

УДК.519.876.5

М.Дивак, докт.техн.наук; П.Стахів, докт.техн.наук; І.Калішук*Тернопільська академія народного господарства*

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ МОДЕЛЕЙ “ВХІД-ВИХІД” ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ІНТЕРВАЛЬНОГО ПІДХОДУ

Розглянуто задачу параметричної ідентифікації моделі типу “вхід-вихід” динамічного об’єкта на основі інтервальних даних експерименту. Запропоновано метод та алгоритм інтервальної ідентифікації параметрів динамічної моделі. Наведено приклад застосування запропонованого методу для моделювання електричного кола силового трьохфазного трансформатора.

Вступ

Моделі типу “вхід-вихід” широко використовуються для дослідження динамічних об’єктів. Параметрична ідентифікація є одним із етапів побудови цих моделей. В цьому випадку, при відомому загальному вигляді залежності, яка описуватиме зв’язок між вхідними (керуючими) та вихідними змінними, на основі заданих наборів управлінь та спостережуваної реакції на ці управління об’єкта необхідно оцінити невідомі коефіцієнти – параметри моделі. Результати спостережень за реакцією об’єкта переважно містять похибки, що призводять до невизначеності при оцінюванні параметрів моделі. Як засвідчують численні публікації, які стосуються задач параметричної ідентифікації [1-10], найчастіше для урахування цієї невизначеності використовують стохастичний підхід. Застосування стохастичного підходу вимагає дослідження похибок спостережень з метою встановлення їх статистичних характеристик [3]. Однак такий підхід є малоприматним за умови малої вибірки спостережень з обмеженими за амплітудою похибками. Слід зауважити, що вимірювальні похибки практично завжди є обмеженими. В цьому випадку для розв’язування задач параметричної ідентифікації більш придатним є інтервальний підхід [10]. Підтвердженням зазначеного вище є достатні успіхи застосування інтервального підходу для ідентифікації моделей статичних систем [2], а також численні результати, отримані при розв’язуванні задач ідентифікації моделей динамічних систем на основі теоретико-множинного та інтервального підходів, наведені в працях В.М.Кунцевича, М.М.Личака, С.П.Шарого, А.Б.Куржанського, Н.М.Куссуль, Ф.Л.Черноусько, Е.Валтер, Л.Пронзато [1, 4-10]. При застосуванні інтервального та теоретико-множинного підходів, на відміну від стохастичного, оцінки параметрів моделей задають гарантованими множинами значень у вигляді багатовимірних прямокутних паралелепіпедів (інтервальні оцінки) або у вигляді багатовимірних еліпсоїдів.

Незважаючи на практичну привабливість методів параметричної ідентифікації, частина з них, що наведена у працях [1, 6], відзначається низькою точністю побудованих моделей, а інша частина [7-10] - надзвичайно високою обчислювальною складністю. Тим часом для побудови моделей “вхід-вихід” статичних систем в межах інтервального підходу розроблено достатньо ефективні алгоритми параметричної ідентифікації, які забезпечують прийнятну точність оцінок, характеризуються низькою обчислювальною складністю та можливістю розпаралелення обчислень [2].

Таким чином, актуальною є задача створення на основі інтервального підходу нових методів параметричної ідентифікації моделей “вхід-вихід” динамічних систем із застосуванням нових результатів, отриманих при розв’язуванні задач ідентифікації моделей “вхід-вихід” статичних систем, які б забезпечували прийнятну точність моделей та не вимагали високої обчислювальної складності алгоритмів їх побудови.

І. Постановка задачі

Розглянемо лінійний динамічний об’єкт, описаний системою дискретних рівнянь:

$$\vec{x}_{k+1} = G \cdot \vec{x}_k + Q \cdot \vec{u}_k, \quad k = 1, 2, \dots \quad (1)$$

$$\vec{y}_{k+1} = C \vec{x}_{k+1} + \vec{e}_{k+1}, \quad k = 1, 2, \dots, \quad (2)$$

де $\vec{x}_k \in R^m$ - вектор параметрів стану об'єкту в k -тий дискретний момент часу; $\vec{u}_k \in R^n$ - вектор вхідних змінних (управлінь) в k -тий дискретний момент часу; $\vec{y}_{k+1} \in R^p$ - вектор вихідних змінних в $k+1$ -ий дискретний момент часу; G, Q, C - матриці з невідомими елементами; $\vec{e}_{k+1} = (e_{k+1,1}, \dots, e_{k+1,i}, \dots, e_{k+1,p})^T$ - вектор випадкових обмежених похибок в $k+1$ -ий момент часу із симетричним законом розподілу.

