

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Розроблення моделі параметричної ідентифікації
лінійного об'єкту роботизації
(тема)

Виконав:
здобувач 2 року навчання,
групи КТРСм-23-2
Онищенко В. М.
(прізвище, ініціали)

Спеціальності 174 Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані технології та робо
техніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютеризовані та
робототехнічні системи
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Ромашов Ю. В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

2025р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	Комп'ютеризовані та робототехнічні системи (код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР _____

(підпис)

« ____ » _____ 20 ____ р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

здобувачеві _____

Онищенку Владиславу Мирославовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення моделі параметричної ідентифікації лінійного об'єкту роботизації

затверджена наказом по університету від “25” листопада 2024р. № 1239 Ст.

2. Термін подання студентом роботи “22” січня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи 3.1 Лінійні об'єкти роботизації;

3.2 Моделі параметричної ідентифікації;

3.3 Комп'ютерна система математичних розрахунків та моделювання;

3.4 Середовище графічного моделювання Xcos системи Scilab;

3.5 Оформлення текстової документації згідно ДСТУ 3008-2015.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Вступ;

4.2 Параметрична ідентифікація лінійних об'єктів роботизації, постановка проблеми;

4.3 Модель параметричної ідентифікації лінійного об'єкта роботизації;

4.4 Комп'ютерне моделювання параметричної ідентифікації лінійного об'єкта роботизації;

4.5 Охорона праці;

4.6 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 12 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Параметрична ідентифікація лінійних об'єктів роботизації, постановка проблеми	25.11 – 07.12.24	виконано
2	Параметрична ідентифікація лінійних об'єктів роботизації, постановка проблеми	08.12 – 20.12.24	виконано
3	Комп'ютерне моделювання параметричної ідентифікації лінійного об'єкта роботизації	21.12 – 06.01.25	виконано
4	Охорона праці	07.01 – 10.01.25	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	11.01 – 13.01.25	виконано
6	Подання роботи на перевірку Інтернет-системою StrikePlagiarism	14.01 – 16.01.25	виконано
7	Подання роботи на рецензію	17.01 – 19.01.25	виконано
8	Подання роботи на підпис зав. кафедри	20.01 – 21.01.25	виконано
9	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	22.01.25	виконано

Дата видачі завдання 25 листопада 2024р.

Здобувач

_____ (підпис)

Онищенко В. М.

Керівник роботи

_____ (підпис)

проф. Ромашов Ю. В.

(посада, прізвище, ініціали)

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«22» січня 2025 р.

Онищенко В. М.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 88 с., 2 табл., 16 рис., 2 дод., 18 джерел.

ОБРОБКА СИГНАЛІВ, ЛІНІЙНИЙ ОБ'ЄКТ РОБОТИЗАЦІЇ,
ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ,
ТЕОРІЯ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ.

Мета роботи – обробка сигналів лінійних об'єктів роботизації, що досліджуються при розв'язуванні задач їх параметричної ідентифікації.

Об'єкт досліджень – процес параметричної ідентифікації лінійних об'єктів роботизації.

Предмет дослідження – використання сигналів лінійних об'єктів щодо розв'язування задач параметричної ідентифікації об'єктів роботизації.

Методи дослідження – аналіз та узагальнення існуючих публікацій, комп'ютерне моделювання.

Сучасні програмно-апаратні засоби обчислювальної техніки є ядром робототехнічних систем. Висока швидкість обчислень і швидкодіючі інтелектуальні засоби контролю надають широкі можливості для реалізації адаптивного високоточного управління виконавчими пристроями з урахуванням зовнішніх впливів та інформативних факторів.

Задачі дослідження спрямовані на реалізацію мети та містять огляд базових понять про робототехнічні системи, огляд підходів щодо управління ними, а також формулювання проблем їх ідентифікації.

ABSTRACT

Explanatory note: 81 pp., 2 tab., 14 fig., 1 appendices, 18 sources.

SIGNAL PROCESSING, LINEAR ROBOTIC OBJECT, PARAMETRIC IDENTIFICATION, COMPUTER MODELING, AUTOMATIC CONTROL THEORY.

Purpose – to process signals of linear robotization objects studied in solving problems of their parametric identification.

The object of research is linear robotization objects.

The subject of research is the use of signals of linear objects to solve problems of parametric identification of robotic objects.

Research methods – analysis and generalization of existing publications, computer modeling.

Modern hardware and software of computer technology are the core of robotic systems. High computing speed and high-speed intelligent control tools provide ample opportunities for the implementation of adaptive high-precision control of actuators, taking into account external influences and informative factors.

The research objectives are aimed at realizing the goal and include an overview of the basic concepts of robotic systems, an overview of approaches to their management, as well as the formulation of problems of their identification.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	7
Вступ	8
1 Параметрична ідентифікація лінійних об'єктів роботизації, постановка проблеми	11
1.1 Лінійні об'єкти роботизації, основні засади.....	11
1.2 Постановка і класифікація завдань ідентифікації та оцінювання	14
1.3 Ідентифікація лінійних детермінованих об'єктів	22
1.4 Висновки по розділу	30
2 Модель параметричної ідентифікації лінійного об'єкта роботизації	31
2.1 Узагальнена модель параметричної ідентифікації лінійного об'єкта роботизації на основі використання цифрованих вимірювань	31
2.2 Дискретизація диференціального рівняння математичної моделі лінійного об'єкта роботизації	35
2.3 Лінійний об'єкт роботизації другого порядку	
2.4 Висновки по розділу	41
3 Комп'ютерне моделювання параметричної ідентифікації лінійного об'єкта роботизації	54
3.1 Використання перетворення Лапласа та передавальної функції щодо комп'ютерного моделювання лінійного об'єкта роботизації	54
3.2 Комп'ютерна модель лінійного об'єкта роботизації та процесу його параметричної ідентифікації	59
3.3 Дослідження процесів в лінійному об'єкті роботизації щодо його параметричної ідентифікації	64
3.4 Висновки по розділу	71
4 Охорона праці	73
4.1 Аналіз умов праці на робочому місці	73

4.2 Промислова безпека на робочому місці	73
4.3 Виробнича санітарія у приміщенні	74
4.4 Пожежна безпека приміщення	76
Висновки	78
Перелік джерел посилання	80
Додаток А Апробація результатів дослідження	83
Додаток Б Демонстраційний матеріал	88

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АФХ – амплітудно-фазова характеристика;

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;

КПО – коефіцієнт природної освітленості;

ОР – об'єкт регулювання;

ОУ – об'єкт управління;

ПД – пропорційно-інтегрально-диференційний;

ПК – персональний комп'ютер;

ТАР – теорія автоматичного регулювання;

ТАУ – теорія автоматичного управління;

ТОУ – технологічний об'єкт управління;

ФЧХ – фазо-частотна характеристика.

ВСТУП

Останні 10-15 років активно впроваджуються інтелектуальні системи управління, які оцінюють невидимі змінні, прогнозувати стан процесу та синтезувати оптимальні стратегії. Їх основною метою є мат. Модель, що зв'язує вхідні та вихідні сигнали. Актуальність роботи обумовлена необхідністю створення адаптивних моделей, які точно відображають динаміку лінійних об'єктів роботизації. Це підвищує ефективність систем автоматичного управління в промисловості, транспорті та енергетиці. Такі моделі вдосконалюють різні системи, забезпечуючи їх стабільну роботу в умовах змінних параметрів і шумів. Створення таких моделей виконується у два етапи: спочатку формується базова модель на основі фізико-хімічних явищ, яка містить невідомі параметри, визначення яких потребує подальшої інформації. Зазвичай ця модель містить невідомі величини (параметри), отримання яких на основі апріорних знань надто складне або неможливе. Ця модель часто містить деякі елементи структури, доцільність включення яких очевидна. Наприклад, при невідомих значеннях коефіцієнтів дифузії незрозуміла доцільність введення в модель членів, що визначають дифузійне перенесення речовини.

Класична теорія автоматичного регулювання (ТАР) базується на розгляді звичайних, переважно лінійних, диференціальних рівнянь теорію стійкості та якості процесів та системі об'єкт – регулятор. Основи цієї теорії було закладено І. А. Вишнеградським, Д. К. Максвеллом. Під впливом потреб автоматизації управління технологічними процесами та рухомими об'єктами теорія автоматичного управління (ТАУ) інтенсивно розвивалася. Вона ввібрала існуючі методи теорії зв'язку, теорії коливань і створила власні методи аналізу та синтезу систем із зворотним зв'язком.

Таким чином метою кваліфікаційної роботи є обробка сигналів лінійних об'єктів роботизації, що досліджуються при розв'язуванні задач їх параметричної

ідентифікації.

Об'єкт дослідження – процес параметричної ідентифікації лінійних об'єктів роботизації.

Предмет дослідження – використання сигналів лінійних об'єктів щодо розв'язування задач параметричної ідентифікації об'єктів роботизації.

Методи дослідження – аналіз та узагальнення існуючих публікацій, комп'ютерне моделювання.

Завдання дослідження:

- проаналізувати основні засади лінійних об'єктів роботизації;
- провести постановку і класифікацію завдань ідентифікації та оцінювання;
- розглянути ідентифікацію лінійних детермінованих об'єктів;
- розробити модель параметричної ідентифікації лінійного об'єкта роботизації;
- виконати комп'ютерне моделювання параметричної ідентифікації лінійного об'єкта роботизації;
- виконати заходи та розрахунки з охорони праці для безпечної роботи в лабораторії, де виконувалась кваліфікаційна робота.

Робота виконується згідно з [1-4], як складова наукових досліджень, які здійснюються на кафедрі КІТАР Харківського національного університету радіоелектроніки. Результати дослідження були апробовані у [5].

Цілі сталого розвитку – розробка моделі параметричної ідентифікації лінійного об'єкта роботизації сприяє досягненню цілі 9 (Індустрія, інновації та інфраструктура), оскільки оптимізує роботу роботизованих систем, підвищуючи їх ефективність та точність, що має важливе значення для розвитку сучасної індустрії. Крім того, це сприяє цілі 8 (Гідна праця та економічне зростання), оскільки автоматизація роботизованих технологій знижують фізичне навантаження на працівників і створюють нові висококваліфіковані робочі місця.

1 ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЛІНІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ РОБОТИЗАЦІЇ, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

1.1 Лінійні об'єкти роботизації, основні засади

Автоматика та управління оперують безліччю специфічних базових термінів, нерозуміння яких неминуче ускладнить вирішення науково-дослідних завдань.

Можна виділити три способи трудової діяльності у виробництві: ручний, механізований, автоматизований.

Під терміном «роботизація» розуміється застосування та впровадження автоматичних пристроїв, що призводять до звільнення людини від безпосередньої участі у технологічних процесах [5-7].

Автомат – пристрій (машина, апарат, пристрій), що дозволяє здійснювати виробничий процес без безпосередньої участі людини та під її контролем. Часто використовується термін «об'єкт». Можна виділити три різновиди цього поняття: об'єкт виробництва; об'єкт регулювання; об'єкт керування.

Об'єкти регулювання (ОР) – технічні пристрої, яких процеси (фізичні параметри, що впливають перебіг цих процесів) підлягають регулюванню. Об'єкт управління (ОУ) чи технологічний об'єкт управління (ТОУ) – розглядається як об'єкт управління сукупність технологічного обладнання та реалізованого на ньому за відповідними інструкціями чи регламентами технологічного процесу виробництва [7].

Поняття «алгоритм» також широко використовується в різних призначеннях і за змістом означає порядок (послідовність) тих чи інших дій. Розрізняють алгоритм функціонування, алгоритм регулювання, алгоритм керування.

Регулювання – вид управління, метою якого є підтримка на необхідному рівні однієї або кількох величин, що характеризують стан об'єкта управління;

регулювання супроводжується безперервним контролем. Автоматичне регулювання – підтримка фізичних величин на певному рівні або їх зміна за необхідним законом без безпосередньої участі людини. Розрізняють стабілізуюче, програмне та ін. види регулювання.

Регулювання – найпростіший варіант управління. Стабілізуюче регулювання – забезпечує підтримку фізичних величин на певному рівні. Програмне регулювання – що забезпечує зміну фізичних величин за потрібним законом.

У теорії управління при аналізі та синтезі систем управління мають справу з їхньою математичною моделлю [8]. Математична модель є рівняннями, передавальними або тимчасовими функціями, які описують процеси, що протікають у системі управління. Математична модель може бути отримана аналітично (теоретично) на основі фізичних (хімічних тощо) законів, яким підпорядковуються процеси в системі управління, або експериментально.

Лінійні об'єкти автоматизації відіграють ключову роль різних галузях промисловості та науки, де потрібно надійне і точне управління процесами [7-9]. Включаючи такі властивості, як суперпозиція та пропорційність, лінійні системи відрізняються тим, що їхню поведінку можна описати порівняно простими математичними моделями. У цьому розділі розглянуто основні аспекти лінійних об'єктів автоматизації, їх застосування, і методи математичного моделювання та структурні схеми їхнього аналізу та управління.

Лінійні об'єкти автоматизації – це системи, що описуються лінійними диференціальними чи різницевиими рівняннями, поведінка яких підпорядковується принципам суперпозиції та масштабованості [10]. У лінійних системах вихідний відгук у сумі вхідних впливів дорівнює сумі відгуків кожного із впливів окремо. Ця властивість значно спрощує аналіз і управління системою, оскільки дозволяє пророкувати її поведінку при різних вхідних впливах. Приклади лінійних об'єктів включають електричні ланцюги, механічні системи з малою амплітудою коливань, теплові системи, системи регулювання рівня рідини і багато інших об'єктів, які за певних умов можуть бути описані лінійними

моделями. Незважаючи на те, що реальні об'єкти можуть мати нелінійні властивості, часто лінійна модель використовується як апроксимація, що забезпечує досить високу точність для практичних цілей.

Теорія лінійних систем та методів їх автоматичного управління має довгу історію. Основоположниками теорії лінійних систем вважаються Н. Вінер, Р. Калач, Дж. Фур'є та інші вчені, які заклали основи аналізу сигналів, передачі та управління [6, 10, 11]. В останні десятиліття методи ідентифікації та керування лінійними об'єктами були значно вдосконалені завдяки розвитку обчислювальної техніки та алгоритмів цифрової обробки сигналів. Сучасні роботи приділяють особливу увагу адаптивним методам, які дозволяють налаштовувати параметри моделей у режимі реального часу, та методам оптимізації, які мінімізують помилки моделі за наявності шумів та зовнішніх впливів. Важливе місце у літературі посідає питання стійкості лінійних систем. Роботи А.М. Ляпунова, у яких формулюються критерії стійкості, вплинули в розвитку теорії управління. Сучасні публікації присвячені покращенню критеріїв стійкості для лінійних об'єктів, що особливо актуально у завданнях автоматичного управління, де висока точність та надійність мають критичне значення.

Лінійні об'єкти автоматизації знаходять застосування у широкому спектрі галузей, включаючи:

- промислове виробництво. Автоматичне управління процесами у хімічній, нафтопереробній, металургійній промисловості часто спирається на лінійні моделі. Наприклад, керування температурою в печах, швидкістю конвеєрів або тиском у трубопроводах можна апроксимувати лінійними моделями, що дозволяє використовувати ефективні алгоритми керування;

- енергетика. Лінійні моделі використовуються для керування та стабілізації режимів роботи енергетичних установок, таких як електростанції та електричні мережі. Наприклад, системи стабілізації частоти в енергосистемах описуються лінійними диференціальними рівняннями, що дозволяє реалізовувати ефективні регулятори;

– авіація та транспорт. В авіації лінійні моделі допомагають описувати динаміку польоту на малих кутах атаки, що є основою розробки автопілотів. Також лінійні моделі застосовуються в автоматичному керуванні рухом транспортних засобів, таких як поїзди та автомобілі, де потрібно підтримувати постійну швидкість або відстань;

– обробка сигналів. У телекомунікаціях лінійні об'єкти використовуються для моделювання та фільтрації сигналів.

Для наочного уявлення лінійних об'єктів часто використовуються структурні схеми, які показують взаємозв'язок між елементами системи та потоками сигналів.

Основні елементи структурної схеми включають:

– вхідний сигнал. Джерело сигналу, що впливає на об'єкт, наприклад завдання температури в системі опалення або потрібна швидкість для транспортного засобу;

– об'єкт управління. Система, що підлягає управлінню, наприклад нагрівальний елемент, двигун або механічна система;

– контролер. Блок, який обчислює керуючу дію на основі відхилення вихідного сигналу від бажаного значення. Контролери можуть бути пропорційно-інтегрально-диференціальними (ПІД), адаптивними або оптимальними;

– зворотній зв'язок. Канал, який передає інформацію про поточний стан об'єкта на вхід контролера, дозволяє коригувати управління для досягнення необхідного результату.

1.2 Постановка і класифікація завдань ідентифікації та оцінювання

Задачею ідентифікації вважатимемо отримання математичних залежностей між сигналами на вході та виході технологічного процесу на основі спостережень цих сигналів [7, 8, 12]. Ці залежності утворюють математичну модель технологічного об'єкта управління. Математична модель у системах

управління служить для оцінювання та прогнозування неспостережуваних змінних стану, прогнозування змінних, що спостерігаються, розрахунку стратегій управління. Різні постановки завдань ідентифікації та оцінювання можна проілюструвати за допомогою структурної схеми об'єкта, зображеної на рисунку 1.1, де x і z – вхідний і вихідний сигнали, що спостерігаються (в загальному випадку вектори).

