

В.І. Аверченков, д.т.н., проф.
Ю.М. Козаков, викл.
Брянський державний технічний університет (Росія)

АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ПРИ ЇХНІЙ БАГАТОВАРІАНТНОСТІ

Розглядаються принципи прийняття оптимальних технологічних рішень на етапі технологічної підготовки виробництва при їхній багатоваріантності. Пропонуються методи оцінки технологічності на основі моделювання технологічних процесів (ТП) в умовах САПР ТП, що дозволяє більш точно врахувати вплив виробничих і технологічних факторів.

Задачі підвищення якості виробів і відповідно ефективності конструкторсько-технологічної підготовки виробництва в умовах ринкової конкуренції є одними з найважливіших. При цьому якість виробів і проектних рішень багато в чому визначається обґрунтованістю прийнятих рішень.

Одним із напрямків підвищення ефективності промислового сектора економіки є застосування сучасних інформаційних технологій для інформаційної інтеграції процесів, що виконуються в ході всього життєвого циклу продукції, та її компонентів. Життєвий цикл (ЖЦ) продукту – сукупність процесів, що виконуються від моменту виявлення потреб суспільства у визначеній продукції, до моменту задоволення цих потреб й утилізації продукту [ISO 9004-1]. Одними з основних складових ЖЦ деталі є: проектування і розробка процесів, виготовлення й експлуатація. Аналіз сучасних досліджень і розробок в області технологічної підготовки виробництва (ТПП) дозволяє відзначити, що найбільший ефект може бути отриманий при комплексному рішенні поставлених задач. Для цього потрібен облік великої кількості технологічних і конструкторських критеріїв етапу виготовлення й експлуатації. Необхідно створення механізму, що дозволяє звести складові в єдину систему.

Досить актуальною ця проблема є на етапі технологічної підготовки виробництва (ТПП) при рішенні основних задач оцінки на технологічність і розробки технології виготовлення.

Традиційний розв'язок конструкторсько-технологічних задач розділений в часі, що знижує, взагалі, ефективність ТПП. Найбільш обґрунтоване та оптимальне рішення може бути прийняте при розв'язку цих задач у комплексі, таким чином оцінка технологічності деталей і виробу, в цілому, повинна бути присутня як параметр оптимізації при розробці технології виготовлення і зборки. Методи оцінки технологічності на основі моделювання ТП в умовах САПР ТП дозволяє більш точно врахувати вплив виробничих і технологічних факторів. При цьому оцінюється не тільки ТП, але й виникає можливість зміни конструктивних особливостей деталі. Як обмеження конструктивних змін деталей є забезпечення заданих експлуатаційних характеристик виробу в цілому.

Аналіз існуючих підходів з підвищення ефективності технологічної підготовки виробництва дозволив виділити ряд основних напрямків вирішення даної проблеми:

- формування і розробка ефективних структурно-функціональних схем конструкторсько-технологічних служб підприємства. При цьому можна відзначити розвиток інтеграційних процесів при рішенні задач технологічної підготовки виробництва;
- розробка методології оптимізації та оцінки при прийнятті технологічних рішень;
- розробка засобів автоматизації включаючи створення автоматизованих систем для комплексного рішення задач технологічної підготовки виробництва.

У загальному випадку вирішення даних задач представлено як перебування оптимального проектного рішення, обґрунтування рішень й автоматизації рішення задач, що виникають при цьому.

Розглядаючи етап технологічної підготовки, можна відзначити, що він є одним із ключових у процесі життєвого циклу виробу. На цьому етапі закладаються всі основні характеристики виробу, формується його якість. Від прийняття обґрунтованих рішень на даному етапі багато в чому залежать ефективність і витрати на інших етапах життєвого циклу.

В умовах наявності безлічі конструктивно-технологічних варіантів виготовлення деталі і суперечливості основних показників технологічності, задача вибору найбільш технологічної конструкції і відповідного оптимального варіанта виготовлення є багатокритеріальною і багаторівневою (рис. 1).