Нехай відома максимальна амплітуда цих похибок:

$$|e_{k+1}| \leq \Delta, \Delta > 0 \forall k = 1, 2, \dots \quad (3)$$

Не порушуючи загальності, введемо такі спрощення: $C=I$ - одинична матриця, тоді $p=m$; надалі будемо розглядати систему із скалярним управлінням, в якій $u_k \in R$.

Тоді системи (1), (2) перепишемо у такому вигляді:

$$\begin{cases} x_{1,k+1} = g_{1,1} \cdot x_{1,k} + \dots + g_{1,i} \cdot x_{i,k} + \dots + g_{1,m} \cdot x_{m,k} + q_1 \cdot u_k \\ \vdots \\ x_{i,k+1} = g_{i,1} \cdot x_{1,k} + \dots + g_{i,i} \cdot x_{i,k} + \dots + g_{i,m} \cdot x_{m,k} + q_i \cdot u_k \\ \vdots \\ x_{m,k+1} = g_{m,1} \cdot x_{1,k} + \dots + g_{m,i} \cdot x_{i,k} + \dots + g_{m,m} \cdot x_{m,k} + q_m \cdot u_k \end{cases} \quad (4)$$

$$y_{k+1} = x_{k+1} + e_{k+1}, |e_{k+1}| \leq \Delta, \Delta > 0 \forall k = 1, 2, \dots \quad (5)$$

Задача оцінювання значень елементів матриць G і Q на основі даних експерименту (інтервальних даних) є задачею ідентифікації параметрів моделі (1), (2) динамічного об'єкта. При цьому інтервальні дані отримані в результаті реалізації скалярного управління і вимірювання змінних стану з обмеженими похибками у дискретні моменти згідно з (5) та симетричністю закону розподілу похибок:

$$u_k \rightarrow [x_{k+1}^-, x_{k+1}^+], \quad k = 1, 2, \dots, \quad (6)$$

де $x_{k+1}^- = x_{k+1} - i \cdot \Delta$ і $x_{k+1}^+ = x_{k+1} + i \cdot \Delta$ - вектори нижніх та верхніх меж гарантованих інтервалів змінних стану; i - вектор, всі компоненти якого дорівнюють "1".

II. Метод інтервальної ідентифікації параметрів динамічного об'єкта

Із урахуванням даних експерименту у вигляді (6), система рекурентних рівнянь

(4) матиме такий вигляд:

$$\begin{cases} x_{1,k+1}^- \leq g_{1,1} \cdot [x_{1,k}^-, x_{1,k}^+] + \dots + g_{1,i} \cdot [x_{i,k}^-, x_{i,k}^+] + \dots + g_{1,m} \cdot [x_{m,k}^-, x_{m,k}^+] + q_1 \cdot u_k \leq x_{1,k+1}^+ \\ \vdots \\ x_{i,k+1}^- \leq g_{i,1} \cdot [x_{1,k}^-, x_{1,k}^+] + \dots + g_{i,i} \cdot [x_{i,k}^-, x_{i,k}^+] + \dots + g_{i,m} \cdot [x_{m,k}^-, x_{m,k}^+] + q_i \cdot u_k \leq x_{i,k+1}^+ \\ \vdots \\ x_{m,k+1}^- \leq g_{m,1} \cdot [x_{1,k}^-, x_{1,k}^+] + \dots + g_{m,i} \cdot [x_{i,k}^-, x_{i,k}^+] + \dots + g_{m,m} \cdot [x_{m,k}^-, x_{m,k}^+] + q_m \cdot u_k \leq x_{m,k+1}^+ \end{cases}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (7)$$

Розв'язок отриманої інтервальної системи алгебраїчних рівнянь дозволяє оцінити параметри (елементи матриць Q, G) моделі динамічного об'єкта. Для спрощення подальшого розгляду методу ідентифікації параметрів, виділимо із системи (7) стрічки для фіксованого значення i та $k = 1, 2, \dots, N$.

$$\begin{cases} x^- \leq g_{i,1} \cdot [x^-, x^+]_{1,0} + \dots + g_{i,m} \cdot [x^-, x^+]_{m,0} + q_i \cdot u \leq x^+ \\ \vdots \\ x^- \leq g_{i,k+1} \cdot [x^-, x^+]_{i,1,k} + \dots + g_{i,m} \cdot [x^-, x^+]_{i,m,k} + q_i \cdot u \leq x^+ \\ \vdots \\ x^- \leq g_{i,N} \cdot [x^-, x^+]_{1,N-1} + \dots + g_{i,m} \cdot [x^-, x^+]_{m,N-1} + q_i \cdot u \leq x^+ \end{cases} \quad (8)$$

Отримана система (8) є інтервальною системою лінійних (відносно невідомих елементів матриць Q та G) алгебраїчних рівнянь (ІСЛАР). Властивості цієї системи в достатній мірі досліджені в інтервальному аналізі. Зокрема, відомо, що ІСЛАР (8) подібна до ІСЛАР, які є формальним представленням задач параметричної ідентифікації моделей статичних систем на основі інтервальних даних [2]. В просторі оцінок коефіцієнтів $g_i = (g_{i,1}, \dots, g_{i,m})$ множина розв'язків Ω системи (8) є не опуклий многогранник (див. рис. 1 для випадку $N=m=2$).

