

УДК 621.9(075.8)

В.В. Ступницький, канд. техн. наук, доц.
Національний університет «Львівська політехніка», Україна
Тел./Факс: +38 (02) 2582501; E-mail: stupn@i.ua

УЗАГАЛЬНЕНИЙ АЛГОРИТМ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

В статті описаний алгоритм багатокритеріальної оптимізації структури та параметрів технологічних операцій і переходів залежно від особливостей функціонування виробу у складі машини чи технологічної системи та забезпечення виконання заданого, необхідного або граничного експлуатаційного потенціалу його роботи. Наведено методу формування адитивного критерію оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу.

Ключові слова: багатокритеріальна оптимізація, функціонально-орієнтована технологія, критерії оптимізації, алгоритм оптимізації.

1. Постановка проблеми в загальному вигляді і її зв'язок з важливими науковими і практичними завданнями

Класичний алгоритм *об'єктно-орієнтованого* технологічного проектування передбачає виконання ряду послідовних взаємопов'язаних етапів неітераційного низхідного структурно-параметричного синтезу. Спочатку на основі вхідних даних (макрогеометрична конфігурація деталі, матеріал, її розмірно-вагові характеристики, точність геометричних розмірів та взаєморозташування поверхонь, фізико-механічний стан функціональних поверхонь деталі, тип та організаційна форма виробництва) формується маршрут механічного оброблення виробу, потім визначається структура технологічних операцій, переходів, призначаються режими оброблення а відтак проектується або підбирається технологічне оснащення, інструмент тощо. При цьому технолог повністю абстрагується від проблем функціонального (експлуатаційного) характеру об'єкту виробництва, справедливо вважаючи, що призначення норм точності та якості – це прерогатива конструктора.

Основним критерієм формування оптимальної структури та параметрів *об'єктно-орієнтованого* технологічного процесу є забезпечення мінімальної собівартості виготовлення об'єкту виробництва (виробу) при дотриманні формалізованих показників якості (точності, шорсткості, фізико-механічних властивостей окремих поверхонь) та заданих виробничою програмою обсягів виготовлення продукції з урахуванням технологічної спадковості існуючого виробництва. Проте об'єктивні умови розвитку ринкової економіки визначають необхідність цільової орієнтації наукових досліджень, процесів проектування та виробництва виробів машинобудування на формування більш високого рівня якості, ніж у конкурентів протягом життєвого циклу (ЖЦ) продукції. В результаті поступового насичення ринку взаємозамінними виробами-аналогами *ефективність цінової конкуренції знижується, а нецінової* (як результат розширення та вдосконалення експлуатаційних властивостей) підвищується, що обумовлює актуальність пошуку нових критеріїв оцінки і технологій управління якістю різноманітних технічних систем на кожному з етапів ЖЦ. Структурність якості складає основу фундаментального для кваліметрії принципу функціонально-кібернетичної еквівалентності [3].

Головною особливістю *функціонально-орієнтованого проектування* є те, що первинним у формуванні структури та параметрів технологічних операцій і переходів є забезпечення комплексу функціонально-експлуатаційних властивостей виробу при дотриманні заданих параметрів точності, а також організаційних та техніко-економічних обмежень. У даному випадку функцією мети при прийнятті рішень про оптимальну структуру та параметри технологічного процесу є інтегральний кваліметричний критерій технічного рівня виробу, що системно характеризує зносостійкість, втомну міцність, корозійну стійкість тощо найбільш навантажених поверхонь виробу і отримується як результат формування мікротопології поверхневого шару, залишкових напружень та деформацій під час формоутворення цих поверхонь.

2. Аналіз досягнень і публікацій, в яких розпочато вирішення проблеми, виділення невіршених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується ця стаття

У роботі [3] доведена адекватність моделювання множини показників якості технологічної системи i -го виробу $\{F_i\} = \{q_1, q_2, q_3 \dots q_N\}$ і взаємопов'язаних зв'язків між ними $\{q_k \Leftrightarrow q_m\}$, як єдиної інформаційної системи при умові забезпечення обмежень $\{L_i\} = \{Q_1, Q_2, Q_3 \dots Q_S\}$. Згідно з принципом функціонально-кібернетичної еквівалентності, чим більше число модельованих показників якості N та обмежень S , тим вища альтитуда моделі, в результаті чого зменшується множина зв'язків $\{q_k \Leftrightarrow q_m\}$. На кожному рівні моделі, в якій не використовуються суб'єктивні експертні методи генерування технологічних рішень, потрібно враховувати тільки ті функціонально-експлуатаційні властивості, що характеризують систему в цілому, а також реалізувати аналіз альтернативних варіантів структурно-параметричних рішень за єдиним комплексним критерієм $K(F_i)$ технічного рівня. При цьому управління якістю проектування полягає в цільовій дії на елементи безлічі механічних властивостей об'єкту виробництва, що визначають відповідність проекту вектору критеріїв i -го виробу $\{F_i\}$. Вектор ознак якості i -го виробу $\{q_1, q_2, q_3 \dots q_N\}$ відображає певне поєднання результуючих параметрів проектування R_e і відповідає деякій точці Y в N -мірному абстрактному просторі Y_n . Адекватне відображення множини ознак якості Y на числову вісь [3]:

$$f : Y \rightarrow R_e \quad (1)$$

де $f \subset Y \cdot R_e$ - функціональне відношення, що визначає міру впливу функціонально-експлуатаційної якості деталі у виробі.