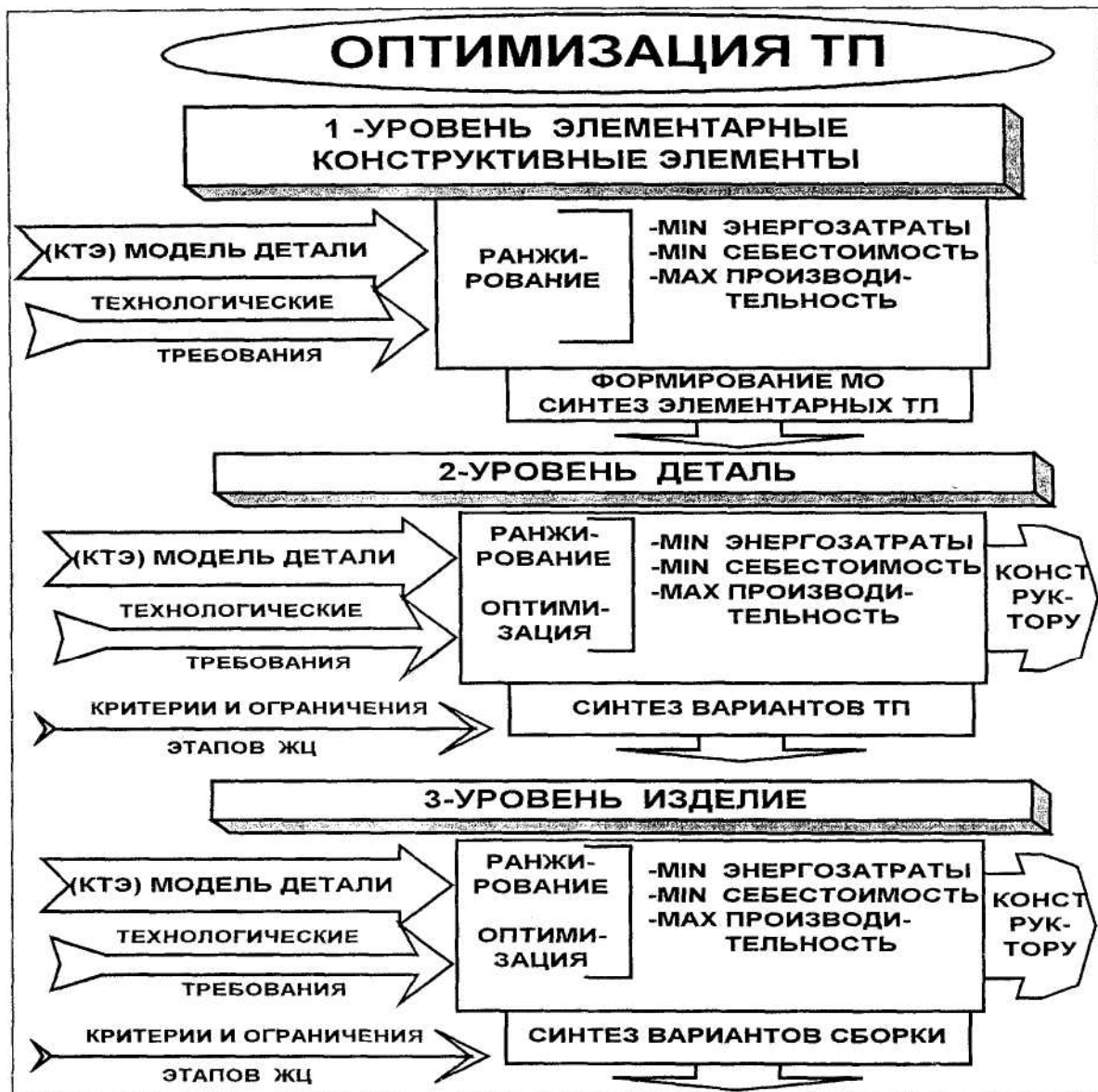


Рис. 1. Схема послідовності прийняття оптимального технологічного рішення

Результатом першого етапу є формування припустимих варіантів методів обробки (МО), комплексна оцінка технологічності поверхонь при обробці різними МО, проранжировані варіанти ТП обробки конструкторсько-технологічних елементів (КТЕ).

