

ОЦІНКА ОБЛАСТІ ДОПУСКІВ НА ПАРАМЕТРИ КОРЕКТУВАННЯ В ІНДУКЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ПРИСКОРЮВАННЯ

Л. А. Панталієнко, кандидат фізико-математичних наук, доцент

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: nubip.ea@gmail.com

Анотація. Розглянуто питання формалізації та чисельного розв'язання задач розрахунку допусків на параметри коректувальних елементів для лінійної індукційної системи прискорювання, безпосередньо зв'язаних з працездатністю реального об'єкту.

Досліджено ключові моменти динаміки поперечного руху частинок для конкретної структури лінійної індукційної системи прискорювання за наявності заданих значень енергії для кожного з періодів резонатора. Враховано наявність паразитних електричних та магнітних полів, що виникають внаслідок зміщення частинок відносно осі прискорювача та змінюють поперечні компоненти імпульсів. Здійснено перетворення вихідної різницевої моделі індукційної системи до лінійного вигляду.

Для формулювання постановок задач розрахунку допусків введено вектори розкиду фазових координат та допусків на параметри коректування. З метою застосування методів практичної стійкості множину допусків на параметри коректувальних елементів задано у вигляді еліпсоїда. За умовою, що початкові зміщення поперечних координат відносно осі прискорювача відомі сталі величини, здійснено оцінювання структурованої області допусків при відомих лінійних обмеженнях на розкид векторів фазових координат. За розробленими алгоритмами практичної стійкості вихідну задачу розрахунку допусків зведено до задачі знаходження максимуму лінійної форми на еліпсоїді.

Досліджено окремі важливі типи обмежень на відхилення фазових координат, що стосуються оцінки допусків на параметри першого елементу коректування та кількості частинок. Для випадку нелінійних динамічних обмежень на розкид вектора фазових координат опуклу замкнену множину запропоновано попередньо апроксимувати дотичними гіперплощинами.

З позицій практичної стійкості розглянуто задачу оцінки допусків для випадку заданих обмежень на розкид критерію якості. За допомогою алгоритмів практичної стійкості за напрямком запропоновано оцінювати максимальні за об'ємом області допусків на параметри за наявності динамічних обмежень на розкид фазових координат або критерію якості.

Ключові слова: допуски на параметри, індукційна система прискорювання, соленоїд, елементи коректування, чутливість, стійкість

Актуальність. Питання нормального функціонування системи в реальних умовах експлуатації відносять до важливих складових процесу моделювання складних об'єктів керування [1, 2]. Останнє пов'язане з неминучим відхиленням значень ключових параметрів системи на реальних режимах, що може призвести до значних відхилень траєкторії від розрахункової, і зрештою, до непрацездатності системи [3, 4]. Тому необхідно враховувати вимоги щодо чутливості реального об'єкта ще на етапі проектування, включаючи їх до постановок відповідних задач [2, 4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При аналізі індукційної системи прискорювання [5] виникає ряд нагальних задач розрахунку допусків на параметри коректування, що охоплюються класом обернених задач теорії чутливості [2, 6, 7, 8]. На відміну від методів, що ґрунтуються на застосуванні функцій чутливості [2], методи практичної стійкості [3, 4, 7, 8] дозволяють чисельно оцінити область допустимих параметрів у заданих структурах та значно поширити коло актуальних задач досліджуваної параметричної моделі. З таких позицій, за допомогою алгоритмів практичної стійкості за напрямком, можна одержувати оцінки максимальних за об'ємом областей допусків на параметри за наявності динамічних обмежень на розкид фазових координат або критерію якості.

Мета дослідження — розробка чисельних методів розв'язання задач розрахунку допусків на параметри коректувальних елементів лінійної індукційної системи прискорювання з урахуванням вимог до чутливості.

Матеріали та методи дослідження. У роботі застосовуються методи практичної стійкості, теорії чутливості та структурно-параметричної оптимізації.

Результати досліджень та їх обговорення. Досліджується модель лінійної індукційної системи прискорювання [5], що має структуру як на рис.1.

