УДК 621.9.02–761:658.5.011.56

В.М. Тонконогий, к.т.н., доц.
Одеський національний політехнічний університет

СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЄЮ НАНЕСЕННЯ ЗНОСОСТІЙКИХ ІОННО-ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТЬ

Розроблено АСУ процесом одержання різального інструмента із зносостійким іонно-плазмовим покриттям, яка підтримує два найголовніших етапи: вибір типу покриття та режимів його нанесення.

Нанесення зносостійких покрить на різальний інструмент дозволяє значно підвищити його стійкість, а отже, якість продукції та економічні показники виробництва, де застосовується обробка металів різанням [1]. Зносостійкі покриття наносять, як правило, в умовах вакууму, які, з одного боку, ставлять суворі вимоги до додержання розрахункових параметрів процесу, а з іншого, – створюють перешкоди безпосередньому спостереженню за інструментом, що оброблюється.

Застосування сучасних інтелектуальних технологій математичної підтримки АСУ процесом нанесення покрить дозволяє значно підвищити ефективність управління в умовах нечіткого формулювання початкової задачі. Зокрема, вже на першому етапі підготовки виробництва прийняття рішення про тип покриття (одношарове, багатошарове, композиційне) спирається, поряд із неперервними (швидкість різання, подача) та дискретними (матеріали деталі та інструмента, вид обробки: точіння, свердління, фрезерування тощо, характер обробки: чорнова, напівчистова, чистова, тип майбутнього виробництва: масове, серійне, індивідуальне) параметрами, на групи властивостей, які можна віднести до нечітких множин.

Розглянемо процес прийняття рішення про доцільність нанесення покриття, як рішення рівняння:

$$y = f_y \; x_1, x_2, \ldots, x_n \; , \qquad (1)$$

де y – деяка вихідна змінна, яка однозначно визначає прийняте рішення; $x_1, x_2, \ldots, x_n$ – вхідні змінні, на підставі яких, власне, і базується рішення.

Для якісних змінних $x_i \div x_n$ і y передбачається, що відомо множини всіх можливих значень:

$$U_i = \; v_i^1, \; v_i^2, \; \ldots, \; v_i^{q_i} \; , \; i = \overline{1, n} \qquad (2)$$

$$Y = \; y^1, y^2, \ldots, y^{q_m} \; , \qquad (3)$$

де $v_i^1 \; v_i^{q_i}$ – бальна оцінка, що відповідає найменшому (найбільшому) значенню вхідної змінної x_i; $y^1 \; y^{q_m}$ – бальна оцінка, що відповідає найменшому (найбільшому) значенню вихідної змінної *в*; q_i, $i = \overline{1, n}$ і q_m – потужності множин (2) і (3) [2].

Фазифікація змінних дозволила одержати наступні лінгвістичні оцінки і необхідні для їхньої формалізації функції належності. В множині з *n* змінних, прийнятих до уваги при ухваленні рішення про доцільність покриття, п'ять можна віднести до лінгвістичних якісних: x_1 – тип виробництва; x_2 – характер обробки; x_3 – матеріал інструмента; x_4 – конфігурація інструмента; x_5 – габарит інструмента. У нашому випадку $n = 5$, і інші параметри при виборі не розглядаються. Вихідна змінна y відповідає ухваленню рішення про доцільність нанесення зносостійкого покриття.

Для оцінки лінгвістичних змінних x_i, $i = \overline{1, \; 5}$ і y використані якісні терми з наступних терм-множин:

$A_i = \; a_i^1, \; a_i^2, \; \ldots, \; a_i^{l_i}$ – терми-множина змінної x_i, $i = \overline{1, \; 5}$;

$D = \; d_1, \; d_2, \; \ldots, \; d_m$ – терми-множина змінної *в*,

де a_i^p – *p-й* лінгвістичний терм змінної x_i; $p = \overline{1, l_i}$, $i = \overline{1, n}$; d_j – *j-й* лінгвістичний терм змінної *в*; *m* – кількість різних рішень у розглянутій області.

