УДК 519.876.5

М.П. ДИВАК, Є.О. МАРЦЕНЮК, О.Л. КОЗАК
Тернопільський національний економічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ ЗА УМОВ ІНТЕРВАЛЬНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ СТАНУ В КАНАЛІ ВИМІРЮВАНЬ

Розглянуто методи гарантованого та допускового оцінювання для задач параметричної ідентифікації лінійних динамічних систем, коли кількість вихідних змінних в каналі вимірювань більша за кількість параметрів стану.

The methods of guaranteed and tolerance estimations for the tasks of parameters identification of the linear dynamic systems when the quantity of output variables in the measuring channel are more than quantity of state parameters are considered.

Ключові слова: параметрична ідентифікація, динамічні системи, стан параметрів, інтервальні дані.

Для ідентифікації дискретних моделей динамічних систем за умов обмежених вибірок даних з похибками, обмеженими за амплітудою використовують методи аналізу інтервальних даних [1, 2].

У цих випадках задача параметричної ідентифікації моделей лінійних динамічних систем формулюється як задача розв’язування інтервальної системи лінійних алгебричних рівнянь (ІСЛАР) з невідомими коефіцієнтами-параметрами моделі.

Відомі методи розв’язування ІСЛАР, зазвичай орієнтовані на інтервальне оцінювання розв’язку, відзначаються низькою точністю, тому актуальним є розвиток методів параметричної ідентифікації моделей лінійних дискретних динамічних систем на основі інтервальних даних, які в порівнянні з методами інтервального оцінювання, забезпечують вищу точність при помірній складності алгоритмів їх реалізації.

Розробці вказаних методів присвячені праці відомих українських та зарубіжних науковців: В.Кунцевича, А.Куржанського, М.Личака і т.д. [3, 4, 5]. Проте ці методи відзначаються високою обчислювальною складністю.

В роботах С. Шарого при розв’язуванні задач параметричної ідентифікації лінійних динамічних систем знаходять загрублені гарантовані інтервальні оцінки [6]. Тоді як для розв’язання задач допускового контролю перехідних процесів в механічних системах чи електричних колах, або для задач оцінки динаміки концентрацій шкідливих викидів автотранспорту, важливим є визначення таких значень параметрів, які забезпечують допускові коридори динаміки параметрів стану. Такого типу задачі описані у працях М. Личака, М. Дивака, П. Стахіва [1, 3, 7]. Але у всіх працях вказаних авторів розглядається випадок, коли кількість вихідних змінних дорівнює кількості параметрів стану , що не завжди відповідає практиці задання каналу вимірювань. Переважно структура каналу вимірювань є набагато складнішою, тобто існують певні взаємозв’язки між множиною виходів та параметрів стану, що не дозволяє застосувати методи, розроблені у вказаних працях. Саме на випадок, коли кількість вихідних змінних більша кількості параметрів, орієнтована дана праця.

Постановка задачі

Розглянемо лінійний динамічний об’єкт за умов повної спостережності, зі скалярним управлінням, а також за умов обмежених за амплітудою похибок експериментальних даних. Такий об’єкт опишемо лінійними різницевими рівняннями динаміки (1) та рівняннями каналу вимірювань (2)

$$\vec{x}_{k+1} = G \cdot \vec{x}_k + Q \cdot \vec{u}_k\,,\ k = 0,...N-1\,, \tag{1}$$

$$\vec{y}_{k+1} = C \cdot \vec{x}_{k+1} + \vec{e}_{k+1}\,,\ k = 0,...N-1\,, \tag{2}$$