Аналіз літературних джерел за станом питання [3,5,7] показав, що на сьогоднішній день немає усталеної методики структурно-параметричної оптимізації технологічного процесу, сформованого за функціонально-орієнтованим принципом структурного синтезу. Запропоновані в [7] моделі носять узагальнений характер і потребують конкретизації та чіткої алгоритмічної формалізації.

3. Формулювання мети і постановка завдань роботи

Метою даної наукової публікації є опис алгоритму структурно-параметричної оптимізації технологічного процесу механічного оброблення виробів, сформованого на основі функціонально-орієнтованого принципу, що базується на прогностичних результатах аналізу реологічного моделювання напружено-деформованого та термодинамічного стану деталі в процесі її формоутворення. Формалізація рекурентних зв'язків між структурно-параметричними результатами технологічного проектування та

умовами експлуатації виробів дасть змогу забезпечити оптимальний комплекс їх кваліметричних показників засобами паралельного інжинірингу.

У статті поставлено завдання: розроблення методики вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу

4. Основний зміст і результати роботи

Непорожня підмножина якісних станів виробу, що забезпечують досягнення мети функціонально-орієнтованого технологічного проектування, відповідає простору, обмеженому за допомогою певних меж: $\sup q_n \cup \inf q_n \forall n = \overline{1, N}$, фізичний зміст яких обумовлений критеріями енергетичної ефективності, міцності, жорсткості, точності, надійності та інше. При цьому проектувальникові слід описати цю систему в термінах технічних характеристик об'єкту виробництва, тобто квантифікувати спільну мету на сукупність локальних критеріїв якості за умови забезпечення наперед сформульованих САЕ-системою обмежень.

Серед найбільш важливих характеристик кваліметричної ефективності $\{F_i\}$ технологічного процесу слід виділити наступні найбільш важливі локальні критерії, що характеризують умови функціонування певної j -ї поверхні ($j = \overline{1, J}$) i -ї деталі: зносостійкість (q_{ij1}); триботехнічна якість спряжень (q_{ij2}); втомна міцність (q_{ij3}); корозійна стійкість (q_{ij4}); мастильна утримуюча здатність (q_{ij5}).

Кожне поєднання вхідних даних для відповідного варіанту структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу відображається у N -мірному просторі зважених показників якості, за якими оцінюється відповідність виробу поставленим вимогам:

$$F_{opt} \{q_1, q_2, q_3 \dots q_N\} \rightarrow \max \quad (2)$$

Систематизація номенклатури та розрахункові формули найбільш важливих показників функціональної ефективності виробів, отриманих як результат реалізації функціонально-орієнтованих технологій машинобудування, подано в табл. 1

Прийняті в табл. 1 позначення: $I_{h_схолл}$; $I_{h_тепл}$; $I_{h_абр}$; $I_{h_втомн}$ - інтенсивність зношування за видами (схоплювання 1-го і 2-го роду, абразивне, втомне, відповідно); p - тиск на елементарній площині dA контакту визначеної форми; f - коефіцієнт тертя; τ_0 - опір зсуву; $HВ$ - твердість матеріалу по Брінелю; β - безрозмірний коефіцієнт зміцнення молекулярного зв'язку [9]; b_{ekv} - безрозмірний еквівалентний (по Дьомкіну [4]) параметр опорної поверхні; v_{ekv} - еквівалентний параметр степеневі апроксимації кривої Аббота; $R_{max_{ekv}}$ - еквівалентний параметр максимальної висоти мікронерівностей профілю; tm_{ekv} - еквівалентний параметр опорної довжина по середній лінії профілограми мікронерівностей профілю; c - безрозмірний коефіцієнт, що залежить від форми виступів мікронерівностей профілю [6]; σ_{eI}^+ , σ_{eI}^- - залишкові напруження I-го роду стиску і розтягу; σ_{eII}^+ , σ_{eII}^- - залишкові напруження II-го роду стиску і розтягу, що визначаються на основі аналізу реологічної моделі алотропних перетворень; σ_a - дійсне значення еквівалентного напруження на поверхні тертя, що визначаються на основі аналізу САЕ - моделі; t_y - коефіцієнт фрикційної втоми при пружному контакті спряжених поверхонь [8]; τ_m - час до

