

УДК 681.513.675

DOI: 10.32626/2308-5916.2024-26.43-53

С. А. Положаєнко, д-р техн. наук, професор,

А. А. Савельєв, старший викладач,

Л. Л. Прокоф'єва, старший викладач

Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса

КОНТРОЛЬ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ МЕТОДАМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПРИ НАТУРНОМУ МОДЕЛЮВАННІ

Зростання вимог до засобів моделювання, а також обсягу задач, які розв'язуються методами моделювання, призводить до необхідності створення продуктивних моделюючих систем високого технічного рівня, що являють собою складні та розгалужені комплекси функціональних елементів, вузлів і агрегатів, які забезпечують виконання різних етапів процесу моделювання. Таким чином, при розробці, дослідженні, синтезі та оцінці якості роботи сучасних моделюючих засобів останні повинні розглядатися як системи з притаманними їм теорією, принципами побудови, особливостями реалізації та областями застосування. Одним з природних, у сучасних умовах та перспективних напрямів суттєвого підняття технічного рівня засобів моделювання, є їх інтелектуалізація шляхом реалізації складних процедур за допомогою технічних та програмних засобів, що принципово може бути досягнуто лише на основі широкого використання у системах моделювання сучасної обчислювальної техніки.

Розглянуто особливості організації обчислювального процесу класу натурних імітаторів, реалізованих на аналого-цифровому (гібридному) обчислювачі. Показана ефективність використання в гібридних натурних імітаторах аналогового процесора як динамічна модель об'єкта, що обумовлено високою швидкістю внаслідок розпаралелювання та неалгоритмічних обчислень у ході моделювання динаміки. Запропоновано підхід до контролю обчислювального процесу при натурному моделюванні, що ґрунтується на методах ідентифікації та отримано конструктивні вирази оцінки функціонування обчислювально-керуючих систем гібридних натурних імітаторів.

Ключові слова: *обчислювальний процес, натурні системи, аналоговий процесор, цифровий процесор, оперативний контроль, оцінка функціонування, методи ідентифікації.*

Вступ. В останні роки в теорії та практиці моделювання розвивається новий напрямок зі створення засобів моделювання, що базується на поєднанні концепцій фізичного та квазіаналогового моделювання. Основною особливістю такого роду засобів моделювання, які

набули назву *натурних обчислювально-моделюючих систем* (НОМС), є наявність у їх складі реального моделюючого об'єкта (базового), подібного за фізичним характером з об'єктом, що моделюється, і системи управління (УС або, в більш загальному випадку, обчислювальної управляючої системи – ОУС), призначеної для вироблення (обчислення) таких управляючих впливів базового об'єкта (тобто моделюючого об'єкта), які забезпечують його еквівалентність об'єкту, що моделюється. Можливості такого роду засобів моделювання досить повно характеризуються прикладами НОМС рухомих об'єктів (зокрема, натурних імітаторів), якими можна навести такі:

- літаючі літакові імітатори, у яких забезпечується збіг поведінки базового та модельованого літаків у реальних польотних умовах, що дозволяє розв'язувати задачі як дослідницького характеру (наприклад, відпрацювання систем управління літаків, які проєктуються або перебувають на стадії модельних досліджень), так і тренування та навчання льотного складу;
- динамічно еквівалентні імітатори надводних та підводних суден, а також сухопутних пересувних засобів (наприклад, автомобілів), створення яких дозволяє в умовах, близьких до реальних, організувати полігонне навчання та тренування екіпажів з управління в різноманітних ситуаціях (маневри в портах та на трасах судноплавства, рух у тумані тощо);
- дослідницькі комплекси високоточних електромеханічних систем локації, при створенні яких однією з основних задач є розробка системи управління та законів визначення керуючих впливів, що забезпечують задану якість процесів наведення (стеження).

Високі вимоги щодо точності призводять до того, що відпрацювання законів управління, наприклад, процесами локації, можливе лише шляхом створення на базі засобів обчислювальної техніки системи моделювання, що включає власне електромеханічний об'єкт, що забезпечує повний облік та аналіз значущості всіх факторів, які впливають на точність наведення. Подібні системи моделювання призначено, зокрема, для проведення досліджень з оцінки правильності конструктивних рішень, якості процесів локації та параметрів законів управління.