де k – час, який змінюється дискретно, $k = 0,...N-1$; $\vec{y}_{k+1}$ – вектор (розмірністю $n \times 1$) виміряних значень «виходів» системи; $\vec{x}_k$ – вектор (розмірністю $m \times 1$) змінних стану системи в k-й дискретний момент часу; $\vec{x}_{k+1}$ – вектор (розмірністю $m \times 1$) змінних стану системи в $k+1$-й дискретний момент часу; $\vec{u}_k = \left(u_{1k},\ \ u_{2k}\ \ ,\cdots,\ \ u_{pk}\right)^T$ – вектор (розмірністю $p \times 1$) вхідних змінних в k-й дискретний момент часу.

$$G = \begin{pmatrix} g_{11} & \cdots & g_{1i} & \cdots & g_{1n} \\ g_{21} & \cdots & g_{2i} & \cdots & g_{2n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ g_{n1} & \cdots & g_{ni} & \cdots & g_{nn} \end{pmatrix}, Q = \begin{pmatrix} q_{11} & \cdots & q_{1i} & \cdots & q_{1p} \\ q_{12} & \cdots & q_{2i} & \cdots & q_{2p} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ q_{n1} & \cdots & q_{ni} & \cdots & q_{np} \end{pmatrix}; C = \begin{pmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1i} & \cdots & c_{1n} \\ c_{12} & \cdots & c_{2i} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ c_{m1} & \cdots & c_{mi} & \cdots & c_{mn} \end{pmatrix}$$

G, Q – матриці параметрів моделі, елементи яких необхідно ідентифікувати; C – прямокутна $\left(m \times n\right), n \rangle m$ матриця, яка задає канал вимірювання; $\vec{e}_{k+1} = \left(e_{1k+1}\ \ e_{2k+1}\ \ \cdots\ \ e_{nk+1}\right)^T$ – вектор випадкових, обмежених за амплітудою похибок.

Нехай:

$$\left|e_{1k+1}\right| = \left|e_{2k+1}\right| = ... = \left|e_{nk+1}\right| = \left|e_{k+1}\right| \le \Delta_{k+1},\ \ \Delta_{k+1} > 0 \quad \forall\ k = 0,...,N-1\,. \tag{3}$$

Позначимо за **Gar** та **Tol** деякі перетворення, що дозволяють отримати, відповідно, гарантовані та допускові інтервали вектора параметрів стану на основі даних з каналу вимірювань, тобто:

$$[\vec{x}_k] = [\vec{x}_k^-; \vec{x}_k^+] = \mathbf{Gar}(\vec{y}_k, |e_k| \le \Delta_k, C), \; k = 1,...N, \tag{4}$$

$$[\vec{x}_{k+1}] = [\vec{x}_{k+1}^-; \vec{x}_{k+1}^+] = \mathbf{Tol}(\vec{y}_{k+1}, |e_{k+1}| \le \Delta_{k+1}, C), \; k = 0,...N-1. \tag{5}$$

Гарантоване перетворення на k-му кроці забезпечує включення коридору значень змінних стану отриманих з каналу вимірювань $[\vec{x}_k], k = 0,..., N-1$ в прогнозний коридор $[\hat{\vec{x}}_k]$ для змінних стану, тобто $[\vec{x}_k] = [\vec{x}_k^-; \vec{x}_k^+] \subseteq [\hat{\vec{x}}_k] = [\hat{\vec{x}}_k^-; \hat{\vec{x}}_k^+]$.

Допускове перетворення на $k+1$-му кроці забезпечує включення прогнозного коридору $[\hat{\vec{x}}_{k+1}]$ для змінних стану в коридор значень змінних стану отриманих з каналу вимірювань:

$$[\hat{\vec{x}}_{k+1}] = [\hat{\vec{x}}_{k+1}^-; \hat{\vec{x}}_{k+1}^+] \subseteq [\vec{x}_{k+1}] = [\vec{x}_{k+1}^-; \vec{x}_{k+}^+], \; k = 0,...N-1, \tag{6}$$

де

$$[\hat{\vec{x}}_{k+1}] = \hat{G} \cdot [\hat{\vec{x}}_k] + \hat{Q} \cdot \vec{u}_k, \tag{7}$$

$\hat{G}$ та $\hat{Q}$ – матриці оцінок параметрів рівняння (1).