зменшення маси на одиницю площі на допустиму величину Δm ; v_m - швидкість зменшення маси внаслідок фретинг-корозійного руйнування поверхонь деталі; τ_l - час проникнення фретинг-корозії на допустиму (задану) глибину Δl ; v_l - лінійна швидкість корозії; k_{o1}, k_{o2} - константи, що характеризують фізичну адсорбцію та хемосорбцію атомів кисню на поверхні деталі [10]; N - навантаження на в зоні трибоконтакту; ζ - частота відносних коливань спряжених поверхонь; k_{o3} - коефіцієнт, що залежить від висоти виступів мікронерівностей профілю ($R_p k_{ekv} + R_{k_{ekv}}$); η - відносна площа трибоконтакту; α - коефіцієнт пружності мікровиступів; h_{kp} - гранична товщина мастильного шару в зоні трибоконтакту; h_{min} - мінімальна товщина мастильного шару; W_{max} - висота макронерівностей деталі в зоні трибоконтакту; X_{max} - величина похибки від взаємного розташування спряжених поверхонь по довжині трибоконтакту; k_S - емпіричний коефіцієнт пропорційності [8].

Узагальнена блок-схема алгоритму структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу наведена на рис. 1 і складається з таких етапів:

1. Етап інтерактивного внесення інформації (вхідних даних) в систему: моделювання виробу в CAD-системі та попередній інженерний аналіз в CAE-системі (блок 1)

2. Формування вихідного варіанту структури і параметрів технологічного процесу в CAPP-системі (блок 2).

3. Етап моделювання та аналізу напружено-деформованого стану виробу в процесі його формоутворення, реалізований в САF-системі (блок 5).

4. Етап розрахунку локального критерію - інтенсивності зношування функціональних поверхонь в імітованих умовах потенційного функціонування виробу в залежності від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення цих поверхонь (блоки 6-10).

5. Етап розрахунку локального критерію - коефіцієнту запасу за показником втомної міцності функціональних поверхонь деталі в умовах їх майбутньої експлуатації в залежності від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення цих поверхонь (блок 11).

6. Етап розрахунку локального критерію - показника залежності динамічної якості трибоспряжень функціонально-важливих поверхонь деталі в залежності від структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу їх формоутворення (блок 12).

7. Етап розрахунку локального критерію - параметру залежності корозійної стійкості (фретинг-корозії) поверхонь деталі в умовах потенційного функціонування виробу від структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення цих поверхонь (блок 13).

8. Етап розрахунку локального критерію - коефіцієнту запасу рідинного трибоконтакту функціональних поверхонь деталі в імовірних умовах їх функціонування у виробі в залежності від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу (блок 14).

9. Етап інтерактивного лінійного нормування кваліметричних критеріїв та поточного розрахунку функції мети вибраного структурно-параметричного варіанту функціонально-орієнтованого технологічного процесу (блок 15).

Табл. 1. Загальна характеристика типових показників функціональної ефективності виробів

Назва властивості	Показник	Залежність від відомих показників функціонально-орієнтованого технологічного проектування
Зносостійкість	Інтенсивність зношування I_{hj} функціональної поверхні за видами: $q_{ij1} = I_{hj}$ $\exists I_{hj} \rightarrow \forall (I_{h_столл} \wedge I_{h_метл} \wedge I_{h_обр}) \leq [I_{рухл}]$	$q_{ij1} = \frac{0,6(1 - \mu^2) \cdot F_a \cdot \lambda}{\sqrt{v_{ekv}} (\sqrt{v_{ekv}^2 - 1}) \cdot K_2 \cdot E \cdot n}$ $\sqrt{q_{ij1}} = \frac{\alpha \cdot b_{ekv} \cdot \varepsilon^{(v_{ekv}+1)} \cdot R_{max_{ekv}} \cdot \lambda_2}{(v_{ekv} + 1) \cdot n \cdot d}$ $\lambda = \left(\frac{\sigma_e + \sigma_{eII}^+}{\sigma_a} \right)^{t_y} \vee \lambda = \left(\frac{\sigma_e - \sigma_{eII}^-}{\sigma_a} \right)^{t_y}$ $q_{ij1} = F(b_{ekv}, v_{ekv}, R_{max_{ekv}}, t_{m_{ekv}}, \sigma_{eII}^+)$
Трибологічна якість спряжень (енергетичні втрати на тертя в спряжених поверхнях деталей машин)	Сила тертя F_S в трибоконтакті: $q_{ij2} = F_S = f(b_{ekv}, v_{ekv}, R_{max_{ekv}}, t_{m_{ekv}}) \times \int p dA_A$	$f = \frac{\tau_0}{HB} + \beta + 0,55 K \sqrt[3]{\frac{R_{max_{ekv}}}{v_{ekv}}} \cdot \left(\frac{2p_c}{HB} \right)^{1/2} \cdot v_{ekv}^{1/2}$ $q_{ij2} = F(b_{ekv}, v_{ekv}, R_{max_{ekv}}, t_{m_{ekv}})$

¹У випадку пружного контакту шортких поверхонь (коли умова Вільямсона-Грінвуда виконується)

²У випадку пластичного контакту шортких поверхонь (коли умова Вільямсона-Грінвуда не виконується)

Продолжение таблицы 1.