Практична необхідність створення НОМС (у тому числі НОМС рухомих об'єктів) полягає в отриманні інструменту, що дозволяє як суттєво підвищити економічність та якість досліджень складних систем, так і якісніше організувати процеси навчання, тренування та професійного відбору обслуговуючого персоналу.

Вочевидь, що у процесі натурального моделювання слід забезпечити достовірність обчислених управлінь моделюючого (базового) об'єкта динаміці реального об'єкта (того, що моделюється).

Мета роботи. Метою роботи є отримання адекватних оцінок функціонування обчислювально-керуючої системи натурних імітаторів, реалізованої на основі цифрового обчислювача з аналоговими підпрограмами.

Основна частина. У загальному випадку побудова ОУС НОМС можлива із застосуванням різних засобів обчислювальної техніки.

Особливий інтерес у даному випадку представляє використання в якості динамічної моделі об'єкта аналогового процесора (побудованому, наприклад, на основі елементів аналогової мікросхемотехніки), що забезпечує високу швидкість внаслідок неалгоритмічного обчислювального процесу в ході моделювання [1-3]. Однак, необхідність урахування похідних високих порядків [4], призводить до того, що виконання ОУС НВМС складних динамічних об'єктів в аналоговому вигляді практично неможливо. У той же час, побудова ОУС на базі аналого-цифрових обчислювальних комплексів або з включенням до їх складу, так званих *аналогових підпрограм* [5-8], є досить перспективною. Сказане обумовлює важливість контролю обчислень, що виконуються аналоговими засобами.

Як зазначається у [9], задача оперативного контролю аналогового процесора одна із важливих проблем аналогової обчислювальної техніки. Спроба вирішити зазначену проблему з використанням аналогової техніки призводить до методів контролю, які, в основному, орієнтовані на контроль справності окремих елементів та вузлів аналогових процесорів [9, 10]. Для контролю та діагностики несправностей останніх може бути застосовано метод *надлишкових змінних* [11], який, однак, не завжди є ефективним при контролі розв'язку рівнянь, що описують динаміку керованих нелінійних об'єктів.

Слід зазначити, що у відомих гібридних обчислювальних системах (ГОС) спостерігається використання цифрового процесора для контролю аналогового процесора. При цьому здійснюється як побудова контрольних і діагностичних тестів аналогової частини ГОС з використанням цифрового процесора [12, 13], так і контроль цифровою частиною ГОС процесу розв'язування рівнянь динаміки аналоговим процесором [14, 15].

В [16] розглядається метод діагностики несправностей аналогових моделей, що описуються системою лінійних звичайних диференціальних рівнянь (ЗДУ) з постійними коефіцієнтами. Метод засновано на розв'язуванні зворотної задачі і зводиться до визначення матриці правої частини системи, що розв'язується за отриманим розв'язком. Діагностика несправностей здійснюється порівнянням ідентифікованої матриці розв'язуваної системи (для моделюючого об'єкта) із заданою матрицею (для реального об'єкта). Усі операції з діагностики несправностей вико-

нуються цифровим процесором ГОС. Ця процедура діагностики заснована на апроксимації перехідного процесу лінійною комбінацією експоненційних функцій. Обмеженням описаного методу є те, що при діагностиці моделей нелінійних об'єктів його застосування стикається із значними труднощами, пов'язаними з необхідністю виконання ітераційних обчислювальних процедур значних обсягів. Таким чином, ця обставина робить метод, заснований на розв'язуванні зворотної задачі, малоефективним для випадків, коли модель об'єкта описується нелінійними рівняннями або містить нестационарні параметри.

Організація процедури контролю обчислень. Контроль аналогової моделі шляхом порівняння аналогового розв'язку з розв'язком, отриманим на цифровому процесорі, є досить поширеним, проте має такі недоліки, як: необхідність подолання труднощів числового розв'язування вихідної задачі у повній постановці на цифровій частині ГОС, суттєві витрати машинного часу (зумовлених, про що зазначалося вище, алгоритмічним циклом обчислень цифровим процесором, особливо для нелінійних задач), а також неможливість встановлення причин виникнення похибок.

Контроль, якщо він здійснюється шляхом прямого вимірювання, завжди являє собою деяку зворотну задачу, зокрема, задачу оцінки параметрів об'єкта за його вихідними та вхідними впливами. У такому випадку є можливість залучити різні методи ідентифікації [17], які мають значні можливості для розв'язування задач контролю динамічних систем [18], у тому числі і аналогових моделей.

