УДК 621.313:519.863
К 40

МЕТОД КВАЗІКОНСТАНТ

О. Ю. Кімстач, канд. техн. наук, доц.

Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв

Анотація. Розглянуто метод квазіконстант, призначений для параметричної оптимізації об'єктів електромеханіки. Проаналізовано вибір незалежних змінних та критеріїв оптимізації. Наведено алгоритм виконання уточнення результату оптимізації при методі квазіконстант.
Ключові слова: метод квазіконстант, параметрична оптимізація, електромеханіка, цільова функція.

Аннотация. Рассмотрен метод квазиконстант, предназначенный для параметрической оптимизации объектов электромеханики. Проанализирован выбор независимых переменных и критериев оптимизации. Приведен алгоритм выполнения уточнения результата оптимизации при методе квазиконстант.
Ключевые слова: метод квазиконстант, параметрическая оптимизация, электромеханика, целевая функция.

Abstract. The quasi-constants method intended for parametrical optimization of electromechanics objects is considered. The choice of independent variables and optimization criteria is analysed. In terms of the quasi-constants method the algorithm of correction of the optimization result is brought.
Keywords: quasi-constant method, parametrical optimization, electromechanics, objective function.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В умовах жорсткої конкуренції сучасне проектування об'єктів електромеханіки (ОЕ) потребує застосування оптимізації для отримання найбільш високотехнологічної продукції [7, 10].

Виконання будь-якого завдання оптимізації починається з визначення мети оптимізації, тобто формулювання вимог до об'єкта оптимізації. Від того, наскільки правильно виражені ці вимоги, залежить можливість реалізації поставленої мети [8].

Основна проблема постановки екстремальних завдань — формулювання цільової функції (ЦФ)

$$Y(\vec{x}_{\text{опт}}) = \mathbf{min}(\mathbf{max})Y(\vec{x}),$$

оскільки вихідний параметр Y є функцією вектора внутрішніх параметрів $\vec{x}$.

Серед вихідних параметрів завжди знайдуться пари таких параметрів, поліпшення одного з яких призводить до погіршення іншого. Такі параметри називаються конфліктними. Тому при оптимізації неможливе поліпшення всіх вихідних параметрів одночасно [9].

Можливі варіанти, коли з вихідних параметрів можна виділити найбільш важливий, який досить повно характеризує властивості об'єкта, тоді його можна взяти за ЦФ. У цьому разі критерії оптимізації (КО) називаються частинними. У більшості ж випадків доводиться прибігати до побудови комплексного критерію, при якому ЦФ поєднує всі або більшість вихідних параметрів.

До особливостей структури математичних моделей (ММ) об'єктів електромеханіки варто віднести наявність процедур округлювання діаметрів провідників, товщини електротехнічної сталі та ін. за табличними значеннями. Ця обставина призводить при безперервних варіаційних змінних до дискретизації допустимої області.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У залежності від вигляду ЦФ та сукупності обмежень використовуються відповідні алгоритми пошуку оптимальних значень внутрішніх параметрів. Спектр суб'єктивних особливостей побудови цих алгоритмів породжує ряд методів оптимізації. Серед них виділяють групи детермінованого та недетермінованого пошуку [6, 7, 9].

Методи детермінованого пошуку оптимального рішення складаються з градієнтних та безградієнтних методів. Градієнтні методи передбачають рух до оптимуму, використовуючи дані зміни градієнта ЦФ, а безградієнтні — побудовані на різних алгоритмах руху до оптимального рішення без необхідності диференціювання ЦФ.

Методи недетермінованого пошуку побудовані на основі застосування випадкового руху в межах області допустимих значень і порівняльного аналізу отриманих значень ЦФ.

Усі відомі методи являють собою сукупність числових методів оптимізації з рядом проблем: відсутність можливості повноцінного аналізу залежності критеріїв оптимізації від окремих параметрів, можливість неотримання кінцевого результату, складність програмної реалізації, надмірність розрахунків, значна суб'єктивність окремих методів оптимізації та ін. [6, 10, 11].

Тому розробка та впровадження універсального методу оптимізації для всіх ОЕ є ***актуальною задачею***.