Таким чином для ідентифікації моделі динаміки (1) необхідно провести перетворення, які дозволять отримати значення вектора параметрів стану з каналу вимірювань.

Очевидно, що перетворення **Gar** та **Tol** визначаються структурою каналу вимірювання. Із врахуванням рівнянь каналу вимірювання (2) та обмеженості амплітуди похибок $\vec{e}_{k+1}$, заданої виразом (3), рівняння каналу вимірювань, подамо в інтервальному вигляді:

$$\vec{y}_{k+1}^- \le C \cdot \vec{x}_{k+1} \le \vec{y}_{k+1}^+, \; k = 0,...N-1, \; n > m \tag{8}$$

де $\vec{y}_{k+1}^- = \vec{y}_{k+1} - \Delta_{k+1}\vec{I}$, $\vec{y}_{k+1}^+ = \vec{y}_{k+1} + \Delta_{k+1}\vec{I}$ – вектор нижніх і верхніх меж вихідних змінних ; $\vec{I}$ – одиничний вектор.

Користуючись рівняннями (8), що описують канал вимірювання, оцінки інтервалів вектора параметрів стану (4) і (5) набудуть такого вигляду:

$$[\vec{x}_k] = \mathbf{Gar}(\vec{y}_k^- \le C \cdot \vec{x}_k \le \vec{y}_k^+), k = 0,...N-1, n>m \tag{9}$$

$$[\vec{x}_{k+1}] = \mathbf{Tol}(\vec{y}_{k+1} \le C \cdot \vec{x}_{k+1} \le \vec{y}_{k+1}^+), \; k = 0,...N-1 \;, n>m \tag{10}$$

У праці $[1]$ наведено методи і алгоритми виконання перетворень (9), (10), а також побудований на їх основі метод параметричної ідентифікації лінійної дискретної системи на основі інтервальних даних для випадку $n = m$. Отже, провівши відповідні перетворення ІСЛАР (8) для загального випадку $n > m$ до ІСЛАР у вигляді:

$$\vec{y}_{k+1}^- \le C_m \cdot \vec{x}_{k+1} \le \vec{y}_{k+1}^+, k = 1,..., N, \tag{11}$$

де $n = m$, у такий спосіб, щоб множина розв'язків Ω_m ІСЛАР (11) максимально співпадала із множиною розв'язків Ω ІСЛАР (8), для ідентифікації лінійної дискретної динамічної системи (1) можемо використати метод, наведений у праці $[1]$ для випадку $n = m$. Очевидно, що перетворення системи (8) до системи (11) необхідно провести із урахуванням (9) та (10).

Метод гарантованого оцінювання інтервалів вектора параметрів стану на основі даних з каналу вимірювання.

Розглянемо метод та алгоритм приведення системи (8), що описує канал вимірювання до системи (11), розв'язок якої максимально наближений до розв'язку ІСЛАР (8). Така система описує канали вимірювань із кількістю виходів більшою від кількості параметрів стану.

Нехай маємо сумісну систему (8), яка включає $n \ge m$ рівнянь. Із системи рівнянь (8), необхідно вибрати насичений блок із m рівнянь, який задається матрицею C_m $(m \times m)$. Розв'язком цієї системи є множина Ω_m, яка в просторі параметрів $\vec{x}$ визначає гіперпаралелепіпед з вершинами $\vec{x}_{sk+1}$, що обчислюють за формулою [8]

$$\vec{x}_{sk+1} = C_m^{-1} \cdot \vec{y}_{sk+1}, \; s = 1,..., 2^m, \tag{12}$$

де $\vec{y}_{sk+1} = \left(y_1^+, y_2^-, \ldots, y_j^+, ..., y_n^-\right)$ – вектор, складений з межових значень інтервалів $\left[y_j^-; y_j^+\right]$, $j = 1, \ldots, n$.