У разі $N=m$ загальний розв'язок Ω_m ІСЛАР (8) є об'єднання 2^{m-m} його складових у вигляді m -вимірних паралелепіпедів $\Omega_{m,p}$, $p = 1, \dots, 2^{m-m}$, один із яких для випадку $N=m=2$ зображений на рис. 2. Кожна складова $\Omega_{m,p}$ загального розв'язку Ω_m є множиною розв'язків інтервальної системи, яка отримується із ІСЛАР (8) шляхом використання однієї з 2^{m-m} комбінацій нижніх або верхніх меж інтервалів $[x^-, x^+]_{i,k}$, $i = 1, \dots, m, k = 1, \dots, m$.

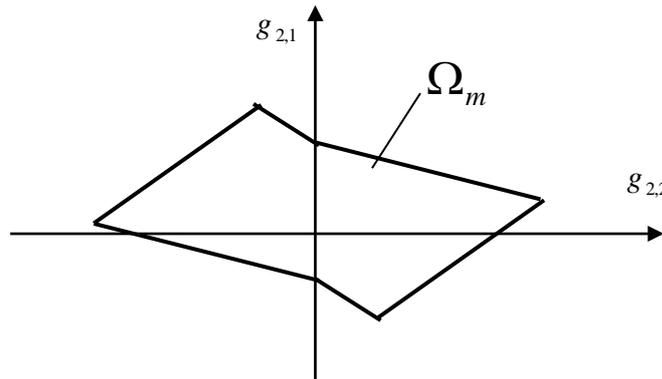


Рис. 1. Ілюстрація загального розв'язку ІСЛАР для випадку $N=m=2$

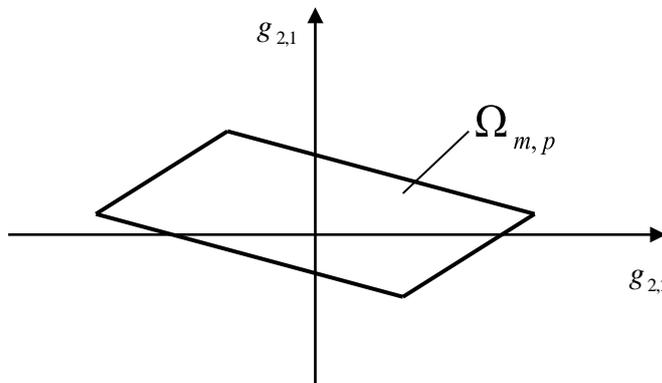


Рис. 2. Ілюстрація складової загального розв'язку ІСЛАР для випадку $N=m=2$

У випадку $N > m$ загальний розв'язок ІСЛАР (8) отримуємо у вигляді не опуклої множини Ω внаслідок перерізу N/m множин Ω_m , які є розв'язком ІСЛАР із m інтервальних рівнянь, виділених із загальної ІСЛАР (8).

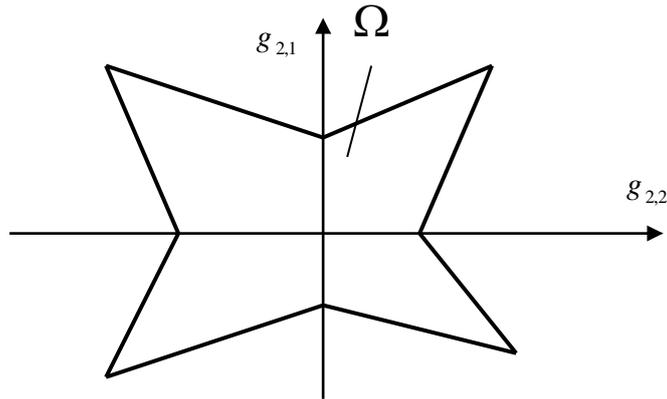


Рис. 3. Ілюстрація розв'язку Ω ІСЛАР (8) для загального випадку $N > m = 2$

Загальний розв'язок ІСЛАР (8) у вигляді множини Ω є надзвичайно складним для опису (див. рис. 3), а його знаходження пов'язане із застосуванням достатньо трудомісткої обчислювальної процедури. За цих умов в інтервальному аналізі шукають наближення множини Ω у вигляді гарантованого та допустимого прямокутних m - вимірних паралелепіпедів Π^+ чи Π^- відповідно. Вказані наближення дозволяють отримати параметри моделі в інтервальному вигляді, тобто у вигляді інтервальних матриць:

$$[G] = \begin{pmatrix} [g^-, g^+] & \cdot & [g^-, g^+] \\ 1,1 & 1,1 & 1,m \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ [g^-, g^+] & \cdot & [g^-, g^+] \\ i,1 & i,1 & i,m \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ [g^-, g^+] & \cdot & [g^-, g^+] \\ m,1 & m,1 & m,m \end{pmatrix}, [Q] = \begin{pmatrix} [q^-, q^+] \\ 1 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ [q^-, q^+] \\ i & i \\ \vdots & \vdots \\ [q^-, q^+] \\ m & m \end{pmatrix}.$$

Аналіз найпоширеніших випадків наближень розв'язку ІСЛАР (8) Ω (у вигляді Π^+ і Π^- -множин) показав: наближення загального розв'язку ІСЛАР (8) у вигляді Π^+ - множини не забезпечує високої точності моделі, оскільки, в цьому випадку, отримуємо широкі інтервали можливих значень елементів матриць Q та G ; обчислювальний процес наближення Π^- - множиною відзначається високою складністю і для підвищеної розмірності моделі ($m > 8$) його реалізація стає практично неможливою.

Результати проведеного аналізу загального розв'язку ІСЛАР (8) дозволили побудувати наступний двокроковий алгоритм інтервальної ідентифікації параметрів динамічних моделей.

Перший крок алгоритму – отримання наближення загального розв'язку Ω у вигляді гарантованого (описаного навколо множини Ω) прямокутного m - вимірного паралелепіпеда на $N-m+1$ ітераціях.

На першій ітерації даного кроку знаходимо Π^+ - множини – як наближення розв'язку Ω_m для m інтервальних рівнянь. В результаті отримуємо інтервальний вектор оцінок параметрів: $\vec{[g_i]} = ([g_{i1}], \dots, [g_{ij}], \dots, [g_{im}])^T$. Наступними $k=m+1, \dots, N-m$ ітераціями першого кроку алгоритму є уточнення Π^+ - множини оцінок параметрів ІСЛАР шляхом послідовного додавання решти $N-m$ інтервальних рівнянь із ІСЛАР (8) і знаходження розв'язку отриманої системи на $k = m+l$ -тій ітерації. Ця система для даної ітерації матиме такий вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} [g_{i1,k+1}] = [g_{i1,k}] \\ [g_{i2,k+1}] = [g_{i2,k}] \\ \vdots \\ x_{l,k+1}^- \leq [x_{1,k}^- ; x_{1,k}^+] \cdot [g_{i1,k+1}^- ; g_{i1,k+1}^+] + [x_{2,k}^- ; x_{2,k}^+] \cdot [g_{i2,k+1}^- ; g_{i2,k+1}^+] + \dots \quad (9) \\ + [x_{i,k}^- ; x_{i,k}^+] \cdot [g_{ii,k}^- ; g_{ii,k}^+] + [x_{m,k}^- ; x_{m,k}^+] \cdot [g_{im,k+1}^- ; g_{im,k+1}^+] \leq x_{l,k+1}^+ \\ \vdots \\ [g_{im,k+1}] = [g_{im,k}] \end{array} \right.$$

Як видно із (9), отримана на $k = m + l$ -тій ітерації система суттєво спрощується внаслідок послідовного наближення множини Π^+ загального розв'язку Ω не усіх рівнянь ІСЛАР (8), а лише частини. На кожній ітерації першого кроку алгоритму система (9) включає одне інтервальне рівняння із ІСЛАР (8) та m рівнянь з попередньої ітерації наближення Π^+ -множиною у вигляді $[g_{ii,k+1}] = [g_{ii,k}]$, $i = 1, \dots, m$. Отже, після реалізації першого кроку отримаємо наближення загального розв'язку ІСЛАР (8) Ω у вигляді множини Π^+ .

Враховуючи, що таке наближення не забезпечує високої точності моделі динамічного об'єкта, на другому кроці алгоритму інтервальної ідентифікації параметрів проводимо уточнення отриманого розв'язку шляхом наближення результату перетину $\Pi^+ \cap \Omega_m$ у вигляді допустимого прямокутного m -вимірною паралелепіеда $\tilde{\Pi}^-$. Такий підхід, з одного боку, дозволить суттєво спростити обчислювальну процедуру ідентифікації через простоту задання Π^+ та нескладну процедуру знаходження Ω_m -множини, а з іншого боку – підвищити точність моделі, оскільки Π^- -множина завдяки включенням $\Pi^- \in \Pi^+$ та $\tilde{\Pi}^- \in \Omega_m$ матиме таку властивість :

$$V(\Pi^-) \leq V(\tilde{\Pi}^-) < V(\Pi^+),$$

де $V(.)$ - об'єм відповідного m -вимірною паралелепіеда.