У формалізованому вигляді контроль на основі методів *параметричної ідентифікації* здійснюється наступним чином. За змінними об'єкта оцінюються параметри його математичної моделі. І вже за результатом порівняння одержаних оцінок параметрів із заданими значеннями приймається рішення про стан об'єкта.

Застосуємо даний підхід при оцінці функціонування ОУС натурних імітаторів для випадку, коли ОУС реалізовано на основі аналого-цифрового обчислювача. Уявімо, що існує система рівнянь тої ж самої структури, що і та, яка моделюється, але з іншими (у загальному випадку – змінними – параметрами $q = (q_1, \dots, q_m)^T$)

$$\mathbf{x} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}^*, \mathbf{q}, t), \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \quad (1)$$

де $\mathbf{x} = \mathbf{y}_u + \Delta \mathbf{y}$ – вектор, що описує об'єкт, який контролюється, та параметри якого (при відсутності похибок в реалізації рівнянь динаміки) співпадають з параметрами системи, яка моделюється.

Шляхом вимірювання або обчислення відповідних величин формується інформація про вектори вхідних \mathbf{u}^* та вихідних \mathbf{x} сигналів

об'єкта контролю. Вектор $\bar{\mathbf{x}}$, який спостерігається, є, у загальному випадку, відомою функцією векторів стану \mathbf{x} та управлінь \mathbf{u}^* . Якщо змінні вимірюються безпосередньо, то $\bar{\mathbf{x}} = \mathbf{E}_z + (\mathbf{v}, \mathbf{u}) = \mathbf{E}\mathbf{u}^* + \mathbf{v}$, де \mathbf{E} – одинична матриця, \mathbf{v} – адитивний шум системи вимірювання. Шуми вимірювання залежать від точності «зчитування» аналогової інформації або змінних у цифровій формі. В аналогових моделях до шумів вимірювання додаються внутрішні шуми самої моделі. В системі вимірювання може виконуватися відокремлення сигналу від шумів, тобто вирішуватися задача фільтрації.

Результати вимірювання використовуються для визначення параметрів математичної моделі (1), тобто для параметричної ідентифікації. За результатами, отриманими за допомогою ідентифікації, визначається за будь-яким критерієм стан об'єкта контролю. Для аналогових моделей при виявленні похибки вирішується задача визначення причини, що викликала похибку, тобто, задача діагностики.

Нехай об'єкт контролю описується рівнянням:

$$\dot{\mathbf{y}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{q}, t), \mathbf{y}(t_0) = \mathbf{y}_0, \quad (2)$$

а модель, яка використовується при ідентифікації, має вигляд

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{z}, \mathbf{u}, \hat{\mathbf{q}}, t), \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \quad (3)$$

де $\hat{\mathbf{q}} = (\hat{q}_1, \dots, \hat{q}_m)^T$ – вектор оцінок параметрів.

Зазвичай, оцінки параметрів $\hat{\mathbf{q}}$ визначаються з умови мінімуму квадратичного функціоналу. Якщо відомим є, з точністю до похибок параметрів $\hat{\mathbf{q}}$, аналітичний розв'язок $\mathbf{x} = \varphi(\mathbf{u}, \hat{\mathbf{q}}, t)$, то вказаний функціонал у матричній формі має вигляд:

$$\mathbf{y}(\hat{\mathbf{q}}) = [\mathbf{b} - \mathbf{A}(\hat{\mathbf{q}})]^T [\mathbf{b} - \mathbf{A}(\hat{\mathbf{q}})], \quad (4)$$

де

$$\mathbf{b} = [y(t_1), \dots, y(t_N)]^T, \mathbf{A}(\hat{\mathbf{q}}) = [\varphi(\mathbf{u}, \hat{\mathbf{q}}, t_1), \dots, \varphi(\mathbf{u}, \hat{\mathbf{q}}, t_N)]^T.$$

Оцінка $\hat{\mathbf{q}}$ вектора параметрів \mathbf{q} віднаходиться з умови

$$\frac{\partial \mathbf{y}(\hat{\mathbf{q}})}{\partial (\hat{\mathbf{q}})} = \frac{\partial \mathbf{A}(\hat{\mathbf{q}})}{\partial (\hat{\mathbf{q}})} [\mathbf{b} - \mathbf{A}(\hat{\mathbf{q}})] = 0. \quad (5)$$

Вираз (5) являє собою систему нелінійних відносно $\hat{\mathbf{q}}$ алгебраїчних рівнянь, розв'язок якої є шукана оцінка вектора параметрів $\hat{\mathbf{q}}$.