Якщо вказану систему із m рівнянь сформувати у такий спосіб, щоб вигляд гіперпаралелепіпеда Ω_m максимально наближався до вигляду многогранника Ω – розв'язку усієї системи (8), то мінімізуючи розміри отриманого гіперпаралелепіпеда, наприклад, його об'єм V_{Ω_m}

$$V_{\Omega_m} \longrightarrow \min, \tag{13}$$

з урахуванням решти *N-m* інтервальних рівнянь (спостережень) системи (8) та за умови включення

$$\Omega \subseteq \Omega_m, \tag{14}$$

можемо отримати більш точнішу гарантовану оцінку, ніж інтервальна.

Систему із m інтервальних рівнянь сформуємо так, щоб квадрат об’єму $V^2_{\Omega_m}$ гіперпаралелепіпеда Ω_m був мінімальним, тобто

$$\left(\prod_{i=1}^{m}\Delta_j^{\,2}\right)\cdot \det(C_m \cdot C_m^{\,T})^{-1} \xrightarrow{C_m} \min \tag{15}$$

У випадку відомої системи (8) і $n > m$ дана задача розв’язується на множині $j = 1,...,n$.

Відповідно до формули (15) та формули для визначення інтервальних похибок $\Delta_i = 0,5\cdot(y_j^{\,+} - y_j^{\,-})$, при відомій фіксованій матриці C_m задача гарантованого оцінювання (13), (14) стає еквівалентною таким задачам:

$$y_j^{\,+} \longrightarrow \min,\ y_j^{\,-} \longrightarrow \max,\ \forall j = 1,...,m,\ n = m,\ \Omega \subseteq \Omega_m \tag{16}$$

Для розв’язування задачі гарантованого оцінювання (16), використаємо ітераційний метод. На i +1-й ітерації нижнє $y_j^{\,-}(i+1)$ та верхнє $y_j^{\,+}(i+1)$ інтервальні значення правих частин кожного із базових m рівнянь обчислюємо за такими формулами:

$$y_j^{\,-}(i+1) = y_j^{\,-}(i) + \delta_j^-(i+1),\ y_j^{\,+}(i+1) = y_j^{\,+}(i) - \delta_j^+(i+1),\ k = 1,...,n,\ n = m \tag{17}$$

При цьому у формулах (17) значення $\delta_j^-(i+1) \ge 0$ та $\delta_j^+(i+1) \ge 0$ максимізуємо, виходячи із умови включень

$$\Omega \subseteq \{\, \Omega_m(i) \cap \breve{\Omega}(i+1)\,\} \subseteq \Omega_m(i+1), \tag{18}$$

де $\Omega_m(i+1)$ – m -вимірний гіперпаралелепіпед, отриманий на $i+1$-тій ітерації;

$\breve{\Omega}(i+1)$ – “гіперсмуга”, яку визначаємо $i+1$-м рівнянням (i =1,…, $n-m$) із тих, що залишились у системі (8) після вибору m базових рівнянь.

Одержання гарантованої оцінки $\Omega_m(i+1)$ на $i+1$-му кроці полягає у переміщенні відповідних граней паралелепіпеда $\Omega_m(i)$ таким чином, щоб вершини, які на i -му кроці розміщені на найближчій відстані від гіперплощини, заданої активним обмеженням у вигляді певної частини інтервального рівняння ІСЛАР (8) із $n-m$, опинились на цій гіперплощині.

Переміщення граней гіперпаралелепіпеда для двох кроків у випадку $m = 2$ зображено на рис. 1.