МЕТА РОБОТИ — впровадження нового універсального методу оптимізації, здатного спростити процес проектування ОЕ.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Досягнення поставленої мети виконується за рахунок методу квазіконстант. Основна сутність методу квазіконстант полягає в конвертації деяких змінних і невідомих при проектуванні параметрів та величин в умовні середньозважені константи з метою досягнення еквівалентності кількості невідомих змінних і незалежних рівнянь, що описують електромеханічні та електромагнітні процеси і взаємозв'язок основних геометричних співвідношень ОЕ.

Тобто за методом квазіконстант ЦФ трансформується до вигляду

$$Y(\vec{x}_{\text{опт}}) = \mathbf{min}(\mathbf{max}) Y(\vec{x}, \vec{z}),$$

де $\vec{z}$ — вектор квазіконстант.

Кількість квазіконстант

$$N_z = N_p - N_y,$$

де N_p — кількість невідомих параметрів; N_y — кількість незалежних рівнянь та обмежень для окремих параметрів і величин.

До придатних для використання як квазіконстанти належать:

– параметри та величини, які змінюються в досить невеликому і жорстко визначеному діапазоні не більше 10% (магнітні індукції всіх ділянок, обмоткові коефіцієнти та ін.);

– бажані або прогнозовані параметри і величини (номінальний коефіцієнт потужності, кратності максимального й пускового моменту, кратність пускового струму, номінальні густини струму в обмотках, коефіцієнт заповнення паза тощо);

– параметри та величини, які визначаються обраною конструктивною схемою ОЕ й матеріалами, з яких він виготовляється (кількість пазів статора і ротора, кількість паралельних гілок обмотки, коефіцієнт заповнення сталі й т. д.);

– примусово зафіксовані параметри та величини, які не належать до жодної попередньої категорії, але їх використання як критерій оптимізації або незалежної змінної не передбачено (лінійне навантаження та ін.).

Як КО слід обирати параметри й величини, які більш повно відображають якість технологічного процесу виготовлення ОЕ та його ефективність роботи, тобто проектний варіант ОЕ повинен надавати можливість отримання максимального прибутку як виробнику, так і покупцю ОЕ.

Для забезпечення максимального прибутку виробника необхідне виконання наступних умов:

– ОЕ має складатися з мінімальної кількості деталей;

– для виготовлення ОЕ слід застосовувати мінімальну кількість та масу матеріалів;

– загальна вартість використаних матеріалів і трудових затрат повинна бути мінімальною.

Для отримання максимального прибутку покупця електричних машин слід забезпечити виконання наступних умов:

– максимум ККД і коефіцієнта потужності;

– мінімальна вартість ОЕ;

– максимально можливий ресурс роботи ОЕ;

– мінімальні маса та габарити ОЕ.

Більшість перелічених умов для обох сторін є взаємозв’язаними, тому для отримання загальнооптимального результату проектування у більшості випадків достатньо обмежитися лише критеріями мінімуму маси та максимуму ККД.

Як незалежні змінні при оптимізації слід намагатися використовувати лише один параметр, тоді застосування одновимірної оптимізації надає можливість її легкого розв’язування за допомогою аналітичних та графічних способів. Бажано, щоб незалежна змінна мала достатньо широкий діапазон для варіювання та чітко визначені обмеження максимального й мінімального значень. Простіше сформувати ЦФ, якщо незалежна змінна пов’язана аналітичними виразами з більшістю параметрів та величин ОЕ.

Найбільш вдалим при оптимізації ОЕ буде використання як незалежні змінні параметрів, які описують геометрію його активної частини.

Для досягнення збільшення кількості рівнянь математичної моделі ОЕ можна застосовувати нерівності, що описують обмеження для тих чи інших параметрів та величин.

Як приклад використання методу квазіконстант розглядається оптимальний розрахунок головних розмірів асинхронного двигуна (АД) з короткозамкненим ротором.

Маса активної частини АД визначає його габарити та більшу частину вартості, тому прийняття як КО маси активної частини забезпечує результат проектування, який надає можливість отримати максимальний прибуток виробнику й покупцю.

До вихідних даних для виконання оптимізації належать: номінальна потужність $P_{2\text{н}}$, кількість пар полюсів p, кількість фаз статора m_1, частота мережі f_1, фазна напруга мережі U_1.

При формуванні ЦФ як незалежна змінна використовується внутрішній діаметр магнітопроводу статора D_1.

Наведемо прийняті квазіконстанти.