На наступних рівнях моделюється ТП виготовлення деталі. Базовою основою для його формування є технологічні процеси, що сформовані на першому рівні. На основі експертних оцінок формуються припустимі ТП обробки деталі, оцінюється технологічність конструктивного варіанта деталі та вибирається оптимальний варіант.

Для вибору оптимального МО повинна бути заданою у формалізованому вигляді область застосування та визначення його характеристик, тобто необхідно попередньо визначити границі його раціонального використання, при переході яких повинні прийматися якісно нові процеси обробки.

Визначення раціональної області застосування МО на основі експертних оцінок є задачею ухвалення рішення при нечіткій вихідній інформації. Рішення задач раціонального вибору альтернатив ґрунтується на методах математичного програмування. Задача ухвалення рішення математично може бути представлена безліччю припустимих альтернатив і заданих на цій безлічі відносин переваги, а її рішення, в загальному випадку, полягає у виборі припустимої альтернативи, найкращої для заданих відносин переваги. При цьому нечіткі цілі ухвалення рішення і безліч альтернатив розглядаються як підмножини єдиної безлічі альтернатив. Підмножина нечітких цілей безлічі альтернатив X описується функцією приналежності μ_c :

$$\mu_c : Y \rightarrow [0,1],$$

де X – єдина безліч альтернатив.

Таким чином, ступінь приналежності альтернативи X нечіткій безлічі мети μ_c визначає ступінь досягнення мети при виборі альтернативи X . При завданні додаткового ряду обмежень зважується задача досягнення нечіткої мети при заданих нечітких обмеженнях. Нечітка мета задається у вигляді підмножини C , безлічі оцінок (відгуків) вибору альтернатив Y :

$$\mu_c : Y \rightarrow [0,1]; \quad \varphi : X \rightarrow Y,$$

де φ – функція відображення;

Y – оцінки вибору відповідних альтернатив.

Нечітка безліч альтернатив $\overline{\mu_c}$, що забезпечує досягнення заданої мети, є прообразом нечіткої безлічі μ_c :

$$\overline{\mu_c}(x) = \mu_c(\varphi(x)).$$

Розв'язком задачі досягнення нечіткої мети буде перетинання безлічей мети й обмежень, а функція приналежності рішення буде мати вигляд:

$$\mu_v(x) = \min \{ \mu_c(x), \mu_o(x) \},$$

де $\mu_v(x)$ – функція приналежності рішень;

$\mu_o(x)$ – функція приналежності обмежень.

Функція приналежності рішення, коли заданий ряд цілей і обмежень при різному ваговому (ступінь важливості) відношенні буде визначатися таким виразом:

$$\mu_v(x) = \min \{ \alpha_1 \mu_{c1}, \dots, \alpha_k \mu_{ck}, \beta_1 \mu_{o1}, \dots, \beta_n \mu_{on} \},$$

де α, β – вагові коефіцієнти.

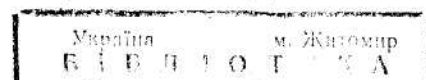
Вибір альтернативного рішення при цьому представляє визначення, що має максимальне значення функції приналежності $\mu_v(x)$ – максимізує рішення:

$$\max_{x \in X} \mu_v(x) = \max_{x \in X} \min \{ \mu_c(x), \mu_o(x) \}$$

Вибір МО на підставі експертних оцінок їхнього раціонального використання є задачею ухвалення рішення при нечіткій вихідній інформації. Явища (критерії), що визначають кінцевий результат, розглянуті при рішенні даного типу задач, мають різну природу і не піддаються безпосередньому виміру. Тому одним із етапів рішення є ранжирування і нормалізація результатів експертних оцінок. Для оцінки МО був запропонований метод парних порівнянь. Основою методу є формування матриці парних порівнянь, в якій число рядків і стовпців дорівнює числу порівнюваних факторів, а їхнє перетинання – це оцінка (відношення) порівнюваних факторів.