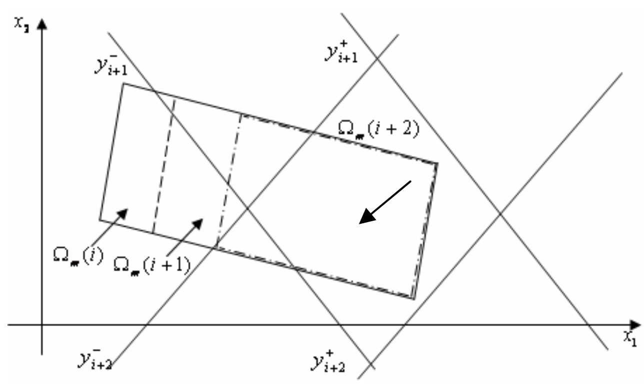

Рис. 1. Ілюстрація процедури гарантованого оцінювання множини параметрів для випадку $m = 2$

Позначимо за $\vec{x}_s(i)$ ($s = 1,...,2^m$) вершину гіперпаралелепіпеда $\Omega_m(i)$ і перетворимо формулу (11) до вигляду, придатного для обчислення координат вершин на i -тій ітерації

$$\vec{x}_s(i) = C_m^{-1}\cdot \vec{y}_s(i), \tag{19}$$

де $\vec{y}_s(i)$, – вектор, складений із комбінацій нижніх $y_j^{\,-}(i)$ та верхніх $y_j^{\,+}(i)$ інтервальних значень правих частин кожного із базових m рівнянь, які обчислюємо за рекурентними формулами (16).

Введемо для кожної вершини $\vec{x}_s(i)$ скалярні функції, які характеризують відстань між вершиною і відповідною межею “гіперсмуги” $\breve{\Omega}(i+1)$

$$L_s(i) = y^-_{i+1} - \vec{c}_{i+1}\cdot \vec{x}_s(i),$$

$$L'_s(i) = \vec{c}_{i+1} \cdot \vec{x}_s(i) - y^+_{i+1} = -L_s(i) - \Delta_{i+1}, \qquad (20)$$

де $\vec{c}_{i+1}$ – рядок матриці С у $i+1$ спостереженні, який визначає $i+1$ рівняння у системі (8);

y^-_{i+1}, y^+_{i+1} – нижнє та верхнє інтервальні значення виходу у $k+1$ спостереженні;

$\Delta_{i+1} = y^+_{i+1} - y^-_{i+1}$.

Тоді, за аналогією із методом та алгоритмом гарантованого оцінювання параметрів статичних систем, наведених в праці [8] в рекурентній формулі (17) для $\delta^-_j(i+1)$ та $\delta^+_j(i+1)$ отримаємо такі вирази:

$$\delta^-_j(i+1) = \begin{cases} \min\limits_{s=1,\dots,2^{m-1}} \{L_s(i) / \left|\vec{c}_{i+1} \cdot \vec{c}_j\right|\}, \text{ якщо } L_s(i) > 0, \vec{c}_{i+1} \cdot \vec{c}_j \neq 0 \\ 0, \text{ якщо } L_s(i) \le 0 \end{cases} \qquad (21)$$

$$\delta^+_j(i+1) = \begin{cases} \min\limits_{s=1,\dots,2^{m-1}} \{L'_s(i) / \left|\vec{c}_{i+1} \cdot \vec{c}_j\right|\}, \text{ якщо } L'_s(i) > 0, \vec{c}_{i+1} \cdot \vec{c}_j \neq 0 \\ 0, \text{ якщо } L'_s(i) \le 0 \end{cases} \qquad (22)$$

Отже для реалізації однієї ітерації, запропонованого локалізаційного методу необхідно виконати таку послідовність обчислень:

1. Розрахувати значення скалярних функцій $L_s(i)$ та $L'_s(i)$ для усіх вершин гіперпаралелепіпеда.
2. Розрахувати $\delta^-_j(i+1)$ та $\delta^+_j(i+1)$, відповідно, за формулами (21) та (22).
3. Обчислити межі інтервалу [$y_j^-(i+1)$; $y_j^+(i+1)$] за формулою (17).