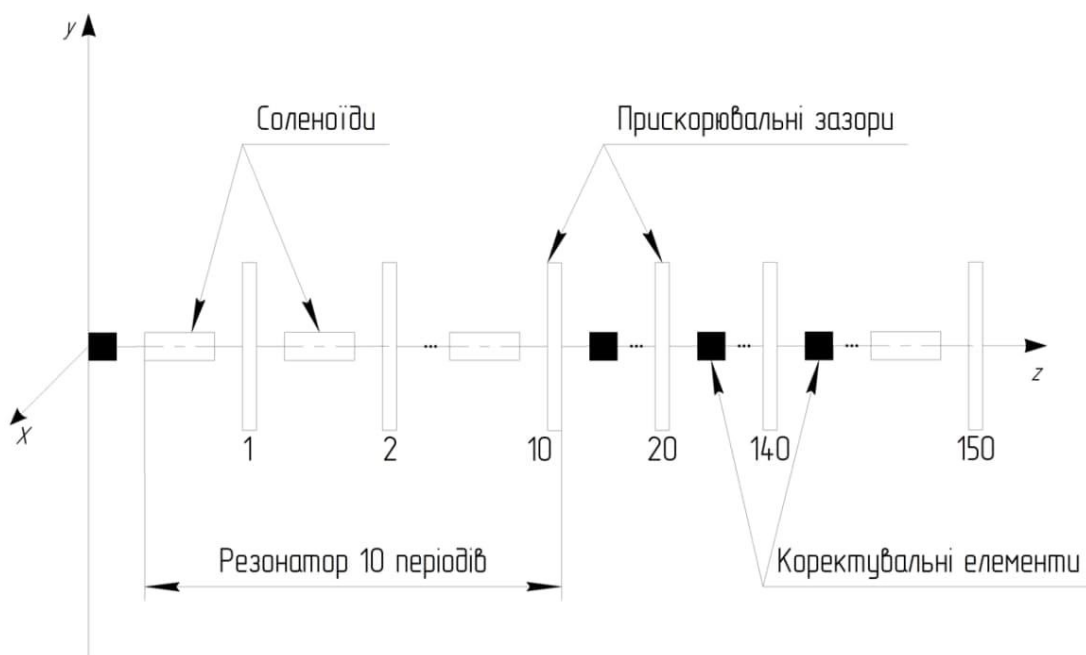


Рис.1. Модель лінійної індукційної системи прискорювання

Частинки рухаються в однорідному стаціонарному магнітному полі. Вісь Oz співпадає з напрямом поширення пучка. Моделюється поперечний рух електронів у площині xOy при заданих значеннях енергії γ_n ($n=1,2,...,150$) для кожного періоду резонатора. Припускається, що частинки в початковий момент часу дещо зміщені відносно осі прискорювача (зміщенням торців соленоїдів і центрів прискорювальних зазорів відносно осі Oz нехтуємо).

Соленоїд є системою фокусування в однорідному магнітному полі [5]. Частинки, що рухаються в центральній області соленоїда паралельно до поля, не зазнають його дії. За наявності поперечної компоненти швидкості виникає сила, під дією якої електрони описують у просторі станів спіральну траєкторію. На кінцях соленоїда силові лінії утворюють розбіжний пучок, внаслідок чого виникає азимутальне прискорення.

Зв'язок між початковими і кінцевими координатами та компонентами імпульсу встановлюється за допомогою лінійної системи рівнянь вигляду:

$$\begin{pmatrix} x_{n+1}^{(i)} \\ p_{x_{n+1}}^{(i)} \\ y_{n+1}^{(i)} \\ p_{y_{n+1}}^{(i)} \end{pmatrix} = M_c^{(n)} \begin{pmatrix} x_n^{(i)} \\ p_{x_n}^{(i)} \\ y_n^{(i)} \\ p_{y_n}^{(i)} \end{pmatrix}, \quad i=1,2,\dots,N, \quad n=1,2,\dots,150. \quad (1)$$

Тут $p_{x_n}^{(i)}, p_{y_n}^{(i)}$ – поперечні компоненти зведеного імпульсу i -тої частинки при проходженні n -го періоду, причому $p_{x_n}^{(i)} = \frac{\dot{x}_n^{(i)} \gamma_n}{c}$, $p_{y_n}^{(i)} = \frac{\dot{y}_n^{(i)} \gamma_n}{c}$

