

## ВІДЗИВ

офіційного опонента професора Білозьорова Василя Євгеновича на дисертаційну роботу Гуди Антона Ігоровича

“Ансамблеві пошукові методи і методи параметричної ідентифікації систем з хаотичною поведінкою”, представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – “Математичне моделювання та обчислювальні методи”

### **1. Актуальність теми дисертації та її зв'язок з основними напрямками розвитку науки і техніки**

Моделювання і подальший розвиток багатьох промислових технологій для сучасного виробництва потребують, з одного боку, ретельного (детального) аналізу існуючих моделей та розв'язків відповідних рівнянь, а з іншого боку, – створення регуляторів, за допомогою яких можна керувати складними нелінійними процесами.

При цьому однієї з основних проблем, які можуть виникнути при такому моделюванні, є нерегулярна (або хаотична) поведінка процесів, що моделюються.

Як відомо, основною ознакою хаотичного процесу (або системи) є підвищена чутливість до будь-якої (навіть дуже малої) зміни початкових умов. Ця чутливість приводить до того, що кінцевий результат суттєво відрізняється від початкового стану. Така закономірність притаманна, наприклад: періодично стимульованим клітинам серця, деяким електричним контурам, процесам у рідинах та газах в разі виникнення турбулентності в цих середовищах, багатьом хімічним реакціям, тощо. З математичної точки зору в багатьох нелінійних динамічних системах, розмірність яких вище 2, при деяких змінах параметрів можна спостерігати хаос, а отже, протягом тривалого часу їх поведінка стає непередбачуваною.

В останні часи моделювання систем з хаотичною поведінкою стало одним з основних напрямків розвитку теорії ідентифікації.

Не дивлячись на безліч ситуацій, які трапляються при моделюванні хаотичних процесів, можна виділити чотири основних етапи такого моделювання: 1) аналіз часових рядів спостережуваних змінних; 2) визначення кількості рівнянь моделі та вигляду функцій, які входять до цих рівнянь (так звана структурна ідентифікація); 3) підбір значень невідомих параметрів, які входять до рівнянь моделі (так звана параметрична ідентифікація); 4) перевірка адекватності реального та змодельованого процесів (ця перевірка відбувається за допомогою мінімізації так званої цільової функції, яка визначає, у деякому сенсі, відхилення траєкторій реальної та модельної систем).

Слід зауважити, що існують ще дві проблеми, які і досі привертають увагу дослідників: 1) отримання оцінок параметрів з необхідною точністю; це дуже важливо тоді, коли за умовами експерименту параметри не можуть бути виміряні безпосередньо (інакше кажучи, процедура моделювання виступає у ролі «вимірюваного пристрою»); 2) оцінювання параметрів в ситуації дефіциту даних, коли по вимірюваному ряду даних не вдається сформулювати ряди всіх динамічних змінних моделі (така ситуація показує, що у системі існують так звані «приховані змінні»).

У представленій роботі досліджується задача параметричної ідентифікації хаотичних динамічних систем (вигляд і кількість рівнянь досліджуваної системи вважаються відомими). Задача полягає тільки в оцінці невідомих параметрів системи по спостережуваним даним. Така постановка привертає серйозну увагу і вельми актуальна у теперішній час.

Таким чином, головною метою дисертації є створення нових методів ідентифікації з використанням адаптивних пошукових принципів настроювання параметрів, які були б придатні для систем з хаотичною поведінкою. Тому математичне моделювання хаотичних динамічних процесів, удосконалення засобів їх комп'ютерного моделювання для розв'язку задач оцінювання стану будь-яких нелінійних систем, обґрунтування і обчислення параметрів таких систем є актуальним науковим

завданням, що має важливе значення для енергетичних галузей (наприклад для вітроенергетики та транспортної промисловості).

## **2. Наукова новизна, ступінь обґрунтованості і достовірність одержаних результатів**

Серед основних наукових досягнень дисертації треба відмітити такі.

Створено критерії ідентифікації систем, які демонструють хаотичну поведінку.

На підставі адаптивно-пошукової парадигми з використанням ансамблю пошукових агентів, розроблено нові методи ідентифікації, які на відміну від відомих методів, значно підвищують швидкість пошуку та здатні за мінімальний час перебудовуватися у разі різкої зміни параметрів.

Створено нову класифікацію систем ідентифікації динамічних систем.

Встановлено, що системи з сухим тертям при деяких значеннях параметрів демонструють хаотичну поведінку. При цьому згадана поведінка визначає новий тип атракторів, невідомих раніше.

