох правил:

1. Будь-який технологічний перехід дозволено переносити при формуванні операцій на пізніші етапи обробки, але заборонено переносити на попередні етапи;
2. Дозволено об'єднувати сусідні етапи в один.

Перший крок – обробка основи 1 корпусу, яка може здійснюватися протягуванням або фрезеруванням на різних типах верстатів (вертикально, горизонтально або карусельно-фрезерний).

Другий крок – свердління отворів 4. Площини 2 і 3 можуть також оброблятися фрезеруванням або протягуванням, а також цекуванням, оскільки вони зв'язані з отворами 4 і 10. На третьому кроці обробляється отвір Ø60H8 на токарному, розточувальному або

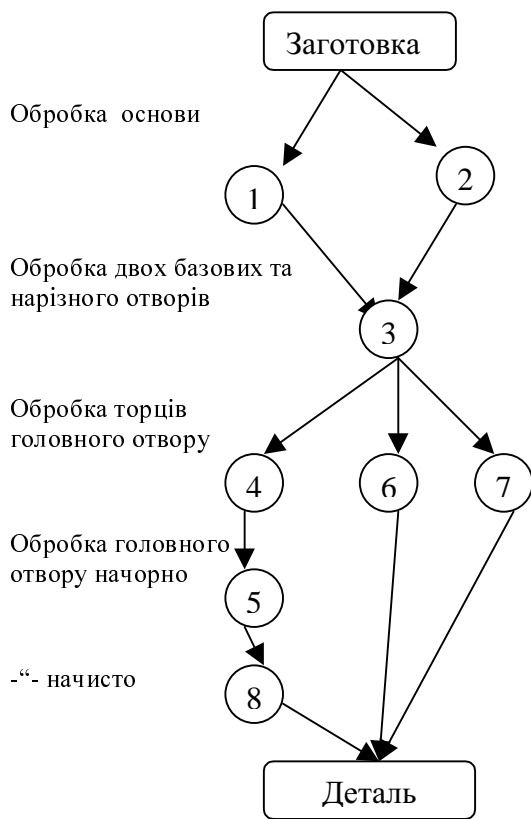


Рис. 3. Граф варіантів обробки корпусу:

1 – вертикально-протяжна; 2 – вертикально-фрезерна; 3 – свердлильна; 4 – горизонтально-фрезерна; 5 – свердлильна; 6 – токарна;

7 – розточувальна; 8 – протяжна

протягувальному верстатах. Бокові поверхні 7 і 8 можуть бути оброблені при точінні або розточуванні, але їх також можна обробити на горизонтально-фрезерувальному верстаті набором фрез. Варіанти реалізації цих кроків дають змогу сформувати мережеву модель технологічного процесу (рис. 4).

Третій етап – вибір оптимального варіанта технологічного процесу методом динамічного програмування за критерієм собівартості механічної обробки, тобто $C_T = \min$. Норми часу визначаються наближено [1]. Наприклад, тривалість обробки основи на вертикально-фрезерному верстаті визначається як $t_0 = 0,006 \cdot l = 0,006 \cdot 160 = 0,96 \text{ хв}$; $t_{um} = 1,5 \text{ хв}$.

Собівартість обробки визначається за допомогою нормативної собівартості, що задається в довідковій літературі для кожної моделі верстата [2]. Для визначення собівартості обробки корпусу, наприклад фрезеруванням, вибираємо верстат 6P10, нормативна собівартість роботи якого становить $C_H = 420$ коп. за 1 год. Тоді для визначення собівартості фрезерування основи корпусу отримаємо