($n=1,2,\dots,150, i=1,2,\dots,N$), $\dot{x}_n^{(i)}, \dot{y}_n^{(i)}$ – поперечні проекції вектору швидкості, c – швидкість світла. Матриця переходу $M_c^{(n)}$ має вигляд [5]:

$$M_c^{(n)} = \begin{pmatrix} \frac{3 - \cos \theta}{2} & \frac{l \sin \theta}{\theta \sqrt{\gamma_n^2 - 1}} & -\frac{\sin \theta}{2} & l(1 - \cos \theta) \\ \frac{3\theta \sqrt{\gamma_n^2 - 1} \sin \theta}{4l} & -\frac{1 - 3\cos \theta}{2} & \frac{3\theta(1 - \cos \theta) \sqrt{\gamma_n^2 - 1}}{4l} & \frac{3 \sin \theta}{2} \\ \frac{\sin \theta}{2} & \frac{l(\cos \theta - 1)}{\theta \sqrt{\gamma_n^2 - 1}} & \frac{3 - \cos \theta}{2} & \frac{l \sin \theta}{\theta \sqrt{\gamma_n^2 - 1}} \\ \frac{3\theta \sqrt{\gamma_n^2 - 1}(\cos \theta - 1)}{4l} & -\frac{3 \sin \theta}{2} & \frac{3\theta \sqrt{\gamma_n^2 - 1} \sin \theta}{4l} & \frac{3 \cos \theta - 1}{2} \end{pmatrix},$$

де θ – кут повороту за круговою орбітою радіуса r на виході центральної однорідної області соленоїда, що обчислюється згідно з формулою:

$$\theta = \frac{lH \cdot \bar{e}}{\sqrt{\gamma_n^2 - 1} \cdot m_0 \cdot c}, \quad (2)$$

де l – довжина соленоїда, $\bar{e}$ – заряд частинки, m_0 – маса спокою ($m = m_0 \gamma_n$ – маса частинки), H – напруга магнітного поля.

Під час руху у прискорювальному зазорі внаслідок зміщення частинок відносно осі прискорювача виникають паразитні електричні та магнітні поля, що змінюють поперечні компоненти імпульсів за таким законом:

$$p_{x_n}^{(i)} = p_{x_n}^{(i)} + H_{x_n}^{(i)}; \\ p_{y_n}^{(i)} = p_{y_n}^{(i)} + H_{y_n}^{(i)}, \quad i=1,2,\dots,N, \quad n=1,2,\dots,150. \quad (3)$$

Тут $H_{x_n}^{(i)}, H_{y_n}^{(i)}$ – поперечні компоненти напруги магнітного поля, що діють на i -ту частинку при проходженні n -го прискорювального зазору.

Компоненти напруги $H_{x_n}^{(i)}$, $H_{y_n}^{(i)}$, $i=1,2,\dots,N$ для фіксованого n обчислюють згідно з рекурентними співвідношеннями [6], а величину сили струму $I_n(t)$ ($n=1,2,\dots,150$) для кожного прискорювального зазору задають графічно.

Під час проходження частинок через коректувальні елементи відбувається змінювання величини імпульсу за лінійним законом

$$\begin{aligned} p_{x_k}^{(i)} &= p_{x_k}^{(i)} + \alpha_k; \\ p_{y_k}^{(i)} &= p_{y_k}^{(i)} + \beta_k, \quad i=1,2,\dots,N, \quad k=1,2,\dots,15, \end{aligned} \quad (4)$$

де α_k , β_k , $k=1,2,\dots,15$ – невідомі параметри коректувальних елементів.

Для описаної структури індукційної системи прискорювання виникає низка нагальних задач, що стосуються забезпечення працездатності системи в реальних умовах експлуатації. До цієї категорії відносять задачі розрахунку допусків на параметри коректувальних елементів, що охоплюються класом обернених задач теорії чутливості [1 – 3, 5, 7, 8].