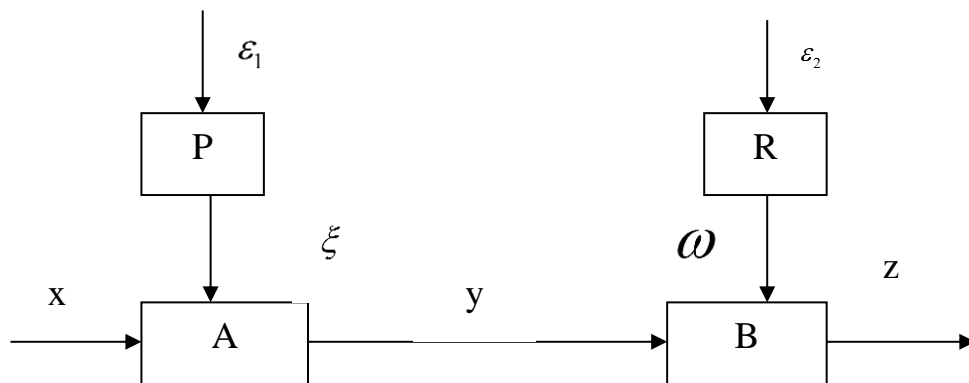


Рисунок 1.1 – Структурна схема моделі об'єкта

Ці сигнали можуть бути детермінованими або випадковими, можуть бути сумішшю (зазвичай адитивною) детермінованої та випадкової складових. Вхідний сигнал x може спеціально подаватися в систему для ідентифікації (активний експеримент) може існувати в системі як вплив, що управляє або обурює. Отримання в цих умовах даних для ідентифікації називається пасивним експериментом. Символом y позначений сигнал, що не спостерігається (в загальному випадку вектор), який оцінюється опосередковано за сигналом, що отримується в результаті перетворення в об'єкті або системі вимірювання оператором.

Не спостерігаємі перешкоди ε_1 і ε_2 – це зазвичай випадкові процеси типу білого шуму, у деяких випадках містять детерміновані складові. ξ і ω – не спостерігаємі, зазвичай кореговані у часі випадкові сигнали, у деяких випадках містять детерміновані компоненти. A , B , P , R – оператори, в деяких випадках їхній вид невідомий, в інших відомий, але невідомі параметри.

1.2.1 Розглянемо коротко основні постановки завдань ідентифікації та оцінювання.

Ідентифікація:

– визначення параметрів (параметрів) об'єкта. Спостерігаються змінні x та z . Потрібно визначити оператори (параметри операторів) A і B . Часто одночасно з визначенням параметрів операторів A і B потрібно визначити параметри операторів P і R , що перетворюють білий шум, що не спостерігається, ε_1 , і ε_2 в не спостерігаємі сигнали ξ і ω ;

– визначення характеристик випадкових сигналів (тимчасових рядів). Спостерігається змінна ξ (або ω), потрібно визначити оператор (параметри оператора) P (або R). Випадкові сигнали ε_1 (або ε_2) не спостерігаються. Зауважимо, що завдання визначення деякого набору постійних чисел (параметрів) має назву параметричної ідентифікації. Завдання визначення певної безперервної функції часу (перехідної характеристики) або частоти (частотної характеристики) зветься непараметричної ідентифікації. Найчастіше після отримання цієї характеристики її апроксимують деяким аналітичним виразом, вирішуючи на цій другій стадії завдання підбору його параметрів і деяких випадках структури.

Оцінювання змінних станів: x , z – випадкові сигнали, що спостерігаються; ξ і ω – випадкові сигнали, що не спостерігаються; A , B , P , R – відомі оператори з відомими параметрами. Потрібно визначити (оцінити) випадковий сигнал, що не спостерігається. Можливі завдання: оцінювання в поточний час – завдання фільтрації або власне оцінювання; оцінювання у майбутній момент часу, зрушений на Δt щодо поточного моменту – завдання прогнозування, передбачення або екстраполяції; оцінювання в минулий час – завдання згладжування або інтерполяції.

Можлива постановка задачі, при якій одночасно проводиться параметрична ідентифікація A , B , P , R та оцінювання (одночасна ідентифікація

та оцінювання). Приватні постановки задачі.

Серед частинних постановок найчастіше зустрічаються такі завдання ідентифікації [12]:

– визначення лінійності операторів. Сигнали x , z спостерігаються; ξ і ω – не спостерігаються і випадкові. Потрібно встановити (підтвердити) лінійний характер операторів A і B . Можлива також постановка задачі підтвердження існування залежності між сигналами x і z або їх складовими;

– визначення порядків та запізнювань. Сигнали x і z спостерігаються; ξ і ω – не спостерігаються і випадкові. Відомо, що A , B , P та R – лінійні оператори. Параметри цих операторів, порядки рівнянь зв'язку та затримки часу невідомі. Потрібно знайти порядок та затримки в операторах за кожною із складових вектора x .

Серед частинних завдань оцінювання найбільш характерні такі:

– визначення значних змінних. Сигнали x і z спостерігаються; A , B , P , R – невідомі оператори. Потрібно визначити частку впливу кожної зі складових вектора x на одну зі складових вектора z (або y);

– поділ масивів (кластеризація). Сигнали x і z спостерігаються. Відомо, що сигнали ξ і ω , або оператори A , B , P , R змінюють свої властивості під час збору даних. Потрібно виділити з масивів експериментальних значень x і z спостереження, пов'язані з різницею в характері операторів (або сигналів ξ і ω). Завдання визначення моменту зміни властивостей операторів (або сигналів ξ і ω) зазвичай називають завданням розладки;

– виявлення та вилучення трендів (дослідження стаціонарності). Сигнали x , z спостерігаються; i мають випадкову складову i , можливо, також деяку детерміновану періодичну або аперіодичну складову. Оператори A , B невідомі, але параметри цих операторів залежать від часу. Потрібно виявити наявність періодичної або аперіодичної детермінованої складової в сигналах ξ і ω , апроксимувати ці складові аналітичними виразами і відняти їх наведені до виходу значення з сигналу z . Якщо тренд є у вхідному сигналі x , що

спостерігається, його виявлення і виділення не потрібно для вирішення завдань ідентифікації та оцінювання;

– визначення характеру та параметрів розподілу випадкових сигналів. Спостерігається сигнал z (або x). Сигнали та y не спостерігаються. Можливі різні постановки задачі: визначити, чи підпорядковується сигнал деякому заданому закону розподілу ймовірностей (наприклад, нормальному); побудувати функцію розподілу ймовірностей сигналу чи функцію щільності ймовірності; апроксимувати побудовану функцію заданим аналітичним виразом (заданим видом закону розподілу) та визначити параметри цього виразу (знайти функцію розподілу ймовірностей або густини ймовірності сигналу). Як ідентифікації, так оцінювання характерного завдання оптимізації чи планування експерименту;

– вибір вхідного сигналу (планування експерименту). У багатьох випадках завдання ідентифікації та оцінювання можна встановити значення сигналу x , виходячи з вимог найбільш швидкої і точної ідентифікації. Експеримент, який проводиться в умовах спеціального вибору вектора x , носить назву активного експерименту. Поряд із вибором значення та характеру вхідного сигналу до завдань планування часто відносять також вибір таких характеристик проведення експерименту, як кількість вимірювань, довжина вибірки, ширина інтервалу при дискретних вимірах, точність вимірювання тощо.

1.2.2 Розглянемо основні різновиди задач ідентифікації.

У промислових умовах вихідні сигнали, що спостерігаються, змінюються не тільки під впливом спостережуваних входів, а й через численні неспостережені перешкоди (ξ і ω на рис. 1.1). У разі, коли ці перешкоди малі або зовсім відсутні ($\xi = \omega = 0$), вихідний сигнал повністю визначається лише вхідним сигналом x , що спостерігається. Така система зветься детермінованою, на відміну від стохастичної системи, в якій перешкоди ξ і ω впливають на змінні y і z .

Перешкоди при ідентифікації призводять до необхідності збирання

більшої кількості даних, ніж це необхідно детермінованій системі. Можливі два підходи до побудови алгоритмів ідентифікації [14]. При одному з них спочатку збирається масив даних та оцінки характеристик або параметрів, які виходять після обробки цього масиву (ідентифікація за масивом, або ретроспективна ідентифікація). Місце збору даних та обробки при цьому можуть бути територіально роз'єднані [14].

В іншій постановці оцінки уточнюються на кожному кроці надходження нових вимірів, тобто – під час процесу. Відповідні алгоритми та оцінки називаються рекурентними (покроковими). У разі, якщо здійснюється певний покроковий процес обчислення без надходження нових вимірювань, такі процедури тут називатимемо ітераційними (їх називають також рекурсивними чи послідовними наближеннями).

Рекурентні алгоритми характерні для адаптивних систем управління, коли внаслідок дрейфу параметрів чи недостатньої вихідної точності необхідно уточнення параметрів у процесі [15]. Методи ідентифікації, що реалізують певний критерій ідентифікації, можуть бути побудовані як за рекурентним, так і за ретроспективним алгоритмом. Однак деякі методи, наприклад метод стохастичної апроксимації і байєсовські оцінки, найбільш пристосовані до рекурентної форми [15].

Алгоритм ретроспективної ідентифікації з метою оцінювання вектора параметрів A може (для дискретних відліків часу $0, 1, \dots, M$) бути записаний у формі [13]:

$$\hat{A}_N = F(x_0^N, z_0^N), \quad (1.1)$$

де (x_0^N, z_0^N) – масив вимірювань від 0 до N ;

\hat{A}_N – оцінка вектору A , одержана на повній виборці $0, 1, \dots, N$.

Рекурентний алгоритм записується в вигляді:

$$\hat{A}_{n+1} = F_1(\hat{A}_n, x_{n+1}, z_{n+1}), \quad (1.2)$$

де \hat{A}_N – оцінка вектора параметрів на n -м шазі.

Сутність (1.2) не зміниться, якщо уявити це рівняння у більш уживаній формі:

$$\hat{A}_{n+1} = F_2(\hat{A}_n, x_{n+1}, z_{n+1}, p_{n+1}), \quad (1.3)$$

де $p_{n+1} = G(p_n, \hat{A}_n, x_{n+1}, z_{n+1})$.

Для дискретних вимірювань використовуватиметься переважно наступна індексація змінних та параметрів. Нижній індекс – порядковий номер відліку часу; нижній індекс у дужках – номер ітерації при ітераційній формі розрахунку; верхній індекс у дужках – номер координати вектора. Для позначення повного масиву вимірювань використовуватимуться нижній та верхній індекси без дужок; при цьому нижній індекс позначає перший, а верхній – останній вимір масиву даних.

Класифікація методів ідентифікації представлена на рисунку 1.2.

Активні методи ідентифікації характерні тим, що на входи об'єкта, що досліджується, подають заздалегідь задані пробні впливи і досліджують вихідний сигнал, причому ці пробні впливи можуть бути імпульсними, періодичними або випадковими функціями часу [5, 8, 15]. У багатьох випадках порушення нормального функціонування об'єкта штучними пробними впливами є неприпустимим. У цих випадках застосовують пасивні методи ідентифікації, як правило, статистичні (наприклад, кореляційні), в яких використовуються випадкові природні коливання вхідного сигналу.

Для ефективного використання цих методів потрібний великий інтервал спостереження, що потребує застосування комп'ютерів. Відсутність пробного впливу усуває небажаний вплив апаратури ідентифікації на процес управління, але точність ідентифікації зменшується, особливо при малому рівні величини,

що управляє. Тому рекомендується хоча б у цих випадках проводити активний експеримент чи збільшити інтервал спостереження пасивному експерименті. Вхідні сигнали повинні містити всі характерні частоти об'єкта. Питання, що є більш прийнятним, непросте і залежить від властивостей конкретного об'єкта, необхідної точності ідентифікації та виду пробного сигналу.

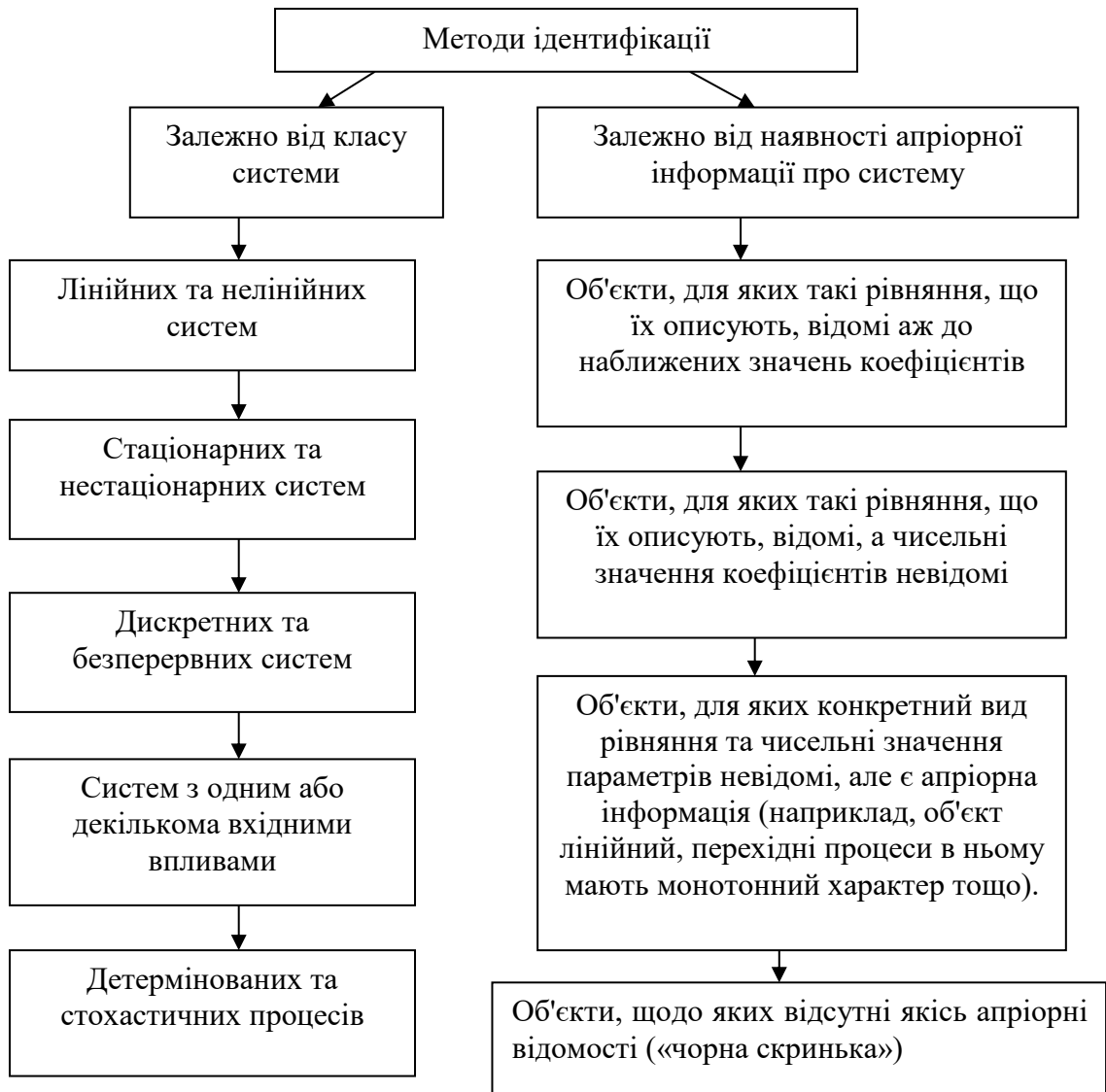


Рисунок 1.2 – Класифікація методів ідентифікації

Крім запропонованої класифікації, методи ідентифікації можуть відрізнятися і за такими ознаками: за способом представлення характеристик об'єкта (у часовій чи частотній області); за прийнятим критерієм подібності об'єкта та моделі; методів відновлення невідомих параметрів моделі

(неітераційні або ітераційні). Отриманий математичний опис має відображати закономірності, що діють у реальному об'єкті, з точністю, що визначається вимогами розв'язуваного завдання управління. Від цього залежить якість керування [7, 15].

1.3 Ідентифікація лінійних детермінованих об'єктів

Ідентифікація лінійних об'єктів є важливим завданням у різних галузях науки та техніки, включаючи управління, моделювання, автоматизацію та обробку сигналів. Під лінійними об'єктами зазвичай розуміються системи, що описуються лінійними диференціальними або різницевиими рівняннями, а також мають властивості суперпозиції і масштабованості. Такі системи широко застосовуються для моделювання динаміки процесів, тому що вони дозволяють відносно просто аналізувати та передбачати поведінку системи.

Ідентифікація лінійного об'єкта передбачає визначення математичної моделі, яка з певною точністю описує його поведінку. Це завдання включає три ключові етапи [7]:

- збір експериментальних даних. Цей етап включає проведення вимірювань вхідних і вихідних сигналів об'єкта в умовах реального часу. Для якісної ідентифікації важливо забезпечити репрезентативність даних, що включає різноманітність режимів роботи об'єкта та врахування впливу різних факторів. Вхідні сигнали можуть бути імпульсними, випадковими, синусоїдальними тощо, залежно від властивостей системи та цілей ідентифікації;

- вибір структури моделі. Лінійні моделі можуть бути представлені в різних формах, таких як передавальні функції, моделі простору станів, різницеві рівняння тощо. Однією з поширених форм для опису лінійних об'єктів є модель авторегресії із зовнішнім впливом (ARX) або авторегресії з рухомим середнім (ARMA). Вибір структури моделі визначає складність та точність опису об'єкта, а також вимоги до обчислювальних ресурсів;

- оцінка параметрів моделі. Після вибору структури моделі виконується

оцінка параметрів, які найкраще відповідають даним даних. Для вирішення цього завдання застосовуються різні методи оптимізації, такі як метод найменших квадратів, метод градієнтного спуску, методи оцінювання Байєсівського та інші. Мета полягає в мінімізації відхилень між передбаченими моделлю значеннями вихідного сигналу та експериментальними даними.

