

О.С. КОВАЛЕВСКА, С.В. КОВАЛЕВСКИЙ

МОДЕЛІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МЕХАНІЗМІВ ПАРАЛЕЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

Представлено обґрунтування можливості моделювання об'єктів на основі сигнатур, які являють собою образ механізму паралельної структури у вигляді спектра власних коливань структурно пов'язаних актуаторів і виконавчих ланок. Показано, що динамічні властивості стрижневих конструкцій, що описують об'єкти з кінцевим числом ступенів свободи і змінним розподілом навантажень на них, можуть бути представлені рівняннями, які є частотними рівняннями власних коливань системи механізмів паралельної структури. На основі якісного аналізу точності і адекватності ідентифікаційних динамічних моделей і застосування математичного апарату нейронних мереж зроблено висновок про перевагу оцінки його ідентифікаційних моделей в порівнянні з їх точністю. Представлені результати експериментальних досліджень сигнатур окремих конфігурацій механізмів паралельної конфігурації.

Ключові слова: моделювання, ідентифікація, динаміка конструкцій, адекватність моделей, точність моделей, нейронні мережі, сигнатура, механізми паралельної структури.

Е.С. КОВАЛЕВСКАЯ, С.В. КОВАЛЕВСКИЙ

МОДЕЛИ ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕХАНИЗМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

Представлено обоснование возможности моделирования объектов на основе сигнатур, которые представляют собой образ механизма параллельной структуры в виде спектра собственных колебаний структурно связанных актуаторов и исполнительных звеньев. Показано, что динамические свойства стержневых конструкций, описывающих объекты с конечным числом степеней свободы и переменным распределением нагрузок на них, могут быть представлены уравнениями, которые являются частотными уравнениями собственных колебаний системы механизмов параллельной структуры. На основе качественного анализа точности и адекватности идентификационных динамических моделей и применения математического аппарата нейронных сетей сделан вывод о предпочтительности оценки адекватности идентификационных моделей в сравнении с их точностью. Представлены результаты экспериментальных исследований сигнатур отдельных конфигураций механизмов параллельной конфигурации.

Ключевые слова: моделирование, идентификация, динамика конструкций, адекватность моделей, точность моделей, нейронные сети, сигнатура, механизмы параллельной структуры.

O. KOVALEVSKA, S. KOVALEVSKYY

MODELS OF IDENTIFICATION OF PARALLEL STRUCTURE MECHANISMS

The substantiation of the possibility of modeling objects based on signatures, which represent the image of the mechanism of a parallel structure in the form of the natural oscillation spectrum of structurally connected actuators and executive links, is presented. It is shown that the dynamic properties of rod structures describing objects with a finite number of degrees of freedom and variable load distributions on them can be represented by equations that are frequency equations of natural oscillations of a system of mechanisms of a parallel structure. Based on a qualitative analysis of the accuracy and adequacy of identification dynamic models and the use of the mathematical apparatus of neural networks, it was concluded that it is preferable to assess the adequacy of identification models in comparison with their accuracy. The results of experimental studies of the signatures of some configurations of the mechanisms of the parallel configuration are presented.

Keywords: modeling, identification, structural dynamics, model adequacy, model accuracy, neural networks, signature, mechanisms of parallel structure.

Вступ. Верстатне обладнання з механізмами паралельної структури (МСП) здатне вирішити широке коло завдань підвищення продуктивності і ефективності і є перспективним напрямком в підвищенні гнучкості виробництва. Таке обладнання відрізняється жорсткістю конструкції при достатній точності переміщень робочих органів з малою металоємністю, здатністю до мобільності, високим рівнем комп'ютеризації [1]. Особливість верстатів з МСП, засобів і методів формування деталей машин, зокрема, розташування ланок МСП зменшує величину переміщення верстатних мас, що сприяє зниженню енергетичних показників, а передача формотворчих рухів платформи, яка несе виконавчі органи верстата за допомогою актуаторів, збільшує точність позиціонування інструменту. Механізми паралельної структури і створене на їх основі верстатне обладнання здатні забезпечити широке коло завдань. Тому, кардинальне вдосконалення виробничих технологій веде до створення комплексно автоматизованих верстатних систем на базі механічних, електронних, програмних синергетично інтегрованих в єдине ціле.

Ідентифікація об'єктів являє собою задачу, рішення якої актуалізується в системах оптимального управління цими об'єктами. Тому вимоги до таких моделей регламентуються їх відповідністю критеріям достовірності і точності цілям застосування [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. На основі таких моделей можуть створюватися еталонні моделі, які використовуються системами автоматизованого управління для коригуючого впливу на об'єкт управління [**Ошибка! Источник ссылки не найден.,Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Створенню ідентифікаційних моделей засновано на виборі і обґрунтуванні інформаційного джерела з подальшим формуванням масиву прецедентів. Від їх обсягу та якості залежить достовірність ідентифікаційної моделі об'єкта.