Як основні критерії оцінки МО запропоновані:

- порівняльна технологічність методів обробки;
- зіставлення МО за складністю форми обробки;
- зіставлення МО за складністю інструмента;
- зіставлення МО за твердістю оброблюваного матеріалу;
- зіставлення МО за складністю устаткування;
- зіставлення МО за можливістю їхньої автоматизації та механізації;
- зіставлення МО за витратами матеріалу;
- зіставлення МО за трудовитратами;



- зіставлення МО за енерговитратами;
- зіставлення МО за впливом на якість поверхні (за параметрами шорсткості, структурними змінами);
- зіставлення МО екологічним фактором тощо.

На першому етапі проводиться попарне порівняння відносних ваг критеріїв, виходячи з основної мети задачі. Для кожного критерію також визначаються відносні ваги попарного порівняння оцінюваних МО.

Відповідно представляються і результати попарного порівняння МО для кожного критерію. При цьому рішення зводиться до перебування власних ваг критеріїв і МО, що визначатимуться власним вектором матриці

$$Ax = \lambda x, (A - \lambda E)X = 0,$$

де X – власний вектор матриці;

E – одинична матриця;

λ – власне число матриці.

На наступному етапі виробляється упорядкування і ранжирування ваг критеріїв та методів обробки для кожного критерію, що отримані в результаті визначення власних векторів матриць попарного порівняння. Усереднена оцінка для групи експертів виходить як середньозважена сума їхніх оцінок.

При цьому введені критерії можна розглядати як функції мети. Вибір методу обробки є вибором альтернатив із обліком « n » функцій мети. Для цього визначається зважена сума заданих критеріїв і вибирається МО, що має максимальне значення отриманої суми.

Оцінку, що отримана групою експертів, можна вважати досить надійною тільки при гарній погодженості відповідей. Ступінь погодженості відповідей може бути визначена на основі коефіцієнта варіації, що є відношенням числа помітних пар подій до максимально можливого числа.

Погодженість відповідей експертів за декількома критеріями, що впливають на вибір МО, визначається за коефіцієнтом консордації W . Значення коефіцієнта змінюється від 0 до 1, значення близьке до «0» означає, що зв'язок між оцінками експертів малий, значення близьке до «1» – оцінки експертів збігаються:

$$W = \frac{S}{S_{\max}};$$

$$S = \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{j=1}^m x_{ij} - \frac{1}{2} m(n+1) \right\}^2;$$

$$S_{\max} = \frac{1}{2} nm^2 (n^2 - 1),$$

де S – сума квадратів різниць відхилень рангів;

x_{ij} – ранг i -го критерію, поставлений j -м експертом;

S_{\max} – сума квадратів різниць відхилень рангів при найкращій погодженості;

m – кількість експертів;

n – кількість критеріїв.

Наступний етап – оцінка МО за його характеристиками: видом і станом вихідної заготовлі, станом заготовлі після обробки, характеристиками процесу обробки. Під характеристикою вихідної заготовлі розуміється її стан до обробки і після обробки розглянутим МО:

характеристики матеріалу:

- вид матеріалу;
- твердість;
- міцність,

поверхні:

- вид оброблюваної поверхні;
- розміри оброблюваної поверхні;
- точність,

якість оброблюваної поверхні:

- шорсткість,

фізико-механічні властивості поверхні:

- залишкові напруги;
- мікротвердість.