Запропоновано наступні терми-множини:

A_1 = {масове (М), крупносерійне (К), серійне (С), індивідуальне (І)};
A_2 = {чорнова (Г), напівчистова (П), чистова (Ч), фінішна (Ф)};
A_3 = {твердий сплав (Т), швидкорізальна сталь (Ш), складений (С)};
A_4 = {осьовий (О), дисковий (Д), крупнозубий (К)};
A_5 = {дрібний (Д), середній (С), великий (В), габаритний (Г)};

D = {нанесення покриття доцільно, нанесення покриття недоцільно}.

Як відомо [3], у випадку якісних лінгвістичних змінних x_i і y нечіткі множини a_i^p і d_j визначаються так:

$$a_i^p = \sum_{k=1}^{q_i} \mu^{a_i^p}\ v_i^k\ /\ v_i^k; \tag{4}$$

$$d_j = \sum_{r=1}^{q_m} \mu^{d_j}\ y^r\ /\ y^r, \tag{5}$$

де $\mu^{a_i^p}\ v_i^k$ – ступінь належності елемента $v_i^k \in U_i$ терму $a_i^p \in A_i$, $p=\overline{1,l_i}$, $i=\overline{1,n}$, $k=\overline{1,q_i}$; $\mu^{d_j}\ y^r$ – ступінь належності елемента $y^r \in Y$ терму-рішенню $d_j \in D$; $j=\overline{1,m}$; U_i і Y – визначаються співвідношеннями (2) і (3). У співвідношеннях (4) і (5) знаки суми позначають об'єднання пар $\mu\ u\ /\ u$.

Для побудови нечіткої бази знань, необхідної для рішення рівняння (1), виконана експертна оцінка комбінацій значень вхідних змінних з одночасною оцінкою функції належності $\mu^{a_i^{jp}}(x_i)$, що об'єднані в матрицю знань. При цьому лінгвістична оцінка a_i^{jp} вибирається з терм-множини, що відповідає змінній x_i, тобто $a_i^{jp} \in A_i$, $i=\overline{1,n}$, $j=\overline{1,m}$, $p=\overline{1,k_j}$.

Матриця знань визначає нечітку базу знань у вигляді системи логічних висловлень типу «ЯКЩО – ТО, ІНАКШЕ», що зв'язують значення вхідних змінних $x_1 - x_n$ з одним з можливих типів рішення d_j, $j=\overline{1,m}$. Вона може бути представлена у вигляді рівняння:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j}\left[\bigcap_{i=1}^{n} x_i = a_i^{jp}\right] \to y = d_j,\ j=\overline{1,\ 2}. \tag{6}$$

Таким чином, шукане співвідношення (1), що встановлює зв'язок між вхідними параметрами x_i і вихідною змінною *в,* формалізовано у вигляді системи нечітких логічних висловлень (6), що базується на матриці знань.

Функція належності $\mu^T\ x$ характеризує суб'єктивну міру (у діапазоні [0,1]) впевненості експерта в тім, що чітке значення *x* відповідає нечіткому терму *T*.

Будемо вважати відомими множину рішень $D = d_1,\ d_2$, що відповідають вихідній змінній *y*, множину вхідних змінних *X* = $x_1,\ x_2,\ ...,\ x_5$, функції належностей, що дозволяють представляти змінні x_i, $i=\overline{1,\ 5}$ у вигляді нечітких множин (4), а також матрицю знань.

Для розробки алгоритму прийняття рішення, що дозволяє фіксованому вектору вхідних змінних $X^* = \left\langle x_1^*, x_2^*, ..., x_5^* \right\rangle$, $x_i^* \in \left[\underline{x_i}, \overline{x_i}\right]$ поставити у відповідність рішення $y \in D$, будуємо систему нечітких логічних рівнянь на базі матриці знань або ізоморфній їй базі знань і обчислюємо значення функцій належності різних рішень при фіксованих значеннях вхідних змінних об'єкта. Як шукане вибирається рішення з найбільшим значенням функції належності.