Однією з особливостей такої ідентифікації об'єктів є твердження про залежність реакції об'єкта від складності збурюючого впливу на цей об'єкт. Суть цього твердження полягає в тому, що обсяг інформації про індивідуальні властивості об'єкта є пропорційний складності функції збурюючого впливу і може бути ідентифікований в функції відклику на цей вплив

[**Ошибка! Источник ссылки не найден.**] З теорії автоматичного управління відомо, що ступінчасті впливу як аналог одиничних, дозволяють виявляти передавальні характеристики ланок динамічних моделей об'єктів. Цей приклад дозволяє припускати, що власні коливання об'єкта і його елементів містять інформацію про визначальну множину його властивостей і характеристик.

Мета роботи. Теоретичне та експериментальне обґрунтування можливості динамічної ідентифікації МСП, включаючи їх виконавчі ланки на основі спектрів власних коливань, тобто, обґрунтування і підтвердження доцільності ідентифікації об'єктів на основі хвильових сигнатур власних коливань.

Основна частина. Під сигнатурою сигналів власних коливань МПС слід розуміти амплітудно-частотну характеристику певного стану об'єкта. Таким чином, кожному ідентифікованому стану об'єкта повинна відповідати певна сигнатура: сукупність таких сигнатур здатне описувати відповідну множину станів об'єкта:

$$\begin{aligned} &1\text{-й стан об'єкта} - S1(t); \\ &2\text{-й стан об'єкта} - S2(t); \\ &\dots \dots \dots \\ &n\text{-й стан об'єкта} - Sn(t). \end{aligned} \quad (1)$$

Оскільки технічні і технологічні об'єкти можуть бути описані сукупністю матеріальних, енергетичних та інформаційних складових, то саме сигнатури об'єктів, що мають хвильовий характер, містять найбільш повний обсяг інформації про об'єкт.

Проблема динамічної ідентифікації об'єктів полягає в розробці математичного апарату моделювання, який би володів можливостями, що забезпечують необхідні характеристики точності $d(t)$ і адекватності $A(t)$ динамічної моделі. Цій проблемі присвячено багато робіт [6,7,8,9,10,11]. Однак, проблема актуальності прецедентів потребує подальшого обговорення і додаткових дослідженнях [12,13,14].

Для аналізу стрижневий конструкції МПС прийнято наступне:

- безперервний розподіл маси замінено дискретним точковим розподілом мас;
- конструкція МПС розглядається як система з кінцевим числом ступенів свободи.

Таким чином, в обох випадках стрижнева конструкція МПС розглядаються як системи з кінцевим числом ступенів свободи, що складаються з пружного безмасового скелета конструкції і приєднаних до нього дискретних мас. Розрахункові схеми окремих стрижневих конструкцій МПС як систем з кінцевим числом ступенів свободи засновані на описі положення мас при коливаннях конструкції, які описуються лінійними і кутовими переміщеннями. Під дією прикладеної до стрижневий конструкції періодичного навантаження $H(t)$ вона здійснює коливання. Конструкція розглядається як система з кінцевим числом ступенів свободи (рис.1).

Беручи число незалежних переміщень

стрижневий конструкції МПС як n , число лінійних переміщень – m , прийнято число кутових переміщень – $(n - m)$. Тоді, лінійні переміщення: y_1, \dots, y_m , а α кутові переміщення: $\varphi_{m+1}, \dots, \varphi_n$.

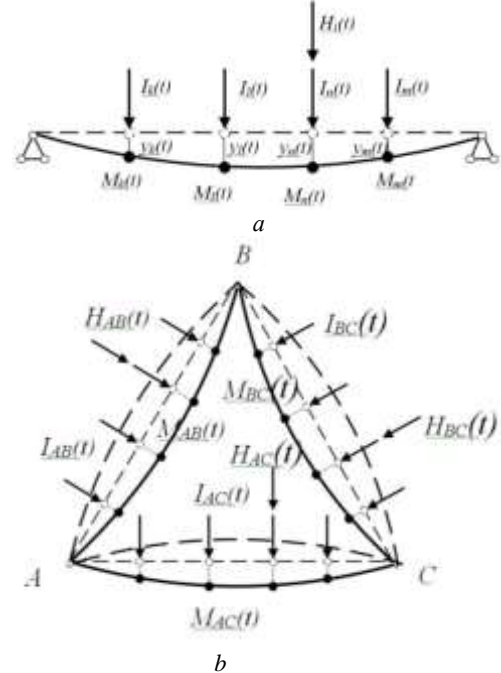


Рисунок 1 – Схеми навантажень елементів ланок стрижневих конструкцій МПС: *a* – загальна схема наприкладі окремої ланки МСП; *b* – схема навантажень базової конфігурації МСП