До теперішнього часу відома велика різноманітність об'єктів, завдань та методів ідентифікації, значення якої у різних галузях науки і техніки постійно зростає. Завдання ідентифікації залежить від апріорної інформації про об'єкт ідентифікації, крім того, існуючі підходи та методи ідентифікації визначаються формою математичних моделей (детерміновані, стохастичні, частотні, часові, спектральні тощо). У кваліфікаційній роботі розглядається завдання визначення параметрів системи (об'єкта ідентифікації), заданої лінійною математичною моделлю, що включає випадкові функції часу. Для оптимізації стохастичної системи, схильної до випадкових впливів, детерміновані методи можуть застосовуватися лише обмежено для наближеної оптимізації системи при обліку усереднених випадкових впливів і при фіксованій структурі системи.

Об'єкт управління можна розглядати як систему, у якій необхідно управляти енергетичними або інформаційними потоками, просторовими координатами, кількістю і якістю матеріальних потоків тощо. У будь-якому об'єкті існує певна функціональна залежність вихідних величин об'єкта від керуючих та обурювальних впливів:

$$Y = F(x_1 \dots x_n), \quad (1.4)$$

де F – оператор управління.

Найбільш складним завданням є визначення оператора управління, оскільки це безпосередньо зв'язане з отриманням необхідної початкової інформації про об'єкт, тобто для цього необхідні кількісні характеристики та якісні показники об'єкта. Для отримання таких характеристик об'єкта проводиться їхній математичний опис (ідентифікація).

Передбачається, що зв'язок між вхідними і вихідними змінними об'єкта може бути описана лінійним рівнянням, при цьому вихідна змінна змінюється тільки під впливом вхідних сигналів, що спостерігаються, а які-небудь неспостережені перешкоди, що викликають додаткове переміщення вихідної змінної, відсутні або їх впливом можна знехтувати.

Отже, у схемі на рисунку 1.1 передбачається, що $\xi = \omega = 0$, тобто вихідна змінна у спостерігається без перешкод. Розглянемо загальне рівняння зв'язку між сигналами. Рівняння зв'язку між вхідними та вихідними змінними можна записати у різній формі. Найбільш універсальною формою такого запису є диференціальне рівняння об'єкта.

Диференціальні рівняння перетворюються на форму різницевих рівнянь, якщо відлік часу відбувається в дискретні рівновідстояючі моменти. При такому відліку часу безперервні функції, що описують поведінку сигналів, перетворюються на гратчасті.

Для безперервного часу лінійне диференціальне рівняння об'єкта записується як:

$$A(p)y = B(p)x. \quad (1.5)$$

Опертори $A(p)$ і $B(p)$ мають вигляд:

$$\begin{aligned} A(p) &= a_m p^m + a_{m-1} p^{m-1} + \dots + a_1 p + 1; \\ B(p) &= b_l p^l + a_{l-1} p^{l-1} + \dots + b_1 p + b_0, \end{aligned} \quad (1.6)$$

де $p^r \triangleq \frac{d^r}{dt^r}$;

m – порядок рівняння.

Поширені також інші форми запису зв'язку між змінними на вході та виході:

$$y(t) = \int_{-\infty}^t x(\tau)w(t-\tau)d\tau = \int_0^t w(\tau)x(t-\tau)d\tau, \quad (1.7)$$

де $y(t)$, $x(t)$ – вхідний та вихідний сигнали;

$w(\tau)$ – імпульсна перехідна функція,

Вираз (1.7) ще називається інтегралом Дюамеля.

Диференціальне рівняння та передатна функція є найбільш загальною формою рівняння зв'язку між змінними станами на вході та виході лінійної системи. Експериментатор спостерігає лише вхідні та вихідні змінні, за якими має отримати рівняння зв'язку. Таке рівняння не обов'язково має бути записано однією з форм, наведених раніше. За допомогою експерименту можна отримати лише графік чи таблицю чисел, що визначають значення сигналів на вході та виході, тобто. отримати реалізацію деякого приватного рішення за певного вхідного сигналу. Надалі, апроксимувавши аналітичним виразом отримані реалізації, можна побудувати диференціальне рівняння заданої структури і записати його в одній з форм, наведених вище.

Під час експерименту можна використовувати різні види вхідних сигналів. Застосовуючи деякі їх види, можна не тільки суттєво полегшити завдання апроксимації, але і, що особливо важливо, підвищити якість (точність) дослідження з погляду деякого заданого критерію ідентифікації. Вибір характеру вхідного сигналу з погляду оптимізації якості ідентифікації досліджується в методичних посібниках з оптимізації методів планування експериментів. Перші методи ідентифікації завдання управління були засновані на використанні ступінчастих, імпульсних і гармонійних вхідних сигналів.

Основні види вхідних сигналів, що використовуються для ідентифікації, наведені в лівій колонці рисунку 1.3.

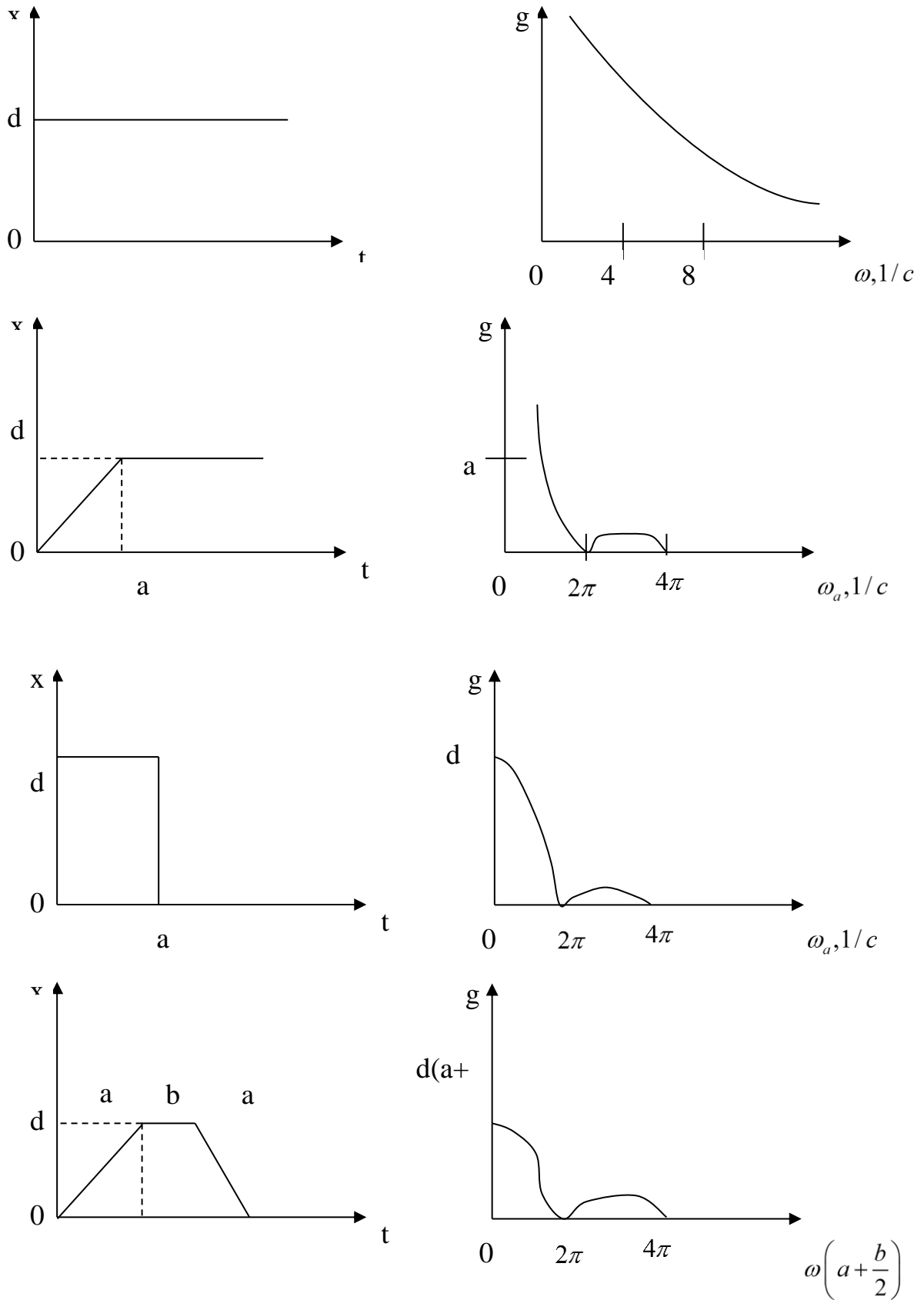


Рисунок 1.3 – Види вхідних неперіодичних сигналів та їх амплітудні спектри

Найбільшого поширення набули перехідні характеристики при ступінчастому впливі на вході (рис. 1.3). Реакцію об'єкта на ступінчасту дію

часто називають кривою розгону. Якщо відома амплітуда ступеня на вході d і експериментально отримані ординати кривої розгону $y(n)$, можна записати, використовуючи вираз дискретного зображення Лапласу вхідного і вихідного впливів.

Дискретна передатна функція та відповідне дискретне рівняння при цьому можуть бути знайдені. Для безперервного часу отримана крива розгону повинна бути апроксимована аналітичним виразом.

Зазвичай для лінійних систем така апроксимація виконується за допомогою виразу:

$$y(t) = \sum_{k=1}^m a_k e^{-b_k t}, \quad (1.8)$$

де b – комплексне число.

Огляд методів апроксимації експериментальних кривих аналітичними виразами наведено в [16], за аналітичними виразами входу та виходу можуть бути знайдені зображення цих виразів за Лапласом, передавальні функції та диференціальні рівняння. Розглянемо основні недоліки методів ідентифікації за допомогою перехідних функцій. Відомо, що неперіодична функція $x(t)$, що задовольняє умовам Діріхле, може бути представлена у вигляді інтегралу Фур'є. При цьому амплітуда густини спектру $g(\omega)$ інтеграла Фур'є пропорційна енергії сигналу $x(t)$ на даній частоті ω . Вираз для амплітуди густини спектру записується у вигляді:

$$g(\omega) = \left| \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \right|. \quad (1.9)$$

На рисунку 1.3 у правій колонці наведено залежності $g(\omega)$ для різних видів вхідних впливів. З рисунка видно, що наведені види вхідних впливів несуть дуже мало енергії на високих частотах. З іншого боку, промислові об'єкти зазвичай є

фільтрами нижніх частот, тобто. значно зменшують амплітуди на високих частотах. Тому точність визначення параметрів об'єктів. в області високих частот за допомогою перехідних функцій дуже низька.

Як ідентифікацію з допомогою перехідних функцій дуже несприятливо позначаються також випадкові перешкоди, що спотворюють реакцію об'єкта, і неточність апроксимації об'єкта лінійною моделлю.

Частково ці недоліки усуваються при ідентифікації об'єкта частотними методами. Динамічні властивості об'єкта можна описати за допомогою частотних характеристик.

Частотна характеристика об'єкта являє собою залежність від частоти в режимі двох змінних, що встановився:

- відносини амплітуд гармонійних сигналів на вході і виході об'єкта – амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) $A(\omega)$;
- зсуву фаз між вхідними та вихідним гармонійними сигналами – фазо-частотна характеристика (ФЧХ) $\varphi(\omega)$.

На графіках прийнято зображати зазначені характеристики в наступних формах:

- у вигляді сукупності АЧХ і ФЧХ в декартових координатах залежно від частоти. Ця форма графіка називається діаграмою Боде;
- у полярних координатах, де $A(\omega)$ є радіусом-вектором, $\varphi(\omega)$ – полярним кутом. Частота є параметром. Така крива з відмітками частот має назву амплітудно-фазової характеристики (АФХ), або діаграми Найквіста.

Прийнято використовувати відому форму запису функцій, заданих у полярних координатах, у вигляді комплексних чисел.

Дійсна частина $W(j, \omega)$ записується у вигляді:

$$P(\omega) = A(\omega) \cos \varphi(\omega), \quad (1.10)$$

уявна у вигляді

$$Q(\omega) = A(\omega) \sin \varphi(\omega), \quad (1.11)$$

амплітудно-фазова характеристика у цій формі запису має вигляд

$$W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega). \quad (1.12)$$

Якщо в діаграмах Бode $A(\omega)$ замінені на $\lg A(\omega)$, то характеристики носять назву логарифмічних частотних характеристик. При цьому зазвичай по осі абсцис відкладається відносна частота в логарифмічному масштабі в октавах або декадах.

Експеримент, за допомогою якого досліджуються частотні характеристики, значно більш трудомісткий по апаратурі та часу проведення порівняно з перехідними характеристиками. Для дослідження необхідна апаратура, за допомогою якої можна подати на вхід об'єкта гармонійні сигнали. Вихідний сигнал завжди зашумлений і зазвичай дещо спотворений нелінійностями, що є в об'єкті [10, 15]. Тому для визначення амплітуди і фази вихідного гармонійного сигналу необхідно виділення першої гармонійної складової вручну або за допомогою спеціальної апаратури.

Дослідження на різних, у тому числі низьких частотах, потребує багато часу. Оскільки при дослідженні частотних характеристик розглядається вимушений, а не вільний рух системи, необхідно деякий час для згасання вільного руху. На дослідження частотних характеристик несприятливий вплив надають тренди, що викликають «заповзання» середньої лінії вихідного сигналу.

Для зменшення помилок через «повзання» середньої лінії та зменшення впливу перешкод визначення частотних характеристик проводять у замкнутій системі за схемою, наведеною на рисунку 1.4, де об'єкт з передатною функцією $W(p)$ охоплений зворотним зв'язком з регулятором-стабілізатором, що має передатну функцію $W_p(p)$.

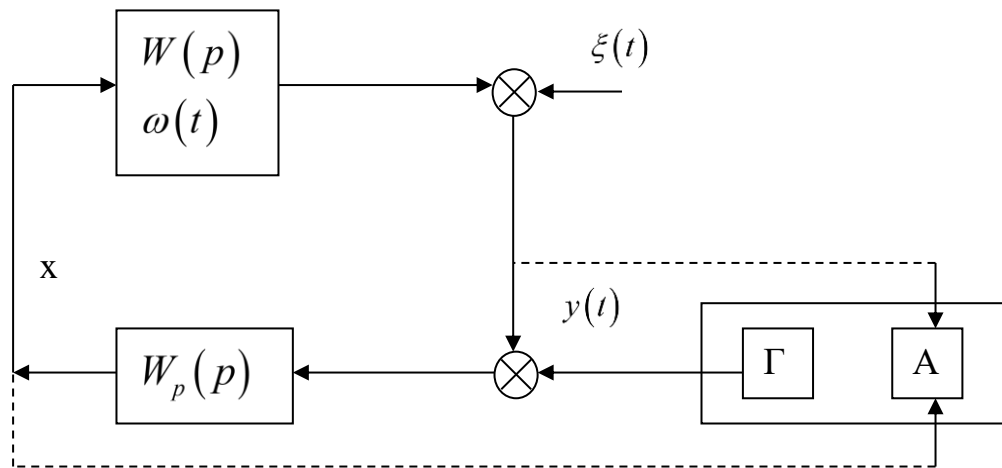


Рисунок 1.4 – Схема визначення частотних характеристик в замкнутій системі

Перешкоди, наведені до виходу об'єкта $\xi(t)$ можуть містити, крім випадкових складових, детерміновані тренди. Але в сигналі $y(t)$ «повзання» буде усунено, а вплив випадкових складових $\xi(t)$ значно ослаблений.

Гармонічний сигнал тепер подаватиметься з генератора Γ не безпосередньо на регулюючий орган, а на задатчик регулятора, що, звичайно, вимагає значно меншої потужності генератора. На аналізатор A , що виділяє перші гармонічні складові, подаються сигнали x і y .

1.4 Висновки по розділу

Отримані експериментально-частотні характеристики, як згадувалося вище, можуть бути безпосередньо використані для розрахунку системи управління. Однак більш універсальним для різних застосувань є аналітичне уявлення. Розроблено методи апроксимації частотних характеристик аналітичними виразами. Огляд цих методів наведено у [16].

2 МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЛІНІЙНОГО ОБ'ЄКТА РОБОТИЗАЦІЇ

Виконання параметричної ідентифікації лінійного об'єкту роботизації істотно залежить від вигляду диференціального рівняння його математичної моделі і може містити досить громіздкі перетворення, причому обсяг таких перетворень збільшується зі збільшенням порядку диференціального рівняння математичної моделі. Отже, дуже корисною для розв'язування інженерних задач автоматизації є модель параметричної ідентифікації, яка б містила формалізований підхід, що дозволяє спрощувати виконання громіздких перетворень у випадку диференціальних рівнянь високого порядку.