Нехай $\mu^{a_i^{jp}}(x_i)$ – функція належності параметра $x_i \in \left[\underline{x_i}, \overline{x_i}\right]$, $i=\overline{1,\ 5}$ нечіткому терму a_i^{jp}; $i=\overline{1,\ 5}$; $j=\overline{1,\ 2}$; $p=\overline{1,k_j}$; $\mu^{d_j}\ x_1,\ x_2,\ ...,\ x_n$ – залежна від 5 змінних функція належності вектора вхідних змінних *X* = $x_1,\ x_2,\ ...,\ x_5$ значенню вихідної змінної $y = d_j$; $j=\overline{1,\ 2}$.

Зв'язок між цими функціями визначається нечіткою базою знань і може бути представлена у вигляді наступних рівнянь:

$$\mu^{d_m}\ x_1,\ x_2,\ ...,\ x_5 = \bigvee_{p=1}^{k_j}\left[\bigwedge_{i=1}^{5}\mu^{a_i^{jp}}(x_i)\right],\ j=\overline{1,\ 2}. \tag{9}$$

Ці нечіткі логічні рівняння отримані з нечіткої бази знань шляхом заміни лінгвістичних термів a_i^{jp} та d_j на відповідні функції належності, а операцій $\bigcap$ і $\bigcup$ – на операції $\wedge$ і $\vee$.

Ухвалення рішення $d^* \in D = d_1,\ d_2$, що відповідає вектору фіксованих значень вхідних змінних $X^* = \left\langle x_1^*,\ x_2^*,\ ...,\ x_5^* \right\rangle$, здійснюється у відповідності до наступного алгоритму.

Крок 1. Фіксується вектор значень вхідних змінних *X**.

Крок 2. Задається функція належності нечітких термів, використовуваних у нечіткій базі знань, і визначаються значення цих функцій для заданих значень вхідних змінних $x_1^* - x_5^*$.

Крок 3. З використанням логічних рівнянь (9) обчислюються багатомірні функції належності $\mu^{d_j}(x_1^*,\ x_2^*,\ \ldots,\ x_5^*)$ вектора *X** для всіх значень $d_j \in D;\ \ j = \overline{1,\ 2}$ вихідної змінної *в*. При цьому логічні операції І($\wedge$) та АБО ($\vee$) над функціями належності заміняються на операції min і max:

$$\mu(a) \wedge \mu(b) = \min[\mu(a),\ \mu(b)]; \tag{10}$$

$$\mu(a) \vee \mu(b) = \max[\mu(a),\ \mu(b)]. \tag{11}$$

Крок 4. Визначається значення d_j^*, функція належності якого максимальна:

$$\mu^{d_j}(x_1^*,\ x_2^*,\ \ldots,\ x_5^*) = \max_{j=\overline{1,\ 2}} \mu^{d_j}(x_1^*,\ x_2^*,\ \ldots,\ x_5^*). \tag{12}$$

Це і буде шуканим рішенням для вектора значень вхідних змінних $X^* = \left\langle x_1^*,\ x_2^*,\ \ldots,\ x_5^* \right\rangle$.

Таким чином, запропонований алгоритм використовує ідею ідентифікації лінгвістичного терма за максимумом функції належності й узагальнює цю ідею на всю матрицю знань.

Обчислювальна частина запропонованого алгоритму реалізована на матриці значень функцій належності, отриманої з матриці знань шляхом виконання операцій min і max.

На другому етапі задіяні методи інтелектуальної підтримки АСУ, які дозволяють в умовах багатофакторного швидкоплинного процесу іонно-вакуумного нанесення покриття приймати ефективні управлінські рішення в реальному часі. До таких методів, зокрема, відноситься метод віртуального об'єкта, застосування якого дозволяє використовувати для розрахунків температурних полів та напружено-деформованого стану елементів різального інструмента під час нанесення покриття сучасні швидкодіючі ППП [4].

Віртуальним об'єктом називають такий уявний (проміжний) стан об'єкта, який не може бути відтворений в реальній практиці, але на рівні моделі може бути використаний для потреб оптимізації при проектуванні та управлінні.

Віртуальні об'єкти в машинознавстві використовуються на всіх етапах життєвого циклу. З метою оптимізації конструкцій та умов експлуатації об'єктів машинобудування віртуальні об'єкти використовуються при проектуванні деталей оптимальної форми, проектуванні та експлуатації регенеруючих вузлів і деталей машин, а також з метою зниження часової складності управління швидкоплинними процесами.