Визначення оцінок параметрів $\hat{q}_i, i = \overline{1, m}$ з умови близькості виходів об'єкта та моделі, заданій у вигляді диференціальних рівнянь, призводить до нелінійних процедур оцінювання навіть у тому випад-

ку, коли модель об'єкта лінійна по параметрах (що зумовлено нелінійною залежністю розв'язку від параметрів).

Оцінювання параметрів об'єкта за похідними (метод диференціальної апроксимації). Метод диференціальної апроксимації відноситься до явних методів ідентифікації. Квадратичний функціонал близькості моделі та об'єкта за похідними при оцінюванні параметрів рівняння (2) має вигляд

$$\mathbf{y}(\mathbf{q}) = \sum_{i=1}^N (\hat{\mathbf{y}}(t_i) - f(\mathbf{y}, \mathbf{u}, \mathbf{q}, t_i))^2,$$

де $\hat{\mathbf{y}}(t_i)$ – оцінка похідної вихідного сигналу об'єкта в момент часу. Оцінки параметрів знаходяться із системи нелінійних рівнянь алгебри виду (5). Для лінійних за параметрами моделей квадратичний критерій призводить до лінійної процедури оцінювання. Таким чином, при використанні критерію близькості моделі та об'єкта за похідними для проведення ідентифікації не потрібне рішення диференціальних рівнянь та, крім того, для лінійних за параметрами моделей об'єктів процедура оцінювання є лінійною. Тому при контролі розв'язання диференціальних рівнянь методами ідентифікації доцільно використовувати квадратичний критерій близькості моделі та об'єкта за похідними.

Вектор \mathbf{b} формується з похідних оцінок, отриманих чисельним диференціюванням аналогового рішення. Доцільно застосовувати метод *ковзного диференціювання*. Наприклад, формули числового диференціювання третього, п'ятого та сьомого порядку точності (для окремих компонентів відповідних векторів)

$$\hat{y}_i = \frac{1}{2h} (y_{i+1} - y_{i-1}) - \frac{h^2}{6} y^{(3)}(\xi), \quad (6)$$

$$\hat{y}_i = \frac{1}{12h} (y_{i-2} - 8y_{i-1} - 8y_{i+1} - y_{i+2}) - \frac{h^4}{30} y^{(5)}(\xi), \quad (7)$$

$$\hat{y}_i = \frac{1}{60h} (-y_{i-3} + 9y_{i-2} - 45y_{i-1} + 45y_{i+1} - 9y_{i+2} + y_{i+3}) + \frac{h^6}{140} y^{(7)}(\xi). \quad (8)$$

Основним джерелом похибок оцінок параметрів є похибки числового диференціювання при формуванні вектора \mathbf{b} . Ці похибки є випадковими величинами і складаються з методичних похибок числового диференціювання та похибок, які визначаються шумами вимірювання. Методичні похибки визначаються залишковим членом відповідної розрахункової формули і залежать від інтервалу знімання аналогового розв'язку h (з моделі, що реалізується аналоговим процесором) і значення k -ї похідної диференційованої функції.

Похибка оцінки похідної при застосуванні числового диференціювання переважно визначається шумами вимірювань. Тому, в ряді випадків, доцільно проінтегрувати вихідне диференціальне рівняння та при ідентифікації перейти до моделі

$$\mathbf{y}(t_2) - \mathbf{y}(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} f(\mathbf{y}, \mathbf{u}, \mathbf{q}, t) dt. \quad (9)$$

Система алгебраїчних рівнянь, з якої визначається оцінка вектора параметрів $\hat{\mathbf{q}}$, формується змішуванням інтервалу інтегрування $T_j = [t_{1j}, t_{2j}]$, $j = \overline{1, N}$. В цьому випадку в системі (5) $\mathbf{b} = [\mathbf{y}(t_{21}) - \mathbf{y}(t_{11}), \dots, \mathbf{y}(t_{2N}) - \mathbf{y}(t_{1N})]^T$. $\mathbf{A}(\hat{\mathbf{q}})$ являє собою інтеграл від правої частини (2), для визначення якого при складних функціях – $f(\mathbf{y}, \mathbf{u}, \mathbf{q}, t)$ залучається числове інтегрування. Через те, що вектор \mathbf{q} , який оцінюється, перебуває під знаком інтеграла при $\mathbf{q} = \mathbf{q}(t)$, то використання представлення (9) призводить до додаткової похибки оцінки $\hat{\mathbf{q}}$.