2.1 Узагальнена модель параметричної ідентифікації лінійного об'єкта роботизації на основі використання цифрованих вимірювань

Лінійним об'єктом роботизації прийнято називати такий об'єкт автоматизації, математична модель якого визначається за допомогою лінійного звичайного диференціального рівняння та відповідної кількості початкових умов, що дозволяють у загальному вигляді представити зв'язок параметра керування та керованого параметра. В інженерних задачах автоматизації лінійні об'єкти автоматизації зазвичай представляють окремі контури автоматичних систем керування та є наслідком лінеаризації диференціальних рівнянь, що визначають процеси в таких контурах, що дозволяє обмежуватись саме одним параметром керування та керованим параметром. З урахуванням означених обставин, типовому для інженерної автоматизації є математична модель об'єкта роботизації у вигляді лінійного звичайного диференціального рівняння n -го порядку зі сталими коефіцієнтами та відповідною кількістю початкових умов для інтегрування. Та обставина, що мова йдеться про диференціальне рівняння саме n -го порядку свідчить про те, що в цьому рівнянні міститься похідна n -го

порядку керованого параметра. Отже, узагальнена математична модель лінійного об'єкта роботизації має такий вигляд:

$$\frac{d^n x}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = b_m \frac{d^m u}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{du}{dt} + b_0 u, \quad (2.1)$$

$$\frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}}(t_0) = x_0^{(n-1)}, \dots, \frac{dx}{dt}(t_0) = x_0^{(1)}, x(t_0) = x_0^{(0)}, \quad (2.2)$$

де t – час, яким визначається послідовність зміни стану досліджуваного об'єкта роботизації;

x – керований параметр досліджуваного об'єкта роботизації;

u – параметр керування досліджуваного об'єкта роботизації;

a_{n-1}, \dots, a_1, a_0 та b_{n-1}, \dots, b_1, b_0 – параметри диференціального рівняння математичної моделі досліджуваного об'єкта роботизації;

t_0 – заданий початковий момент часу;

$x_0^{(n-1)}, \dots, x_0^{(1)}, x_0^{(0)}$ – задані значення похідних та самого керованого параметра моделі досліджуваного об'єкта роботизації.

В узагальненій математичній моделі (2.1), (2.2) об'єкта роботизації, здійснено масштабування диференціального рівняння (2.1) таким чином, що коефіцієнт при похідній n -го порядку керованого параметра дорівнює одиниці, що за визначенням можливо для диференціального рівняння n -го порядку. Порядок диференціального рівняння (2.1) та кількість m похідних параметру керування, які слід враховувати, зазвичай визначаються із загальних відомостей властивостей процесів, притаманних досліджуваному об'єкту автоматизації. Для попередньо встановлених значень n та m для побудови диференціального рівняння (2.1) зазвичай розглядають задачу параметричної ідентифікації, тобто параметри диференціального рівняння (2.1) визначають за результатами спостережень над параметром керування та керованим параметром при проведенні відповідних випробувань, що можна символічно представити так:

$$u(t), x(t) \xrightarrow{\mathfrak{Z}} a_{n-1}, \dots, a_1, a_0, b_m, \dots, b_1, b_0, \quad (2.3)$$

де \mathfrak{Z} – метод параметричної ідентифікації.

Результати спостережень над параметром керування та керованим параметром в задачах ідентифікації (2.3) є результатами вимірювань, які фіксуються відповідним вимірювальними приладами протягом проведення відповідних випробувань, неможливо у загальному випадку уявляти як неперервні функції часу. Зазвичай результати вимірювань представляють у цифровій формі:

$$t = t_k, \quad x_k = x(t_k), \quad u_k = u(t_k), \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (2.4)$$

де t_k – моменти часу, в які забезпечується вимірювання параметра керування та керованого параметра;

u_k – виміряне значення керованого параметра в момент часу $t = t_k$;

x_k – виміряне значення керованого параметра в момент часу $t = t_k$;

N – обсяг вимірюваних даних.

Моменти часу, в які забезпечується вимірювання параметра керування та керованого параметра, визначаються кроком дискретизації у наступному вигляді:

$$t_1 = t_0, \quad t_2 = t_1 + \Delta t, \dots, t_{k+1} = t_k + \Delta t, \dots, t_N = t_{N-1} + \Delta t, \quad (2.5)$$

де Δt – крок дискретизації при проведенні вимірювань параметра керування та керованого параметра.

З урахуванням результатів вимірювань (2.4) маємо задачу ідентифікації (2.3) в іншому вигляді, де в якості вихідних даних є не неперервні функція часу параметра керування та керованого параметра, а дискретні значення моментів часу та результати вимірювань цих параметрів в ці моменти часу:

$$t = t_k, x_k = x(t_k), u_k = u(t_k), k = 1, 2, \dots, N \xrightarrow{\mathfrak{I}_N} a_{n-1}, \dots, a_1, a_0, b_m, \dots, b_1, b_0, \quad (2.6)$$

де \mathfrak{I}_N – метод параметричної ідентифікації за цифрованими даними про параметр керування та керований параметр досліджуваного об'єкта роботизації.

Зрозуміло, що цифрування (2.5) даних результатів вимірювань параметра керування та керованого параметра створює відповідну похибку представлення означених параметрів, оскільки для належного представлення відповідних неперервних функцій слід забезпечувати відповідний досить малий крок дискретизації Δt . Вибір кроку дискретизації Δt щодо цифрування результатів вимірювань параметра керування та керованого параметра має бути узгоджений із характерним періодом зміни у часі означених параметрів. Таке узгодження може бути забезпечене щодо розв'язування задач параметричної ідентифікації, оскільки при плануванні випробувань здійснюється вибір параметра керування, отже його залежність від часу та її характерний період є відомими заздалегідь. З іншого боку, фундаментальною властивістю лінійних систем, які визначаються лінійним звичайними диференціальним рівнянням зі сталими коефіцієнтами вигляду (2.1), є те, що характерний період залежності від часу керованого параметра дорівнює характерному періоду залежності від часу параметра керування. Отже, для заданого параметра керування відповідно величині характерного періоду його залежності від часу завдяки означеній фундаментальній властивості лінійної системи завжди можемо підібрати такий крок дискретизації, щоб цифровані данні (2.4) належним чином представляли результати вимірювань параметра керування та керованого параметра. Слід зазначити, що сучасні технічні засоби автоматизації вимірювань забезпечують досить мале значення кроку дискретизації Δt . З іншого боку, при проведенні випробувань щодо параметричної ідентифікації об'єктів автоматизації не обов'язково слід використовувати параметри керування із малим характерним періодом залежності від часу, а можна використовувати параметри керування із великими характерним періодом залежності від часу так що характеристики

сучасних засобів автоматизації вимірювань забезпечуватимуть дуже високу точність відтворення залежності від часу параметра керування та керованого параметра.

Слід зазначити, що методи параметричної ідентифікації, зрозуміло, залежать від того, у якому вигляді представлені відомості про параметр керування та керований параметр, тобто методи \mathfrak{I} розв'язування задачі параметричної ідентифікації (2.3) у випадку неперервних функцій часу параметра керування та керованого параметра та метод \mathfrak{I}_N розв'язування задачі параметричної ідентифікації (2.6) у випадку цифрованих функцій часу параметра керування та керованого параметра насправді є різними. При цьому, метод \mathfrak{I}_N може розглядатися як метод наближеного розв'язування задачі параметричної ідентифікації (2.3), який при $N \rightarrow \infty$ наближається до методу \mathfrak{I} . При формулюванні задачі параметричної ідентифікації у вигляді (2.6) маємо $n + m - 1$ невідомих та обсяг $3N$ даних (2.4), тобто кількість невідомих задачі у загальному випадку відрізняється від обсягів наявних вихідних даних. За цих умов в якості метода \mathfrak{I}_N доцільно використовувати метод найменших квадратів, який є досить універсальним.

2.2 Дискретизація диференціального рівняння математичної моделі лінійного об'єкта роботизації

Вигляд диференціального рівняння (2.1) математичної моделі досліджуваного лінійного об'єкта роботизації не узгоджений із цифровими даними (2.4), що представляють результати спостережень над параметром керування та керованим параметром, оскільки в диференціальному рівнянні містяться неперервні функції часу параметра керування та керованого параметра. З урахуванням цієї обставини слід диференціальне рівняння (2.1) математичної моделі об'єкта роботизації привести до форми, яка б була узгодженою із цифровими даними (2.4) вимірюваних параметра керування та

керуваного параметра. Для цього диференціальне рівняння (2.1) слід розглядати в дискретні моменти часу (2.4):

$$\frac{d^n x_k}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x_k}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dx_k}{dt} + a_0 x_k = b_m \frac{d^m u_k}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{du_k}{dt} + b_0 u_k, \quad (2.7)$$

де $k = 1, 2, \dots, N$;

$\frac{d^p x_k}{dt^p}$ – похідна p -го порядку функції часу керуваного параметра в момент часу

$t = t_k$;

$\frac{d^p u_k}{dt^p}$ – похідна p -го порядку функції часу параметра керування в момент часу

$t = t_k$.

Основна складність використання записаного у дискретному вигляді (2.7) диференціального рівняння (2.1) полягає в тому, що відомим є лише значення параметра керування та керуваного параметра у відповідні моменти часу, але похідні цих параметрів невідомі і мають бути визначеними через цифровані значення (2.4) моментів часу, параметра керування та керуваного параметра. При цьому слід використовувати такий спосіб визначення похідних, щоб метод найменших квадратів приводив до неоднорідної системи лінійних алгебраїчних рівнянь. Для цього визначатимемо похідні, що містяться у диференціальному рівнянні дискретного вигляду (2.7) за допомогою наближених формул такого вигляду:

$$\frac{d^p x_k}{dt^p} \approx \sum_{j=0}^p A_j^{(p)} x_{k+j}, \quad p = 1, 2, \dots, n, \quad (2.8)$$

$$\frac{d^p u_k}{dt^p} \approx \sum_{j=0}^p A_j^{(p)} u_{k+j}, \quad p = 1, 2, \dots, m, \quad (2.9)$$

де $A_j^{(p)}$ – числові коефіцієнти, які мають бути належним чином визначеними, щоб забезпечувати потрібну точність виконання наближеної рівності вигляду (2.8) та (2.9).

Визначення числових коефіцієнтів формул (2.8) та (2.9) наближеного диференціювання здійснюється з використанням рядів Тейлора та може бути реалізовано для похідних будь-якого порядку. Зрозуміло, що збільшення порядку похідної веде до відповідного ускладнення формул (2.8). (2.9) через збільшення доданків. Далі вважаємо, що числові коефіцієнти формул (2.8) та (2.9) визначені та підставимо наближені формули (2.8) та (2.9) до диференціального рівняння, записаного у дискретній формі (2.7). При цьому враховуємо, що формули (2.8) та (2.9) для випадку $n \geq m$ можуть бути використаними в диференціальних рівняннях, записаних у дискретній формі (2.7), лише для моментів часу із номерами $k \leq N - n$, та матимемо такий результат:

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^n A_j^{(n)} x_{k+j} + a_{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} A_j^{(n-1)} x_{k+j} + \dots + a_1 \sum_{j=0}^1 A_j^{(1)} x_{k+j} + a_0 x_k &\approx \\ &\approx b_m \sum_{j=0}^m A_j^{(m)} u_{k+j} + \dots + b_1 \sum_{j=0}^1 A_j^{(1)} u_{k+j} + b_0 u_k, \end{aligned} \quad (2.10)$$

де $k = 1, 2, \dots, N - n$.

Виконаємо тотожні перетворення отриманих у вигляді (2.10) наближених співвідношень таким чином, щоб упорядкувати подібні доданки при наявних значеннях параметра керування та керованого параметра у відповідні моменти часу:

$$\begin{aligned} x_{k+n} A_n^{(n)} + x_{k+n-1} \left(A_{n-1}^{(n)} + a_{n-1} A_{n-1}^{(n-1)} \right) + \dots + x_k \left(A_0^{(n)} + a_{n-1} A_0^{(n-1)} + \dots + a_1 A_0^{(1)} + a_0 \right) &\approx \\ &\approx u_{k+m} b_m A_m^{(m)} + \dots + u_k \left(A_0^{(m)} + b_{m-1} A_0^{(m-1)} + \dots + b_1 A_0^{(1)} + b_0 \right), \end{aligned} \quad (2.11)$$

де $k = 1, 2, \dots, N - n$.

З урахуванням вигляду отриманих наближених рівностей (2.11) для скорочення подальших записів введемо такі нові позначення:

$$\begin{aligned} -\alpha_1 &= A_{n-1}^{(n)} + a_{n-1}A_{n-1}^{(n-1)}, \dots, -\alpha_n = A_0^{(n)} + a_{n-1}A_0^{(n-1)} + \dots + a_1A_0^{(1)} + a_0, \\ \alpha_{n+1} &= b_m A_m^{(m)}, \dots, \alpha_{n+m+1} = b_m A_0^{(m)} + b_{m-1}A_0^{(m-1)} + \dots + b_1A_0^{(1)} + b_0, \end{aligned} \quad (2.12)$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{n+m+1}$ – проміжні невідомі;

$$k = 1, 2, \dots, N - n.$$

Завдяки введенню проміжних невідомих (2.12) наближені співвідношення (2.11) помітно скоротяться та набудуть такого вигляду:

$$x_{k+n-1}\alpha_1 + \dots + x_k\alpha_n + u_{k+m}\alpha_{n+1} + \dots + u_k\alpha_{n+m+1} - x_{k+n}A_n^{(n)} \approx 0, \quad (2.13)$$

де $k = 1, 2, \dots, N - n$.

Співвідношення (2.13) використовуємо далі для визначення проміжних невідомих, що введені у вигляді (2.12), за допомогою методу найменших квадратів, який істотно пов'язаний із статистикою та приводить до статистично обґрунтованих результатів, тобто до результатів, які мають найбільш високу ймовірність. Відповідно до методу найменших квадратів розглядаємо наближені співвідношення вигляду (2.13) як похибки виконання деяких відповідних їм точних співвідношень та визначаємо суму квадратів таких похибок в усі моменти часу:

$$S = \sum_{k=1}^{N-n} \left(x_{k+n-1}\alpha_1 + \dots + x_k\alpha_n + u_{k+m}\alpha_{n+1} + \dots + u_k\alpha_{n+m+1} - x_{k+n}A_n^{(n)} \right)^2. \quad (2.14)$$

Для відомих цифрованих результатів вимірювань (2.4) сума квадратів похибок (2.14) може розглядатись як функція багатьох змінних, а саме –

проміжних невідомих, які були введені у вигляді (2.12), і це можна представити у такій символічній формі:

$$S = S(\alpha_1, \dots, \alpha_n, \alpha_{n+1}, \dots, \alpha_{n+m+1}). \quad (2.15)$$

Ідея методу найменших квадратів щодо визначення проміжних невідомих, які були введені у вигляді (2.12), полягає в тому щоб за рахунок значень цих проміжних невідомих мінімізувати суму квадратів похибок (2.14). Оскільки сума квадратів похибок (2.14) можна уявляти як функцію багатьох змінних (2.15), то визначення проміжних невідомих, які були введені у вигляді (2.12), можна звести до мінімізації цієї функції. Як відомо із математичного аналізу, умови мінімуму функції багатьох змінних (2.15) мають такий вигляд:

$$\frac{\partial S}{\partial \alpha_1} = 0, \dots, \frac{\partial S}{\partial \alpha_n} = 0, \frac{\partial S}{\partial \alpha_{n+1}} = 0, \dots, \frac{\partial S}{\partial \alpha_{n+m+1}} = 0. \quad (2.16)$$

Умови (2.16) приводять до системи $n + m + 1$ лінійних алгебраїчних рівнянь, які дозволяють визначити проміжні невідомі, що були введені у вигляді (2.12). Отже, метод найменших квадратів приводить до кількості рівнянь, яка дорівнює кількості невідомих незалежно від обсягу наявних вихідних даних цифрованих часу, параметра керування та керованого параметра. Зрозуміло, що збільшення обсягу наявних вихідних даних цифрованих часу, параметра керування та керованого параметра приводить до збільшенні точності визначення проміжних невідомих, що були введені у вигляді (2.12). Зрозуміло, що розв'язування систем лінійних алгебраїчних рівнянь є типовою математичною задачею та не містить принципових труднощів, хоча, зрозуміло, що у випадку великої кількості невідомих розв'язування такої задачі не є простою. Для розв'язування систем лінійних алгебраїчних рівнянь створено велику кількість різноманітного програмного забезпечення наукового

призначення, яке дозволяє виконувати розв'язування систем із досить великою кількістю невідомих.

2.3 Лінійний об'єкт роботизації другого порядку

При розв'язуванні інженерних задач автоматизації у багатьох випадках доводиться розглядати лінійний об'єкт роботизації, який визначається диференціальним рівнянням другого порядку та є окремим випадком математичної моделі (2.1), (2.2) загального вигляду, в якому

$$n = 2, m = 0. \quad (2.19)$$

З урахуванням значень (2.19) математична модель (2.1), (2.2) запишеться у вигляді:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + a_1 \frac{dx}{dt} + a_0 x = b_0 u, \quad (2.20)$$

$$\frac{dx}{dt}(t_0) = x_0^{(1)}, \quad x(t_0) = x_0^{(0)}. \quad (2.21)$$

Математична модель (2.20), (2.21) представляє механічну частину промислового робота-маніпулятора (рис. 2.1), для окремого випадку руху за однією із узагальнених координат, що позначені на його кінематичній схемі (рис. 2.2) як q_1, q_2, q_3, q_4 , при заданих значеннях інших узагальнених координат. Рівняння має саме другий порядок, оскільки узагальнені координати (рис. 2.2) визначають або переміщення або кут повороту, отже прискорення, що водить до другого закону Ньютона визначається другими похідними узагальнених координат.