Початкові умови зміщення мас описуються наступною системою:

$$y_1(t) = y_{01}, \dots, y_m(t) = y_{0m}$$

$$\varphi_{m+1}(t) = \varphi_{0m+1}, \dots, \varphi_n(t) = \varphi_{0n}$$

Початкові швидкості цих зсувів:

$$y_1(0) = y_{01}, \dots, y_m(0) = y_{0m}$$

$$\varphi_{m+1}(0) = \varphi_{0m+1}, \dots, \varphi_n(0) = \varphi_{0n}$$

Динамічні переміщення $y_j(t)$ мас m_j при коливаннях системи з кінцевим числом ступенів свободи відносно їх положення рівноваги викликають реакції R_j , які залежать від діючих сил $H_i(t)$, податливостей δ_j і відповідають рівнянням:

$$R_j(y_1, \dots, y_n, H_i(t)) = -(r_{j1}y_1 + \dots + r_{jn}y_n + R_{jH_i(t)});$$

$$(j = 1, \dots, n);$$

$$m_j \ddot{y}_j = -(r_{j1}y_1 + \dots + r_{j1}y_1 + R_{jH_i(t)});$$

$$(j = 1, \dots, n);$$

$$y_j = \delta_{j1}I_1(t) + \dots + \delta_{jn}I_n(t) + \Delta_{jH_i(t)};$$

$$(j = 1, \dots, n);$$

$$I_j(t) = -m_j \ddot{y}_j;$$

$$\delta_{j1}m_1\ddot{y}_1 + \dots + \delta_{jn}m_n\ddot{y}_1 + y_j = \Delta_{jH_i(t)}; \\ (j = 1, \dots, n).$$

Виходячи з цих форм записи переміщень елементів МПС і їх реакцій побудовані системи рівнянь, що описують коливання елементів МПС у вигляді підсистеми лінійних і кутових переміщень.

$$m_k\ddot{y}_k = -(\sum_{i=1}^m r_{ki}y_i + \sum_{j=m+1}^n r_{kj}\varphi_j); \\ I_k\ddot{\varphi}_k = -(\sum_{i=1}^m r_{li}y_i + \sum_{j=m+1}^n r_{lj}\varphi_j); \\ (k = 1, \dots, m; \quad l = m + 1, \dots, n).$$

Спираючись на рівняння вільних коливань у вигляді:

$$y_k = a_k \sin(\omega t + \beta); \\ \varphi_l = a_l \sin(\omega t + \beta), \\ (k = 1, \dots, m; \quad l = m + 1, \dots, n).$$

де: a_k, a_l - амплітуди вільних коливань системи; ω - кругова частота коливань системи, отримана система рівнянь, що дозволяє визначити невідомі амплітуди МПС згідно [17]:

$$(r_{11} - m_1\omega^2)a_1 + \dots + r_{1m}a_m + r_{1m+1}a_{m+1} + \dots + r_{1n}a_n = 0;$$

.....;

$$r_{m1}a_1 + \dots + (r_{mm} - m_m\omega^2)a_m + r_{mm+1}a_{m+1} + \dots + r_{mn}a_n = 0;$$

$$r_{m11}a_1 + \dots + r_{m+1m}a_m (r_{m+1m+1} - I_{m+1}\omega^2)a_{m+1} + \dots + r_{m+1n}a_n = 0;$$

.....;

$$r_{n1}a_1 + \dots + r_{nm}a_m + r_{nm+1}a_{m+1} + \dots (r_{nn} - I_n\omega^2)a_n = 0.$$

Аналогічно отримана система диференціальних рівнянь:

$$\sum_{i=1}^m \delta_{ki}m_i\ddot{y}_i + \sum_{j=m+1}^n \delta_{kj}I_j\ddot{\varphi}_j + y_k = 0; \\ \sum_{i=1}^m \delta_{li}m_i\ddot{y}_i + \sum_{j=m+1}^n \delta_{lj}I_j\ddot{\varphi}_j + \varphi_l = 0;$$

$$(k = 1, \dots, m; \quad l = m + 1, \dots, n).$$

Отримана система рівнянь також складається з двох взаємопов'язаних підсистем. Перша підсистема диференціальних рівнянь описує лінійні переміщення мас ($k = 1, \dots, m$), друга - кутові переміщення мас ($l = m + 1, \dots, n$) при вільних коливаннях конструкції.