У обчислювальному відношенні використовувати числове диференціювання зазвичай є значно вигіднішим, ніж числове інтегрування. Крім того, при адитивних похибках вимірювання застосування для ідентифікації процедури інтегрування може призвести до зміщених оцінок параметрів.

Для розширення класу похибок значення $f_j(\mathbf{y}, \mathbf{u}, t_i)$, що виявляються та використовуються при контролі, може бути використана процедура обчислень за окремою програмою або на спеціальному процесорі. У цьому випадку збільшується ймовірність виявлення похибок програмування, збоїв та відмов у роботі апаратури. Зауважимо, що використання додаткової програми або процесора не дорівнює методу подвійного розрахунку.

Оцінка параметрів $\hat{\mathbf{q}}(t)$ апроксимує дійсну функцію параметрів $\mathbf{q}(t)$ та є ступінчастою функцією, постійною на відрізках числового розв'язання диференціальних рівнянь, що використовуються під час ідентифікації. Тому точність оцінки $\hat{\mathbf{q}}(t)$ залежить від швидкості зміни $\mathbf{q}(t)$.

Методи ідентифікації можуть віднайти застосування при контролі гібридних моделей динамічних систем. І тут також бажано застосування цифрового процесора, за допомогою якого розв'язується задача ідентифікації, а процедуру ідентифікації необхідно вибирати з урахуванням точності зчитування вихідних сигналів гібридної моделі.

Лінеаризація моделі за параметрами. У тому випадку, якщо залежність $\varphi(\mathbf{u}, \mathbf{q}, t)$ виходу об'єкта \mathbf{y} від сигналів управління \mathbf{u} та параметрів \mathbf{q} може бути розкладена в ряд Тейлора за параметрами щодо їх номінального значення \mathbf{p} , то контроль здійснюється на основі використання частини ряду Тейлора. Число членів ряду, включених у модель, визначається необхідною точністю $\Delta \mathbf{p}$ оцінки відхилення параметрів \mathbf{q} від номінальних значень \mathbf{p} та складнощами обчислювального характеру. Найбільш простою є лінійна процедура оцінювання вектора $\Delta \mathbf{p}$. Тому практично можна обмежитися двома першими членами ряду. Оцінка $\Delta \mathbf{p}$ визначається при цьому із системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

У тому випадку, коли невідомо аналітичний вираз $\varphi(\mathbf{u}, \mathbf{q}, t)$, доцільно здійснити *лінеаризацію* $f(\mathbf{y}, \mathbf{u}, \mathbf{q}, t)$. Такий підхід зручний, наприклад, в методі *диференціальної апроксимації*. Розкладаючи $f(\mathbf{y}, \mathbf{u}, \mathbf{q}, t)$ в ряд Тейлора в околі наближеного розв'язку і утримуючи два члени, отримаємо

$$\dot{\mathbf{y}} = f(\mathbf{y}, \mathbf{u}, \mathbf{q}, t) + \frac{\partial f}{\partial \mathbf{p}} \Delta \mathbf{p}. \quad (10)$$

Використовуючи тепер числове диференціювання для визначення оцінки похідної $\dot{\mathbf{y}}$, оцінку вектора $\Delta \mathbf{p}$ можна віднайти з відповідної системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

Введення фіктивних параметрів. Враховуючи складність відновлення параметрів у нелінійному випадку, а також кінцеву мету відновлення (контроль функціонування), привабливим є введення в систему (2) *фіктивних параметрів* \mathbf{q}^* , щодо яких задача оцінювання є лінійною. При цьому параметри \mathbf{q}^* можуть входити до правої частини: або у вигляді мультиплікативних параметрів, і при контролі використовуються модель

$$\dot{\mathbf{y}} = f(\mathbf{y}, \mathbf{u}, \mathbf{q}, t) \mathbf{q}^*, \quad (11)$$

або у вигляді адитивних параметрів, коли

$$\dot{\mathbf{y}} = f(\mathbf{y}, \mathbf{u}, \mathbf{q}, t) + \varphi(\mathbf{y}, \mathbf{u}) \mathbf{q}^*, \quad (12)$$