Назва властивості	Показник	Залежність від вихідних показників функціонально-орієнтованого технологічного проектування
Втомна міцність	<p>Коефіцієнт запасу n_{-1} по втомній міцності:</p> $q_{ij3} = n_{-1} = \frac{n_{\sigma} \cdot n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}}$ $n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_a \cdot n_{e\Sigma} + \psi_{\sigma} \cdot \sigma_m}; n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\tau_a \cdot n_{e\Sigma} + \psi_{\tau} \cdot \tau_m}$ $n_{e\Sigma} = \left(\frac{n_{eK}}{n_{eD}} + \frac{1}{n_{eR}} - 1 \right) \cdot \frac{n_{eZ}}{n_{eY}}$	$n_{eR} = 0,575 \cdot \left(1 - 0,22 \cdot \lg R_{max} \cdot \left(\lg \left(\frac{\tau_e}{20} \right) - 1 \right) \right) + 0,425$ $n_{eZ} = \frac{\sigma_{-1} + (\sigma_{eI}^+ + \sigma_{eII}^+)}{\sigma_{-1}} \cdot \sqrt[3]{n_{eZ}}, \sqrt[3]{n_{eZ}} = \frac{\sigma_{-1} - (\sigma_{eI}^- + \sigma_{eII}^-)}{\sigma_{-1}}$ $q_{ij3} = F(R_{max}, \sigma_{eI}^+, \sigma_{eII}^+)$
Корозійна стійкість	<p>Показники корозійної стійкості в об'ємному або лінійному еквіваленті:</p> $q_{ij4} = \left\{ \tau_m = \frac{\Delta l}{\nu_m} \vee \tau_1 = \frac{\Delta l}{\nu_1} \right\};$	$\Delta m = (k_{01} \cdot \sqrt{N} - k_{02} \cdot N) \cdot \frac{n_y}{5} + k_{03} \cdot \eta \cdot n_y \cdot N$ $N = K_3 \cdot \alpha \cdot t_m \cdot A_c \cdot B \cdot e^{\omega + \nu};$ $\eta = \alpha \cdot \frac{\sigma}{(\nu + \sigma)} \cdot t_m \cdot \frac{\nu}{(\nu + \sigma)} \cdot q_1 \cdot K_3 \cdot B \cdot \frac{(\nu + \sigma)}{\nu}$ $q_{ij4} = F(b_{ekv}, \nu_{ekv}, R_{k_{ekv}} + R_{k_{ekv}} \cdot t m_{ekv})$
Масильна утримуюча здатність	<p>Коефіцієнт запасу рідинного трибоконтакту:</p> $q_{ij5} = S = \frac{h_{min}}{h_{кр}}$	$h_{кр} = R_{max_{ekv}} + \sum W_{max} + \sum X_{max} + \sum Y_{max}$ $h_{min} = k_g \cdot R_{\nu_{ekv}}$ $q_{ij5} = F(R_{max_{ekv}}, R_{\nu_{ekv}})$

³ У випадку інтерференційного домінування залишкових напружень стиску першого і другого роду $\sigma_{eI}^+, \sigma_{eII}^+$

⁴ У випадку інтерференційного домінування залишкових напружень розтягу першого і другого роду $\sigma_{eI}^-, \sigma_{eII}^-$

10. Етап направленого пошуку альтернативних варіантів структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу за евристичними правилами (блоки 20-25).

11. Етап формалізації результатів структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу за системним кваліметричним критерієм (блок 26).

Розглянемо алгоритм структурно-параметричної оптимізації більш докладно.

Для кожної i -ї деталі, що включає в себе $j = \overline{1J}$ поверхонь в систему інтерактивно вносять конструкторську інформацію $\{Ef_{ij}\} \cap \|L_{ij} \wedge D_{ij}\| \cap \{TD_{ij}\} \cap \{Ra_{ij}\} \cap \{HB_{ij}\}$ про такі параметри, як геометрична форма $\{Ef_{ij}\}$ всіх $\forall j = \overline{1J}$ поверхонь деталі, їх розміри $\|L_{ij} \wedge D_{ij}\|$, параметри точності та шорсткості $\{TD_{ij}\} \cap \{Ra_{ij}\}$ та задані параметри міцності $\{HB_{ij}\}$ (блок 1 – рис.1). Крім того, формалізації підлягають фізико-механічні показники матеріалу даної деталі $Md_i = \{\sigma_{bi}; \sigma_{ti}; \sigma_{-1i}; \tau_{-1i}; E_i; G_i; ?_i; \lambda_i; t_{xi}\}$ та матеріалу спряжених з нею деталей $Md_{(i+1)} = \{HB_{(i+1)}; E_{(i+1)}; ?_{(i+1)}; \lambda_{(i+1)}\}$.