У матричній формі ця система диференціальних рівнянь має вигляд:

$$[\delta][a]\ddot{q} + \dot{q} = 0;$$

$$[\delta] = \begin{pmatrix} \delta_{11} & \dots & \delta_{1m} & \delta_{1m+1} & \dots & \delta_{1n} \\ \dots & \ddots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_{m1} & \dots & \delta_{mm} & \delta_{mm+1} & \dots & \delta_{mn} \\ \delta_{m+11} & \dots & \delta_{m+1m} & \delta_{m+1m+1} & \dots & \delta_{m+1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ \delta_{n1} & \dots & \delta_{nm} & \delta_{nm+1} & \dots & \delta_{nn} \end{pmatrix},$$

де $[\delta]$ - матриця податливості конструкції МПС.

Оскільки матриця жорсткості конструкції МПС безпосередньо пов'язана з матрицею податливості її ланок, при розкритті отримано рівняння:

$$b_n(\omega^2) + b_{n-1}(\omega^2)^{n-1} + \dots + b_1\omega^2 + b_0 = 0 \quad (2)$$

Це рівняння є частотним рівнянням власних коливань системи. Оскільки положення системи, від якого відраховуються переміщення, що виникають при коливаннях, є становищем стійкої рівноваги, то все коріння цього рівняння є дійсними і позитивними [17]. Цим доводиться, що будь-яка кожна система з кінцевим числом ступенів свободи має свій спектр власних частот, за яким може ідентифікуватися положення або траєкторія руху ланок МПК. З цього висновку доводиться, що рішеннями рівняння є спектр власних коливань стрижневої конструкції верстату з МПК.

Доведено існування дійсних розв'язань рівняння (3) для різних конфігурацій верстатів та іншого обладнання з МСП дозволяє вважати, що сигнатури власних коливань такого обладнання є носіями інформації для побудови ідентифікаційних моделей об'єктів. В якості таких моделей може виступати нейронна мережа. Вибір нейронної мережі як багатовимірної математичної моделі системи рівнянь регресії обумовлений її властивістю цілісності.

Точність моделювання, зазвичай, знаходиться в прямій залежності від часу моделювання:

$$d(t) = D \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\alpha}}\right), \quad (3)$$

де t - час, необхідний для одноразового створення моделі, α - показник інтенсивності досягнення точності математичної моделі; D - коефіцієнт точності динамічної моделі.

Однак, адекватність моделі, в загальному випадку, з часом знижується:

$$A(t) = A_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\beta_1}}\right) - A_2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\beta_2}}\right), \quad (4)$$

де β_1 і β_2 - показники інтенсивності забезпечення адекватності моделі; A_1 и A_2 - коефіцієнти адекватності динамічної моделі.

Загальний характер зміни в часі показників $d(t)$ і $A(t)$ показано на рис.2.

Можна припустити, що в кращому випадку і коректність та відповідність моделі повинні прагнути до максимального значення. Однак, про кількісну оцінку можна судити тільки в тому випадку, якщо ці оцінки мають обґрунтовані числові значення при наступних вихідних даних:

$$S(t) = k_1 \cdot A(t) + k_2 \cdot d(t) \rightarrow \max, \quad (5)$$

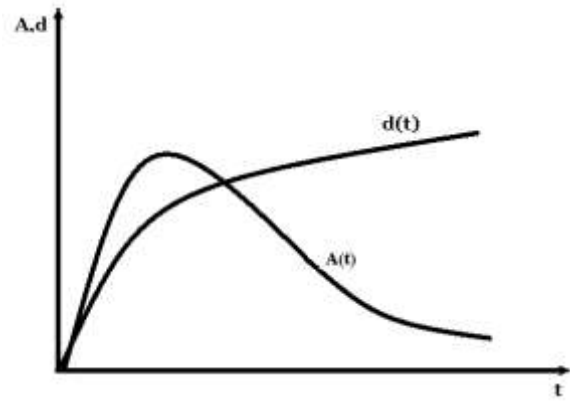


Рисунок 2 – Загальний характер зміни в часі показників $d(t)$ і $A(t)$

при обмеженнях:

$$D = 1; A_1 = 1; A_2 = 1; \alpha = 2; \beta_1 = 2; \beta_2 = 1.$$

де: $S(t)$ – цільова функція оптимізації достовірності динамічної моделі; k_1 і k_2 – параметри цільової функції.

Формування комплексного показника $S(t)$ наведено на рис.2.