Для математичного формулювання постановок таких задач, з метою застосування алгоритмів практичної стійкості [7, 8], подамо модель індукційної системи в термінах вектору $z_n^* = (x_n^{(1)}, p_{x_n}^{(1)}, y_n^{(1)}, p_{y_n}^{(1)}, \dots, x_n^{(N)}, p_{x_n}^{(N)}, y_n^{(N)}, p_{y_n}^{(N)})$ вимірності $4N$ ($n=1,2,\dots,150$). Згідно з таким перетворенням рівняння, що описують рух частинок у прискорювальному зазорі (ПЗ), будуть вже лінійного вигляду:

$$z_{n+1} = A_{ПЗ} z_n, \quad n=1,2,\dots,149, \quad (5)$$

де $A_{ПЗ}$ – нижня трикутна матриця, елементи якої складені із коефіцієнтів доданків при $x_n^{(i)}$, $y_n^{(i)}$ у виразах для $H_{x_n}^{(i)}$, $H_{y_n}^{(i)}$ ($i=1,2,\dots,N$, $n=1,2,\dots,150$), а на головній діагоналі стоять одиниці. При цьому коефіцієнти матриці є сталими величинами для даної кількості частинок N та не залежать від номера періоду резонатора.

Динаміка частинок при проходженні соленоїда описується рівняннями

$$z_{n+1} = S_n z_n, \quad n=1,2,\dots,149, \quad (6)$$

де матриця S_n має блочну структуру з блоками $M_c^{(n)}$ на головній діагоналі (решта елементів нулі):

$$S_n = \begin{pmatrix} M_c^{(n)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & M_c^{(n)} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & M_c^{(n)} \end{pmatrix}.$$

Якщо тепер ввести до розгляду вектори $f_{(k)}^* = (0, \alpha_k, 0, \beta_k, \dots, 0, \alpha_k, 0, \beta_k)$, $k = 1, 2, \dots, 15$ вимірності $4N$, то рух пучка частинок у k -тому коректувальному елементі можна подати у вигляді:

$$z_{n+1} = z_n + f_{(k)}, \quad n = 10k. \quad (7)$$

Для формулювання задачі розрахунку допусків введемо вектори розкиду фазових координат $\tilde{z}_n = z_n - \bar{z}_n$, $n = 1, 2, \dots, 150$ та допусків на параметри $\tilde{f}_{(k)} = f_{(k)} - \bar{f}_{(k)}$, $k = 1, 2, \dots, 15$, де $\bar{z}_n$, $\bar{f}_{(k)}$ – розрахункові значення векторів z_n , $f_{(k)}$ ($n = 1, 2, \dots, 150$, $k = 1, 2, \dots, 15$).

Необхідно при заданих обмеженнях на розкид векторів фазових координат вигляду

$$G_n = \{\tilde{z}_n : |l_{sn}^* \tilde{z}_n| \leq 1, \quad s = 1, 2, \dots, \bar{N}\}, \quad (8)$$

де l_{sn} , $s = 1, 2, \dots, \bar{N}$, $n = 1, 2, \dots, 150$ – відомі вектори вимірності $4N$ (N – кількість частинок), оцінити область допусків на параметри коректувальних елементів. При цьому початкові зміщення поперечних координат z_1 відносно осі прискорювача – відомі сталі величини.

Для чисельного розв’язання сформульованої задачі множину допусків на параметри коректування задають у вигляді еліпсоїда

$$G(\tilde{f}) = \left\{ \tilde{f}_{(1)}, \tilde{f}_{(2)}, \dots, \tilde{f}_{(M_1)} : \sum_{k=1}^{15} \tilde{f}_{(k)}^* B_k f_{(k)} \leq c^2 \right\}, \quad (9)$$

де B_k , $k = 1, 2, \dots, M_1$ – відомі симетричні матриці вимірності $4N \times 4N$.

Далі подамо загальний розв’язок індукційної системи (5) – (7) у вигляді:

$$z_n = A_{ПЗ} S_{n-1} A_{ПЗ} S_{n-2} \dots A_{ПЗ} S_1 (z_1 + f_{(1)}) + A_{ПЗ} S_{n-1} A_{ПЗ} S_{n-2} \dots A_{ПЗ} S_{11} f_{(2)} + \\ + A_{ПЗ} S_{n-1} A_{ПЗ} S_{n-2} \dots A_{ПЗ} S_{21} f_{(3)} + \dots + A_{ПЗ} S_{n-1} A_{ПЗ} S_{n-2} \dots A_{ПЗ} S_{141} f_{(15)}, \quad n = 2, 3, \dots, 150.$$