Слід зауважити, що процес налаштування параметрів в задачі ідентифікації може привести до виникнення нових сценаріїв хаосу в досліджуваних системах. Основою будь-якого такого процесу є біфуркації траєкторій системи. Саме виникнення біфуркацій може суттєво впливати на пошукові алгоритми в задачах ідентифікації.

Біфуркації є одним з найважливіших факторів просторово-часової самоорганізації (появі сингулярного атрактора) у відкритих системах до яких можливе надходження зовнішньої енергії. У загальному випадку для моделювання в природних умовах атракторів системи необхідно провести велику роботу: визначити параметри від яких залежить поведінка хаотичної системи, виділити незалежні зміни, побудувати атрактор шляхом порівняння кореляцій між незалежними змінними.

У представленій роботі для оцінки ефективності алгоритмів ідентифікації були використані наступні системи в яких виникають хаотичні явища: системи Лоренца, Спротта, Чуа, системи з сухим тертям та система Колпітца.

Обґрунтованість і достовірність отриманих результатів підтверджується використанням законів класичної теорії керування, хаотичної динаміки, апробованих методів математичного та фізичного моделювання, задовільною збіжністю аналітичних і експериментальних даних, позитивними результатами впроваджених у життя розробок.

### **3. Наукове і практичне значення роботи**

На основі теоретичних розробок були розроблені нові методи параметричної ідентифікації хаотичних систем. Запропоновані алгоритми не тільки дозволили збільшити швидкість процесів ідентифікації параметрів реальних систем, але й суттєво підвищили стійкість обчислювальних процедур пошуку до збурень, які можуть виникати в досліджуваних системах.

Результати роботи було впроваджено в рамках науково-практичного дослідження «Оцінка можливості заміни випробувань КА на стійкість до акустичного навантаження випробуваннями широкосмугової вібрації» (ІТМ НАН України, м. Дніпро) та при ідентифікації режиму роботи вертикально-осьової віброустановки з Н-ротором Дар'є з урахуванням складно-періодичної або хаотичної структури коливань лопатей (ІТСТ НАН України, м. Дніпро).

На базі створених алгоритмів, програмно-технічних засобів моделювання і обробки інформації розроблені та втілені у виробництво методичні рекомендації по визначенню параметрів лопатей віброустановок. Ці рекомендації одержані завдяки застосуванню методів теорії керування та моделювання динамічних процесів в хаотичних системах.

### **4. Зауваження по роботі**

Незважаючи на, в цілому, приємне враження, представлена робота має деякі недоліки. Найбільш суттєвими, на мій погляд, є два наступних недоліка:

1) кількість параметрів, що ідентифікуються, не перевищує одного; тільки при ідентифікації параметрів системи Лоренца, розглянута можливість одночасної ідентифікації двох параметрів.

2) хаотичність досліджуваних систем (крім класичних) ніде не перевіряється і залежність процедури настройки параметрів від біфуркаційних процесів ніде не досліджується.

Відомо, що аналіз хаотичних властивостей неперервних динамічних систем може бути зведений до аналізу властивостей деякого дискретного відображення (яке зветься відображенням Пуанкаре). Пошук цього відображення є дуже складною математичною проблемою. Наприклад, вже побудова дискретного відображення Пуанкаре для широко відомої (і дуже простої з точки зору математичного опису) системи Лоренца зіткнулася зі значними труднощами. Математичні спроби на протязі довгого часу довести існування дивного атрактора в околі сідло-вузла або сідло-фокуса цієї системи теж закінчилися невдачею. Більш того, результати деяких недавніх робіт з хаотичної динаміки дозволили стверджувати, що геометричний підхід, розвинений для дискретних відображень і дозволивший одержати ряд блискучих результатів, є не зовсім адекватним по відношенню до неперервних динамічних систем. Склалося враження, що саме визначення сингулярного атрактора, а також такі класичні розділи хаотичної динаміки, як обчислення вимірності атрактора, сценарії переходу до хаосу і самі критерії виникнення хаосу потребують значної переоцінки.

Як показують численні приклади, ні наявність додатнього показника Ляпунова, ні наявність петель сепаратрис сідло-вузлів або сідло-фокусів, ні наявність самих седло-вузлів або сідло-фокусів не є необхідною умовою існування хаотичної динаміки. Більш того, сингулярні аттрактори великого класа тривимірних дисипативних автономних динамічних систем, до якого входять і всі відомі класичні системи, народжуються завдяки одних і тих же каскадів м'яких біфуркацій стійких граничних циклів. Початком завжди є каскад біфуркацій подвоєння періоду Фейгенбаума, який переходить у

повний або неповний субгармонічний каскад біфуркацій Шарковського, який продовжується повним або неповним гомоклінічним каскадом біфуркацій.