Важливим є також формальна інтерпретація особливих умов Um_i силового $\|Pr_i\|$ навантаження, динамічної $\|Dn_i\|$, кінематичної $\|Kn_i\|$, температурної $T_{i(i+1)}$ взаємодії та параметрів трибоконтакту $\|f_{i(i+1)}\|$ зі спряженими деталями у виробі а також кінематичних обмежень $\|Mz_i\|$, що встановлюються конструктором в процесі функціонування деталі: $Um_i = \{\|Pr_i\|; \|Dn_i\|; \|Kn_i\|; T_{i(i+1)}; \|f_{i(i+1)}\|; \|Mz_i\|\}$. Очевидно, що більшість цих показників визначається з статистичного або довідкового репозиторію даних.

В результаті реалізації етапу попереднього аналізу напружено-деформованого стану виробу у змодельованих умовах експлуатації, що реалізується у таких відомих CAE-системах, як CosmosWorks, Abaqus, SolidEdge, Catia, Unigraphics тощо, отримуємо імітаційно-аналітичні картини нормальних та тангенціальних напружень, деформацій та термодинамічного стану виробу: $\{\sigma_{oij}; \tau_{oij}; \Delta_{oij}; T_{oij}\}$. Реалізація даного етапу обумовлена необхідністю формування бази даних з оперативної аналітичної інформації для подальшого розрахунку локальних критеріїв - кваліметричних показників виробу в результаті формування макрогеометричних та залишково-деформаційних параметрів окремих поверхонь в процесі їх формоутворення.

Формування альтернативних варіантів структури і параметрів технологічного процесу (блок 2) в *CAPP*-системі (*ComputerAidedPlanningProduction*) – важливий і невід’ємний етап оптимізації. Під час реалізації цього етапу формується базовий маршрут оброблення i -ї деталі як сукупність технологічних операцій x -ї структури: $M_i = \{O_{ix}(var)\}$. Кожна така операція характеризується кортежем параметрів (технологічних переходів): $O_{ix} = \{P_{ixy}(var) \forall x = \overline{1, X}\}$, що визначаються показниками: швидкості різання $V_{ixy}(var)$, подачі $S_{ixy}(var)$, глибини різання $t_{ixy}(var)$ та параметрами інструмента $Ins_{ixy}(var)$:

$$P_{ixy} = \{V_{ixy}(var) \wedge S_{ixy}(var) \wedge t_{ixy}(var) \wedge Ins_{ixy}(var) \forall y = \overline{1, Y}\} \quad (3)$$

Причому формальна характеристика інструмента не обмежується лише геометричними показниками різального леза $\gamma_{ixy}(\text{var}), \alpha_{ixy}(\text{var}), \varphi_{ixy}(\text{var})$, але включає також вибір інструментального матеріалу та типу покриття $\text{Mins}_{ixy}(\text{var})$:

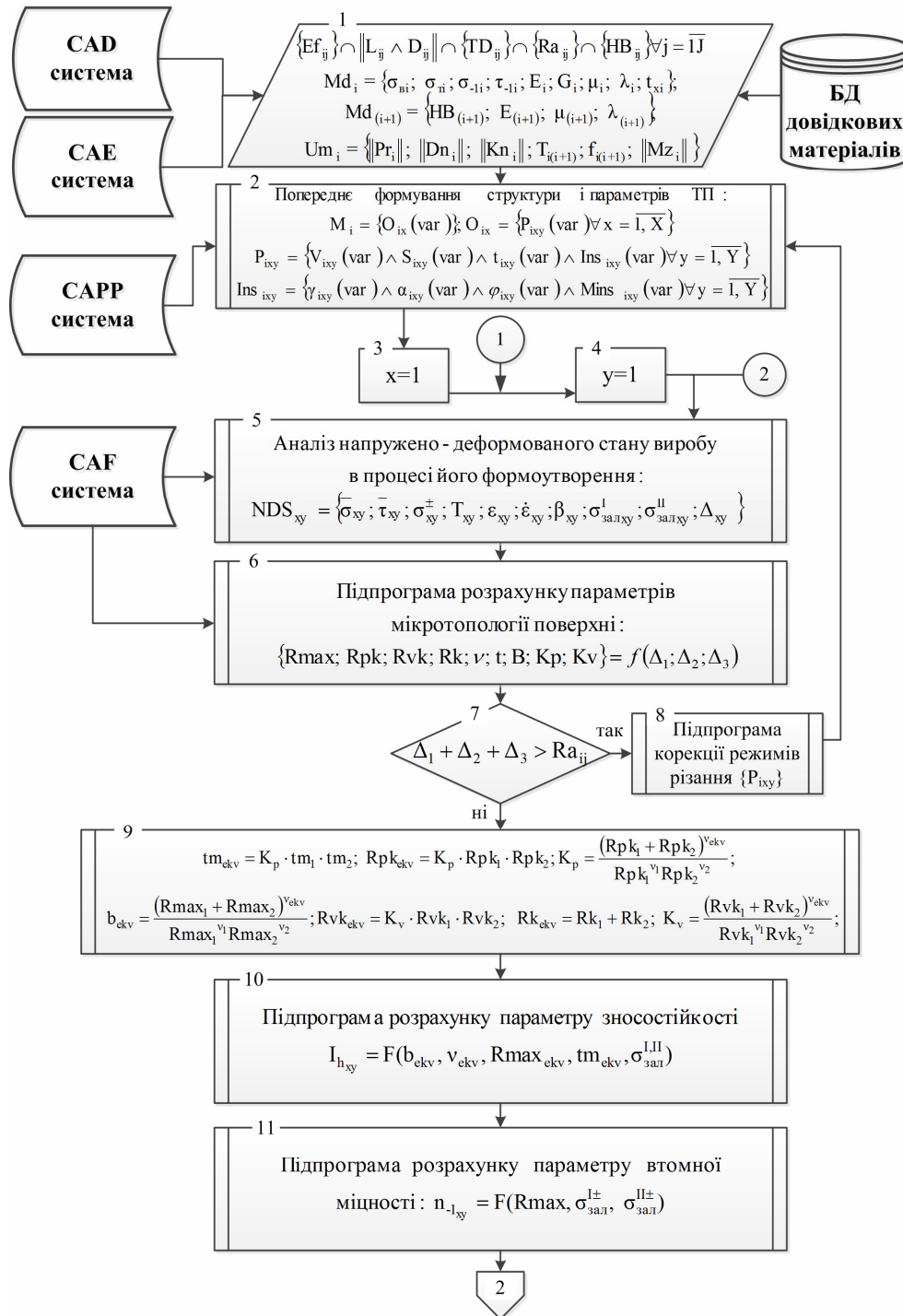


Рис.1. Блок-схема алгоритму структурно-параметричної оптимізації функціонально-орієнтованого технологічного процесу



Рис. 1. (продовження)

$$Ins_{ixy} = \{V_{ixy}(var) \wedge \alpha_{ixy}(var) \wedge \phi_{ixy}(var) \wedge Mins_{ixy}(var) \forall y = \overline{1, Y}\} \quad (4)$$

Попереднє формування альтернативних варіантів структури та параметрів технологічного процесу відбувається на основі методології прототипування [7] і включає в себе ряд формальних процедур ідентифікації геометричної форми об'єкту виробництва $\{Ef_{ij}\}$ всіх $\forall j = \overline{1, J}$ поверхонь деталі, аналізу їх розмірів $\|L_{ij} \wedge D_{ij}\|$, параметрів точності та шорсткості $\{TD_{ij}\} \cap \{Ra_{ij}\}$ та заданих параметрів міцності $\{HB_{ij}\}$

(див. блок 1 даного алгоритму). Найбільш наближений аналог уніфікованого технологічного процесу, що є в базі даних САРР-системи, узгоджується та адаптується до вхідних даних з врахуванням технологічної спадковості існуючого виробництва на основі логічних формалізованих процедур.

Далі для кожного x -го варіанту структури технологічної операції і y -го варіанту технологічного переходу в САР-системі імітаційно моделюється картина напружено-деформованого стану NDS_{xy} (блок 5) відповідної поверхні (в т.ч. залишкові параметри напруження I і II роду та деформації) в процесі її формоутворення: $NDS_{xy} = \{ \bar{\sigma}_{xy}; \bar{\tau}_{xy}; \sigma_{xy}^{\pm}; T_{xy}; \varepsilon_{xy}; \dot{\varepsilon}_{xy}; \beta_{xy}; \sigma_{залxy}^I; \sigma_{залxy}^{II}; \Delta_{xy} \}$. Детально методика та математичний апарат формування результатів такого моделювання викладено в роботах [1,2].

На основі цих розрахунків послідовно визначають геометрико-кінематичну складову мікронерівності Δ_1 , вібраційну складову Δ_2 та деформаційну складову Δ_3 . Така постановка задачі дозволяє формалізувати процес формування мікронерівностей профілю як множини параметрів мікротопології поверхні: $\{R_{max}; R_{pk}; R_{vk}; R_k; v; t; B; K_p; K_v\} = f(\Delta_1; \Delta_2; \Delta_3)$ (блок 6). При цьому важливо перевірити умову (блок 7): $\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 > Ra_{ij}$. У випадку її дотримання, слід повернутись до формування параметричних вхідних даних (блок 8).

При моделюванні трибоконтракту в системі microCAE [9], параметри мікротопології поверхонь повинні бути змінені, приймаючи до уваги необхідність формалізації еквівалентної поверхні у відповідності до моделі Дьомкіна [4] – блок 9. При цьому еквівалентна несуча площа контакту залежить від навантаження на трибоспряження в ступені, що змінюється від 0,2 до 1,0, причому домінуючий вплив має саме форма мікронерівностей, а не їх висотні та крокові параметри [9].