За допомогою віртуального об'єкта на інформаційному рівні вирішували задачі підвищення якості і зниження термінів проектування і керування, а отже, і підвищення якості управління процесом нанесення зносостійкості покриття.

Реакція об'єкта на зовнішні впливи є функцією конструктивних ознак (форми і розмірів), властивостей матеріалів, що складають об'єкт, зовнішнього навантаження (механічного, термічного і т.п.) і часу.

Обчислювальна складність і точність розрахунку реакції $\mathbf{r}$ визначається конкретними математичними моделями об'єктів і прийнятими методами моделювання, тобто розв`язуючими алгоритмами.

Такий розрахунок відноситься до прямих рішень, коли з параметрів-причин – **(x; λ; q)** шукають параметр-наслідок – **r**, і результат яких завжди однозначний.

У прямої задачі є три зворотні:

– за відомою реакцією **r**, властивостями λ і впливом **q** розрахувати конфігурацію **x**;

– за відомою реакцією **r**, конфігурацією **x** і впливу **q** розрахувати властивості λ;

– за відомою реакцією **r**, властивостями λ і конфігурацією **x** розрахувати вплив **q**.

Зворотні задачі відносяться до класу некоректно поставлених. Вимоги коректності у даному випадку зводяться до такого формулювання. Необхідно знайти рішення за початковими даними $\mathbf{r}_{\text{ІД}}$, $\mathbf{x} = \mathbf{G}(\mathbf{r})$, де **G** – деякий оператор. Якщо **r** та **x** належать множинам **X** та **R**, для елементів яких визначене поняття відстані (метрики) $\mathbf{g}_x(\mathbf{x}_1,\ \mathbf{x}_2)$ і $\mathbf{g}_R(\mathbf{r}_1,\ \mathbf{r}_2)$, де $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \in \mathbf{X},\ \ \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2 \in \mathbf{R}$, тобто **X** і **R** – метричні простори, то повинні задовольнятися наступні три вимоги:

– існування: для всякого $\mathbf{r} \in \mathbf{R}$ існує рішення $\mathbf{X}$ з **X**;

– однозначності: рішення визначається однозначно;

– стійкості: рішення повинне безперервно залежати від початкових даних, тобто щоб для всякого $\varepsilon > 0$ можна було вказати таке δ (**ε**), що коли $\mathbf{g}_R(\mathbf{r}_1,\ \mathbf{r}_2) \le \delta$ і $\mathbf{x}_1 = \mathbf{G}(\mathbf{r}_1)$, $\mathbf{x}_2 = \mathbf{G}(\mathbf{r}_2)$, то $\mathbf{g}_x(\mathbf{x}_1,\ \mathbf{x}_2) \le \boldsymbol{\varepsilon}$.

Нехай, наприклад, для оптимізації певного об`єкта треба «рухатися» вздовж параметра А, але розв`язуючий алгоритм такий рух забороняє (заборона А). Нехай рухом вздовж параметра Б також можна оптимізувати об`єкт (назвемо цей процес *квазіоптимізацією*), але такий рух забороняє фізична або інша природа самого об`єкта (заборона Б).

В практиці реального моделювання заборона Б нездоланна: неможливо створити об`єкт, який, наприклад, складається *одночасно* з *різних* матеріалів або на який в одній точці *одночасно* діють сили *різної* величини. Метод віртуального об`єкта (МВО) такі ситуації дозволяє, роблячи заборону Б не абсолютною.

Тоді, якщо заборона Б менш жорстка, ніж заборона А, то, рухаючись у напрямку Б, знайдемо квазіоптимальний (віртуальний) об`єкт. Далі залишається фінішний перехід від квазіоптимального до оптимального об`єкта. Задача розв`язана, й жорстка заборона А обійдена. Результат – значне зниження часової складності оптимізації.

Управління об'єктом можливе, якщо він вже існує, а отже, його параметри $\mathbf{x}$ і $\boldsymbol{\lambda}$ незмінні. Пов'язані з цим розрахунки зводяться до зворотної процедури: знаходженню оптимальної функції керуючого впливу $\mathbf{q}^*(\tau)$ за відомими $\mathbf{x}$, λ, $r(\tau)$ і $\mathbf{r}^*$.