Всі ці складності, які виникають при дослідженні хаотичних атракторів, можуть суттєво вплинути на процедури ідентифікації, що запропоновані в роботі. Головне питання до цих процедур, є наступним. Яким чином треба налаштувати параметри у випадку, якщо значення цих параметрів знаходяться близько до біфуркаційних значень? Таким чином обумовлена наявність наступного зауваження:

3) Не досліджено, як буде працювати будь-яка процедура ідентифікації, якщо в системі буде реалізовано каскад біфуркацій Фейгенбаума або Шарковського? (Навіть дуже малі зміни параметрів приведуть до ще більшої хаотизації процесу.)

4) У всіх тестових системах (Лоренца та інших) атрактори є глобальними (автор не замислюється над тим, з якої початкової точки треба стартувати при вивченні поведінки модельних систем). Як бути у тому випадку, коли атрактори локальні? (Старт із будь-якої точки, що не лежить в околі атрактора, призведе до того, що траєкторії модельної системи будуть прямувати до нескінченності.)

5) Використовується тільки три типи тестуючих сигналів: гармонійний стрибковий (прямокутні коливання), гармонійний гладкий (сіносподібні коливання) та лінійний. Ніде не пояснюється, чому такі сигнали вибрані для тестування? Мені здається, що цього недостатньо. Якщо вже мати справу з періодичними тестуючими сигналами, то чому не використовуються розривні періодичні функції (наприклад, тангенсоподібні обмежені функції)?

Або, в системі Колпітца, при спеціальному підборі гармонійної тестуючої функції може виникнути багатодзиговий атрактор. Як в цьому випадку буде відбуватися ідентифікація параметрів такої системи?

6) Наприкінці треба сказати про те, що в роботі є деякі недоліки мовного характеру. Наприклад: «Набуло подальший розвиток підходи...»; «...цими методами ... цими методами»; «У роботі [21,46]...»; «...системи еквівалентної їй системи...»; «...ведемо...», «...або отримане в результаті попереднього моделювання...», «...подібних розглядався...», «...не

відповідає жодної моделі...», «...так і похідною від неї...», «...в в пошуковій...», « - Адаптивно-пошуковий метод...», «... вийшла картина...», « ...але на настільки...», « ...на стрибкоподібне зміна...» « ...слабо виражена динаміка...сильно виражена динаміка??? », « ...нульової частоті...», « ... помітного відмінності...», « ...все вольт-амперні...», « ...коли перший переключився елемент...».

## **5. Рекомендації по використанню результатів**

Методичні та практичні аспекти роботи можуть бути використані науково-дослідними інститутами для визначення параметрів систем, що моделюються. Результати роботи також можуть бути використані при проектуванні, створенні та налаштуванні параметрів стендів дослідження вібраційного та акустичного впливу на поведінку коливальних систем. Аналіз результатів даних з таких стендів дає можливість вказати необхідні нелінійні властивості системи та діапазон параметрів, які у сукупності забезпечують широкосмуговий спектр коливань.

Створене програмне середовище для моделювання нелінійних динамічних систем використовується при проведенні лабораторних робіт по дисциплінам «Моделювання систем» та «Сучасні системи управління» на кафедрі інформаційних технологій та систем Національної металургійної академії України.

## **6. Загальні висновки**

Незважаючи на всі вказані критичні зауваження я вважаю, що дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, яке відповідає пунктам 9, 10, 12-14 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», а також вимогам Департаменту атестації кадрів доктора технічних наук, з одержанням нових науково обґрунтованих теоретичних і експериментальних результатів, а саме: нових критеріїв та методів ідентифікації нелінійних динамічних систем, які, на відміну від існуючих, дозволяють оцінити їх стан та хаотичну поведінку, а

також дають підстави для створення ефективних алгоритмів настроювання параметрів моделей систем ідентифікації, що відповідають пунктам 1 – «Розроблення або розвиток теорії математичного моделювання реальних явищ, об'єктів, систем чи процесів як сукупності формалізованих дій (операцій) для складання ефективних математичних описів досліджуваних об'єктів» та 2 – «Розвиток, ефективне використання методів обчислювальної математики стосовно вирішення проблем дослідження, проектування, виготовлення та експлуатації об'єктів нової техніки й нових технологій» паспорту наукової спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, а її автор, Гуда Антон Ігорович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за цією спеціальністю.

Професор кафедри комп'ютерних технологій  
Дніпровського національного університету,  
доктор фізико-математичних наук

В. Є. Білозьоров

*Вчений*



*Т. В. Козак*