Враховуючи, що початкові зміщення поперечних координат z_1 є фіксованими сталими, запишемо загальний розв’язок для розкиду фазових координат:

$$\tilde{z}_n = A_{ПЗ} S_{n-1} A_{ПЗ} S_{n-2} \dots A_{ПЗ} S_1 \tilde{f}_{(1)} + A_{ПЗ} S_{n-1} A_{ПЗ} S_{n-2} \dots A_{ПЗ} S_{11} \tilde{f}_{(2)} + \\ + A_{ПЗ} S_{n-1} A_{ПЗ} S_{n-2} \dots A_{ПЗ} S_{21} \tilde{f}_{(3)} + \dots + A_{ПЗ} S_{n-1} A_{ПЗ} S_{n-2} \dots A_{ПЗ} S_{141} \tilde{f}_{(15)},$$

$$n = 2, 3, \dots, 150. \quad (10)$$

Підставивши вираз (10) в обмеження (8), знайдемо максимум лінійної форми (8) на еліпсоїді (9). За розробленими алгоритмами практичної стійкості [7, 8] має виконуватися включення

$$\left\{ \tilde{f}_{(1)}, \tilde{f}_{(2)}, \dots, \tilde{f}_{15} : \sum_{k=1}^{15} \tilde{f}_{(k)}^* B_k f_{(k)} \leq c^2 \right\} \subset \left\{ \tilde{f}_{(1)}, \tilde{f}_{(2)}, \dots, \tilde{f}_{15} : \left| \sum_{k=1}^{15} p_{sn}^{*(k)} \tilde{f}_{(k)} \right| \leq 1 \right\},$$

$$\text{де } p_{sn}^{*(1)} = l_{sn}^* \cdot A_{\Pi 3} S_{n-1} A_{\Pi 3} S_{n-2} \dots A_{\Pi 3} S_1, \quad p_{sn}^{*(2)} = l_{sn}^* A_{\Pi 3} S_{n-1} A_{\Pi 3} S_{n-2} \dots A_{\Pi 3} S_{11}, \dots,$$

$$p_{sn}^{*(15)} = l_{sn}^* \cdot A_{\Pi 3} S_{n-1} A_{\Pi 3} S_{n-2} \dots A_{\Pi 3} S_{141}.$$

Оскільки область допусків на параметри коректування задано у вигляді опуклої множини, екстремум буде досягатися на межі еліпсоїда, а вихідна задача — зводиться до задачі на умовний екстремум. У результаті отримаємо:

$$\begin{aligned} c^2 \leq \min_{s=1,2,\dots,\bar{N}} \min_{n=2,3,\dots,150} [& l_{sn}^* \cdot A_{\Pi 3} S_{n-1} A_{\Pi 3} S_{n-2} \dots A_{\Pi 3} S_1 B_1^{-1} (A_{\Pi 3} S_{n-1} A_{\Pi 3} S_{n-2} \dots A_{\Pi 3} S_1)^* \cdot l_{sn} + \\ & + l_{sn}^* A_{\Pi 3} S_{n-1} A_{\Pi 3} S_{n-2} \dots A_{\Pi 3} S_{11} B_2^{-1} (A_{\Pi 3} S_{n-1} A_{\Pi 3} S_{n-2} \dots A_{\Pi 3} S_{11})^* \cdot l_{sn} + \\ & + \dots + l_{sn}^* \cdot A_{\Pi 3} S_{n-1} A_{\Pi 3} S_{n-2} \dots A_{\Pi 3} S_{141} \cdot B_{15}^{-1} \cdot (A_{\Pi 3} S_{n-1} A_{\Pi 3} S_{n-2} \dots A_{\Pi 3} S_{141})^* \cdot l_{sn}]^{-1}. \end{aligned} \quad (11)$$