До характеристик процесу відносяться режими обробки, продуктивність, енерговитрати. На основі аналізу принципів побудови компромісних схем оптимізації та характеристик МО запропонована багаторівнева структура оптимізації з низкою критеріїв [2, 3]. Кожна характеристика якості МО при цьому представлена інтервалом можливих значень і оформлена у вигляді функціональності чи залежності масиву.

Перший рівень оптимізації припускає вибір МО за характеристиками якості поверхні, тобто оцінкою придатності МО буде влучення кожного з необхідних значень якості поверхні в інтервал значень, що забезпечується цим МО. Для цього формується нормалізований вектор критеріїв з безрозмірними компонентами. Як оцінка МО виступає надійність забезпечення необхідного параметра, що виражається імовірністю його забезпечення та порівняння отриманої імовірності з заданою. Імовірність забезпечення має безрозмірний характер, що дозволяє поєднувати критерії та маніпулювати ними. Таким чином перший рівень оптимізації – пошук МО, що забезпечують виконання заданих параметрів МО з заданою імовірністю їхнього забезпечення.

Оцінюючи фізичний зміст показників МО, можна запропонувати три можливих варіанти їхньої оцінки. Перший варіант – найкращим є досягнення середнього значення інтервалу параметрів.

Критерієм даної умови є імовірність випадкової величини P , що відрізняється від "а" сильніше, ніж P^{TP} від "а":

$$P\{|P - a| > |P^{TP} - a|\},$$

де a – математичне очікування величини P ;

P^{TP} – необхідне значення величини P .

Якщо параметр має нормальний розподіл, то геометрично це можна представити заштрихованою областю (рис. 2).

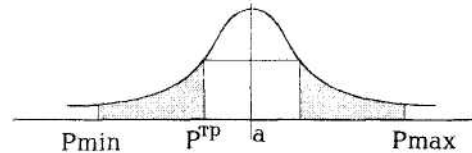


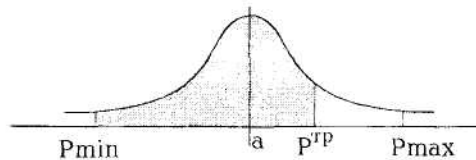
Рис. 2. Геометричне представлення імовірності забезпечення параметрів МО

Чим вища імовірність, тим надійніше досягається параметр P^{TP} :

$$P\{|P - a| > c\} = 1 - 2\Phi_0\left(\frac{c}{\sigma}\right),$$

де Φ – функція Лапласа.

Як приклади другого і третього варіантів можуть бути використані параметри, збільшення-зменшення яких є найбільш прийнятним для МО (рис. 3, 4).

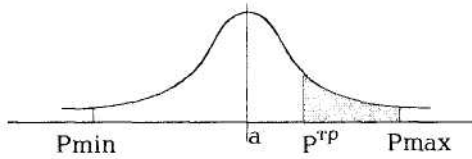


$$P\{P < P^{TP}\} = \frac{1}{2} + \Phi_0\left\{\frac{P^{TP} - a}{\sigma}\right\};$$

$$P\{P < P^{TP}\}.$$

Рис. 3. Геометричне представлення імовірності забезпечення параметрів МО

Так при виборі МО, в порівнянні з іншими МО, коли вони порівнюються за критерієм, збільшення якого більш сприятливе, критерієм виступає одностороннє значення ймовірності. Прикладом може бути вибір МО, що забезпечує найбільший ступінь наклепу або відносну опорну довжину профілю за інших рівних умов.



$$P\{P > P^{TP}\} = \frac{1}{2} - \Phi_0\left\{\frac{P^{TP} - a}{\sigma}\right\};$$

$$P\{P > P^{TP}\}.$$

Рис. 4. Геометричне представлення імовірності забезпечення параметрів МО

З огляду на різний вплив на експлуатаційні властивості виробів параметрів якості поверхні та її фізико-механічні властивості, пріоритети критеріїв і відповідно вагові коефіцієнти визначаються з умови забезпечення заданих експлуатаційних властивостей. Проективальник сам безпосередньо встановлює важливість того чи іншого параметра. Після визначення ступеня надійності забезпечення заданих параметрів здійснюється її порівняння із заданою величиною імовірності забезпечення параметрів:

$$P^3 \leq P^P,$$

де P^3 – задане значення імовірності забезпечення параметра A_i ;

P^P – розрахункове значення імовірності забезпечення параметра A_i .