1. Параметри та величини, які змінюються в досить невеликому і жорстко визначеному діапазоні: магнітні індукції робочого зазору B_δ, зубців B_{z1} і спинки B_{c1} статора, спинки B_{c2} ротора; обмотковий коефіцієнт статора k_{o1}; коефіцієнт ЕРС статора k_{e1}.

2. Бажані або прогнозовані параметри й величини: номінальні розрахункові коефіцієнт потужності $\cos\varphi_1$ і ККД η, номінальні розрахункові густини струму в обмотках статора Δ_1 і ротора Δ_2, коефіцієнт заповнення пазового простору статора k_{z1}.

3. Параметри й величини, які визначаються обраною конструктивною схемою АД та матеріалами, з яких виготовляється активна частина АД: кількість пазів ротора z_2, кількість паралельних гілок обмотки статора a_1, кількість пазів на полюс і фазу обмотки статора q_1, коефіцієнт заповнення сталі k_{c1}, густини сталі ρ_c, міді $\rho_м$ та алюмінію $\rho_а$.

4. Примусово зафіксовані параметри та величини: розрахункове значення лінійного навантаження статора A_1, відносне значення струму намагнічування $I_{μ*}$.

Приймаються наступні припущення: внутрішній діаметр магнітопроводу статора дорівнює зовнішньому діаметру магнітопроводу ротора; дроти обмотки статора не округлюються до стандартних значень; коефіцієнт заповнення пазового простору для статора k_{z1} визначається як співвідношення загального перетину дротів одного окремого паза до площини трапеції, в яку вписується цей паз (рис. 1); розрахунок виконується для першої гармоніки; магнітні властивості матеріалу магнітопроводів однорідні й ізотропні; температура дротів постійна та відповідає розрахунковій.

До формування ЦФ необхідно виконати розрахунок та обрати окремі параметри, які визначаються початковими даними.

Кількість пазів статора

$$z_1 = 2pm_1q_1.$$

Крок обмотки статора визначається обраною схемою обмотки, але у першому наближенні його можна вважати таким, що дорівнює діаметральному кроку:

$$y_1 = \frac{z_1}{2p}.$$

Максимальне значення зовнішнього діаметра магнітопроводу статора D_{1max} визначається висотою обертання ротора h, яка має взаємозалежність із потужністю та кількістю пар полюсів АД.

Внутрішній діаметр магнітопроводу ротора $D_{2в}$ дорівнює значенню зовнішнього діаметра третього ступеня вала, що обирається з відповідних таблиць за значенням розрахункового моменту:

$$M' = \frac{P_{2н}p}{\pi f_1}.$$

Коефіцієнт перетворення струму

$$k_{i12} = \sqrt{1 - 2I_{μ*}\sqrt{1-\cos^2\varphi_1} + I_{μ*}^2}.$$

Цільова функція

$$m_{АД}(D_1) = m_{c1}(D_1) + m_м(D_1) + m_{c2}(D_1) + m_а(D_1), \qquad (1)$$

де $m_{c1}(D_1)$ і $m_{c2}(D_1)$ — маси магнітопроводів статора й ротора відповідно; $m_м(D_1)$ — маса міді обмотки статора; $m_а(D_1)$ — маса алюмінію обмотки ротора.

Математична модель процесів перетворення енергії та опису конструктивної схеми АД для отримання розв'язку ЦФ складається з наступних рівнянь:

висота спинки статора

$$h_{c1} = \frac{D_1B_δ}{2pk_cB_{c1}}; \qquad (2)$$

ширина зубця статора

$$b_{z1} = \frac{B_δ\pi D_1}{z_1k_cB_{z1}}; \qquad (3)$$

менша основа трапеції, що описує паз статора (див. рис. 1),

$$a = \frac{\pi D_1}{z_1} - b_{z1};$$

більша основа трапеції, що описує паз статора (див. рис. 1),

$$b = \frac{\pi D_1}{z_1} + \frac{2\pi h_{п1}}{z_1} - b_{z1},$$

де $h_{п1}$ — висота трапеції;

площина трапеції, що описує паз статора,

$$S_{п1} = 0{,}5(a=b)\,h_{п1};$$

струм статора

$$I_1 = \frac{A_1\pi D_1}{20m_1w_1} = \frac{P_{2н}}{m_1U_1\cos\varphi_1\eta},$$

де w_1 — кількість витків обмотки статора;