Зокрема, якщо $B_1 = B_2 = \dots = B_{15} = E$ (E — одинична матриця), маємо таку оцінку області допусків:

$$\begin{aligned} c^2 \leq \min_{s=1,2,\dots,\bar{N}} \min_{n=2,3,\dots,150} [& l_{sn}^* \cdot A_{\Pi 3} S_{n-1} A_{\Pi 3} S_{n-2} \dots A_{\Pi 3} S_1 (A_{\Pi 3} S_{n-1} A_{\Pi 3} S_{n-2} \dots A_{\Pi 3} S_1)^* \cdot l_{sn} + \\ & + l_{sn}^* A_{\Pi 3} S_{n-1} A_{\Pi 3} S_{n-2} \dots A_{\Pi 3} S_{11} (A_{\Pi 3} S_{n-1} A_{\Pi 3} S_{n-2} \dots A_{\Pi 3} S_{11})^* \cdot l_{sn} + \\ & + \dots + l_{sn}^* \cdot A_{\Pi 3} S_{n-1} A_{\Pi 3} S_{n-2} \dots A_{\Pi 3} S_{141} \cdot (A_{\Pi 3} S_{n-1} A_{\Pi 3} S_{n-2} \dots A_{\Pi 3} S_{141})^* \cdot l_{sn}]^{-1}. \end{aligned} \quad (12)$$

За допомогою формули (12) можна оцінювати множину допусків на параметри вигляду

$$\left\{ \tilde{\alpha}_1, \dots, \tilde{\alpha}_{15}, \tilde{\beta}_1, \dots, \tilde{\beta}_{15} : \sum_{k=1}^{15} (\tilde{\alpha}_k^2 + \tilde{\beta}_k^2) \leq \tilde{c}^2 \right\},$$

де $\tilde{\alpha}_k = \alpha_k - \bar{\alpha}_k$, $\tilde{\beta}_k = \beta_k - \bar{\beta}_k$, $k=1,2,\dots,15$. Для цього випадку $\tilde{c}^2 \leq \frac{c^2}{N}$, а стала c^2 визначається за нерівністю (12).

З таких позицій, для окремого типу обмежень на відхилення фазових координат при $n=10$, можна чисельно оцінити і множину допусків на параметри α_1 , β_1 . З цією метою область допусків необхідно задати у вигляді

$$G^{(\tilde{f})} = \{\tilde{f}_{(i)} : \tilde{f}_{(i)}^* \cdot \tilde{f}_{(i)} \leq c_1^2\}$$

або, що рівносильне, у вигляді $\{\tilde{\alpha}_1, \tilde{\beta}_1 : N(\tilde{\alpha}_1^2 + \tilde{\beta}_1^2) \leq c_1^2\}$. Тоді, за алгоритмами практичної стійкості, отримаємо

$$c_1^2 \leq \min_{s=1,2,\dots,\bar{N}} \min_{n=2,3,\dots,11} [l_{sn}^* \cdot A_{n3} S_{n-1} A_{n3} S_{n-2} \dots A_{n3} S_1 \cdot (A_{n3} S_{n-1} A_{n3} S_{n-2} \dots A_{n3} S_1)^* \cdot l_{sn}]^{-1},$$

(або $\tilde{c}_1^2 \leq \frac{c_1^2}{N}$, де $\tilde{c}_1^2$ визначатиме область допусків типу $\{\tilde{\alpha}_1, \tilde{\beta}_1 : \tilde{\alpha}_1^2 + \tilde{\beta}_1^2 \leq \tilde{c}_1^2\}$).

Зазначимо, що коли кількість частинок $N=3$, то матриця переходу у прискорювальному зазорі буде одиничною ($A_{n3} = E$). Тому, наприклад, останнє співвідношення набуватиме вигляду:

$$c_1^2 \leq \min_{s=1,2,\dots,\bar{N}} \min_{n=2,3,\dots,11} [l_{sn}^* \cdot S_{n-1} S_{n-2} \dots S_1 \cdot (S_{n-1} S_{n-2} \dots S_1)^* \cdot l_{sn}]^{-1}.$$

Якщо ж обмеження на розкид вектора фазових координат задано за допомогою опуклої замкненої множини

$$\tilde{G}_n = \{\tilde{z}_n : \psi_{sn}(\tilde{z}_n) \leq 1, s=1,2,\dots,\bar{N}\}, n=1,2,\dots,M,$$

її попередньо апроксимують дотичними гіперплощинами.