Метод допускового оцінювання інтервалів вектора параметрів стану на основі даних з каналу вимірювання.

Перетворення (10) дозволяє знайти допускові інтервали параметрів стану на основі даних з каналу вимірювання $[1]$. Для його виконання попередньо необхідно перетворити ІСЛАР (8) до ІСЛАР (11), але у такий спосіб, щоб:

$$V_{\tilde{\Omega}_m} \xrightarrow{\tilde{\Omega}_m} \max, \ \tilde{\Omega}_m \subseteq \Omega, \qquad (23)$$

де $\tilde{\Omega}_m$ – розв’язок системи (11).

Для пошуку Ω_m із розв’язку задачі (23) використовують ітераційну процедуру, на кожному $i+1$ кроці якої шукають допускову область $\Omega_m(i+1)$, додаючи одне інтервальне рівняння з $n-m$, що залишились у системі (8) після вибору m – базових рівнянь.

Тоді задачу (23) для $i+1$ – кроку записують у такому вигляді:

$$V_{\Omega_m(i+1)} \xrightarrow{\Omega_m(i+1)} \max, \qquad (24)$$

за умови включень

$$\Omega_m(i+1) \subseteq \Omega \subseteq \left\{\Omega_m(i) \cap \breve{\Omega}(i+1)\right\}, \qquad (25)$$

де $\Omega_m(i+1)$ m-вимірний паралелепіпед, отриманий на $i+1$-й ітерації; $\breve{\Omega}(i+1)$ — “гіперсмуга“, яка визначається $i+1$-м рівнянням ($i = 0,\dots,n-m-1$) із тих, що залишились у системі (19) після вибору m – базових рівнянь.

Фактично процедура одержання допускової оцінки $\Omega_m(i+1)$ на $i+1$-му кроці полягає у переміщенні відповідних граней паралелепіпеда $\Omega_m(i)$ у такий спосіб, щоб вершина, яка на i-му кроці розміщена на найбільшій відстані від гіперплощини, заданої активним обмеженням у вигляді певної частини інтервального рівняння ІСЛАР (8) із $n-m$, опинилась на цій гіперплощині.

Процедуру переміщення граней для двох кроків у випадку $m=2$ зображено на рис. 2.

У результаті реалізації цієї процедури для $n-m$ кроків одержимо допускову область $\tilde{\Omega}_m = \Omega_m(i = n-m)$.

Як зазначено вище, розв’язок цієї задачі на $i+1$– кроці одержимо внаслідок переміщення відповідних граней паралелепіпеда $\Omega_m(i)$ за умови виконання включень (25). Таке переміщення еквівалентне використанню перетворень

$$y^+_j(i+1) = y^+_j(i) - \delta^+_j(i+1), \qquad (26)$$

$$y^-_j(i+1) = y^-_j(i) - \delta^-_j(i+1). \qquad (27)$$

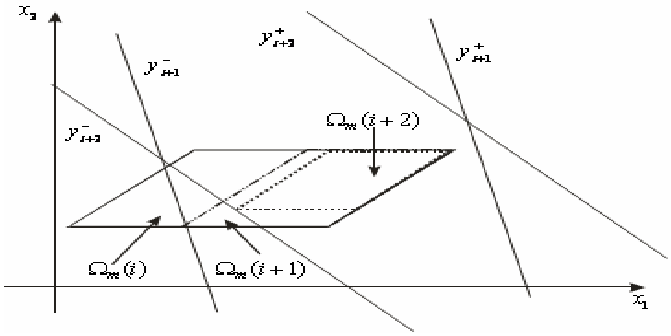

Рис. 2. Ілюстрація процедури допускового оцінювання множини параметрів для випадку $m=2$