ефективний перетин дроту обмотки статора

$$q_{e1} = \frac{I_1}{a_1\Delta_1};$$

кількість ефективних дротів у пазу статора

$$u_{п1} = 2w_1a_1\frac{m_1}{z_1};$$

коефіцієнт заповнення пазового простору статора

$$k_{z1} = q_{e1}\frac{u_{п1}}{S_{п1}};$$

середня довжина витка обмотки статора

$$l_{1ср} = 2l_δ + \frac{1{,}5\pi D_1}{p},$$

де $l_δ$ — довжина активної частини;

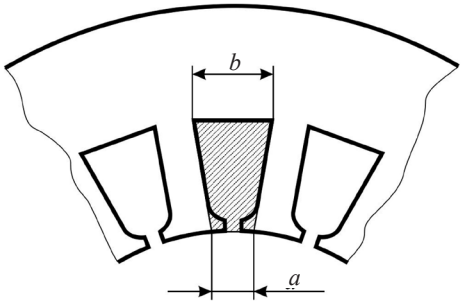

Рис. 1. Визначення коефіцієнта заповнення пазового простору статора

магнітний потік

$$\Phi = \frac{D_1 B_\delta l_\delta \cdot 10^{-6}}{p};$$

ЕРС статора

$$E_1 = k_{e1} U_1 = \sqrt{2}\pi f_1 \Phi w_1 k_{o1};$$

перетин стрижня ротора

$$q_{e2} = \frac{k_{i12} k_{o1} \pi A_1 D_1}{10 \Delta_2 z_2};$$

перетин короткозамкненого кільця ротора

$$q_к = 0{,}2 z_2 \frac{q_{e2}}{p};$$

висота спинки ротора

$$h_{c2} = \frac{D_1 B_\delta}{2 p k_c B_{c2}}; \qquad (4)$$

висота зубця ротора

$$h_{z2} = 0{,}5(D_1 - D_{2в}) - h_{c2}; \qquad (5)$$

середній діаметр короткозамкненого кільця ротора

$$D_{кл.сер} = D_1 - 1{,}16 h_{z2};$$

маса магнітопроводу статора

$$m_{c1} = \rho_c k_c l_\delta \left[b_{z1} h_{п1} z_1 + h_{c1} \pi (D_1 + 2h_{п1} + h_{c1}) \right];$$

маса магнітопроводу ротора

$$m_{c2} = \rho_c k_c l_\delta \left[0{,}25\pi (D_1^2 - D_{2в}^2) - z_2 q_{e2} \right];$$

маса міді обмотки статора

$$m_м = \rho_м q_{e1} l_{1сер} m_1 w_1 a_1;$$

маса алюмінію обмотки ротора

$$m_а = \rho_а \left(q_{e2} l_\delta z_2 + 2\pi D_{кл.сер} q_к \right).$$

Для спрощення вигляду складових ЦФ вводяться розрахункові коефіцієнти:

$$k_1 = \frac{20 P_{2н}}{A_1 U_1 \pi \eta \cos\varphi_1}; \quad k_2 = \frac{p k_{e1} U_1 \cdot 10^6}{\sqrt{2}\pi f_1 k_{o1} B_\delta};$$

$$x_1 = 1 - \frac{B_\delta}{k_c B_{z1}}; \quad x_2 = \frac{2A_1}{5\Delta_1 k_{z1}}.$$

Після перетворення зазначеної вище ММ складові ЦФ у виразі (1) набувають такого вигляду:

$$m_{c1}(D_1) = \rho_c k_c \frac{k_1 k_2}{D_1^2} \left[b_{z1}(D_1) h_{п1}(D_1) z_1 + \right.$$

$$\left. + h_{c1}(D_1) \pi \left[D_1 + 2h_{п1}(D_1) + h_{c1}(D_1) \right] \right];$$

$$m_м(D_1) = \rho_м \pi \frac{A_1}{20\Delta_1} \left(\frac{2k_1 k_2}{D_1} + \frac{3\pi D_1^2}{2p} \right);$$

$$m_{c2}(D_1) = \rho_c k_c \frac{k_1 k_2 \pi}{4} \left[1 - \frac{D_{2в}^2}{D_1^2} - \frac{2k_{i12} A_1 k_{o1}}{5\Delta_2 D_1} \right];$$