Аналогічні оцінки допусків можна отримати для випадку заданих обмежень на розкид критерію якості [3, 7, 8]:

$$|\Phi(z_M) - \Phi(\bar{z}_M)| < \varepsilon.$$

Висновки і перспективи. Для моделі лінійної індукційної системи прискорювання сформульовано постановки задач допусків на параметри коректувальних елементів. За допомогою критеріїв практичної стійкості отримано оцінки області допусків за наявності динамічних обмежень на розкид вектору фазових координат як загальний підхід до запропоновано алгоритму чисельного розв'язання цього класу задач за допомогою методів практичної стійкості дискретних систем.

Список використаних джерел

1. Бублик Б. Н., Гаращенко Ф. Г., Кириченко Н. Ф. Структурно-параметрическая оптимизация и устойчивость динамики пучков. К.: Наук. думка, 1985. 304 с.
2. Розенвассер Е. Н., Юсупов Р. М. Чувствительность систем управления. М.: Наука, 1981. 464 с.

3. Гаращенко Ф. Г., Панталієнко Л. А. Аналіз та оцінка параметричних систем. К.:ІСДО, 1995. 140 с.
4. Гаращенко Ф. Г., Сопронюк О. Л. Аналіз практичної стійкості та чутливості лінійних динамічних систем зі зміною вимірності фазового простору. Системні дослідження та інформаційні технології. 2016. № 3. С. 76-90.
5. Бенфорд А. Транспортировка пучков заряженных частиц. М.: Атомиздат, 1969. 240 с.
6. Панталієнко Л. А. Розрахунок оптимальних параметрів коректувальних елементів в індукційних системах прискорювання. Енергетика і автоматика. 2021. №2. С. 107–114.
7. Панталієнко Л. А. Алгоритми побудови областей стійкості для лінійних різницевих систем, залежних від параметрів. Електрифікація та автоматизація сільського господарства. 2006. №3-4. С. 61–65.
8. Панталієнко Л. А. Оптимальні оцінки в задачах практичної стійкості для лінійних дискретних параметричних систем зі збуреннями. Електрифікація та автоматизація сільського господарства. 2008. №1(22). С.45–50.

References

1. Bublyk, B. N., Garashchenko, F. G., Kyrychenko, N. F. (1985). Strukturno-parametrycheskaia optymyzatsiya y ustoichyvost dynamyky puchkov [Structural-parametric optimization and stability of beam dynamics]. Kyiv: Scientific thought, 304.
2. Rozenvasser, E. N., Yusupov, R. M. (1981). Chuvstvytelnost system upravleniya [Sensitivity control systems]. Moscow: Science, 464.
3. Garashchenko, F. G., Pantalienko, L. A. (1995). Analiz ta otsinka parametrychnykh system [Analysis and evaluation of parametric systems]. Kyiv: ISSE, 140.
4. Garashchenko, F. G., Sopronyuk, O. L. (2016). Analiz praktychnoyi stiykosti ta chutlyvosti liniynykh dynamichnykh system zi zminoyu vymirnosti fazovoho prostoru [Analysis of the practical stability and sensitivity of linear dynamical systems with changing the dimensionality of the phase space]. Systems research and information technology, 3, 76 –90.
5. Benford, A. (1969). Transportyrovka puchkov zaryazhennykh chastyts [Transportation of charged particle beams]. Moscow: Atomizdat, 240.
6. Pantaliienko L. A. (2021). Rozrakhunok optymal'nykh parametriv korektuvал'nykh elementiv v induktsiynykh systemakh pryskoryuvannya [Calculation of optimal parameters of corrective elements in induction acceleration systems]. Energy and automation, 2, 107 –114.
7. Pantaliienko L. A. (2006). Alhorytmy pobudovy oblastey stiykosti dlya liniynykh riznytsevykh system, zalezhnykh vid parametriv [Algorithms for constructing regions of stability for linear difference systems dependent on parameters]. Electrification and automation of agriculture, 3-4, 61–65.
8. Pantaliienko L. A. (2008). Optymal'ni otsinky v zadachakh praktychnoyi stiykosti dlya liniynykh dyskretnykh parametrychnykh system zi zburennnyamy [Optimal estimates in practical stability problems for linear discrete parametric systems with perturbations]. Electrification and automation of agriculture, 1(22), 45–50.