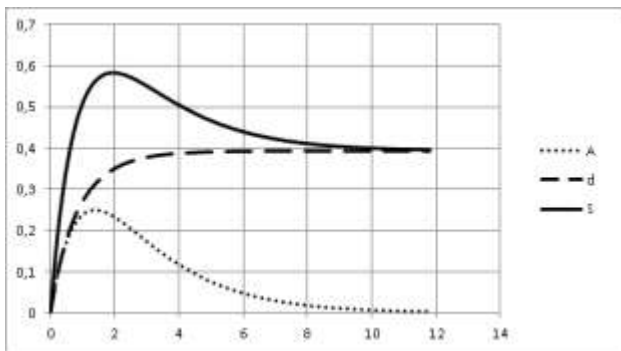


Рисунок 3 – Формування комплексного показника $S(t)$ при вихідних даних: $D = 1; A_1 = 1; A_2 = 1; \alpha = 2; \beta_1 = 2; \beta_2 = 1$

Аналітичний вираз для максимального значення $S(t)$:

$$\frac{dS(t)}{dt} = 0. \tag{6}$$

З умови (6) випливає, що для динамічних моделей необхідно забезпечувати умови поновлення моделей, при яких:

$$S(t) = k_1 \cdot A_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\beta_1}}\right) - k_1 \cdot A_2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\beta_2}}\right) + k_2 \cdot D \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\alpha}}\right) \tag{7}$$

Знайдені чисельні рішення дозволили створити базу прецедентів для нейромережевої моделі (табл.1).

Таблиця 1 – Значення максимуму $S(t)$ для нейросетевого моделювання

| D | A ₁ | A ₂ | α | β ₁ | β ₂ | k ₁ | k ₂ | S (t) _{max} |
|-----|----------------|----------------|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------------|
| 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1,5 | 1 | 1 | 2,9 |
| 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1,5 | 1 | 1 | 3,7 |
| 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1,5 | 1 | 1 | 4,8 |
| 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1,5 | 1 | 1 | 6,8 |
| 2 | 1,5 | 2 | 2 | 2 | 1,5 | 1 | 1 | 5,8 |
| 1 | 1,5 | 2 | 2 | 2 | 1,5 | 1 | 1 | 4,8 |
| 3 | 1,5 | 2 | 2 | 2 | 1,5 | 1 | 1 | 5,8 |
| 1 | 1,5 | 2 | 1 | 2 | 1,5 | 1 | 1 | 4,8 |
| 2 | 1,5 | 2 | 1 | 2 | 1,5 | 1 | 1 | 4,8 |
| 0,5 | 1,5 | 2 | 1 | 2 | 1,5 | 1 | 1 | 3,8 |
| 0,5 | 1,5 | 1,5 | 1 | 2 | 1,5 | 1 | 1 | 2,5 |
| 0,5 | 1,5 | 1,5 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1,7 |
| 1 | 1,5 | 1,5 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1,9 |
| 2 | 1,5 | 1,5 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2,2 |
| 3 | 1,5 | 1,5 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2,5 |
| 3 | 1,5 | 1,5 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2,5 |
| 3 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2,5 |
| 3 | 1,5 | 1,5 | 2 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2,5 |
| 2 | 1,5 | 1,5 | 2 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2,3 |
| 2 | 1,5 | 1,5 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2,2 |
| 2 | 1,5 | 1,5 | 2 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2,3 |
| 1 | 1,5 | 1,5 | 2 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 3 | 1,5 | 1,5 | 2 | 3 | 1 | 1 | 1 | 2,5 |
| 3 | 1,5 | 1,5 | 2 | 3 | 2 | 1 | 1 | 5,8 |
| 3 | 1,5 | 1,5 | 0,5 | 3 | 2 | 1 | 1 | 4,8 |
| 3 | 1 | 1,5 | 0,5 | 3 | 2 | 1 | 1 | 6,8 |

Для створеної нейросетевий моделі вербальне опис, виконане в середовищі NeuroPro 0,25 [15,16] має наступний вигляд:

Поля бази даних (исходные симптомы):

- D
- A₁
- A₂
- α
- β₂

Поля бази даних (кінцеві синдроми): S_{max}

Передобробка вхідних полів БД для подачі мережі:

- $D = (D - 1,75) / 1,25$
- $A_1 = (A_1 - 1,5) / 0,5$
- $A_2 = (A_2 - 1,75) / 0,25$
- $a = (\alpha - 1,25) / 0,75$
- $b_2 = (\beta_2 - 1,5) / 0,5$

Функціональні перетворювачі:

Сигмоїда $1(A) = A / (0,1 + |A|)$

Синдроми 1-го рівня:

Синдром1_1 = Сигмоїда1(0,009517628 * D - 0,05518812 * A1 + 0,005194922 * b2);

Синдром1_2 = Сигмоїда1(0,612629 * D - 0,517355 * A1 + 0,6975336 * A2 - 0,1852509 * a - 0,1394655)