На етапі розрахунку локального критерію - інтенсивності зношування функціональних поверхонь важливим є визначення умов функціонування трибоконтракту за критерієм Грінюда-Вільямсона [8]. У відповідності до виконання

умови: $\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 > 0,89 \cdot ?_i \cdot \left(\frac{H_i}{E_i} \right)^2$, розраховується показник зносостійкості

$I_{h_{xy}} = f(?_i, \lambda_{xy}, v_{ekv}, R_{max_{ekv}}, E_{ekv}, b_{ekv}, tm_{ekv}, \sigma_{\delta II}^{\pm})$ на основі пружного або пружно-пластичного контакту спряжених поверхонь (табл.1) [8].

Для розрахунку локального критерію - коефіцієнту запасу за показником втомної міцності n_{-1} функціональних поверхонь деталі в умовах їх майбутньої експлуатації в залежності від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу формоутворення цих поверхонь застосовують формулу Гафа і Поларда [6]. Попередньо, з врахуванням гіпотетичного домінування нормальних або крутих напружень, повинні бути розраховані такі параметри, як коефіцієнт концентрації напружень $n_{\delta K}$; коефіцієнт впливу геометричних розмірів деталі $n_{\delta D}$; коефіцієнт впливу шорсткості поверхні $n_{\delta R}$; коефіцієнт впливу залишкових деформацій, що виникатимуть в результаті механічного оброблення деталі $n_{\delta Z}$. Відтак для деталі, працюючої в умовах циклічної зміни нормальних чи дотичних напружень, обчислення коефіцієнтів запасу міцності виконують по формулах, наведених в табл.1.

Локальний критерій триботехнічної якості спряжень (блок 12) (що визначається як енергетичні втрати на тертя в спряжених поверхнях деталей машин) характеризується таким важливим показником як коефіцієнт тертя, що залежить від мікротопології спряжених поверхонь: $F_s = f(b_{ekv}, v_{ekv}, R_{max_{ekv}}, tm_{ekv})$.

Алгоритм розрахунку локального критерію корозійної стійкості функціональних поверхонь деталі в умовах їх майбутньої експлуатації в залежності від варіативної структури та параметрів функціонально-орієнтованого технологічного процесу

формування (блок 13) передбачає розрахунок параметру інтенсивності фретинг-корозійного руйнування цих поверхонь в об'ємному або лінійному еквіваленті

$$\tau_m = \frac{\Delta m}{v_m} \vee \tau_1 = \frac{\Delta l}{v_1} \quad (\text{табл.1}).$$

Оскільки мікроступи лінійно рухаються по поверхні металу зі швидкістю v , причому кожен з них оголяє поверхню чистого металу і проробляє борозну з усередненою глибиною $(R_{pk_{ekv}} + R_{k_{ekv}})$, це і є приводом для констатації факту впливу мікротопології обробленої поверхні на явища корозійного руйнування. Причому процес руйнівного окислення відповідає логарифмічному закону Г.Уліга [10].

Розрахунок локального критерію – мастильної утримуючої здатності функціональних поверхонь деталі (блок 14) визначається коефіцієнтом запасу S рідинного трибоконтакту [8]. Цей показник визначається як відношення мінімальної товщини мастильного шару h_{min} до критичної мінімальної товщини мастильного шару $h_{кр}$, дотримання якого є основною умовою переходу рухомих спряжених поверхонь з сухого або напіврідинного режиму в режим рідинного змащування. Причому мінімальна товщина мастильного шару h_{min} формується, виходячи не тільки з конструктивних параметрів опорних поверхонь трибоспряжень, якості мастила та динаміки роботи механізму, у склад якого входить виріб, а також з врахуванням мікротопології поверхонь спряження: $h_{min} = f(R_{max_{ekv}}, Rv_{ekv})$ (табл.1)

Підпрограма призначення евристичних коефіцієнтів ваги: $\{\alpha_n \forall n=1,5\}$ передбачає також розрахунок нормалізованих локальних критеріїв оптимізації Q_n (блоки 15-16) за показником зносостійкості Q_1 ; за коефіцієнтом запасу втомної міцності Q_2 ; за параметром триботехнічної якості спряжень Q_3 ; за параметром корозійної стійкості Q_4 ; за коефіцієнтом запасу рідинного трибоконтакту Q_5 . Остаточний узагальнений критерій оптимізації F_{xy} (блок 17), визначається за формулою:

$$F_{ixy} = \sum_{n=1}^5 Q_{in} \quad (5)$$

Алгоритм направленої пошуку альтернативних параметрів у-готехнологічного переходу x -ї операції: $P_{ix(y+1)} = \{V_{ix(y+1)}(\text{var}); S_{ix(y+1)}(\text{var}); t_{ix(y+1)}(\text{var}); Ins_{ix(y+1)}(\text{var})\}$ (блок 22) та генерування альтернативних варіантів структури технологічного процесу: $M_{i(x+1)y} = \{O_{i(x+1)y}(\text{var})\}$ (блок 25) відбувається за евристичними правилами і виконується у такий спосіб:

1. Вибрану згідно результатів роботи САРР-системи (блок 2) подачу коректують спочатку в напрямку зростання: $S_{ix(y+1)}(\text{var}) = S_{ixy} + \Delta S_{ixy}$ (блок 6).