ОЦЕНКА ОБЛАСТИ ДОПУСКОВ НА ПАРАМЕТРЫ КОРРЕКТИРОВАНИЯ В ИНДУКЦИОННЫХ СИСТЕМАХ УСКОРЕНИЯ

Л. А. Панталиенко

Аннотация. Рассмотрены вопросы формализации и численного решения задач расчета допусков на параметры корректирующих элементов для линейной индукционной системы ускорения, непосредственно связанных с работоспособностью реального объекта.

Исследованы ключевые моменты динамики поперечного движения частиц для конкретной структуры линейной индукционной системы ускорения при заданных значениях энергии для каждого из периодов резонатора. Учтено наличие паразитных электрических и магнитных полей, возникающих в результате смещения частиц относительно оси ускорителя и изменяющих поперечные компоненты импульсов. Осуществлено преобразование исходной разностной модели индукционной системы в линейный вид.

Для формулировки постановок задач расчета допусков введены векторы разброса фазовых координат и допусков на параметры корректировки. С целью применения методов практической устойчивости множество допусков на параметры корректирующих элементов задано в виде эллипсоида. При условии, что начальные смещения поперечных координат относительно оси ускорителя известны постоянные величины, осуществлено оценивание структурированной области допусков при известных линейных ограничениях на разброс векторов фазовых координат. За разработанными алгоритмами практической устойчивости исходная задача расчета допусков сведена к задаче нахождения максимума линейной формы на эллипсоиде.

Исследованы отдельные важные типы ограничений на отклонения фазовых координат, касающиеся оценки допусков на параметры первого элемента корректировки и количества частиц. Для случая нелинейных динамических ограничений на разброс вектора фазовых координат выпуклое замкнутое множество предложено предварительно аппроксимировать касательными гиперплоскостями.

С позиций практической устойчивости рассмотрена задача оценки допусков для случая заданных ограничений на разброс критерия качества. С помощью алгоритмов практической устойчивости по направлению предложено оценивать максимальные по объему области допусков на параметры при наличии динамических ограничений на разброс фазовых координат или критерия качества.

Ключевые слова: допуски на параметры, индукционная система ускорения, соленоид, элементы корректировки, чувствительность, устойчивость

ESTIMATION OF THE TOLERANCE AREA FOR CORRECTION PARAMETERS IN INDUCTION ACCELERATION SYSTEMS

L. Pantalienenko

Abstract. The issues of formalization and numerical solution of the problems of calculating tolerances for the parameters of corrective elements for a linear induction acceleration system, which are directly related to the performance of a real object, are considered.

The key moments of the dynamics of the transverse motion of particles for a specific structure of a linear induction system of acceleration are studied for given values of energy for each of the periods of the resonator. The presence of parasitic electric and magnetic fields, which arise as a result of particle displacement relative to the accelerator axis and change the transverse components of the pulses, is taken into account. The original difference model of the induction system has been transformed into a linear form.

To formulate the problem statements for calculating tolerances, the scatter vectors of phase coordinates and tolerances for the correction parameters are introduced. In order to apply the methods of practical stability, the set of tolerances for the parameters of the corrective elements is given in the form of an ellipsoid. Provided that the initial displacements of the transverse coordinates relative to the axis of the accelerator are known constant values, the structured tolerance region was estimated under known linear restrictions on the spread of the phase coordinate vectors. Due to the developed algorithms of practical stability, the original problem of calculating tolerances is reduced to the problem of finding the maximum of a linear form on an ellipsoid.

Some important types of restrictions on deviations of phase coordinates concerning the estimation of tolerances on the parameters of the first correction element and the number of particles are investigated. For the case of non-linear dynamic constraints on the spread of the phase coordinate vector, it is proposed to approximate the convex closed set by tangent hyperplanes.

From the standpoint of practical stability, the problem of estimating tolerances for the case of given restrictions on the spread of the quality criterion is considered. With the help of practical directional stability algorithms, it is proposed to estimate the maximum tolerance ranges for parameters in terms of volume in the presence of dynamic restrictions on the spread of phase coordinates or a quality criterion.

Key words: *tolerances for parameters, induction system of acceleration, solenoid, elements of correction, sensitivity, stability*