де $\varphi(\mathbf{y}, \mathbf{u})$ – матриця, узгоджена за розмірністю з матрицею \mathbf{q}^* . Так, наприклад, (10) можна розглядати як частинний випадок (12). При цьому матриці $\varphi(\mathbf{y}, \mathbf{u})$ відповідають матриці $(\partial f / \partial \mathbf{p})$ та $\mathbf{q}^* = \Delta \mathbf{p}$. При уведенні фіктивних параметрів обмеження на допустимі відхи-

лення значень цих параметрів відсутні. Однак може виникнути необхідність перерахунку допустимої області відхилення параметрів \mathbf{q} в допустиму область відхилення фіктивних параметрів \mathbf{q}^* або визначення допустимої області відхилення фіктивних параметрів з умов близькості виходів моделі та об'єкта.

Усічення моделі по параметрах. Це перетворення дозволяє зменшити розмірність задачі оцінювання [19]. При цьому відновлюється лише частина параметрів, а інші вважаються номінальними. Нехай K параметрів моделі (2) мають номінальні значення (позначимо їх через $\mathbf{p}^* = \{p_i^*\}_1^K$). Інші $(m-k)$ параметрів $\bar{\mathbf{q}} = \{\bar{q}_j\}$ будуть оцінюватися за допомогою ідентифікації. Модель, яка використовується при контролі, має вид

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{f}(\mathbf{y}, \mathbf{u}, \mathbf{p}^*, \bar{\mathbf{q}}, t) \quad (13)$$

і результатом ідентифікації є оцінка $\hat{\bar{\mathbf{q}}}$. Подібну організацію контролю доцільно застосовувати в тих випадках, коли модель (13) лінійна по параметрах $\bar{\mathbf{q}}$.

Декомпозиція моделі об'єкта, який контролюється. Це перетворення здійснюється виділенням додаткових змінних, в результаті чого виявляється можливість сформулювати сукупність моделей, контроль кожної з яких може бути здійснено окремо. Наприклад, якщо для об'єкта, модель якого

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{f}_1[\mathbf{f}(\mathbf{y}, \mathbf{u}, \mathbf{p}_2)\mathbf{p}_2, t] \quad (14)$$

ввести змінну, яка спостерігається

$$\mathbf{x} = \mathbf{f}_2(\mathbf{y}, \mathbf{u}, \mathbf{p}_2), \quad (15)$$

то при ідентифікації послідовно використовуються модель (15) та модель

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{f}_1(\mathbf{x}, \mathbf{p}_1, t). \quad (16)$$

При заміні моделі (14) моделями (15) та (16) зменшується розмірність вектора одночасно оцінюваних параметрів. Декомпозиція моделі об'єкта, який контролюється, є ефективним засобом підвищення точності контролю та локалізації несправностей. Практично організація контролю на основі декомпозиції моделі багато в чому залежить від можливостей її реалізації (спостереження додаткових змінних).

Висновок. Отримано аналітичні вирази для визначення оцінок функціонування обчислювально-управляючої системи натурних імітаторів, реалізованої на основі аналого-цифрового обчислювача. Обчислювальну процедуру визначення оцінок засновано на методах параметричної іден-

тифікації і не вимагає прямих вимірювань векторів станів натурної моделі (імітатора) реального об'єкта, який моделюється.

Однак, у ряді практичних випадків, аналітичний розв'язок складних диференціальних рівнянь отримати складно (або навіть неможливо) і для визначення змінних слід залучати числові методи, що значно ускладнює процедуру ідентифікації.

Разом з тим, показано принципову можливість організації контролю обчислювальних процесів НОМС на основі методів ідентифікації, що дозволяє здійснювати контроль в найбільш складній постановці – контролю точності моделювання.