$$m_а(D_1) = 2k_{i12} \rho_а \pi \frac{A_1 k_{o1}}{20\Delta_2} \left[\frac{\pi D_1^2}{p} \left(0{,}168 + 0{,}232 \frac{B_\delta}{p k_c B_{c2}} \right) + \right.$$

$$\left. + 0{,}232 \frac{\pi}{p} D_1 D_{2в} + \frac{k_1 k_2}{D_1} \right],$$

де $h_{c1}(D_1)$ і $b_{z1}(D_1)$ визначаються за формулами (2) і (3) відповідно; $h_{п1}(D_1) = -D_1 x_1 / 2 + 0{,}5\sqrt{D_1^2 x_1^2 + D_1 x_2}$ — висота трапеції, що описує паз статора.

Незалежна змінна D_1 має обмеження з меншої та більшої сторін. Максимальне значення незалежної змінної D_1 можна у першому наближенні взяти на рівні максимально допустимого значення зовнішнього діаметра статора D_{1max}.

Мінімальне значення відповідає умові можливості конструктивного виконання ротора, тобто $h_{z2} > 0$. Розв'язуючи сумісно рівняння (4) і (5), можна отримати мінімально допустиме значення за конструктивною ознакою для незалежної змінної:

$$D_{1min} = \frac{D_{2в}}{1 - B_\delta / p k_c B_{c2}}.$$

Аналіз за отриманою ЦФ (рис. 2) показує, що маса активної частини монотонно збільшується при зростанні діаметра площини робочого зазору, а це означає, що оптимальне значення D_1 буде відповідати мінімально допустимому його значенню з урахуванням усіх обмежень.

Обмеження цільової функції $m(D_1)$ визначаються:

– конструктивними чинниками: $h_{z2} > 0$, $a_2 \geq 2$ мм для $h \leq 132$ мм та $a_2 \geq 4$ мм для $h \geq 160$ мм (рис. 3);

– тепловим балансом: $\Delta_2 \leq 3{,}5$ А/мм^2 для IP44 і $\Delta_2 \leq 4$ А/мм^2 для IP23.

Зазначені обмеження можна записати за допомогою нерівностей

$$\begin{cases} a_2 \geq a_{2min}, \\ h_{z2} > 0, \\ \Delta_2 \leq \Delta_{2max}. \end{cases} \qquad (6)$$

Для подальшого розв'язування системи нерівностей необхідно доповнити зазначену вище ММ АД наступними рівняннями:

ширина зубця ротора

$$b_{z2} = \frac{B_\delta \pi D_1}{z_2 k_c B_{z2}};$$

менша основа трапеції, що описує паз ротора (див. рис. 3),

$$a_2 = \frac{\pi(D_{2в} + 2h_{c2})}{z_2 - b_{z2}};$$

більша основа трапеції, що описує паз ротора (див. рис. 3),

$$b_2 = \frac{\pi D_1}{z_2 - b_{z2}};$$

площина трапеції, що описує паз ротора,

$$S_{п2} = 0{,}5(a_2 + b_2)h_{z2};$$

коефіцієнт заповнення пазового простору ротора

$$k_{z2} = \frac{q_{e2}}{S_{п2}}.$$

Перелік зазначених квазіконстант доповнюється:

1) параметри та величини, які змінюються в досить невеликому і жорстко визначеному діапазоні (магнітна індукція зубців ротора B_{z2});

2) бажані або прогнозовані параметри й величини (коефіцієнт заповнення пазового простору ротора k_{z2}).

Система (6) перетворюється з урахуванням доповненої ММ відносно незалежної змінної:

$$\begin{cases} D_1 \geq \dfrac{a_{2\min} z_2/\pi a - D_{2в}}{\dfrac{B_\delta}{k_c}\left(\dfrac{1}{pB_{c2}} - \dfrac{1}{B_{z2}}\right)}, \\ D_1 > \dfrac{D_{2в}}{1 - \dfrac{B_\delta}{pk_c B_{c2}}}, \\ D_1 \geq \dfrac{-B + \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A}, \end{cases} \qquad (7)$$

де $A = 1 - \dfrac{B_\delta^2}{p^2 k_c^2 B_{c2}^2} + \dfrac{2B_\delta^2}{pk_c^2 B_{c2} B_{z2}} - \dfrac{2B_\delta}{k_c B_{z2}}$,

$B = 2D_{2в}\dfrac{B_\delta}{k_c}\left(\dfrac{1}{B_{z2}} - \dfrac{1}{pB_{c2}}\right) - \dfrac{2k_{i12}A_1 k_{o1}}{5\Delta_{2\max} k_{z2}}$ та $C = D_{2в}^2$ — розрахункові коефіцієнти.