Синдром1_3 = Сигмоїда1(-D + A2 - 0,8100481)

$$\text{Синдром1_4} = \text{Сигмоїда1}(0,06461254 * a + 0,145597 * b_2 - 0,08538858)$$

Кінцеві синдроми:

$$S_{max} = \text{Синдром1_1} + 0,4465326 * \text{Синдром1_2} + 0,07499535 * \text{Синдром1_3} + \text{Синдром1_4} + 0,3638409$$

Постобробка кінцевих синдромів:

$$S_{max} = ((S_{max} * 5,10000014305115) + 8,50000023841858) / 2$$

Отримана значимість входів відображає внесок кожної змінної в сумарний показник якості динамічної моделі:

$$D = 0,6566159$$

$$A_1 = 0,2404453$$

$$A_2 = 1$$

$$\alpha = 0,3158262$$

$$\beta_2 = 0,4155805$$

Таким чином, умова (6) та рівняння (5) дозволяють виконувати оцінку ідентифікаційних моделей, ранжуючи їх щодо умов максимальної ефективності метода і дозволить розширити діапазон оцінки методів створення динамічних моделей об'єктів в процесі їх реалізації.

Для ілюстрації запропонованого методу створення ідентифікаційних моделей наведемо такий приклад. Є МПС у вигляді тріглайда. (рис. 4).

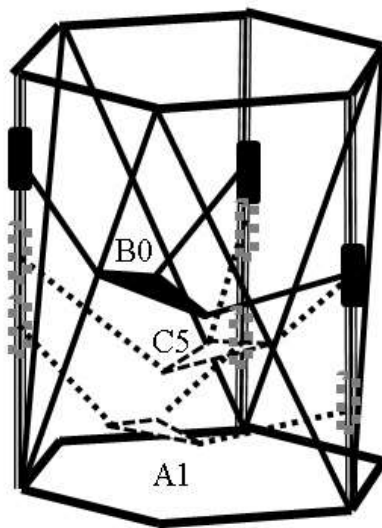


Рисунок 4 – Тріглайд з трьома позиціями виконавчої ланки: A1, B0 і C5

Для експериментальних досліджень прийняті такі позиції:

-позиція B0: {52, -30, 5},

-позиція C5: {0, -60, 250},

-позиція A1: {-52, -30, 50}.

Відповідно до запропонованого методу ідентифікації об'єкта «Тріглайд» експериментально отримані сигнатури цих позицій (рис.5).

Таким чином показано, що сигнатури різних конфігурацій МПС дозволяють ідентифікувати об'єкт у явному вигляді.

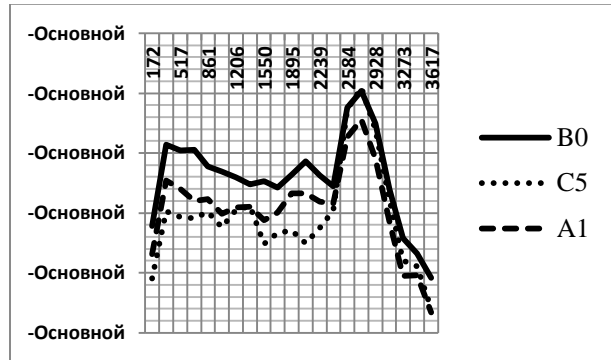


Рисунок 5 – Приклади сигнатур МПС

Висновки. Надано обґрунтування можливості моделювання об'єктів на основі сигнатур, які представляють собою образ механізму паралельної структури у вигляді спектра власних коливань структурно пов'язаних актуаторів і виконавчих ланок. Показано, що динамічні властивості стрижневих конструкцій, що описують об'єкти з кінцевим числом ступенів свободи і змінним розподілами навантажень на них, можуть бути представлені рівняннями, які є частотними рівняннями власних коливань системи механізмів паралельної структури. На основі якісного аналізу точності і адекватності ідентифікаційних динамічних моделей і застосування математичного апарату нейронних мереж зроблено висновок про перевагу оцінки його ідентифікаційних моделей в порівнянні з їх точністю. Представлений підхід дозволяє забезпечити порівняльний аналіз ідентифікаційних моделей, що побудовані на сукупності сигнатур. Результати експериментальних досліджень підтверджують ці висновки