Список використаних джерел:

1. Василевський О. М., Присяжнюк В. В. Основи аналогової техніки. Вінниця: ВНТУ, 2018. 140 с.
2. Бойко В. І., Жуйков В. Я., Зоря А. А. та ін. Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої. 2-е видання. Київ: Освіта України, 2010. 285 с.
3. Комп'ютерна схемотехніка. Ч. 1. Аналогова схемотехніка / за ред. В. М. Приходька. Донецьк: ДонІЗТ, 2008. 198 с.
4. Селіванов В. Л., Верба О. А. Гібридні комп'ютерні системи. Лінійні та гібридні операційні блоки [Електронний ресурс]. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 101 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50133>.
5. Van Der Schaft Arjan J., Schumacher J. M. An introduction to hybrid dynamical systems. *Springer*. 2000. Vol. 251. 174 p.
6. Tabuada P. Verification and control of hybrid systems: a symbolic approach. *Springer*. 2009. 218 p.
7. Lunze J., Lamnabhi-Lagarrigue F. Handbook of hybrid systems control: theory, tools, applications. Cambridge University Press. 2009. 472 p.
8. Goebel R., Sanfelice R., Teel A. R. Hybrid Dynamical Systems: modelling, stability, and robustness. Princeton University Press. 2012. 318 p.
9. Hui Ye., Michel A. N., Hou Ling. Stability Theory for Hybrid Dynamical Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1998. Vol. 43. № 4. P. 461-474.
10. Alur R., Henzinger T. A., Sontag E. D. Analogy systems: verification and control. *Springer*. 1996. Vol. 3. 258 p.
11. Billings S. A., Tsang K. M. Spectral analysis of block structured nonlinear systems. *Mech. Syst. and Sig. Proc.* 1990. Vol. 4. № 2. P. 117-130.
12. Заміховський Л. М., Калявін В. П. Проектування систем діагностування: навчальний посібник. Івано-Франківськ: Вид-во «Полум'я», 2003. 248 с.
13. Осадчий С. І., Саула О. А. Ідентифікація динаміки радіорелейного каналу передачі даних. *Проблеми інформатизації та управління*: збірник наукових праць НАУ. Київ, 2004. Вип. 11. С. 157-160.
14. Burrage K., Lenane I., Lythe G. Numerical Methods for Second-Order Stochastic Differential Equations. *SIAM Journal on Scientific Computing*. 2007. Vol. 29. № 1. P. 245-264.
15. Kang G. Efficient Implementation Techniques for Gracefully Degradable Multiprocessor Systems. *IEEE Trans, on Comp.* 1995. Vol. 44. №. 4. P. 503-517.
16. Верлань А. Ф. Метод операторної інтерполяції в задачах моделювання динамічних систем. *Електронне моделювання*. 2003. Т. 25. № 6. С. 111-119.

17. Мокін Б. І., Мокін В. Б., Мокін О. Б. Математичні методи ідентифікації динамічних систем. Вінниця: ВНТУ, 2010. 260 с.
18. Павленко В. Д., Фомін О. О. Інформаційна технологія модельної діагностики нелінійних динамічних об'єктів. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2011. Т. 1. № 1. С. 57-65.
19. Павленко В. Д., Фомін О. О. Методи редукції діагностичних моделей нелінійних динамічних об'єктів контролю на основі багатовимірних вагових функцій. *Оброблення сигналів і зображень та розпізнавання образів: праці 7-ої Всеукраїнської міжнародної конференції УкрОБРАЗ'2004*. Київ, 2004. С. 100-103.

CONTROL OF COMPUTATIONAL PROCESSES USING IDENTIFICATION METHODS IN NATURAL MODELING

The growth of requirements for modeling tools, as well as the volume of tasks solved by modeling methods, leads to the need to create productive modeling systems of a high technical level, which are complex and extensive complexes of functional elements, nodes and units that ensure the implementation of various stages of the modeling process. Thus, when developing, researching, synthesizing and assessing the quality of work of modern modeling tools, the latter should be considered as systems with their own theory, principles of construction, implementation features and areas of application. One of the natural, in modern conditions and promising directions for significantly raising the technical level of modeling tools is their intellectualization by implementing complex procedures using technical and software tools, which in principle can be achieved only on the basis of the widespread use of modern computer technology in modeling systems.

The features of the organization of the computational process of the class of full-scale simulators implemented on an analog-digital (hybrid) computer are considered. The effectiveness of using an analog processor as a dynamic model of an object in hybrid full-scale simulators is shown, which is due to high speed due to parallelization and non-algorithmic calculations during dynamics modeling. An approach to controlling the computational process in full-scale simulation is proposed, which is based on identification methods, and constructive expressions for evaluating the functioning of computational and control systems of hybrid full-scale simulators are obtained.

Key words: *computational process, full-scale systems, analog processor, digital processor, operational control, performance assessment, identification methods.*

Отримано: 8.12.2024