Зважаючи на перелічені параметри управління, використовують різні частинні методики методу, які відрізняються оптимізуємими і, відповідно, віртуальними параметрами, а також змістом фінішних переходів.

Важливим критерієм створення оптимального об'єкта є допустимість його реакції на плановані і (або) випадкові зовнішні дії. При оцінці проміжних і кінцевих результатів процесу управління система «об'єкт – дія» може розглядатися в статиці, тобто як система ($\mathbf{x}$; λ; $\mathbf{q}$), що має вектори параметрів конфігурації (розмірів) $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$ і властивостей $\boldsymbol{\lambda} \in \boldsymbol{\Lambda}$. На зовнішній вплив $\mathbf{q} \in \mathbf{Q}$ така система відповідає реакцією $\mathbf{r}$:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}\,(\mathbf{x};\ \lambda;\ \mathbf{q}), \qquad (13)$$

де $\mathbf{X}$, $\boldsymbol{\Lambda}$ і $\mathbf{Q}$ – множини, у межах яких при оптимізації системи допускаються зміни, відповідно, $\mathbf{x}$, $\boldsymbol{\lambda}$ і $\mathbf{q}$.

Нехай реакція $\mathbf{r}$, розрахована за (13), визнана АСУ неприпустимо далекою від ідеальної мети $\mathbf{r}_{ІД}$, і було прийнято рішення шляхом першої зворотної задачі змінити вектор конфігурації $\mathbf{x}$ на $\mathbf{x}^*$, так щоб вектор параметрів реакції набув значення $\mathbf{r}^*$:

$$\mathbf{r}(\mathbf{x};\ \lambda;\ \mathbf{q}) \to \mathbf{r}^*(\mathbf{x}^*;\ \lambda;\ \mathbf{q}) \in r_{ІД}\ \pm \delta/2, \qquad (14)$$

де δ – наперед заданий максимально припустимий «коридор», не обов'язково із скінченними границями в просторі параметрів, що складають $\mathbf{r}$.

Як і у випадку, описаному вище, рішення будь-якої задачі можна виконати двома методами, перший, *безпосередній* метод застосований, коли перетворення $\mathbf{X}$, що задовольняє умові (14), дозволено. Тоді вектор $\mathbf{x}^*$, якщо він взагалі існує, шукають, вирішуючи першу зворотну задачу:

$$\mathbf{x}^* = \mathbf{x}\,(\mathbf{r}^*;\ \lambda;\ \mathbf{q}). \qquad (15)$$

Розглянемо для даного випадку оптимізацію при обмеженнях в області розв'язуючих алгоритмів. Якщо безпосереднє перетворення (15) заборонено, то досягти $\mathbf{r}^*$ можна за допомогою методу віртуального об'єкта за рахунок введення додаткової проміжної операції – попереднього перетворення $\boldsymbol{\lambda}$ і (або) $\mathbf{q}$:

$$\mathbf{r}(\mathbf{x};\ \lambda;\ \mathbf{q}) \to \mathbf{r}^*(\mathbf{x};\ \lambda^*;\ \mathbf{q}) \in r_{ІД}\ \pm \delta/2; \qquad (16)$$

$$\mathbf{r}(\mathbf{x};\ \lambda;\ \mathbf{q}) \to \mathbf{r}^*(\mathbf{x};\ \lambda;\ \mathbf{q}^*) \in r_{ІД}\ \pm \delta/2; \qquad (17)$$

$$\mathbf{r}(\mathbf{x};\ \lambda;\ \mathbf{q}) \to \mathbf{r}^*(\mathbf{x};\ \lambda^*;\ \mathbf{q}^*) \in r_{ІД}\ \pm \delta/2. \qquad (18)$$

З (16)–(18) розв'язуються друга і третя зворотні виразу (13) задачі. В результаті цього рішення, обчислювальна складність яких також дуже велика, створюється проміжний додатковий стан системи – ($\mathbf{x}$; λ^*; $\mathbf{q}$), ($\mathbf{x}$; λ; $\mathbf{q}^*$) чи ($\mathbf{x}$; λ^*; $\mathbf{q}^*$), названий, як вказувалося вище, віртуальним об'єктом. Реальна реалізація цього стану не передбачається, і тому значення складових його параметрів можуть приймати будь-які, іноді чисто гіпотетичні величини.