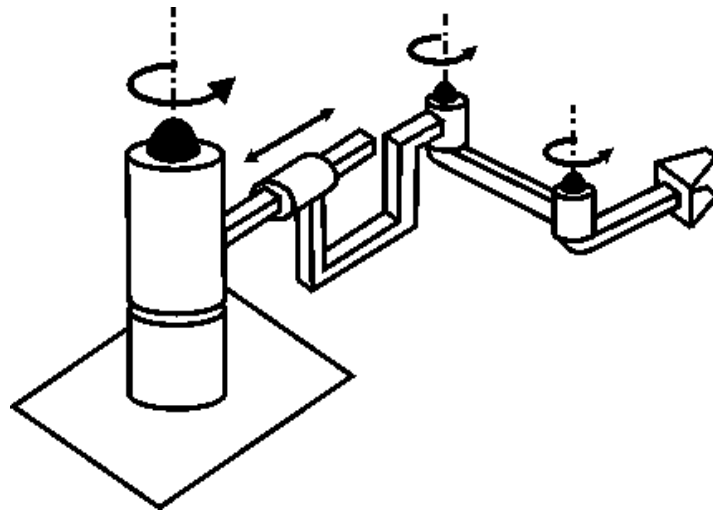


Рисунок 2.1 – Конструктивна схема маніпулятора

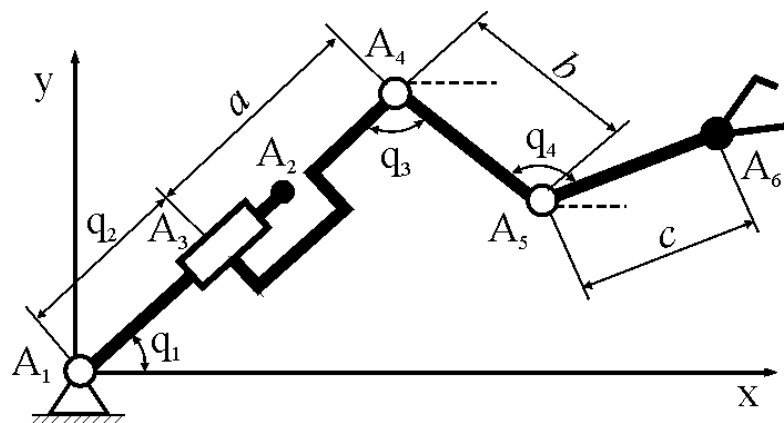


Рисунок 2.2 – Кінематична схема маніпулятора

Для математичної моделі (2.20), (2.21) задача параметричної ідентифікації (2.6) прийме більш простіший вигляд завдяки меншій кількості невідомих – параметрів математичної моделі, отже матимемо таку більш просту задачу ідентифікації:

$$t = t_k, x_k = x(t_k), u_k = u(t_k), k = 1, 2, \dots, N \xrightarrow{S_N} a_1, a_0, b_0. \quad (2.22)$$

Для розв'язування задачі параметричної ідентифікації (2.22) будемо використовувати диференціальне рівняння (2.20), що представлено в дискретній

формі, яка узгоджена із цифрованими даними результатів вимірювань (2.4). Така дискретна форма має вигляд (2.7), в якому слід врахувати значення (2.19), що приведе до такого результату:

$$\frac{d^2 x_k}{dt^2} + a_1 \frac{dx_k}{dt} + a_0 x_k = b_0 u_k, \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (2.23)$$

Формули (2.8) для обчислення похідних, що містяться в рівнянні (2.23), мають такий вигляд:

$$\frac{dx_k}{dt} \approx A_0^{(1)} x_k + A_1^{(1)} x_{k+1}, \quad \frac{d^2 x_k}{dt^2} \approx A_0^{(2)} x_k + A_1^{(2)} x_{k+1} + A_2^{(2)} x_{k+2}, \quad (2.24)$$

де $A_0^{(1)}$ та $A_1^{(1)}$ – числові параметри наближеної формули обчислення першої похідної;

$A_0^{(2)}$, $A_1^{(2)}$ та $A_2^{(2)}$ – числові параметри наближеної формули обчислення другої похідної.

Для визначення параметрів формул (2.24) наближеного диференціювання використовуємо ряд Тейлора, який з урахуванням вигляду формул (2.24) представимо у такому вигляді:

$$x_{k+j} = x_k + j \frac{dx_k}{dt} \Delta t + \frac{j^2}{2} \frac{d^2 x_k}{dt^2} \Delta t^2 + \dots, \quad (2.25)$$

де ... – позначені доданки більш високого ступеня Δt .

Спочатку розглянемо наближену формулу (2.24) першої похідної. Для цього підставимо в першу формулу (2.24) записаний у вигляді (2.25) ряд Тейлора, відповідний випадку $j = 1$ та матимемо таке:

$$\frac{dx_k}{dt} \approx A_0^{(1)} x_k + A_1^{(1)} \left(x_k + \frac{dx_k}{dt} \Delta t + \frac{1}{2} \frac{d^2 x_k}{dt^2} \Delta t^2 + \dots \right). \quad (2.26)$$

Приведемо подібні доданки у співвідношенні (2.26) із множником у вигляді керованого параметра та його похідної:

$$\frac{dx_k}{dt} \approx \left(A_0^{(1)} + A_1^{(1)} \right) x_k + A_1^{(1)} \frac{dx_k}{dt} \Delta t + \frac{A_1^{(1)}}{2} \frac{d^2 x_k}{dt^2} \Delta t^2 + \dots \quad (2.27)$$

Щоб забезпечити наближену рівність (2.27), слід вимагати виконання таких двох умов:

$$A_0^{(1)} + A_1^{(1)} = 0, \quad A_1^{(1)} \Delta t = 1. \quad (2.28)$$

У вигляді умов (2.28) маємо систему двох лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення числових параметрів $A_0^{(1)}$ та $A_1^{(1)}$ наближеної формули (2.24) щодо обчислення першої похідної. Розв'язування цієї системи рівнянь призводить до такого результату:

$$A_1^{(1)} = \frac{1}{\Delta t}, \quad A_0^{(1)} = -\frac{1}{\Delta t}. \quad (2.29)$$

З урахуванням отриманих у вигляді (2.29) значень числових коефіцієнтів наближена формула (2.24) для обчислення першої похідної керованого параметра набуде такого вигляду:

$$\frac{dx_k}{dt} \approx -\frac{1}{\Delta t} x_k + \frac{1}{\Delta t} x_{k+1}, \quad k = 1, 2, \dots, N-1. \quad (2.30)$$

Отже, завдяки наближеній формулі (2.30) можемо визначити першу похідну керованого параметра за даними цифрованих результатів вимірювань (2.4).

Далі розглянемо наближену формулу (2.24) другої похідної. Для цього підставимо в другу формулу (2.24) записаний у вигляді (2.25) ряд Тейлора, відповідний випадкам $j = 1$ та $j = 2$ і в результаті матимемо таке:

$$\begin{aligned} \frac{dx_k}{dt} \approx & A_0^{(2)} x_k + A_1^{(2)} \left(x_k + \frac{dx_k}{dt} \Delta t + \frac{1}{2} \frac{d^2 x_k}{dt^2} \Delta t^2 + \dots \right) + \\ & + A_2^{(2)} \left(x_k + 2 \frac{dx_k}{dt} \Delta t + \frac{2^2}{2} \frac{d^2 x_k}{dt^2} \Delta t^2 + \dots \right). \end{aligned} \quad (2.31)$$

Приведемо подібні доданки у співвідношенні (2.31) із множником у вигляді керованого параметра та його першої і другої похідних:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x_k}{dt^2} \approx & \left(A_0^{(2)} + A_1^{(2)} + A_2^{(2)} \right) x_k + \left(A_1^{(2)} + 2A_2^{(2)} \right) \frac{dx_k}{dt} \Delta t + \\ & + \frac{1}{2} \left(A_1^{(2)} + 4A_2^{(2)} \right) \frac{d^2 x_k}{dt^2} \Delta t^2 + \dots \end{aligned} \quad (2.32)$$

Щоб забезпечити наближену рівність (2.32), слід вимагати виконання таких трьох умов:

$$A_0^{(2)} + A_1^{(2)} + A_2^{(2)} = 0, \quad A_1^{(2)} + 2A_2^{(2)} = 0, \quad \frac{1}{2} \left(A_1^{(2)} + 4A_2^{(2)} \right) \Delta t^2 = 1. \quad (2.33)$$

У вигляді умов (2.33) маємо систему двох лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення числових параметрів $A_0^{(2)}$, $A_1^{(2)}$ та $A_2^{(2)}$ наближеної формули (2.24) щодо обчислення першої похідної. Для розв'язування цієї системи рівнянь спочатку розглянемо два останні рівняння:

$$A_1^{(2)} + 2A_2^{(2)} = 0, \quad A_1^{(2)} + 4A_2^{(2)} = \frac{2}{\Delta t^2}. \quad (2.34)$$

Віднімання першого із другого рівняння (2.24) приводить до такого результату щодо числового коефіцієнта $A_2^{(2)}$:

$$2A_2^{(2)} = \frac{2}{\Delta t^2} \Rightarrow A_2^{(2)} = \frac{1}{\Delta t^2}. \quad (2.35)$$

Перше рівняння (2.34) з урахуванням результату (2.35) дозволяє отримати таке значення:

$$A_1^{(2)} = -2A_2^{(2)} \Rightarrow A_1^{(2)} = -\frac{2}{\Delta t^2}. \quad (2.36)$$

Нарешті, перше рівняння (2.33) та отримані результати (2.35) і (2.36) приведуть до такого результату:

$$A_0^{(2)} = -A_1^{(2)} - A_2^{(2)} \Rightarrow A_0^{(2)} = \frac{1}{\Delta t^2}. \quad (2.37)$$

Таким чином, одержані результати (2.35), (2.36) та (2.37) щодо значень числових коефіцієнтів наближена формула (2.24) для обчислення другої похідної керованого параметра набуде такого вигляду:

$$\frac{d^2 x_k}{dt^2} \approx \frac{1}{\Delta t^2} x_k - \frac{2}{\Delta t^2} x_{k+1} + \frac{1}{\Delta t^2} x_{k+2}, \quad k = 1, 2, \dots, N-2. \quad (2.38)$$

Отже, завдяки наближеній формулі (2.38) можемо визначити другу похідну керованого параметра за даними цифрованих результатів вимірювань (2.4).

Визначені числові коефіцієнти (2.29), (2.35), (2.36) та (2.37) наближених формул (2.24) для обчислення першої та другої похідної керованого параметра дозволяють використовувати ці наближені формули у співвідношеннях (2.23). В результаті матимемо таке:

$$A_0^{(2)}x_k + A_1^{(2)}x_{k+1} + A_2^{(2)}x_{k+2} + a_1(A_0^{(1)}x_k + A_1^{(1)}x_{k+1}) + a_0x_k = b_0u_k, \quad (2.39)$$

де $k = 1, 2, \dots, N - 2$.

Одержаний результат свідчить, що через використання формул наближеного диференціювання (2.24) не маємо можливості розглядати співвідношення (2.23) в усі моменти часу $k = 1, 2, \dots, N$, а маємо таку можливість лише для моментів часу $k = 1, 2, \dots, N - 2$, що не створює труднощів, але має бути врахованим при використанні методу найменших квадратів у подальшому. Відповідно загальному підходу приведемо подібні доданки у співвідношенні (2.39), які мають множниками значення керованого параметра та параметра керування:

$$A_2^{(2)}x_{k+2} + (A_1^{(2)} + a_1A_1^{(1)})x_{k+1} + (A_0^{(2)} + a_1A_0^{(1)} + a_0)x_k = b_0u_k, \quad (2.40)$$

де $k = 1, 2, \dots, N - 2$.

Отриманий у вигляді (2.40) результат є окремим випадком отриманого вище загального результату (2.11) та відповідає окремому випадку (2.19) диференціального рівняння другого порядку (2.20) математичної моделі об'єкта роботизації. Далі для спрощення подальших викладок з урахуванням вигляду

триманих співвідношень (2.40) слід ввести нові проміжні невідомі у такому вигляді:

$$-\alpha_1 = A_1^{(2)} + a_1 A_1^{(1)}, \quad -\alpha_2 = A_0^{(2)} + a_1 A_0^{(1)} + a_0, \quad \alpha_3 = b_0, \quad (2.41)$$

де α_1 , α_2 , α_3 – нові проміжні невідомі щодо розв'язування задачі параметричної ідентифікації.

Співвідношення (2.41) є окремим випадком отриманих вище співвідношень загального вигляду (2.14) та відповідає окремому випадку (2.19) диференціального рівняння другого порядку (2.20) математичної моделі об'єкта роботизації. Далі для спрощення подальших викладок з урахуванням введених у вигляді (2.41) нових проміжних невідомих представимо співвідношення (2.40) у такому вигляді:

$$\alpha_1 x_{k+1} + \alpha_2 x_k + \alpha_3 u_k - A_2^{(2)} x_{k+2} = 0, \quad k = 1, 2, \dots, N-2. \quad (2.42)$$

Співвідношення (2.42) є окремим випадком отриманих вище співвідношень загального вигляду (2.13), якими вводяться нові проміжні невідомі, та відповідає окремому випадку (2.19) диференціального рівняння другого порядку (2.20) математичної моделі об'єкта автоматизації. Далі відповідно методу найменших квадратів розглядаємо суму квадратів похибок виконання співвідношень (2.42), яку визначаємо таким чином:

$$S = \sum_{k=1}^{N-2} \left(\alpha_1 x_{k+1} + \alpha_2 x_k + \alpha_3 u_k - A_2^{(2)} x_{k+2} \right)^2. \quad (2.43)$$

Співвідношення (2.43) є окремим випадком введеної вище суми квадратів похибок вигляду (2.14) та відповідає насправді окремому випадку (2.19) диференціального рівняння другого порядку (2.20) математичної моделі об'єкта роботизації. Для відомих цифрованих результатів вимірювань (2.4) сума

квадратів похибок (2.43) може розглядатись як функція трьох змінних, а саме – проміжних невідомих, які були введені у вигляді (2.41), і це можна представити у такій символічній формі:

$$S = S(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3). \quad (2.44)$$

Зрозуміло, що співвідношення (2.14) є окремим випадком співвідношення (2.15) та відповідає насправді окремому випадку (2.19) диференціального рівняння другого порядку (2.20) математичної моделі об'єкта роботизації. Ідея методу найменших квадратів щодо визначення проміжних невідомих, які були введені у вигляді (2.41), полягає в тому щоб за рахунок значень цих проміжних невідомих мінімізувати суму квадратів похибок (2.44). Оскільки суму квадратів похибок (2.43) можна уявляти як функцію трьох змінних (2.44), то визначення проміжних невідомих, які були введені у вигляді (2.41), можна звести до мінімізації цієї функції. Як відомо із математичного аналізу, умови мінімуму функції трьох змінних (2.44) мають такий вигляд:

$$\frac{\partial S}{\partial \alpha_1} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial \alpha_2} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial \alpha_3} = 0. \quad (2.45)$$

Умови (2.46) приводять до системи трьох лінійних алгебраїчних рівнянь, які дозволяють визначити проміжні невідомі, що були введені у вигляді (2.41). Щоб отримати цю систему лінійних алгебраїчних рівнянь, визначимо спочатку похідні (2.45) суми квадратів похибок (2.43):

$$\begin{aligned}
\frac{\partial S}{\partial \alpha_1} &= 2 \sum_{k=1}^{N-2} \left(\alpha_1 x_{k+1} + \alpha_2 x_k + \alpha_3 u_k - A_2^{(2)} x_{k+2} \right) x_{k+1}, \\
\frac{\partial S}{\partial \alpha_2} &= 2 \sum_{k=1}^{N-2} \left(\alpha_1 x_{k+1} + \alpha_2 x_k + \alpha_3 u_k - A_2^{(2)} x_{k+2} \right) x_k, \\
\frac{\partial S}{\partial \alpha_3} &= 2 \sum_{k=1}^{N-2} \left(\alpha_1 x_{k+1} + \alpha_2 x_k + \alpha_3 u_k - A_2^{(2)} x_{k+2} \right) u_k.
\end{aligned} \tag{2.46}$$

Завдяки отриманим результатам (2.46) маємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь для визначення раніше введених проміжних невідомих (2.41) у такому вигляді:

$$\begin{aligned}
\left(\sum_{k=1}^{N-2} x_{k+1}^2 \right) \alpha_1 + \left(\sum_{k=1}^{N-2} x_k x_{k+1} \right) \alpha_2 + \left(\sum_{k=1}^{N-2} u_k x_{k+1} \right) \alpha_3 &= A_2^{(2)} \sum_{k=1}^{N-2} x_{k+2} x_{k+1}, \\
\left(\sum_{k=1}^{N-2} x_k x_{k+1} \right) \alpha_1 + \left(\sum_{k=1}^{N-2} x_k^2 \right) \alpha_2 + \left(\sum_{k=1}^{N-2} u_k x_k \right) \alpha_3 &= A_2^{(2)} \sum_{k=1}^{N-2} x_{k+2} x_k, \\
\left(\sum_{k=1}^{N-2} u_k x_{k+1} \right) \alpha_1 + \left(\sum_{k=1}^{N-2} u_k x_k \right) \alpha_2 + \left(\sum_{k=1}^{N-2} u_k^2 \right) \alpha_3 &= A_2^{(2)} \sum_{k=1}^{N-2} x_{k+2} u_k.
\end{aligned} \tag{2.47}$$

Таким чином, маємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь (2.47) для визначення введених раніше у вигляді (2.41) проміжних невідомих. З іншого боку, для заданих проміжних невідомих $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, що визначені шляхом розв'язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь (2.47), маємо у вигляді (2.41) іншу систему лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$a_1 A_1^{(1)} = -\alpha_1 - A_1^{(2)}, \quad a_1 A_0^{(1)} + a_0 = -\alpha_2 - A_0^{(2)}, \quad b_0 = \alpha_3. \tag{2.48}$$

Для розв'язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь (2.48) спочатку із першого рівняння (2.48) визначимо один із параметрів диференціального рівняння (2.20) математичної моделі об'єкта роботизації:

$$a_1 = -\frac{\alpha_1 + A_1^{(2)}}{A_1^{(1)}}. \quad (2.49)$$

Далі, за допомогою отриманого результату (2.49) та другого рівняння матимемо можливість визначити інший параметр диференціального рівняння (2.20) математичної моделі об'єкта роботизації:

$$a_0 = -\alpha_2 - A_0^{(2)} - a_1 A_0^{(1)} \Rightarrow a_0 = -\alpha_2 - A_0^{(2)} + \frac{A_0^{(1)}}{A_1^{(1)}} (\alpha_1 + A_1^{(2)}). \quad (2.50)$$

Нарешті, третє рівняння (2.48) містить пряме визначення відповідного параметра диференціального рівняння (2.20) математичної моделі об'єкта роботизації:

$$b_0 = \alpha_3. \quad (2.51)$$

Таким чином, розв'язування системи трьох алгебраїчних рівнянь (2.47) та співвідношення (2.49), (2.50) та (2.51) представляють розв'язування задачі параметричної ідентифікації диференціального рівняння (2.20), яке представляє математичну модель лінійного об'єкта роботизації другого порядку.