Очевидно, що запропонований підхід є надзвичайно ефективним у випадку, коли область Ω буде сильно витягнутою і її конфігурація буде подібною до конфігурації Ω_m -множини - розв'язку m інтервальних рівнянь. Зауважимо, що подібна ситуація достатньо часто зустрічається на практиці.

III. Ідентифікація динамічної моделі трьохфазного трансформатора

Проілюструємо особливості та можливості запропонованого методу інтервальної ідентифікації параметрів моделі динамічного об'єкта на прикладі побудови моделі силового трьохфазного трансформатора. Еквівалентна електрична схема трансформатора наведена на рис. 4.

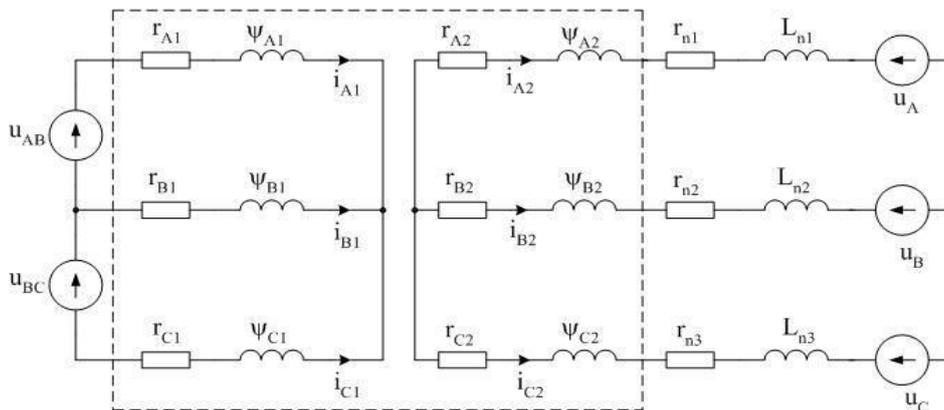


Рис. 4. Еквівалентна електрична схема трьохфазного трансформатора

Графіки перехідного процесу для струмів i_{c1} , i_{c2} відповідно, обвиток середньої та високої напруги для однієї фази “С”, отримані за умови $u_{AB} = u_{BC} = u_A = u_c = 0$ та подачі скачка напруги фіксованою амплітудою U_{nom} на обвитку фази “В”, тобто $u_B = U_{nom}$. При знятті характеристик перехідного процесу похибка вимірювань (похибка в каналі вимірювань) складала: $|e_{k+1}| \leq 0,1 \forall k = 1, 2, \dots$

Отже, модель “вхід-вихід” трансформатора включає один вхід ($u = U_{nom}$) та два виходи $\vec{y} = (i_{c1}, i_{c2})^T$. В силу умови повної спостережності ($C=I$), матимемо: $x_{1,k+1} = i_{c1,k+1}$ і $x_{2,k+1} = i_{c2,k+1}$ відповідно.

Для спрощення ілюстрації методу інтервальної ідентифікації параметрів моделі “вхід-вихід” трансформатора використаємо тільки 10 дискретних значень струмів i_{c1} , i_{c2} , отриманих в моменти часу, що належать проміжку від $t = 0$ с до $t = 0,2$ с (таблиця 1).

Таблиця 1

Дискретні значення струмів i_{c1} , i_{c2}

№	t_{k+1}	$x_{1,k+1}^-$	$x_{1,k+1}^+$	$x_{2,k+1}^-$	$x_{2,k+1}^+$
1	0,02	-0,85	-0,65	3,51	3,71
2	0,04	-1,2	-1	7,29	7,49
3	0,06	-1,348	-1,126	10,02	10,22
4	0,08	-1,35	-1,133	11,69	11,89
5	0,1	-1,29	-1,09	12,76	12,96
6	0,12	-1,2	-0,98	13,28	13,48
7	0,14	-1,1	-0,9	13,68	13,88
8	0,16	-0,99	-0,79	13,92	14,12
9	0,18	-0,89	-0,69	14,09	14,29
10	0,2	-0,79	-0,59	14,22	14,42