Якщо порівняти праві частини нерівностей (7), то з'ясовується, що найбільшою з них буде третя за умови

$$A_1 > \frac{5\Delta_{2\max} k_{z2}}{2k_{i12}k_{o1}}\left[\frac{D_{2в}}{F} + AF\left(D_{2в} - a_{2\min}\frac{z_2}{\pi}\right) - \frac{D_{2в}a_{2\min}z_2}{F(D_{2в}\pi - a_{2\min}z_2)}\right],$$

де $F = \dfrac{k_c B_{z2} B_{c2} p}{B_\delta(pB_{c2} - B_{z2})}$ — розрахунковий коефіцієнт.

Першими двома нерівностями в системі (7) можна знехтувати, тоді обмеження перетворюється у формулу розрахунку оптимального значення діаметра площини активного зазору

$$D_{1O} = \frac{-B + \sqrt{B^2 + 4AC}}{2A}.$$

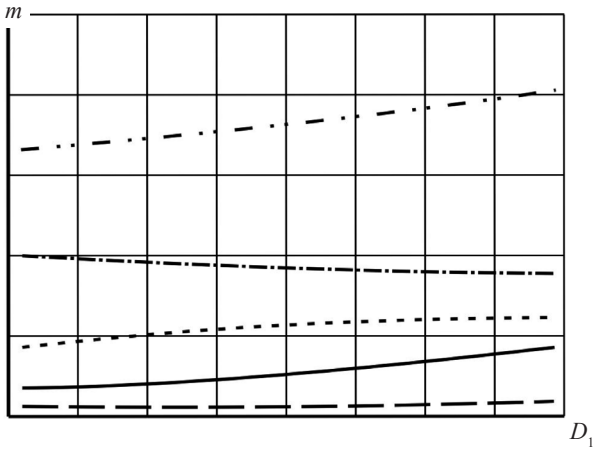

Рис. 2. Приклад графіків цільової функції $m(D_1)$ та її складових: — — — — m_{c2}; — — — — m_a; — · — · — $m_{АД}$; — · — · — m_{c1}; ——— $m_м$

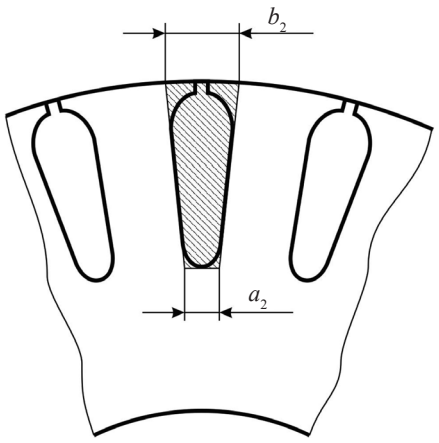

Рис. 3. Обмеження мінімального розміру паза ротора

Крім цього, метод квазіконстант був апробований при проектуванні реостатної системи пуску машини постійного струму [1], синхронної машини [2], асинхронної машини [3], трансформатора з обертовим полем [4], машини постійного струму [5].

За необхідності визначення впливу застосування та фіксації значень квазіконстант, що відповідає точності методу, можна провести аналіз як за кожною з них, так і в комплексі.

При цьому виконується дослідження всіх значень оптимального рішення в межах діапазону зміни квазіконстант. Для вирішення поставленого завдання достатньо задати по черзі мінімальне і максимальне можливі значення кожної квазіконстанти та визначити відповідні до них значення незалежної змінної.

Визначення загального уточнюючого значення виконується на основі коефіцієнта вагомості кожної квазіконстанти

$$V_i = \frac{\Delta x_i}{\sum_{i=1}^{n_k} \Delta x_i},$$

де Δx_i — діапазон зміни незалежної змінної при варіації i-ї квазіконстанти; n_k — кількість квазіконстант.