2.4 Висновки по розділу

Виконання параметричної ідентифікації лінійного об'єкту роботизації істотно залежить від вигляду диференціального рівняння його математичної моделі і містить певні часом досить громіздкі перетворення, причому обсяг таких перетворень залежить від порядку диференціального рівняння та збільшується при збільшенні такого порядку. Завдяки означеній обставині для розв'язування інженерних задач автоматизації вкрай потрібна модель параметричної

ідентифікації, яка б містила формалізований підхід, що дозволяє спрощувати виконання громіздких перетворень у випадку диференціальних рівнянь високого порядку.

Математична модель лінійного об'єкта роботизації визначається за допомогою лінійного звичайного диференціального рівняння та відповідної кількості початкових умов, що дозволяють у загальному вигляді представити зв'язок параметра керування та керованого параметра. В інженерних задачах автоматизації лінійні об'єкти автоматизації зазвичай представляють окремі контури автоматичних систем керування та є наслідком лінеаризації диференціальних рівнянь, що визначають процеси в таких контурах, що дозволяє обмежуватись саме одним параметром керування та керованим параметром. З урахуванням означених обставин, типовому для інженерної автоматизації є математична модель об'єкта роботизації у вигляді лінійного звичайного диференціального рівняння n -го порядку зі сталими коефіцієнтами та відповідною кількістю початкових умов для інтегрування.

Для побудови диференціального рівняння математичної моделі об'єкта роботизації зазвичай розглядають задачу параметричної ідентифікації, тобто параметри диференціального рівняння визначають за результатами спостережень над параметром керування та керованим параметром при проведенні відповідних випробувань. Результати спостережень над параметром керування та керованим параметром в задачах ідентифікації результатами вимірювань, які фіксуються відповідним вимірювальними приладами протягом проведення відповідних випробувань, неможливо у загальному випадку уявляти як неперервні функції часу. Зазвичай результати вимірювань представляють у цифровій формі.

Розв'язування задачі параметричної ідентифікації лінійного об'єкта роботизації здійснюється шляхом запису диференціального рівняння математичної моделі у дискретній формі з використанням формул наближеного диференціювання, які слід представляти через значення параметра керування та керованого параметра в поточній та в наступні моменти часу. В результаті

маємо проміжні невідомі, що лінійно зв'язані із параметрами диференціального рівняння математичної моделі, і задача параметричної ідентифікації зводиться саме до визначення цих проміжних невідомих.

Для визначення проміжних невідомих задачі параметричної ідентифікації лінійного об'єкта роботизації краще використовувати метод найменших квадратів, оскільки він не вимагає зв'язку між кількістю шуканих проміжних невідомих та обсягами даних цифрованих результатів вимірювань часу та параметра керування і керованого параметра. Таким чином, розв'язування задачі параметричної ідентифікації зводиться до розв'язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь, що побудована за допомогою метода найменших квадратів, та системи лінійних алгебраїчних рівнянь, що впливає із лінійного зв'язку між параметрами математичної моделі та проміжним невідомими параметрами. Такий підхід може бути реалізований формальними процедурами для диференціальних рівнянь довільного порядку.

3 КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЛІНІЙНОГО ОБ'ЄКТА РОБОТИЗАЦІЇ

Дослідження процесів параметричної ідентифікації є досить складним з точки зору отримання даних через обмежені можливості натурних вимірювань та їхню високу вартість. За цих умов саме комп'ютерне моделювання з використанням відповідних математичних моделей та спеціалізованого програмного забезпечення є альтернативою натурним випробуванням щодо дослідження процесів параметричної ідентифікації лінійних об'єктів роботизації. При цьому слід розуміти, що процеси параметричної ідентифікації є насправді досить специфічним об'єктом щодо комп'ютерного моделювання, і ця специфічність вимагає розроблення відповідних підходів щодо комп'ютерного моделювання. Отже, розглянемо далі низку питань щодо специфіки комп'ютерного моделювання процесів параметричної ідентифікації лінійних об'єктів роботизації. В якості прикладу розглядатимемо лінійний об'єкт роботизації, процеси в якому визначаються лінійним звичайним диференціальним рівнянням другого порядку.

3.1 Використання перетворення Лапласа та передавальної функції щодо комп'ютерного моделювання лінійного об'єкта роботизації

Одним із найбільш зручних підходів щодо врахування властивостей лінійних об'єктів автоматизації для їхнього комп'ютерного моделювання є використання диференціальних рівнянь. В якості прикладу розглядаємо лінійний об'єкт роботизації, який визначається диференціальним рівнянням другого порядку (2.20) із необхідними для його інтегрування початковими умовами (2.21). В той же час, розглядатимемо далі більш загальний вигляд лінійного звичайного диференціального рівняння другого порядку (2.1), в якому передбачено ненормовані числові значення параметрів:

$$\alpha_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + \alpha_1 \frac{dx}{dt} + \alpha_0 x = \beta_0 u, \quad (3.1)$$

$$\frac{dx}{dt}(0) = x_0^{(1)}, \quad x(0) = x_0^{(0)}, \quad (3.2)$$

де $\alpha_2, \alpha_1, \alpha_0, \beta_0$ – немасштабовані параметри диференціального рівняння математичної моделі.

Зрозуміло, що немасштабовані параметри диференціального рівняння математичної моделі (3.1) зв'язані із масштабованими параметрами, які містяться в диференціальному рівнянні (2.20), такими співвідношеннями:

$$a_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}, \quad a_0 = \frac{\alpha_0}{\alpha_2}, \quad b_0 = \frac{\beta_0}{\alpha_2}. \quad (3.3)$$

Слід розуміти, що масштабування параметрів диференціального рівняння математичної моделі лінійного об'єкта роботизації є необхідним кроком щодо його параметричної ідентифікації, яка дозволяє визначати лише співвідношення між параметрами математичної моделі. В той же час, дослідження процесів в об'єкті автоматизації не потребує масштабування параметрів диференціального рівняння їхньої математичної моделі. Також слід відзначити, що початкові умови (3.2) відповідають окремому випадку початкових умов (2.21), в якому прийнято, що початковий момент часу дорівнює нулю:

$$t_0 = 0. \quad (3.4)$$

Зрозуміло, що прийняте значення (3.4) не зменшує загальність усіх подальших висновків, оскільки таке значення (3.4) можна уявляти як наслідок тривіальної заміни змінної – часу у вигляді зсуву на початкове значення $t_0 \neq 0$, що приведе до еквівалентної нової задачі, в якій матимемо значення (3.4).

У випадку лінійних звичайних диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами вкрай доцільним є використання заміни змінної відповідно інтегральному перетворенню Лапласа, оскільки це дозволяє у досить зручному вигляді передавальній функції представити властивості відповідного диференціального рівняння. Така передавальна функція, яку можна ввести внаслідок використання перетворення Лапласа, є досить зручною для визначення математичної моделі об'єкта роботизації, що досить широко використовується в спеціалізованому програмному забезпеченні для виконання наукових та інженерних розрахунків. В той же час, використання інтегрального перетворення Лапласа щодо лінійних звичайних диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами є зручним лише за умови нульових початкових значень в початкових умовах (3.2). Для цього пропонується перетворити математичну модель (3.1), (3.2) шляхом заміни змінної:

$$x(t) = y(t) + x_0^{(1)}t + x_0^{(0)}, \quad (3.5)$$

де $y(t)$ – нова змінна замість керованого параметра.

При використанні заміни змінної (3.5) слід враховувати, що похідні керованого параметру досліджуваного об'єкта роботизації визначаються так:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d^2y}{dt^2}, \quad \frac{dx}{dt} = \frac{dy}{dt} + x_0^{(1)}. \quad (3.6)$$

Завдяки запропонованій заміні змінної (3.5) з урахуванням вигляду (3.6) похідних керованого параметра досліджуваного об'єкта роботизації диференціальне рівняння (3.1) набуде такого вигляду:

$$\alpha_2 \frac{d^2y}{dt^2} + \alpha_1 \left(\frac{dy}{dt} + x_0^{(1)} \right) + \alpha_0 \left(y + x_0^{(1)}t + x_0^{(0)} \right) = \beta_0 u. \quad (3.7)$$

Виконаємо тотожні перетворення звичайного диференціального рівняння (3.7) та представимо математичну модель (3.1), (3.2) у такому більш зручному щодо використання перетворення Лапласа остаточному вигляді:

$$\alpha_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + \alpha_1 \frac{dy}{dt} + \alpha_0 y = \beta_0 u - (\alpha_1 + \alpha_0 t) x_0^{(1)} - \alpha_0 x_0^{(0)}, \quad (3.8)$$

$$\frac{dy}{dt}(0) = 0, \quad y(0) = 0. \quad (3.9)$$

Принциповою з точки зору використання перетворення Лапласа відмінністю математичної моделі (3.1), (3.2) від математичної моделі (3.8), (3.9) є нульові початкові значення у початкових умовах. Зрозуміло, що заміна змінних (3.5) вплинула також й на вигляд диференціального рівняння математичної моделі, але при цьому відповідно характеристичне рівняння не змінилося, а зміни є лише в неоднорідному рівнянні через наявність додаткових доданків, що враховують ненульові початкові значення в початкових умовах (3.2).

Для зручності подальшого викладення введемо до розгляду позначення:

$$u_0(t) = u - \frac{\alpha_1 + \alpha_0 t}{\beta_0} x_0^{(1)} - \frac{\alpha_0}{\beta_0} x_0^{(0)}, \quad (3.10)$$

де $u_0(t)$ – параметр керування, корегований відповідно до ненульових початкових умов.

Нульові початкові значення в початкових умовах (3.9) значно спрощують використання інтегрального перетворення Лапласа для заміни змінної в диференціальному рівнянні (3.8), яке можна запропонувати у такому вигляді:

$$Y(s) = \int_0^{\infty} y(t) e^{-st} dt, \quad U_0(s) = \int_0^{\infty} u_0(t) e^{-st} dt, \quad (3.11)$$

де s – нова комплексна змінна замість часу t ;

$Y(s)$ – нова змінна замість змінної $y(t)$, що у свою чергу була введена замість керованого параметра;

$U(s)$ – нова змінна, яка відповідає параметру керування.

Переваги використання перетворення Лапласа (3.11) щодо розв'язування лінійних звичайних диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами обумовлена наявністю притаманних йому таких дуже цікавих властивостей:

$$sY(s) = \int_0^{\infty} \frac{dy}{dt}(t) e^{-st} dt, \quad s^2Y(s) = \int_0^{\infty} \frac{d^2y}{dt^2}(t) e^{-st} dt. \quad (3.12)$$

Завдяки властивостям (3.12) та іншим властивостям перетворення Лапласа, які є наслідками властивостей інтегралів, з урахуванням позначень (3.11) диференціальне рівняння (3.8), записне для керованого керування (3.9), набуде вигляду:

$$\alpha_2 s^2 Y(s) + \alpha_1 s Y(s) + \alpha_0 Y(s) = \beta_0 U_0(s). \quad (3.13)$$

Завдяки співвідношенню (3.13) маємо можливість ввести до розгляду передавальну функцію:

$$W(s) = \frac{\beta_0}{\alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0}. \quad (3.14)$$

Передавальна функція (3.14) надає можливість представляти лінійний об'єкт роботизації у вигляді динамічної ланки, яка ототожнюється із відповідною передавальною функцією, як це показано на рис. 3.1. Це насправді широко використовується у різноманітних комп'ютерних системах виконання наукових та інженерних розрахунків і моделювання.

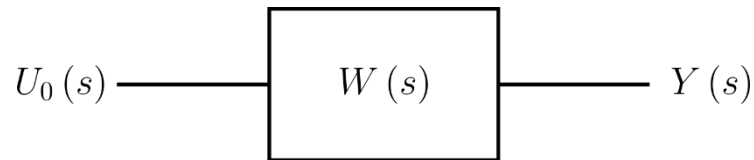


Рисунок 3.1 – Лінійний об'єкт роботизації

Таким чином, завдяки передавальній функції (3.14) маємо досить зручну форму представлення математичної моделі (3.1), (3.2) досліджуваного лінійного об'єкта роботизації. В той же час, слід розуміти, що передавальна функція (3.14) дозволяє отримувати лише проміжну змінну, введену замість керованого параметра через співвідношення (3.5).

3.2 Комп'ютерна модель лінійного об'єкта роботизації та процесу його параметричної ідентифікації

Дослідження процесів в досліджуваному лінійному об'єкті роботизації зводиться до визначення залежності від часу керованого параметра, відповідного заданій залежності від часу параметра керування, що потребує інтегрування диференціального рівняння (3.1) з урахуванням початкових умов. (3.2). Зрозуміло, що таке інтегрування можна здійснити з використанням комп'ютеру за допомогою відповідного програмного забезпечення, що саме і є комп'ютерним моделюванням процесів, як його розуміють сьогодні.

Інтегрування диференціального рівняння (3.1) з урахуванням початкової умови (3.2) є насправді стандартною математичною задачею, яка може бути розв'язана за допомогою різноманітних обчислювальних методів, що реалізовані у вигляді відповідного програмного забезпечення. Зрозуміло, що немає сенсу розробляти власні програми щодо розв'язування диференціального рівняння (3.1) з урахуванням початкової умови (3.2), оскільки сьогодні пропонується велика кількість спеціалізованого програмного забезпечення для розв'язування такої та інших стандартних математичних задач щодо моделювання процесів на

основі розв'язування диференціальних рівнянь. Далі для виконання комп'ютерного моделювання процесів в лінійному об'єкті роботизації, який визначається математичною моделлю (3.1), (3.2), будемо використовувати спеціалізовану комп'ютерну систему Scilab, що розроблена для виконання наукових та інженерних розрахунків та розповсюджується через мережу Internet для вільного користування, у тому числі й із відкритим програмним кодом.

При виконанні комп'ютерного моделювання процесів в досліджуваному об'єкті роботизації, який визначається математичною моделлю (3.1), (3.2), використовуємо такі вихідні данні:

$$\alpha_2 = 0,4, \quad \alpha_1 = 0,75, \quad \alpha_0 = 10, \quad \beta_0 = 12,5, \quad u(t) = 1. \quad (3.15)$$

Початкові значення $x_0^{(0)}$ та $x_0^{(1)}$ керованого параметра та його похідної використовуватимемо у залежності від змісту дослідження та будемо наводити при проведенні цих досліджень. При виконанні комп'ютерного моделювання процеси в досліджуваному об'єкті роботизації, який визначається математичною моделлю (3.1), (3.2), розглядаємо протягом часу

$$0 \leq t \leq 30 \text{ с}. \quad (3.16)$$

Комп'ютерне моделювання здійснюємо таким чином, щоб мати данні щодо моментів часу, параметра керування та керованого параметра, через проміжки такі часу:

$$\Delta t = 0,01 \text{ с}. \quad (3.17)$$

Комп'ютерна модель, процесів в лінійному об'єкті роботизації, який визначається лінійним звичайним диференціальним рівнянням другого порядку (3.1) із початковими умовами (3.2), показана на рис. 3.2. Ця комп'ютерна модель

(рис. 3.2) побудована засобами графічного середовища моделювання Xcos, що є невід'ємною складовою частиною комп'ютерної системи Scilab. В графічному середовищі моделювання Xcos моделі процесів представляються у вигляді графічних діаграм, що містять блоки різного призначення та визначені зв'язки між ними. Комп'ютерна модель процесів в лінійному об'єкті автоматизації, який визначається лінійним звичайним диференціальним рівнянням другого порядку (3.1) із початковими умовами (3.2), яка показана на рис. 3.2, використовує передаточну функцію (3.14) досліджуваного об'єкта роботизації. Це дозволяє наочно представити комп'ютерну модель та її зв'язок із досліджуваним об'єктом автоматизації. На рис. 3.2 слід звернути увагу на визначені у вигляді контекстних змінних вихідні данні (3.15), час (3.16), протягом якого розглядається досліджуваний процес, а також інтервал часу (3.17) збереження результатів розрахунків. В комп'ютерній моделі (рис. 3.2) передбачено побудову залежності від часу параметра керування та керованого параметра для поточного контролю процесу моделювання, а також експорт результатів із середовища графічного моделювання Xcos до системи Scilab для подальшого використання. Зрозуміло, що використання комп'ютерної моделі (рис. 3.2) можливо із середовища графічного моделювання Xcos, але більш зручним є автоматизоване використання цієї моделі шляхом програмного керування із системи Scilab. Для цього в системі Scilab наявними засобами програмування сценаріїв розрахунків розроблено спеціальну допоміжну програму-сценарій (рис. 3.3), яка дозволяє програмно здійснювати моделювання процесів в досліджуваному об'єкті роботизації для необхідних числових даних, якими визначаються початкові значення $x_0^{(0)}$ та $x_0^{(1)}$ керованого параметра та його похідної. Для автоматизованого розв'язування задачі параметричної ідентифікації досліджуваного лінійного об'єкта роботизації, що визначається математичною моделлю (3.1), (3.2), розроблено спеціальну програму-сценарій Scilab, що показна на рис. 3.4.