За умови $x_{1,0} = 0$, $x_{2,0} = 0$ (у початковий момент струми обвиток дорівнюють нулю) отримаємо таку систему інтервальних рівнянь:

$$\begin{cases}
 -0,85 \leq g_{11} \cdot 0 + g_{12} \cdot 0 + q_1 \cdot U_{nom} \leq -0,65 \\
 3,51 \leq g_{21} \cdot 0 + g_{22} \cdot 0 + q_2 \cdot U_{nom} \leq 3,71 \\
 -1,2 \leq g_{11} \cdot [-0,85; -0,65] + g_{12} \cdot [3,51; 3,71] + q_1 \cdot U_{nom} \leq -1 \\
 7,29 \leq g_{21} \cdot [-0,85; -0,65] + g_{22} \cdot [3,51; 3,71] + q_2 \cdot U_{nom} \leq 7,49 \\
 -1,348 \leq g_{11} \cdot [-1,2; -1] + g_{12} \cdot [7,29; 7,49] + q_1 \cdot U_{nom} \leq -1,126 \\
 10,02 \leq g_{21} \cdot [-1,2; -1] + g_{22} \cdot [7,29; 7,49] + q_2 \cdot U_{nom} \leq 10,22 \\
 -1,35 \leq g_{11} \cdot [-1,348; -1,126] + g_{12} \cdot [10,02; 10,22] + q_1 \cdot U_{nom} \leq -1,133 \\
 11,69 \leq g_{21} \cdot [-1,348; -1,126] + g_{22} \cdot [10,02; 10,22] + q_2 \cdot U_{nom} \leq 11,89 \\
 -1,29 \leq g_{11} \cdot [-1,35; -1,133] + g_{12} \cdot [11,69; 11,89] + q_1 \cdot U_{nom} \leq -1,09 \\
 12,76 \leq g_{21} \cdot [-1,35; -1,133] + g_{22} \cdot [11,69; 11,89] + q_2 \cdot U_{nom} \leq 12,96 \\
 -1,2 \leq g_{11} \cdot [-1,29; -1,09] + g_{12} \cdot [12,76; 12,96] + q_1 \cdot U_{nom} \leq -0,98 \\
 13,28 \leq g_{21} \cdot [-1,29; -1,09] + g_{22} \cdot [12,76; 12,96] + q_2 \cdot U_{nom} \leq 13,48 \\
 -1,1 \leq g_{11} \cdot [-1,2; -0,98] + g_{12} \cdot [13,28; 13,48] + q_1 \cdot U_{nom} \leq -0,9 \\
 13,68 \leq g_{21} \cdot [-1,2; -0,98] + g_{22} \cdot [13,28; 13,48] + q_2 \cdot U_{nom} \leq 13,88 \\
 -0,99 \leq g_{11} \cdot [-1,1; -0,9] + g_{12} \cdot [13,68; 13,88] + q_1 \cdot U_{nom} \leq -0,79 \\
 13,92 \leq g_{21} \cdot [-1,1; -0,9] + g_{22} \cdot [13,68; 13,88] + q_2 \cdot U_{nom} \leq 14,12 \\
 -0,89 \leq g_{11} \cdot [-0,99; -0,79] + g_{12} \cdot [13,92; 14,12] + q_1 \cdot U_{nom} \leq -0,69 \\
 14,09 \leq g_{21} \cdot [-0,99; -0,79] + g_{22} \cdot [13,92; 14,12] + q_2 \cdot U_{nom} \leq 14,29 \\
 -0,79 \leq g_{11} \cdot [-0,89; -0,69] + g_{12} \cdot [14,09; 14,29] + q_1 \cdot U_{nom} \leq -0,59 \\
 14,22 \leq g_{21} \cdot [-0,89; -0,69] + g_{22} \cdot [14,09; 14,29] + q_2 \cdot U_{nom} \leq 14,42
 \end{cases} \quad (10)$$

Розв'язавши перше та друге інтервальні рівняння із системи (10), отримаємо: $[q_1] = [-0,85/U_{nom}; -0,65/U_{nom}]$ та $[q_2] = [3,51/U_{nom}; 3,71/U_{nom}]$.

Із урахуванням отриманих інтервальних значень $[q_1]$ та $[q_2]$ сформуємо дві незалежні ІСЛАР типу (8), які дозволяють обчислити невідомі g_{11}, g_{12} та g_{21}, g_{22} , відповідно:

$$\left\{ \begin{array}{l} -1,2 \leq g_{11} \cdot [-0,85; -0,65] + g_{12} \cdot [3,51; 3,71] + [-0,85; -0,65] \leq -1 \\ -1,348 \leq g_{11} \cdot [-1,2; -1] + g_{12} \cdot [7,29; 7,49] + [-0,85; -0,65] \leq -1,126 \\ -1,35 \leq g_{11} \cdot [-1,348; -1,126] + g_{12} \cdot [10,02; 10,22] + [-0,85; -0,65] \leq -1,133 \\ -1,29 \leq g_{11} \cdot [-1,35; -1,133] + g_{12} \cdot [11,69; 11,89] + [-0,85; -0,65] \leq -1,09 \\ -1,2 \leq g_{11} \cdot [-1,29; -1,09] + g_{12} \cdot [12,76; 12,96] + [-0,85; -0,65] \leq -0,98 \\ -1,1 \leq g_{11} \cdot [-1,2; -0,98] + g_{12} \cdot [13,28; 13,48] + [-0,85; -0,65] \leq -0,9 \\ -0,99 \leq g_{11} \cdot [-1,1; -0,9] + g_{12} \cdot [13,68; 13,88] + [-0,85; -0,65] \leq -0,79 \\ -0,89 \leq g_{11} \cdot [-0,99; -0,79] + g_{12} \cdot [13,92; 14,12] + [-0,85; -0,65] \leq -0,69 \\ -0,79 \leq g_{11} \cdot [-0,89; -0,69] + g_{12} \cdot [14,09; 14,29] + [-0,85; -0,65] \leq -0,59 \end{array} \right. \quad (11)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 7,29 \leq g_{21} \cdot [-0,85; -0,65] + g_{22} \cdot [3,51; 3,71] + [3,51; 3,71] \leq 7,49 \\ 10,02 \leq g_{21} \cdot [-1,2; -1] + g_{22} \cdot [7,29; 7,49] + [3,51; 3,71] \leq 10,22 \\ 11,69 \leq g_{21} \cdot [-1,348; -1,126] + g_{22} \cdot [10,02; 10,22] + [3,51; 3,71] \leq 11,89 \\ 12,76 \leq g_{21} \cdot [-1,35; -1,133] + g_{22} \cdot [11,69; 11,89] + [3,51; 3,71] \leq 12,96 \\ 13,28 \leq g_{21} \cdot [-1,29; -1,09] + g_{22} \cdot [12,76; 12,96] + [3,51; 3,71] \leq 13,48 \\ 13,68 \leq g_{21} \cdot [-1,2; -0,98] + g_{22} \cdot [13,28; 13,48] + [3,51; 3,71] \leq 13,88 \\ 13,92 \leq g_{21} \cdot [-1,1; -0,9] + g_{22} \cdot [13,68; 13,88] + [3,51; 3,71] \leq 14,12 \\ 14,09 \leq g_{21} \cdot [-0,99; -0,79] + g_{22} \cdot [13,92; 14,12] + [3,51; 3,71] \leq 14,29 \\ 14,22 \leq g_{21} \cdot [-0,89; -0,69] + g_{22} \cdot [14,09; 14,29] + [3,51; 3,71] \leq 14,42 \end{array} \right. \quad (12)$$

Оцінка інтервальних елементів матриці $[G]$ у вигляді $\tilde{\Pi}^-$ - множини, обчислена за допомогою запропонованого алгоритму наближення, матиме такий вигляд:

$$[G] = \left(\begin{array}{cc} [0,213; 0,281] & [-0,005; 0,011] \\ [-2,031; -1,972] & [0,592; 0,604] \end{array} \right)$$

Отримані оцінки елементів матриць $[G]$ та $[Q]$ дозволяють побудувати гарантовану інтервальну оцінку прогнозування для струмів i_{c1}, i_{c2} .

Результати прогнозування наведені на рис. 5 та рис. 6, де використані такі позначення: i_{c1}^-, i_{c1}^+ - нижня і верхня межі значень виміряного струму i_{c1} ; i_{c2}^-, i_{c2}^+ - нижня і верхня межі значень виміряного струму i_{c2} ; \hat{i}_d^-, \hat{i}_d^+ - нижня і верхня межі інтервального прогнозу для струму i_{c1} ; $\hat{i}_{c2}^-, \hat{i}_{c2}^+$ - нижня і верхня межа інтервального прогнозу для струму i_{c2} .