Беручи до уваги вищевикладене, ітераційну процедуру (24) можемо переписати у такому еквівалентному вигляді:

$$\prod_{k=1}^{m}\left(y_j^+\left(i+1\right)-y_j^-\left(i+1\right)\right)^2\cdot\det\left(C_m\cdot C_m^T\right)^{-1}\xrightarrow{y_j^+(i+1),\,y_j^-(i+1),\,i=1,\dots,m}\max \tag{28}$$

Еквівалентні перетворення формули (28), проведені у праці [8], дозволили задачу (24), (25) перетворити до такої задачі нелінійного програмування:

$$2\cdot\sum_{j=1}^{m}\ln(y_j^+(i)-\delta_j^+(i+1)-y_j^-(i)-\delta_j^-(i+1))+\ln(\det(C_m\cdot C_m^T)^{-1})\to \tag{29}$$

$$\xrightarrow{\delta_j^-(i+1),\,\delta_j^+(i+1),\,j=1,\dots,m}\max,$$

$$y_{j+1}^- - C_{j+1}^T\cdot C_m^{-1}\cdot\vec{Y}_{s^*}(i+1)=0\,, \tag{30}$$

$$C_{j+1}^T\cdot C_m^{-1}\cdot\vec{y}_{s^*}(i+1)-y_{j+1}^+=0\,, \tag{31}$$

$$0\le\delta_j^+(i+1)\le y_j^+(i)-y_j^-(i)\,,\;\;0\le\delta_j^-(i+1)\le y_j^+(i)-y_j^-(i)\,. \tag{32}$$

В результаті реалізації даного методу одержимо систему m інтервальних рівнянь виду (11). Тоді, використовуючи інтервальну арифметику $[1]$, з перетворення (10) отримаємо допускові оцінки параметрів стану у такому вигляді:

$$\begin{aligned}
&\min_{\Delta_{k+1}\in\{-\Delta_{k+1};+\Delta_{k+1}\}}\left\{c_{11}^*\cdot(y_{1k+1}-\Delta_{k+1})+\dots+c_{1j}^*\cdot(y_{jk+1}-\Delta_{k+1})+\dots+c_{1m}^*\cdot(y_{mk+1}-\Delta_{k+1})\right\}\le x_{1k+1}\le\\
&\le\max_{\Delta_{k+1}\in\{-\Delta_{k+1};+\Delta_{k+1}\}}\left\{c_{11}^*\cdot(y_{1k+1}+\Delta_{k+1})+\dots+c_{1j}^*\cdot(y_{jk+1}+\Delta_{k+1})+\dots+c_{1m}^*\cdot(y_{mk+1}+\Delta_{k+1})\right\};\\
&\vdots\\
&\min_{\Delta_{k+1}\in\{-\Delta_{k+1};+\Delta_{k+1}\}}\left\{c_{j1}^*\cdot(y_{1k+1}-\Delta_{k+1})+\dots+c_{jj}^*\cdot(y_{jk+1}-\Delta_{k+1})+\dots+c_{jm}^*\cdot(y_{mk+1}-\Delta_{k+1})\right\}\le x_{ik+1}\le\\
&\le\max_{\Delta_{k+1}\in\{-\Delta_{k+1};+\Delta_{k+1}\}}\left\{c_{j1}^*\cdot(y_{1k+1}+\Delta_{k+1})+\dots+c_{jj}^*\cdot(y_{jk+1}+\Delta_{k+1})+\dots+c_{jm}^*\cdot(y_{mk+1}+\Delta_{k+1})\right\};\qquad,\\
&\vdots\\
&\min_{\Delta_{k+1}\in\{-\Delta_{k+1};+\Delta_{k+1}\}}\left\{c_{m1}^*\cdot(y_{1k+1}-\Delta_{k+1})+\dots+c_{mj}^*\cdot(y_{jk+1}-\Delta_{k+1})+\dots+c_{mm}^*\cdot(y_{mk+1}-\Delta_{k+1})\right\}\le x_{mk+1}\le\\
&\le\max_{\Delta_{k+1}\in\{-\Delta_{k+1};+\Delta_{k+1}\}}\left\{c_{m1}^*\cdot(y_{1k+1}+\Delta_{k+1})+\dots+c_{mj}^*\cdot(y_{jk+1}+\Delta_{k+1})+\dots+c_{mm}^*\cdot(y_{mk+1}+\Delta_{k+1})\right\},
\end{aligned}$$