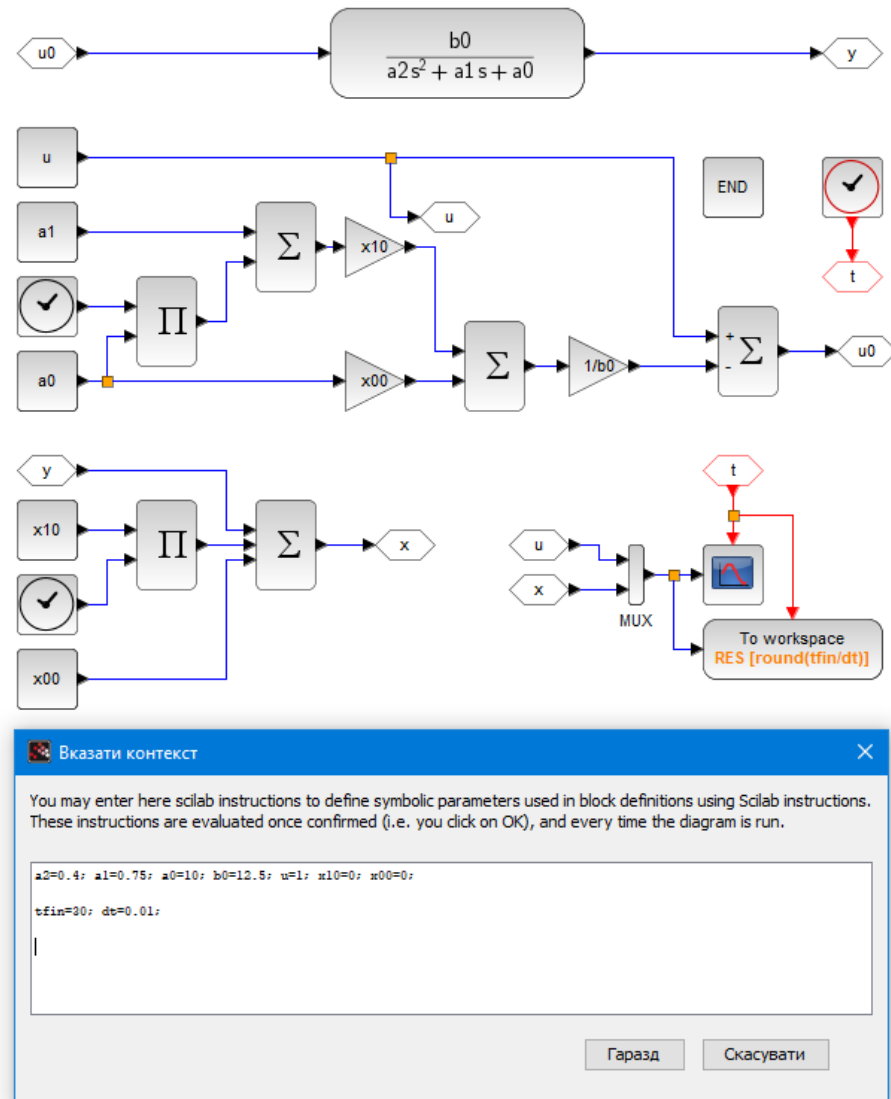


Рисунок 3.2 – Розроблена в системі Scilab комп'ютерна модель процесів в лінійному об'єкті роботизації, який визначається лінійним звичайним диференціальним рівнянням другого порядку

```

1 loadXcosLibs (); loadScicos ();
2
1 function res=simulation(x00,x10)
2     importXcosDiagram("model.zcos");
3     typeof(scs_m);
4     scs_m.props.context;
5     Context.x00=x00; Context.x10=x10;
6     scicos_simulate(scs_m,Context);
7     res=RES;
8 endfunction
11

```

Рисунок 3.3 – Текст програми-сценарію щодо автоматизованого використання комп'ютерної моделі процесів в досліджуваному лінійному об'єкті роботизації, який визначається лінійним звичайним диференціальним рівнянням другого порядку

```

1
1 function res=identification(t,u,x)
2     N=length(t); dt=t(2)-t(1);
3     a11=sum(x(2:N-1).^2); a12=sum(x(1:N-2).*x(2:N-1));
4     a13=sum(u(1:N-2).*x(2:N-1)); b1=sum(x(3:N).*x(2:N-1))/dt^2;
5     a22=sum(x(1:N-2).^2); a23=sum(u(1:N-2).*x(1:N-2));
6     b2=sum(x(3:N).*x(1:N-2))/dt^2;
7     a33=sum(u(1:N-2).^2); b3=sum(x(3:N).*u(1:N-2))/dt^2;
8     A=[a11,a12,a13;a12,a22,a23;a13,a23,a33]; b=[b1;b2;b3];
9     a=A\b;
10    b0=a(3); a1=-(a(1)+(-2/dt^2))/(1/dt);
11    a0=-a(2)-(1/dt^2)+(-1/dt)/(1/dt)*(a(1)-2/dt^2);
12    res=[a1,a0,b0];
13 endfunction
15

```

Рисунок 3.4 – Текст програми-сценарію щодо автоматизованого виконання параметричної ідентифікації лінійного об'єкта роботизації, який визначається лінійним звичайним диференціальним рівнянням другого порядку

3.3 Дослідження процесів в лінійному об'єкті роботизації щодо його параметричної ідентифікації

Розглянемо вплив початкових значень керованого параметра на процеси, що відбуваються в досліджуваному об'єкті роботизації, які визначаються математичною моделлю (3.1), (3.2). Розроблена для виконання такого дослідження програма-сценарій Scilab показана на рис. 3.5. В цій програмі-сценарії (рис. 3.5) автоматизовано визначення початкових значень для виконання комп'ютерного моделювання процесів в досліджуваному лінійному об'єкті автоматизації, що визначається диференціальним рівнянням другого порядку, з використанням раніше розробленої комп'ютерної моделі, що показана на рис. 3.2. В програмі-сценарії (рис. 3.5) передбачається також побудова результатів комп'ютерного моделювання у вигляді залежності від часу параметра керування та керованого параметра та автоматизоване форматування відповідних графіків у належному вигляді для безпосереднього додавання до наукових звітів. Крім цього, побудовані графіки зберігаються в файли спеціального формату Scilab, що дозволяє переглядати графіки без потворного проведення моделювання.

Результати комп'ютерного моделювання процесів в досліджуваному об'єкті роботизації, який визначається математичною моделлю (3.1), (3.2), показані на рис. 3.6, рис. 3.7, рис. 3.8 та рис. 3.9 для різних початкових значень керованого параметра та його похідної. Бачимо, що перехідні процеси в досліджуваному об'єкті автоматизації, який визначається математичною моделлю (3.1), (3.2), залежать від початкових значень керованого параметра та його похідної. В той же час, порівняння рис. 3.6 та рис. 3.6, а також рис. 3.8 та рис. 3.9 свідчить про відносно малу чутливість впливу початкового значення похідної керованого на параметра, який зводиться до незначного збільшення розмаху перехідних процесів при збільшенні початкового значення похідної. При цьому, порівняння рис. 3.6 та рис. 3.8, а також рис. 3.7 та рис. 3.9 свідчить про чутливість процесів, що відбуваються в досліджуваному об'єкті автоматизації, до початкового значення керованого параметра. Усі одержані

результати наочно показують типовий для диференціального рівняння другого порядку характерний вигляд перехідних процесів, що характеризуються осциляціями навколо нового усталеного значення керованого параметра, які зменшуються протягом часу. Зрозуміло, що нове усталене значення керованого параметра не залежить від початкових значень, що наочно ілюструється отриманими результатами. Зазначимо, що результат, показаний на рис. 3.6, представляє собою перехідну функцію досліджуваного об'єкта роботизації, який визначається математичною моделлю (3.1), (3.2).

```

1 clear; clc;
2
3 exec('simulation.sce',-1);
4
5 exec('FormatCharts.sce',-1);
6
7 function result(x00,x10,N,filename)
8 ... res=simulation(x00,x10);
9 ... t=res.time; u=res.values(:,1); x=res.values(:,2); show_window(N);
10 ... plot(t,u,"k--","linewidth",2);
11 ... plot(t,x,"k-","linewidth",2);
12 ... titlex="$t, \mathrm{s}$"; titley="$u(t), x(t)$";
13 ... titlec="$x^{(0)}_0="+string(x00)+", -x^{(1)}_0="+string(x10)+"$";
14 ... LEGEND=["$u(t)$", "$x(t)$"]; SetYAxesBounds(0,2);
15 ... FormatCharts(titlex,titley,titlec,LEGEND,4);
16 ... xsave(filename);
17 endfunction
18
19 result(0,0,1,"res1A.scg");
20 result(0.75,0,2,"res1B.scg");
21 result(0,1.5,3,"res1C.scg");
22 result(0.75,1.5,4,"res1D.scg");
23

```

Рисунок 3.5 – Текст програми-сценарію щодо дослідження впливу початкових значень керованого на процеси в лінійному об'єкті роботизації, який визначається лінійним звичайним диференціальним рівнянням другого порядку

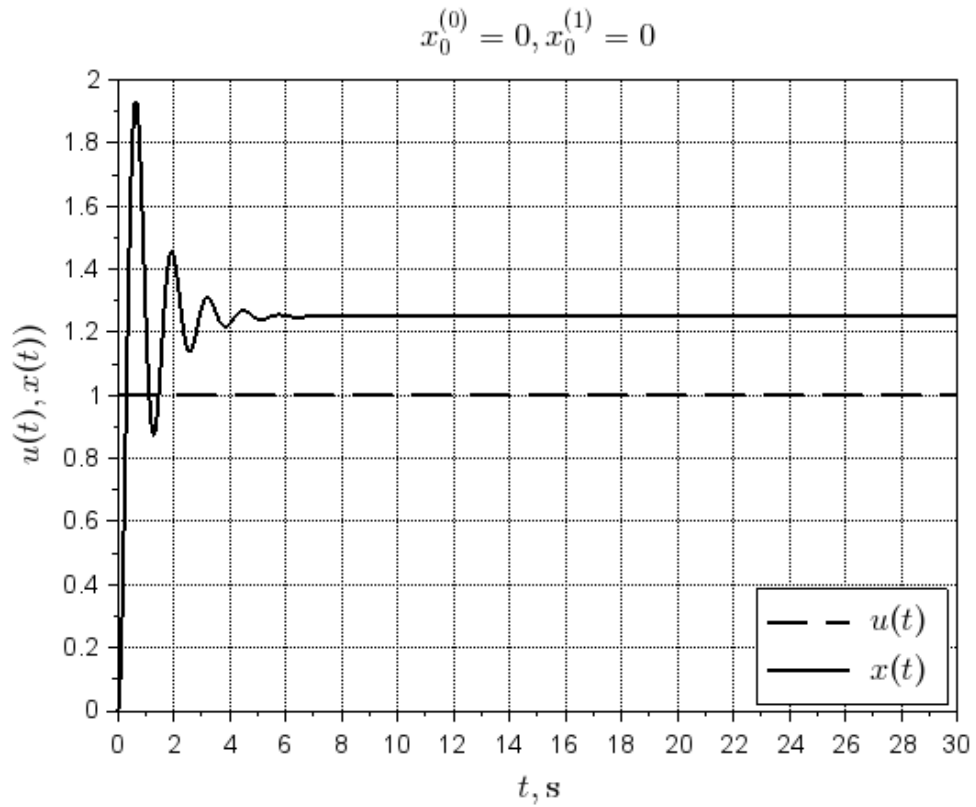


Рисунок 3.6 – Процеси в лінійному об'єкті роботизації, який визначається лінійним звичайним диференціальним рівнянням другого порядку, при нульових початкових значеннях керованого параметра та його похідної

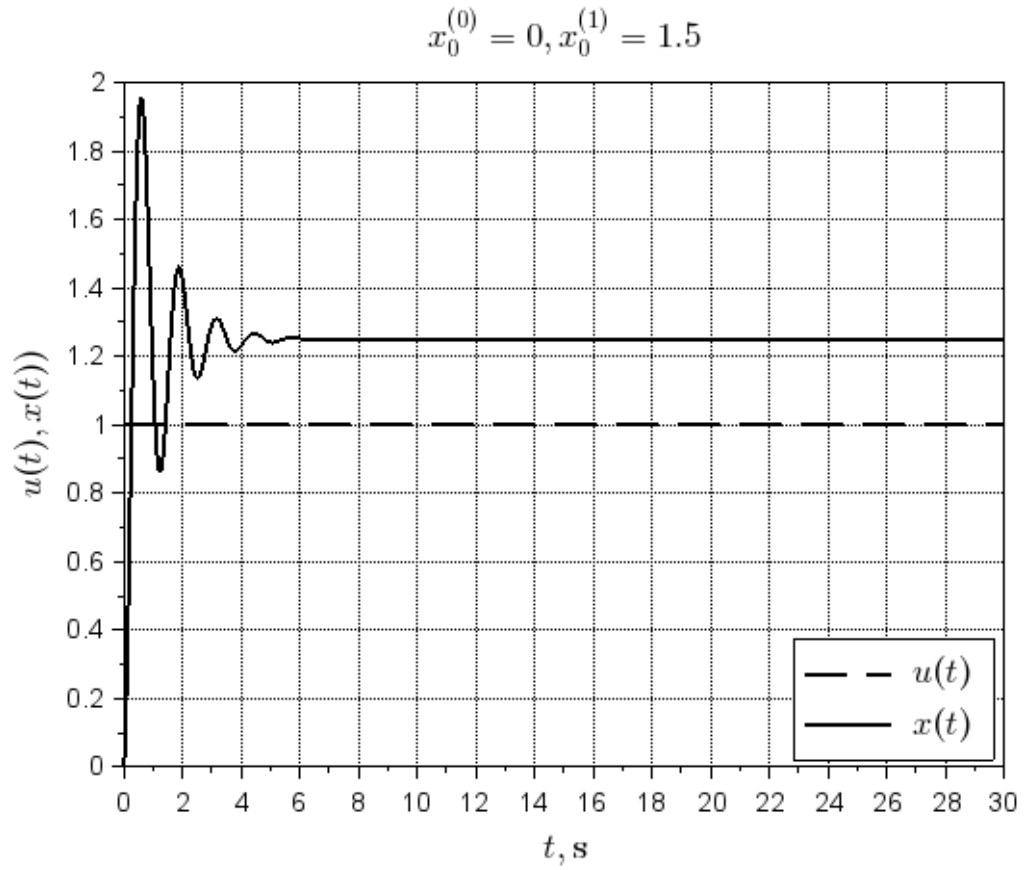


Рисунок 3.7 – Процеси в лінійному об'єкті роботизації, який визначається лінійним звичайним диференціальним рівнянням другого порядку, при нульовому початковому значенні керованого параметра та ненульовому початковому значенні його похідної