$$C_T = \frac{1}{60} C_H \cdot t_{um} = 12,6 \text{ коп.}$$

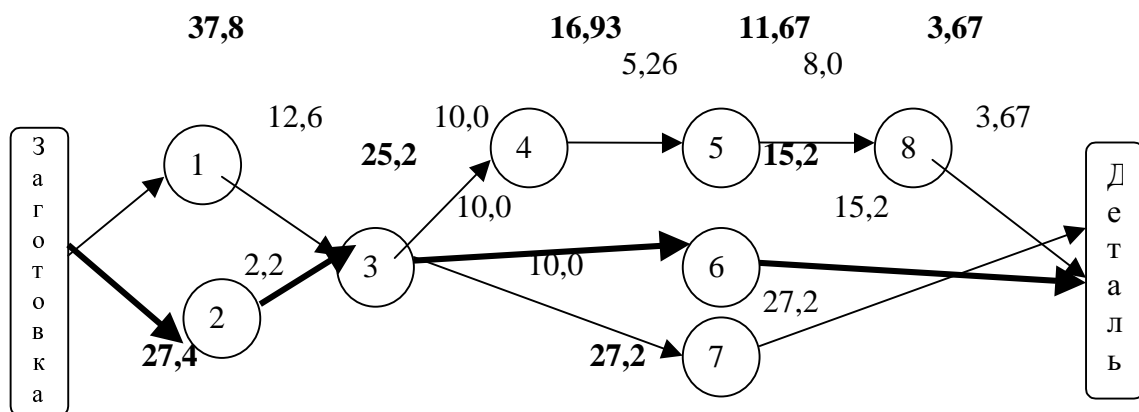


Рис. 4. Мережева модель структури технологічного процесу обробки корпусу опори

Для решти операцій значення собівартості зведено в табл. 1. За допомогою даних табл. 1 розмітимо мережеву модель структури технологічного процесу обробки корпусу опори (рис. 4.). Розмітка вершин графа здійснюється, починаючи з останньої операції, так: на кожній вершині відмітимо мінімальне значення технологічної собівартості, яке відповідає мінімальному шляху до неї із кінця технологічного процесу. Значення інших шляхів, які мають вищу сумарну технологічну собівартість, опускаємо.

Таблиця 1

Значення штучного часу та собівартості операцій обробки корпусу

Операція	1	2	3	4	5	6	7	8
Штучний час, хв	1,8	0,4	1,25	0,75	1,0	1,7	2,6	0,4
Модель верстата	6P10	7Д450	2Н118	6Р82Г	2Н118	1К62	2А620	7505
Собівартість роботи 1 коп.год	420	327	478	419	478	534	627	543
Собівартість обробки, коп.	12,6	2,2	10,0	5,26	8,0	15,2	27,2	3,67

Після проведення зворотного прогону графової моделі мінімальний шлях запам'ятовується і відмічається (на рис.4 – виділений). Отримана послідовність операцій 2–3–7 є оптимальним технологічним процесом, який забезпечує собівартість обробки 27,4 коп.

Таблиця 2

Оптимальний технологічний процес обробки корпусу опори

№ опер	Назва операції та зміст переходів	Модель верстата
05	Вертикально-протяжна. 1.Протягнути основу.	Протяжний, 7Д450
10	Свердлильна. 1.Свердлити 2 отвори Ø17 послідовно. 2.Зенкерувати 2 отвори Ø17 послідовно. 3.Цекувати 2 отвори Ø17 послідовно. 4.Свердлити отвір під різь М10. 5.Цекувати із зняттям фаски отвір під різь М10. 6.Нарізати різь М10.	Вертикально-свердлильний, 2Н118
15	Токарна. 1.Обробити торець. 2.Розточити отвір Ø60Н9 начорно. 3.Розточити отвір Ø60Н8 начисто. 4.Зняти фаску. 5.Обробити другий торець і зняти фаску	Токарно-гвинторізний, 1К62

Оптимальний технологічний процес складається із таких технологічних операцій (табл. 2). Розглянутий приклад показує методику застосування динамічного програмування для оптимізації структури складних об'єктів.

1. Горбачевич А.Ф., Шкред В.А. Курсовое проектирование по технологии машиностроения. Минск, 1983. 2. Расчеты экономической эффективности новой техники: Справочник // Под ред. К.М. Великанова. Л., 1990. 3. Руденко П.О. Проектування технологічних процесів в машинобудуванні. К., 1993. 4. Пальчевський Б.О. Технологічні основи гнучкого автоматизованого виробництва. Львів, 1994.