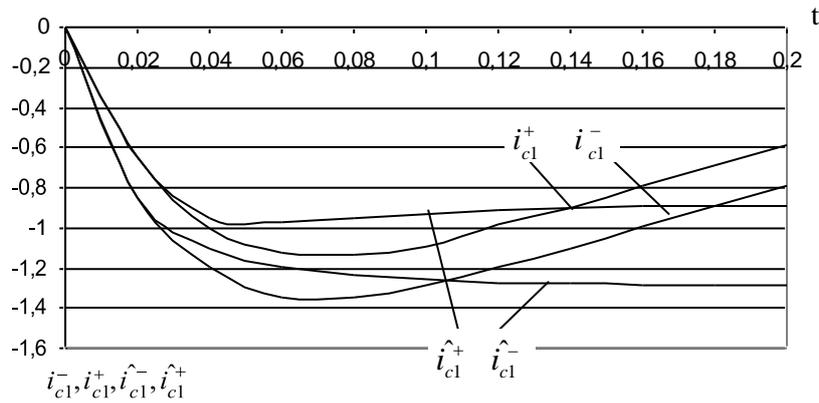


Рис.5. Результати прогнозування для струму i_{c1}

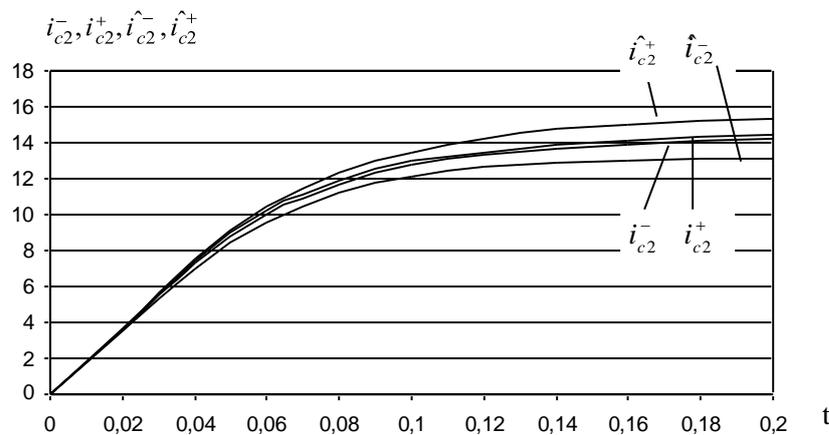


Рис. 6. Результати прогнозування для струму i_{c2}

Як видно з рис.5, інтервальний прогноз для струму i_{c1} характеризується низькою точністю. Очевидно, що у даному випадку необхідно використовувати складнішу від запропонованої (1) модель. Її можна побудувати, наприклад, шляхом уведення нелінійної відносно \vec{x} та \vec{u} частини у модель (1), що повністю відповідатиме запропонованому методу.

Висновки:

1. Аналіз задачі інтервальної ідентифікації параметрів моделей дискретних лінійних динамічних систем показав її подібність до задачі параметричної ідентифікації моделей статичних систем. Обидві задачі зводяться до знаходження розв'язку інтервальної системи лінійних алгебраїчних рівнянь.
2. Проведений аналіз загального розв'язку ІСЛАР дозволив розробити метод та алгоритм інтервальної ідентифікації параметрів динамічних моделей, що у порівнянні із існуючими відрізняється більшою точністю та невисокою обчислювальною складністю.
3. Результати застосування запропонованого методу і алгоритму для побудови моделі "вхід - вихід" силового трьохфазного трансформатора показали, що навіть при достатньо малій кількості спостережень у випадку правильного вибору структури моделі метод забезпечує її високу точність.

The task of parameters identification of "input-output" model of dynamic object on the base of interval data is considered. The method and algorithm of interval parameters identification of the dynamic model is proposed. The example of the proposed method usage for modeling of the electrical circuit of the three-phase transformer are shown.

Література

1. E. Walter, H. Piet – Lohanier. Estimation parameter bounds from bounded-error data // Proc. 12-th IMACS world congress. - Paris, 1988.
2. А.Вошинин, М.Дывак. Планирование оптимального насыщенного эксперимента в задачах построения интервальных моделей // Заводская лаборатория. –1993. -№1.-С.56-59.
3. Стрейц В. Метод пространства состояний в теории дискретных линейных систем управления / Пер. с англ. Под ред. Я.З. Цыпкина. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – 296 с.
4. В.Кунцевич, М.Лычак. Получение гарантированных оценок в задачах параметрической идентификации // Автоматика. – 1982. - №4. - С.49-59.
5. E.Walter, L.Pronzato. Identification of parametric model from experimental data. – London, Berlin, Heidelberg, New York, Paris, Tokyo: Springer, 1997. – 413p.
6. Куссуль Н.Н. Идентификация моделей дискретных динамических систем на основе нейросетевого и множественного подходов // Проблемы управления и информатики. – 2000. – №2. – С.44-51.
7. А.Б.Куржанский. Задача идентификации – теория гарантированных оценок // Автоматика и телемеханика. – 1991. - №4. – С.3-26.
8. Черноусько Ф.Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. Метод эллипсоидов. – М.: Наука, 1988. – 320 с.
9. Шарый С.П. Новый подход к анализу статических систем с интервальной определенностью в данных // Вычислительные Технологии. – 1997. – Т.2. - №1. – С.84-102.

Одержано 09.11.2004 р.