Список литературы

- Кузнцов Ю.М. Світові тенденції і перспективи розвитку верстатобудування в Україні *Проблеми фізико-математичної і технічної освіти і науки України в контексті євроінтеграції*. Київ НПУ ім. М.П. Драгоманова, 2007. с.45-55.
- Томашевський В.М. *Моделювання систем* Київ. Видавнична група BHV, 2007. – 352 с.
- Жиленков А. А. Моделирование адаптивного управления в сложных распределенных системах с идентификацией параметров. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2013. №6. С. 253-260.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S.M., Lewis, A. Grey Wolf Optimizer In *Advances in Engineering Software*. 2014. Vol. 69. P. 46-61. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007
- Куликов С.И., Ризванов Ф.Ф., Романчук В.А., Ковалевский С.В.. – М.: Машиностроение, 1983. – 135 с.
- Duvenaud, D., J. R. Lloyd, R. Grosse, J. B. Tenenbaum, and Z. Ghahramani (2013, June). Structure Discovery in Nonparametric Regression through Compositional Kernel Search. In *Proceedings of the 30th International Conference on Machine Learning*, pp. 1166–1174.
- Giannakis, G., M. Pichler, G. Kontes, H. Schranzhofer, and D. Rovas (2013). Simulation speedup techniques for computationally demanding tasks. In *Proceedings of the Building Simulation 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*, pp. 3761–3768.
- Maimon, O. and L. Rokach (2005). *Data mining and knowledge discovery handbook*, Volume 2. Springer. ISBN: 9780387098227.
- Mezi'c, I. (2005). Spectral properties of dynamical systems, model reduction and decompositions. *Nonlinear Dynamics* 41 (1-3), 309–325.

9. Safarzadegan Gilan, S., N. Goyal, and B. Dilkina (2016). Active Learning in Multi-objective Evolutionary Algorithms for Sustainable Building Design. In *Proceedings of the 2016 on Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pp. 589–596. ACM.
10. Symonds, P., J. Taylor, Z. Chalabi, A. Mavrogianni, M. Davies, I. Hamilton, S. Vardoulakis, C. Heaviside, and H. Macintyre (2016). Development of an England-wide indoor overheating and air pollution model using artificial neural networks. *Journal of Building Performance Simulation*, 1–14.
11. Соколов В.И. Определение передаточных функций электрогидравлического следящего привода оборудования для обработки давлением *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля*. 2011. № 1 (155). Ч.1. С. 130–135.
12. Соколова Я.В. Нелинейная математическая модель электрогидравлического следящего привода с дроссельным регулированием *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля*. 2010. № 10(152). С. 168–175.
13. Ковалевский С. В. Развитие методов акустической диагностики в машиностроении: монография Краматорск : ДГМА, 2014. 91 с.
14. Kovalevskii S. V. Diagnostics of Technological Systems and Engineering Products (using neural network approach) : scientific monography / S. V. Kovalevskii, O. S. Kovalevska, P.V. Dašić. – Vrnjačka Banja : SaTCIP, 2016. 169 p.
15. Діагностика технологічних систем і виробів машинобудування (з використанням нейронного підходу) : монографія / С.В. Ковалевський, О.С. Ковалевська, Є.О. Коржов, А.О. Кошевой ; за заг. ред. д.т.н., проф. С.В. Ковалевського. – Краматорськ : ДДМА, 2016. – 186 с.
16. Kovalevska O. S. Application of acoustic analysis in control systems of robotic machine tools / O. S. Kovalevska, S. V. Kovalevskyy // Науковий журнал «Радиоелектроніка, інформатика, управління», «Radio Electronics, Computer Science, Control». – 2018. – № 2 (45). – С. 51–59.
17. Строительная механика : учеб.-метод. комплекс для студентов специальности 1-70 02 01 и слушателей ИПК УО «ПГУ» специальностей 1-70 02 71, 1-70 04 71. В 3 ч. Ч. 3. Основы динамики и устойчивости сооружений / сост. и общ. ред. Л. С. Туршечева. – Новополюк : ПГУ, 2010. – 136 с.
- Ghahramani (2013, June). Structure Discovery in Nonparametric Regression through Compositional Kernel Search. In *Proceedings of the 30th International Conference on Machine Learning*, pp. 1166–1174.
7. Giannakis, G., M. Pichler, G. Kontes, H. Schranzhofer, and D. Rovas (2013). Simulation speedup techniques for computationally demanding tasks. In *Proceedings of the Building Simulation 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association*, pp. 3761–3768.
8. Maimon, O. and L. Rokach (2005). *Data mining and knowledge discovery handbook*, Volume 2. Springer. ISBN: 9780387098227.
- Mezi'c, I. (2005). Spectral properties of dynamical systems, model reduction and decompositions. *Nonlinear Dynamics* 41 (1-3), 309–325.
9. Safarzadegan Gilan, S., N. Goyal, and B. Dilkina (2016). Active Learning in Multi-objective Evolutionary Algorithms for Sustainable Building Design. In *Proceedings of the 2016 on Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pp. 589–596. ACM.
10. Symonds, P., J. Taylor, Z. Chalabi, A. Mavrogianni, M. Davies, I. Hamilton, S. Vardoulakis, C. Heaviside, and H. Macintyre (2016). Development of an England-wide indoor overheating and air pollution model using artificial neural networks. *Journal of Building Performance Simulation*, 1–14.
11. Sokolov V.I. Opredelenie peredatochnykh funktsij elektrogidravlicheskogo sledyashchego privoda oborudovaniya dlya obrabotki davleniem / V.I. Sokolov, T. YA. Tavanyuk // *Visnik Skhidnoukrajins'kogo nacional'nogo universitetu im. Volodimira Dallya*. – 2011. – № 1 (155). – CH.1. pp. 130-135.
12. Sokolova YA.V. Nelinejnaya matematicheskaya model' elektrogidravlicheskogo sledyashchego privoda s drossel'nym regulirovaniem/ Sokolova YA.V., Tvanyuk T.YA., Sokolov V.I. // *Visnik Skhidnoukrajins'kogo nacional'nogo universitetu im. Volodimira Dallya*. – 2010. – № 10(152). – pp. 168–175.
13. Kovalevskij S. V. Razvitie metodov akusticheskoj diagnostiki v mashinostroenii: monografiya / S. V. Kovalevskaya, V. I. Tulupov. – Kramatorsk : DGMA, 2014. – 91 p.
14. Kovalevskii S. V. Diagnostics of Technological Systems and Engineering Products (using neural network approach) : scientific monography / S. V. Kovalevskii, O. S. Kovalevska, P.V. Dašić. – Vrnjačka Banja : SaTCIP, 2016. – 169 p.
15. Diagnostika tekhnologichnih sistem i virobiv mashinobuduvannya (z vikoristannjam nejromerezhevoogo pidhodu) : monografiya / S.V. Kovalevskij, O.S. Kovalevs'ka, E.O. Korzhov, A.O. Koshevoj ; za zag. red. d.t.n., prof. S.V. Kovalevskogo. – Kramators'k : DDMA, 2016. – 186 p.
16. Kovalevska O. S. Application of acoustic analysis in control systems of robotic machine tools / O. S. Kovalevska, S. V. Kovalevskyy // *Naukovij zhurnal «Radioelektronika, informatika, upravlinnya», «Radio Electronics, Computer Science, Control»*. – 2018. – № 2 (45). – pp. 51–59.
17. Stroitel'naya mekhanika : ucheb.-metod. kompleks dlya studentov special'nosti 1-70 02 01 i slushatelej IPK UO «PGU» special'nostej 1-70 02 71, 1-70 04 71. V 3 ch. CH. 3. Osnovy dinamiki i ustojchivosti sooruzhenij / sost. i obshch. red. L. S. Turishcheva. – Novopolock : PGU, 2010. – 136 p.