2. Якщо розрахований (блок 16) узагальнений критерій оптимізації зменшується ($F_{x(y+1)} < F_{xy}$), то подачу коректують в напрямку зменшення: $S_{ix(y+1)}(\text{var}) = S_{ixy} - \Delta S_{ixy}$. Це відбувається шляхом присвоєння кроку ΔS_{ixy} негативного значення.

3. Виконання цих ітерацій виконують до тих пір, поки значення критерію $F_{x(y+1)}$ не буде оптимізоване (стане максимальним), або подача не вийде за межі умов, що регламентують міцність різального інструменту, допустиму жорсткість заготовки, та граничне значення потужності різання.

4. Аналогічно до пп. 1-3 оптимізують глибину різання та частоту обертання шпинделя.

5. Структурний синтез альтернативних варіантів функціонально-орієнтованого технологічного процесу передбачає необхідність включення в поточний процес кожної операції і переходу уніфікованого ТП, яким відповідає логічна функція, що враховує ідентифікацію або граничне наближення геометричних особливостей оброблюваних поверхонь, баз заготовки, необхідну точність оброблення, якість поверхні, габаритні розміри реальної оброблюваної деталі: $\{Ef_{ij}\} \cap \|L_{ij} \wedge D_{ij}\| \cap \{TD_{ij}\} \cap \{Ra_{ij}\} \cap \{HB_{ij}\}$ тощо до деталі-представника цього уніфікованого ТП. Повний перебір варіантів виконується до виконання умови ($F_{(x+1)y} > F_{xy}$) при дотриманні обмежень техніко-економічного характеру.

5. Висновки

1. На основі аналізу літературних джерел доведено, що на сьогоднішній день немає усталеної методики структурно-параметричної оптимізації технологічного процесу сформованого за функціонально-орієнтованим принципом структурного синтезу.

2. Функцією мети при прийнятті рішень про оптимальну структуру та параметри функціонально-орієнтованого технологічного процесу є інтегральний кваліметричний критерій технічного рівня виробу, що системно характеризує зносостійкість, втомну міцність, корозійну стійкість тощо найбільш навантажених поверхонь виробу і отримується як результат формування мікротопології поверхневого шару, залишкових напружень та деформацій під час формоутворення цих поверхонь.

Перелік літератури:

1. Stupnytskyu Vadym. Computer Aided Machine-Building Technological Process Planning by the Methods of Concurrent Engineering// Europäische Fachhochschule: Wissenschaftliche Zeitschrift - Stuttgart:ORT Publishing,- № 3.- 2013 (Marzs-April). Section 13. -P.346-354.

2. Stupnytskyu Vadym. Features of Functionally-Oriented Engineering Technologies in Concurrent Environment // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 2 Issue 9, September – 2013.- P.1181-1186.

3. Гутыря С.С. Системное моделирование качества механизмов и машин// Труды Одесского политехнического университета. – Одесса.- 2003. – Вып. 2 (20). – С. 14 – 21

4. Демкин Н.Б., Рыжов Э.В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. -224 с.

5. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.

6. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: Физматлит, 2007. – 368 с.

7. Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки – Киев: Наук. думка, 1989. – 192 с.

8. Сафонов Б.П., Бегова А.В. Инженерная трибология: оценка износостойкости и ресурса трибосопряжений. -Новомосковск. Изд-во МХТУ им. Менделеева, 2004. - 65 с.

9. Ступницький В.В., Махоркін Є.М. Триботехнічний критерій формування функціонально-орієнтованої технології виготовлення деталей в машинобудуванні // Збірник наукових праць Луцького національного технічного університету «Наукові нотатки». – Луцьк. 2013, – Вип. №42. – с. 305-313.

10. Улиг Г.Г., Рєви Р.У. Коррозия и борьба с ней /Под ред. А.М.Сухотина. - Л.: Химия, 1989. -456 с.

Надійшла до редакції 12.02.2014

В.В. Ступницький

ОБОБЩЕННЫЙ АЛГОРИТМ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

В статье описан алгоритм многокритериальной оптимизации структуры и параметров технологических операций и переходов в зависимости от особенностей функционирования изделия в составе машины или технологической системы и обеспечения выполнения заданного, необходимого или предельного эксплуатационного потенциала его работы. Приведена методика формирования аддитивного критерия оптимизации.

Ключевые слова: многокритериальная оптимизация, функционально-ориентированная технология, критерии оптимизации, алгоритм оптимизации.

V. Stupnytskyu

GENERALIZED STRUCTURAL-PARAMETRIC OPTIMIZATION ALGORITHM OF A FUNCTIONAL-ORIENTED PROCESS

The paper considers an algorithm of multicriterial optimization of structure and parameters of technological operations and machining steps depending on the peculiarities of functioning of the product as a part of a machine or process system. A method of additive optimization criterion formation is provided.

Keywords: multicriterial optimization, function-oriented technology, optimization criteria, optimization algorithm.