Варіаційна площа для i-ї квазіконстанти

$$S_i = V_i \Delta x_i.$$

Загальна площа варіацій

$$S = \sum_{i=1}^{n_k} S_i.$$

Середнє значення оптимального значення при варіації i-ї квазіконстанти

$$x_{\mathrm{O}\,i} = \frac{x_{\max i} + x_{\min i}}{2},$$

де $x_{\max\ i}$ і $x_{\min\ i}$ — максимальне й мінімальне значення незалежної змінної при варіації i-ї квазіконстанти.

Уточнене оптимальне значення

$$x_{\mathrm{O.y}} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^{n_k} S_i x_{\mathrm{O}\,i}.$$

Якщо уточнене оптимальне значення відрізняється від отриманого більше ніж на допустиму максимальну похибку або ЦФ при уточненому оптимальному значенні має недопустимо велике відхилення, то потрібно переглянути порядок формування ЦФ та прийняття значень квазіконстант.

Аналіз відхилень оптимального значення за абсолютною величиною при варіації квазіконстант показує, що вони залежать від рівнянь, які утворюють ЦФ, і місця в них квазіконстант. Бажано уникати використання як квазіконстанти показників степенів і основ логарифмів.

ВИСНОВКИ

1. Універсальність методу квазіконстант базується на узагальненні алгоритму формування цільової функції та відсутності будь-яких обмежень щодо застосування. 2. Сформульовані ієрархічні рекомендації з розподілу та застосування квазіконстант, вибору критерію оптимізації та оцінки похибки розрахунків, що складає повний спектр положень, необхідних для широкого впровадження методу квазіконстант.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] **Кимстач, О. Ю.** Оптимизация по времени системы пуска двигателя постоянного тока [Текст] / О. Ю. Кимстач // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського. — Кременчук : КДПУ, 2009. — Вип. 3/2009 (56). — Ч. 1. — С. 31–34.

[2] **Кимстач, О. Ю.** Оптимизация по массе индуктора синхронной явнополюсной машины [Текст] / О. Ю. Кимстач // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. — Кременчук : КДПУ, 2007. — Вип. 3/2007 (44). — Ч. 2. — С. 67–69.

[3] **Кімстач**, **О. Ю.** Оптимізація головних розмірів асинхронної машини [Текст] / О. Ю. Кімстач, Ю. Є. Смирнов // Електротехніка і електромеханіка : матеріали Всеукраїн. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів, молодих вчених з міжнародною участю. — Миколаїв : НУК, 2008. — С. 61–65.

[4] **Кімстач**, **О. Ю.** Оптимізація головних розмірів трансформатора з обертовим полем [Текст] / О. Ю. Кімстач // Електротехніка і електромеханіка : матеріали Всеукраїн. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів, молодих вчених з міжнародною участю. — Миколаїв : НУК, 2007. — С. 125–131.

[5] **Кімстач**, **О. Ю.** Оптимізація машин постійного струму [Текст] / О. Ю. Кімстач // Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів : матеріали Всеукраїн. наук.-техн. конф. з міжнародною участю. — Миколаїв : НУК, 2006. — С. 174–178.

[6] **Ли, К.** Основы САПР (CAD/CAM/CAE) [Текст] / К. Ли. — С.Пб. : Питер, 2004. — 560 с.

[7] **Лопухина, Е. М.** Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности [Текст] / Е. М. Лопухина, Г. А. Семенчуков. — М. : Высш. шк., 2002. — 511 с.

[8] Методы оптимизации в принятии технических и экономических решений [Текст] / А. Я. Казарезов, А. Ф. Галь, Т. А. Фарионова, С. К. Чернов. — Николаев : НУК, 2007. — 145 с.

[9] **Норенков, И. П.** Основы автоматизированного проектирования [Текст] / И. П. Норенков. — М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 336 с.

[10] **Фролов, Ю. М.** Автоматизированное проектирование электроприводов [Текст] / Ю. М. Фролов, А. В. Романов. — Воронеж : Воронеж. гос. техн. ун-т, 2003. — 205 с.

[11] On the number of local minima for the multidimensional assignment problem [Text] / Don A. Grundel, P. A. Krokhmal, C. A. S. Oliveira, P. M. Pardalos // J. Combinatorial Optimization. — 2007. — Vol. 13, №2. — P. 1–18.

© О. Ю. Кімстач

Надійшла до редколегії 18.01.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК
д-р техн. наук, проф. *Г. В. Павлов*

Статтю розміщено у Віснику НУК №2, 2012