References (transliterated)

1. Kuznecov Yu.M. Svitovi tendencii i perspektivi rozvitku verstatobuduvannya v Ukraini // "Problemi fiziko-matematichnoi i technichnoi osviti i nauki Ukraini v konteksti evrointegracii". - K.: NPU im. M.P. Dragomanova, 2007. – pp.45...55.
2. Tomashevskij V.M. Modelyuvannya sistem / Tomashevskij V.M. – K.: Vidavnicna grupa VNV, 2007. – 352 s. 3.ZHilenkov A. A. Modelirovanie adaptivnogo upravleniya v slozhnyh raspredelennyh sistemah s identifikaciej parametrov / A. A. ZHilenkov, S. G. CHyornyj // *Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu*. – 2013. – №6. – pp. 253–260.
4. Mirjalili, S., Mirjalili, S.M., Lewis, A. Grey Wolf Optimizer / In *Advances in Engineering Software*. 2014. Vol. 69. P. 46-61. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007
5. Kulikov S.I., Rizvanov F.F., Romanchuk V.A., Kovalevskij S.V.. – M.: Mashinostroenie, 1983. – 135 p.
6. Duvenaud, D., J. R. Lloyd, R. Grosse, J. B. Tenenbaum, and Z. Postupila (received) 17.04.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ковалевська Олена Сергіївна (Ковалевская Елена Сергеевна, Olena Kovalevska) – кандидат технічних наук, доцент, кафедра технології машинобудування ДДМА, м. Краматорськ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5884-0430>; e-mail: olenakovalevska@gmail.com

Ковалевський Сергій Вадимович (Ковалевский Сергей Вадимович, Serhiy Kovalevskyy) – доктор технічних наук, професор, кафедра технології машинобудування ДДМА, м. Краматорськ, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4708-4091>; e-mail: kovalevskii@dgma.donetsk.ua