Нехай $\boldsymbol{\lambda}^*$ і (або) $\mathbf{q}^*$ існують і на *першому* етапі методу віртуального об'єкта вони знайдені. Це означає, що вдалося досягти бажаного $\mathbf{r}^*$, але не за рахунок необхідної оптимізації форми, а шляхом віртуальної зміни властивостей $\boldsymbol{\lambda}^*$ і (або) зовнішніх впливів $\mathbf{q}^*$.

Перейдемо тепер до *другого* етапу, на якому $\mathbf{x}^*$ шукається як функція від розрахованих на першому етапі $\boldsymbol{\lambda}^*$і (або) $\mathbf{q}^*$:

$$\mathbf{x}^{*}=\mathbf{f}(\boldsymbol{\lambda}^{*};\mathbf{q})\ ;\quad \mathbf{x}^{*}=\mathbf{f}(\boldsymbol{\lambda};\mathbf{q}^{*})\ ;\quad \mathbf{x}^{*}=\mathbf{f}(\boldsymbol{\lambda}^{*};\mathbf{q}^{*})\,. \tag{19}$$

Формули (19) у явному вигляді чи інші методи розрахунку за цими рівняннями визначаються в кожному конкретному випадку в залежності від об'єкта управління, його фізичних моделей і прийнятих методів перетворень у його структурі та параметрах. Їхня обчислювальна складність на порядок менше складності рішення відповідних зворотних задач.

Як бачимо, у результаті одного з перетворень (19) виходить шуканий вектор **x***. Сумарна обчислювальна складність обох етапів – (16)–(18) і (19) мало чим відрізняється від складності одного етапу (16)–(18). Саме на останньому і вигідно застосовувати швидкодіючі методи обчислень, що накладають заборону на зміну **x**.

Застосування згаданих інтелектуальних технологій в практиці покриття різальних інструментів методом КІБ (іонне бомбардування у вакуумі) дозволило значно покращити якість виробництва як на етапі створення інструмента, так і в процесі його експлуатації. Оскільки різання як вид обробки використовується майже у всіх виробничих процесах, техніко-економічні перспективи такого підходу вельми значні.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Верещака А.С.* Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.
2. *Балан С.А., Становская Т.П., Становский А.Л.* Проектирование и управление в машиноведении. – Одесса: Астропринт, 2002. – 376 с.
3. *Ротштейн А.П.* Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. – Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 1999. – 320 с.
4. *Балан С.О., Становська Т.П.* Оптимізація при обмеженнях в області розв’язуючого алгоритму // Труды Одесс. политехн. ун-та. – 2000. – Вып. 3(12). – С. 106–110.

ТОНКОНОГИЙ Володимир Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, декан механіко-технологічного факультету Одеського національного політехнічного університету.

Наукові інтереси:

– автоматизовані системи управління технологічними процесами;

– знос та руйнування різальних інструментів із зносостійкими покриттями.

Тел. р.: (0482) 28-84-75,

д.: (0482) 34-56-98,

E-mail: vladimir@iptdm.ospu.odessa.ua.

Подано 25.02.2004

Тонконогий В.М. Система автоматизованого управління технологією нанесення зносостійких іонно-плазмових покрить

Тонконогий В.М. Система автоматизированного управления технологиею нанесения износостойкости ионно-плазменних покритий

УДК 621.9.02–761:658.5.011.56

Система автоматизованого управління технологією нанесення зносостійких іонно-плазмових покрить / В.М. Тонконогий

Розроблено АСУ процесом одержання різального інструмента із зносостійким іонно-плазмовим покриттям, яка підтримує два найголовніших етапи: вибір типу покриття та режимів його нанесення.

УДК 621.9.02–761:658.5.011.56

Система автоматизированного управления технологиею нанесения износостойкости ионно-плазменних покритий / В.М. Тонконогий

Разработано АСУ процесом содержания режущего инстремента из износостойкости ионно-плазменних покритий, который поддерживает два самых главных этапа: выбор покрития и режим его нанесения.