При цьому отримані критерії мають безрозмірні значення. Потім будується вектор пріоритетів, визначаються вагові коефіцієнти й здійснюється згортка критеріїв. Для одержання узагальненого критерію використовується згортка критеріїв, отримана підсумовуванням окремих критеріїв із їхніми ваговими коефіцієнтами C_1, \dots, C_m :

$$\sum_{i=1}^m C_i = 1;$$

$$K_j = C_1 P_1 + \dots + C_m P_m.$$

Використовуючи даний метод згортки критеріїв, є можливість вибору оптимального МО, що одержав найбільший K_j , що має дуже малі окремі складові P_j . Таким чином обраний МО може бути критичним за будь-яким критерієм. Тому як узагальнений критерій використана функція мінімізації МО, що має малу імовірність за яким-небудь параметром, дає різке збільшення K_j і відповідно знижує можливості вибору його, як оптимального:

$$K = \frac{1}{C_1 P_1} + \dots + \frac{1}{C_m P_m}, \quad \frac{optM}{M \in \Omega_M} = \min(K).$$

Другий рівень оптимізації має на увазі вибір МО, що забезпечує мінімальні енерговитрати і максимальну продуктивність.

Через те, що забезпечувані параметри є випадковими величинами, що описані визначеними законами розподілу, і режими обробки для забезпечення цих параметрів мають деякі граничні інтервали, продуктивність і енерговитрати відповідно також будуть змінюватися в деякому інтервалі значень:

Аналізуючи поставлену задачу, можна запропонувати три підходи оптимізації.

1. Оцінка МО за мінімумом енерговитрат і відповідно максимумом продуктивності:

$$\begin{cases} \frac{optM}{M \in \Omega_M} = \min(Q); \\ \frac{optM}{M \in \Omega_M} = \max(\Pi). \end{cases}$$

2. Оцінка МО за середнім значенням продуктивності й енерговитратами:

$$\begin{aligned} \Pi'_{cp} &= \frac{\Pi'_{\min} + \Pi'_{\max}}{2}; & Q'_{cp} &= \frac{Q'_{\min} + Q'_{\max}}{2}; \\ \frac{optM}{M \in \Omega_M} &= \max(\Pi); & \frac{optM}{M \in \Omega_M} &= \min(Q). \end{aligned}$$

Можна представити три можливих варіанти порівняння МО (рис. 5). У першому випадку вибір МО не представляє утруднень. Середня оцінка (математичне очікування) є критерієм

вибору. В другому випадку є деяка імовірність, що буде обраний не оптимальний метод обробки. Однак ця імовірність менша, ніж імовірність вибору оптимального МО, і критерієм також може бути середнє значення. У третьому випадку середні оцінки є фактично однаковими, але МО «В» має більш широкий інтервал розподілу параметра (продуктивності, енерговитрат). Порівняння за середнім значенням параметра в даному випадку є не обґрунтованим критерієм. Третій підхід полягає в порівнянні за комплексним критерієм, що враховує ширину інтервалу:

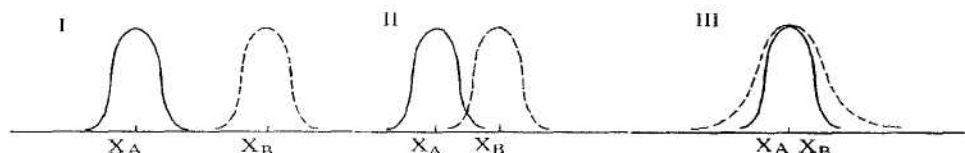


Рис. 5. Відносний розподіл параметрів МО

$$K^t = \Pi_{ep}^t - \frac{1}{3} \frac{\Pi_{max}^t - \Pi_{min}^t}{2}$$

Зміст цього критерію в тому, що від середнього значення відступають вліво на параметр нормального розподілу σ . При цьому, за умови нормального розподілу, гарантується досягнення продуктивності з імовірністю, не нижчою за 0,841. Оцінка МО в даному випадку формується, виходячи із середнього значення інтервалу та його ширини. Це наочно видно з наступного прикладу (рис. 6). $K_1 < K_2$, отже МО₂ є кращим, ніж МО₁.

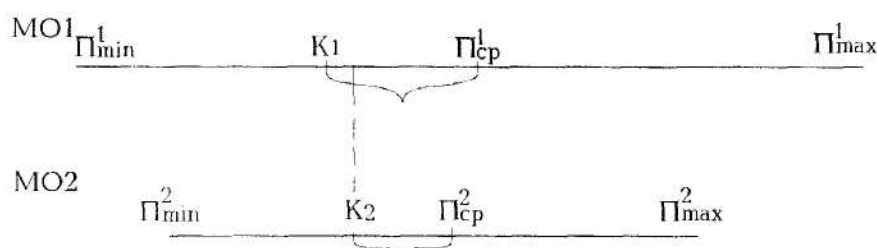


Рис. 6. Схема оцінки МО за комплексним критерієм

Усі запропоновані підходи вибору оптимального МО за продуктивністю й енерговитратами можна привести до єдиного критерію:

$$\Pi = \Pi_{min} + K \frac{\Pi_{max} + \Pi_{min}}{6};$$

$$Q = Q_{min} + K \frac{Q_{max} - Q_{min}}{6}.$$

Значення $K = 0, 3, 2$ – приводять формулу відповідно до варіантів 1, 2 і 3.

Для оптимізації МО за продуктивністю й енерговитратами обрані критерії нормалізуються, тобто приводяться до безрозмірного вигляду, визначаються вагові коефіцієнти і виробляється їхня згортка. Ваговий коефіцієнт у даному випадку визначає пріоритетність впливу чи енерговитрат продуктивності.

Узагальнений безрозмірний критерій буде представлений такою залежністю:

$$F_i = \lambda \frac{\Pi_i n}{\sum_{i=1}^n \Pi_i} + \frac{(1-\lambda) \sum_{i=1}^n Q_i}{n Q_i},$$

де λ – ваговий коефіцієнт.

При $\lambda = 0$ оцінка виробляється за енерговитратами, при $\lambda = 1$ оцінка виробляється за продуктивністю. Таким чином, найоптимальнішим буде МО, що має найбільше значення F .

ЛІТЕРАТУРА:

1. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. – М.: Наука, 1981. – 208 с.
2. Реклейтис Г., Рейвиндран А., Рэгсдел К. Оптимизация в технике: В 2. т. – М.: Мир, 1986.
3. Румишинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 192 с.

АВЕРЧЕНКОВ Володимир Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Технологія машинобудування", проректор з інформатизації Брянського державного технічного університету, Заслужений діяч науки Російської Федерації, академік Міжнародної академії інформації (Росія).

Наукові інтереси:

- автоматизація конструкторсько-технологічної підготовки виробництва з використанням інтегрованих САПР;
- застосування CALS-технологій;
- технологічне забезпечення якості машин;
- формалізація методів технологічного проектування.

КОЗАКОВ Юрій Михайлович – викладач Брянського державного технічного університету (Росія).

Наукові інтереси:

- автоматизація конструкторсько-технологічної підготовки виробництва з використанням інтегрованих САПР;
- математичне моделювання й оптимізація технологічних процесів;
- застосування CALS-технологій;
- автоматизація проектування технологічних процесів.

Подано 20.06 2001