$$k=0,\dots,N-1.\;\;(33)$$

Запропоновані підходи до отримання гарантованих і допускових оцінок параметрів стану дозволяють суттєво спростити процедури ідентифікації лінійних дискретних моделей динамічних систем і при цьому є придатними для будь-якої заданої структури каналу вимірювань.

Висновки

Розглянуто задачу параметричної ідентифікації лінійних динамічних систем методами аналізу інтервальних даних. Розглянуто випадок параметричної ідентифікації динамічних систем коли кількість вихідних змінних в каналі вимірювання більша від кількості параметрів стану і при цьому із застосуванням методу аналізу даних отримано такі наукові та практичні результати:

- вперше показано, що канал вимірювання лінійного динамічного об’єкта з кількістю виходів більших від кількості параметрів стану цього об’єкта може бути наближено представлений моделлю лінійного динамічного об’єкта з каналом вимірювання, у якого кількість виходів більша від кількості параметрів стану, що дозволило розв’язати задачу параметричної ідентифікації лінійних динамічних систем на основі інтервальних даних відомими методами та алгоритмами;

- вперше для випадку, коли кількість вихідних змінних не дорівнює кількості параметрів стану отримані перетворення для обчислення гарантованих та допускових інтервалів вектора параметрів стану на основі даних з каналу вимірювань, що дозволило розробити метод параметричної ідентифікації динамічної системи на основі інтервальних даних, який на відміну від існуючих забезпечує знаходження допускових коридорів динаміки параметрів стану системи за умов заданих параметрів каналу вимірювань.

Література

1. Дивак М.П. Моделювання лінійних динамічних систем із заданою структурою вимірювання методами аналізу інтервальних даних / М.П. Дивак, А.В. Пукас, Є.О. Марценюк, І.Ф. Войтюк // Моделювання та керування станом еколого-економічних систем регіону : зб. праць. – К. : МННЦ ІТС, 2008. – С. 79–91.

2. Дивак М.П. Використання насиченого експерименту для оцінювання параметрів інтервальної моделі при аналізі інтервальних даних / М.П. Дивак // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 1999. – № 2. – С. 33–36.

3. Дивак М. Ідентифікація параметрів моделей “вхід-вихід” динамічних систем на основі інтервального підходу / М. Дивак, П. Стахів, І. Каліщук // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2004. – Т. 9, № 4. – С. 109–117.

4. Кунцевич В. Получение гарантированных оценок в задачах параметрической идентификации / В. Кунцевич, М. Лычак // Автоматика. – 1982. – № 4. – С. 49–59.

5. Куржанский А.Б. Задача идентификации – теория гарантированных оценок / А.Б. Куржанский // Автоматика и телемеханика. – 1991. – № 4. – С. 3–26.

6. Шарый С.П. Интервальный анализ: прошлое, настоящее и будущее / С.П. Шарый // Наука в Сибири. – 1997. – № 41 (2127). – С. 3.

7. Dyvak M. Interval identification of dynamic model of realization of bakery produce / M. Dyvak, I. Kalishchuk, Ye. Martsenyuk. // Proc. of International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, TCSET 2006–Lviv-Slavske: National University „Lviv Polytechnic”. – 2006. – P. 159–163.

8. Дивак М.П. Метод допускового оцінювання параметрів інтервальних моделей статичних систем / М.П. Дивак, О.Л. Козак // Відбір і обробка інформації. – 2007. – Вип. 26. – С. 18–26.

Надійшла 2.11.2009 р.