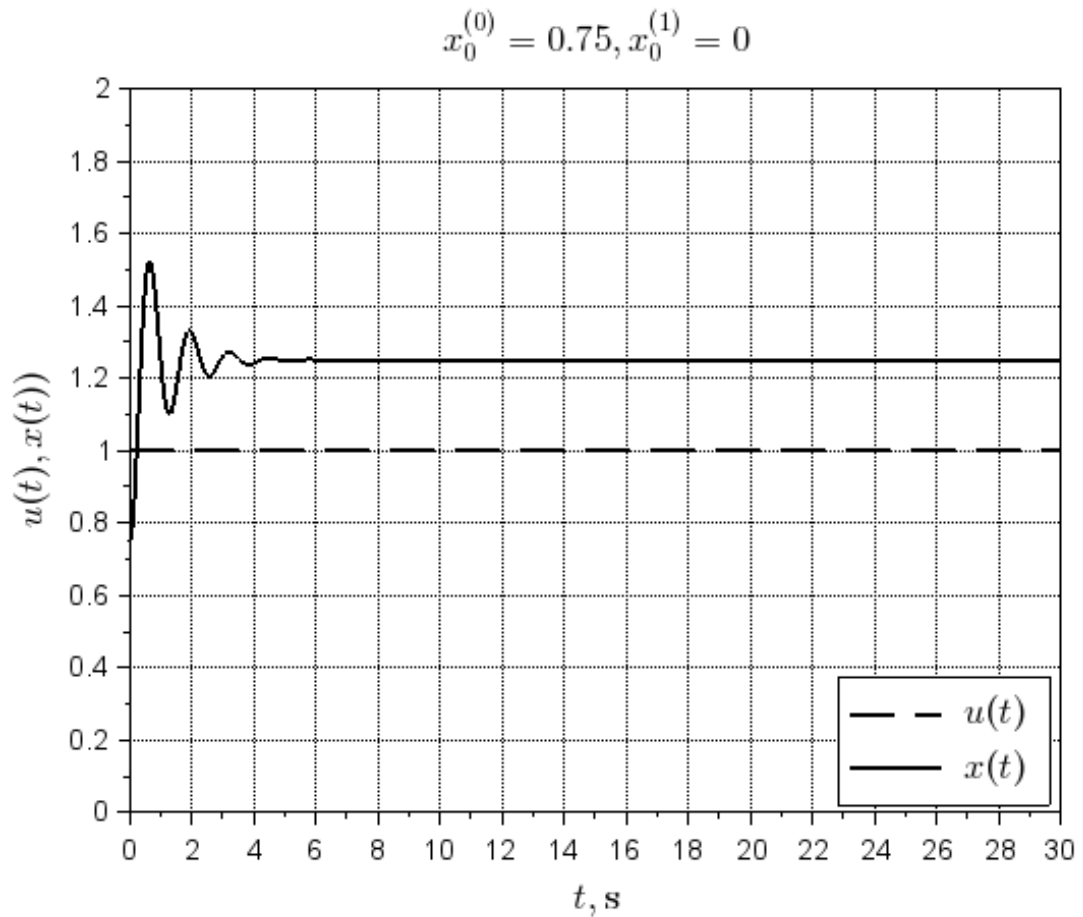


Рисунок 3.8 – Процеси в лінійному об'єкті роботизації, який визначається лінійним звичайним диференціальним рівнянням другого порядку, при ненульовому початковому значенні керованого параметра та при нульовому початковому значенні його похідної

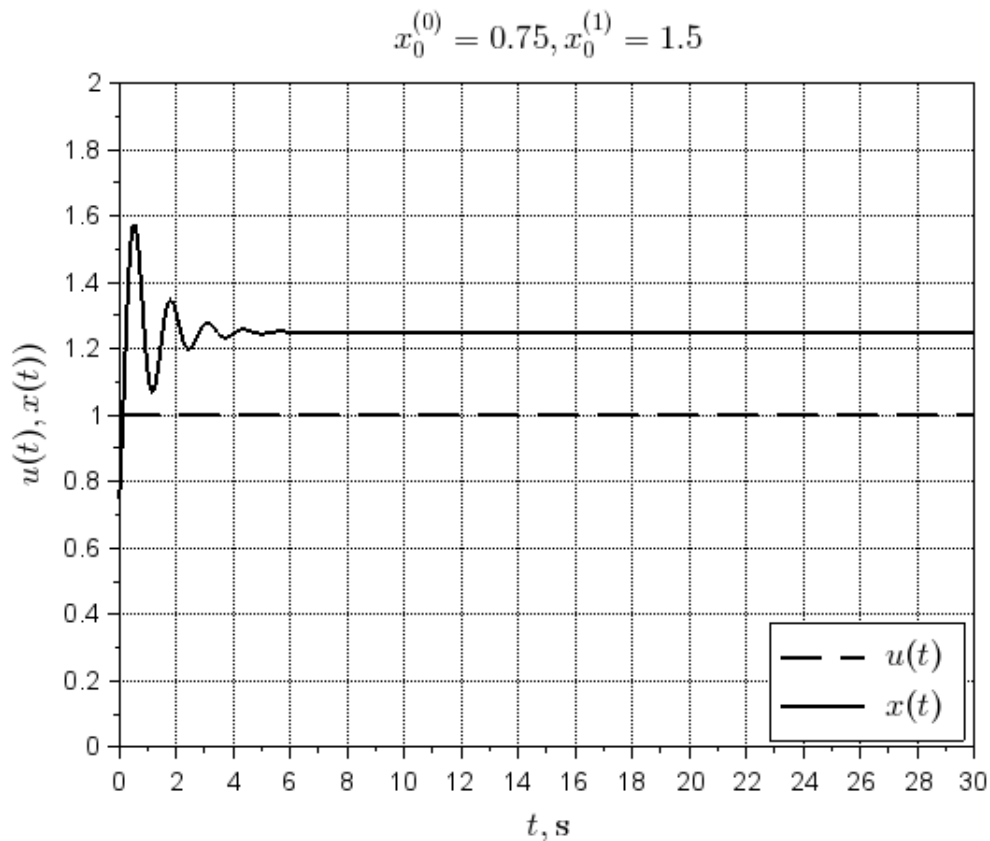


Рисунок 3.9 – Процеси в лінійному об'єкті роботизації, який визначається лінійним звичайним диференціальним рівнянням другого порядку, при ненульових початкових значеннях керованого параметра та його похідної

Виконаємо розв'язування задачі параметричної ідентифікації для досліджуваного лінійного об'єкта роботизації, який визначається математичною моделлю (3.1), (3.2), розробленої у розд. 2 моделі параметричної ідентифікації з використанням результатів комп'ютерного моделювання, що наведені на рис. 3.6. Для цього розроблено програму-сценарій Scilab, яка представлена на рис. 3.10, та виконує необхідні розрахунки та формує дані для подальшого порівняння. Результати параметричної ідентифікації представлені в табл. 3.1 та свідчать досить високу точність запропонованої моделі параметричної ідентифікації. В той же час, для одного із параметрів маємо відносно високу відносну похибку визначення, яка перевищує 12% (табл. 3.1). Така похибка може свідчити про недостатньо малий крок інтегрування, а також про недостатню

точність використуваних формул наближеного диференціювання, що потребує подальших досліджень.

```

1 clear; clc;
2
3 exec('simulation.sce',-1); exec('identification.sce',-1);
4
5 res=simulation(0,0); t=res.time; u=res.values(:,1); x=res.values(:,2);
6
7 alpha2=0.4; alpha1=0.75; alpha0=10; beta0=12.5;
8
9 res=identification(t,u,x); a1=res(1); a0=res(2); b0=res(3);
10
11 disp(a1,alpha1/alpha2,abs(a1-alpha1/alpha2)/(alpha1/alpha2)*100);
12 disp(a0,alpha0/alpha2,abs(a0-alpha0/alpha2)/(alpha0/alpha2)*100);
13 disp(b0,beta0/alpha2,abs(b0-beta0/alpha2)/(beta0/alpha2)*100);
14

```

Рисунок 3.10 – Текст програми-сценарію щодо параметричної ідентифікації лінійного об'єкта роботизації, який визначається лінійним звичайним диференціальним рівнянням другого порядку

Таблиця 3.1 – Результати розв'язування задачі параметричної ідентифікації

Позначення параметра математичної моделі	Значення параметра		Відносна похибка оцінки параметра, %
	Точне	Оцінка	
a_1	2,1105226	1,875	12,561206
a_0	24,765244	25,0	0,9390223
b_0	30,956692	31,25	0,9385865

3.4 Висновки по розділу

Отримані результати щодо комп'ютерного моделювання процесів параметричної ідентифікації лінійного об'єкта роботизації, який визначається диференціальним рівнянням другого порядку, дозволяють зробити такі висновки.

У випадку лінійних звичайних диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами вкрай доцільним є використання заміни змінної відповідно інтегральному перетворенню Лапласа, оскільки це дозволяє у досить зручному вигляді передавальній функції представити властивості відповідного диференціального рівняння. Така передавальна функція, яку можна ввести внаслідок використання перетворення Лапласа, є досить зручною для визначення математичної моделі об'єкта роботизації, що досить широко використовується в спеціалізованому програмному забезпеченні для виконання наукових та інженерних розрахунків. В той же час, використання інтегрального перетворення Лапласа щодо лінійних звичайних диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами є зручним лише за умови нульових початкових значень в початкових умовах. Для цього слід перетворити математичну модель шляхом відповідної заміни змінної.

Перехідні процеси в досліджуваному об'єкті автоматизації, який визначається диференціальним рівнянням другого порядку, залежать від початкових значень керованого параметра та його похідної. Встановлено відносно малу чутливість впливу початкового значення похідної керованого на параметра, який зводиться до незначного збільшення розмаху перехідних процесів при збільшенні початкового значення похідної. Показано чутливість процесів, що відбуваються в досліджуваному об'єкті автоматизації, до початкового значення керованого параметра.

Одержані результати наочно показують типовий для диференціального рівняння другого порядку характерний вигляд перехідних процесів, що характеризуються осциляціями навколо нового усталеного значення керованого

параметра, які зменшуються протягом часу. Показано, що нове усталене значення керованого параметра не залежить від початкових значень, що наочно ілюструється отриманими результатами.

Результати параметричної ідентифікації свідчать про досить високу точність запропонованої моделі параметричної ідентифікації. В той же час, для одного із параметрів маємо відносно високу відносну похибку визначення, яка перевищує 12%. Така похибка може свідчити про недостатньо малий крок інтегрування, а також про недостатню точність використовуваних формул наближеного диференціювання, що потребує подальших досліджень.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз умов праці на робочому місці

На робочому місці оператора ПК виникають небезпечні та шкідливі фактори: підвищений рівень шуму, несприятливі мікрокліматичні умови, недостатній рівень освітленості, шкідливі речовини, підвищений рівень електромагнітних випромінювань радіочастот, висока напруга електричної мережі, статична електрика та інші. Робота з ПК супроводжується також підвищеним ступенем напруженості трудового процесу. При систематичному впливі виробничих факторів, які не відповідають нормативним показникам, зростає рівень професійно зумовленої захворюваності працюючих та можуть виникнути професійні захворювання органів зору, руху, нервової системи. Таким чином, вивчення умов праці на робочому місці програміста є необхідною умовою запобігання негативних наслідків впливу небезпечних та шкідливих факторів.

Організація робочого місця. Приміщення, в якому знаходиться робоче місце програміста, загальною площею 48 м², і висотою стелі 3,5 м. У приміщенні знаходиться 6 робочих місць з ПК. Кожне робоче місце обладнане робочим столом, стільцем та персональним комп'ютером, що складається з монітора, системного блоку, клавіатури та миші.

4.2 Промислова безпека на робочому місці

Живлення ПК здійснюється від трифазної чотирьох електричної мережі змінного струму з глухо-заземленою нейтраллю і напругою 220 В, частотою 50 Гц. Згідно НПАОП 40.1-1.21-98 приміщення можна віднести до категорії без підвищеної небезпеки, так як в приміщенні відсутні чинники, які викликають підвищену або особливу небезпеку.

Для створення безпечних умов праці необхідно провести ряд організаційних і технічних заходів. Згідно НПАОП 40.1-1.32-01 для запобігання ураження людини електричним струмом в приміщенні застосовується система занулення.

4.3 Виробнича санітарія у приміщенні

Робота оператора ПК за енерговитратами відноситься до категорії легких робіт. В таблиці 4.1 наведені оптимальні параметри мікроклімату в приміщеннях, де виконуються роботи операторського типу [18].

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату для приміщень з ПК

Період року	Параметр мікроклімату	Величина
Холодний	Температура повітря в приміщенні; відносна вологість; швидкість руху повітря	22 – 24 °С; 40 – 60 %; до 0,1 м/с
Теплий	Температура повітря в приміщенні; відносна вологість; швидкість руху повітря	23 – 25 °С; 40 – 60 %; 0,1 – 0,2 м/с

Виміряні за допомогою приладів температура та вологість у лабораторії відповідають вказаним у таблиці для теплого періоду року. Слід зазначити, що для нормалізації параметрів мікроклімату слід використовувати у приміщеннях кондиціонування повітря, або забезпечити подачу свіжого повітря системами вентиляції.

Лабораторія, де виконується робота, має наступні характеристики:

- площа приміщення – 48 м² (8 м × 6 м);
- висота – 3,5 м;
- кількість робочих місць – 6 шт.;
- обладнання – стіл з ПК і периферією – 6 шт.

Приміщення, відповідно до ДНАОП 0.00-1.31-99, має забезпечувати 6 м² площі та 20 м³ об'єму на одне окреме робоче місце з ПК [18]. Площа приміщення 48 м² та об'єм 168 м³, на кожне робоче місце приходиться 8 м² площі і об'єм 28 м³, тобто вимога виконана.

Приміщення з ПК повинні мати природне і штучне освітлення відповідно до ДБН В.25-28-2006 «Природне і штучне освітлення». Природне світло повинно проникати через бічні світлові прорізи, зорієнтовані, як правило, на північ або північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5 %.

Рівень загального штучного освітлення приміщення можна перевірити за допомогою методу питомої потужності, викладеної в [18].

Розрахункова формула методу:

$$W = \frac{W_{\Sigma}}{S}, \quad (4.1)$$

де W – питома потужність, Вт/м²;

S – площа приміщення, м²;

W_{Σ} – загальна потужність освітлювальної установки Вт, яка розраховується за формулою:

$$W_{\Sigma} = W_{ce} \cdot n_{ce}, \quad (4.2)$$

де W_{ce} – потужність одного світильника, Вт;

n_{ce} – кількість світильників в приміщенні.

$$W_{\Sigma} = 100 \cdot 4 = 400 \text{ Вт}, \quad (4.3)$$

$$W = \frac{400}{48} = 8,33 \text{ Вт/м}^2. \quad (4.4)$$

Питомої потужності 8,33 Вт/м² по таблиці Б.3 із [18] відповідає освітленість в 250 лк при мінімальній допустимій освітленості 300 лк.

Отже, для створення сприятливих зорових умов в лабораторії необхідно збільшити кількість світильників або замінити лампи в світильниках на більш потужні.

4.4 Пожежна безпека приміщення

Пожежна безпека – стан об'єкта, при якому виключається можливість пожежі, а у випадку його виникнення запобігає вплив на людей небезпечних факторів пожежі й забезпечується захист матеріальних цінностей.

Пожежна безпека забезпечується системою запобігання пожежі й системою пожежного захисту. У всіх службових приміщеннях обов'язково повинен бути «План евакуації людей при пожежі», що регламентує дії персоналу у випадку виникнення вогнища загоряння, що й указує місця розташування пожежної техніки.

Горючими компонентами у виробничому приміщенні є: перегородки, двері, підлоги, ізоляція кабелів і ін.

Протипожежний захист – це комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки людей, на запобігання пожежі, обмеження його поширення, а також на створення умов для успішного гасіння пожежі.

Джерелами запалювання у виробничому приміщенні можуть бути електронні схеми від ПК, прилади, застосовувані для технічного обслуговування, пристрою електроживлення, кондиціонування повітря, де в результаті різних порушень утворюються перегріті елементи, електричні іскри й дуги, здатні викликати загоряння горючих матеріалів.

У сучасних ПК дуже висока щільність розміщення елементів електронних

схем. У безпосередній близькості друг від друга розташовуються сполучні проведення, кабелі. При протіканні по них електричного струму виділяється значна кількість теплоти. При цьому можливо оплавлення ізоляції. Для відводу надлишкової теплоти від ПК служать системи вентиляції й кондиціонування повітря. При постійній дії ці системи являють собою додаткову пожежну небезпеку.

Енергопостачання виробничого приміщення здійснюється за допомогою трансформаторної станції та за допомогою двигун-генераторних агрегатів. На трансформаторних підстанціях особливу небезпеку представляють трансформатори які мають масляне охолодження. У зв'язку із цим перевагу слід віддавати сухим трансформаторам.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи запропоновано модель параметричної ідентифікації лінійних об'єктів автоматизації та досліджено можливості запропонованої моделі шляхом комп'ютерного моделювання процесів параметричної ідентифікації. Одержані результати дозволяють зробити такі висновки.

Виконання параметричної ідентифікації лінійного об'єкту автоматизації істотно залежить від вигляду диференціального рівняння його математичної моделі і містить певні часом досить громіздкі перетворення, причому обсяг таких перетворень залежить від порядку диференціального рівняння та збільшується при збільшенні такого порядку. Завдяки означеній обставині для розв'язування інженерних задач автоматизації вкрай потрібна модель параметричної ідентифікації, яка б містила формалізований підхід, що дозволяє спрощувати виконання громіздких перетворень у випадку диференціальних рівнянь високого порядку.

Розв'язування задачі параметричної ідентифікації лінійного об'єкта роботизації здійснюється шляхом запису диференціального рівняння математичної моделі у дискретній формі з використанням формул наближеного диференціювання, які слід представляти через значення параметра керування та керованого параметра в поточний та в наступні моменти часу. В результаті маємо проміжні невідомі, що лінійно зв'язані із параметрами диференціального рівняння математичної моделі, і задача параметричної ідентифікації зводиться саме до визначення цих проміжних невідомих.

Для визначення проміжних невідомих задачі параметричної ідентифікації лінійного об'єкта роботизації краще використовувати метод найменших квадратів, оскільки він не вимагає зв'язку між кількістю шуканих проміжних невідомих та обсягами даних цифрованих результатів вимірювань часу та параметра керування і керованого параметра. Таким чином, розв'язування задачі

параметричної ідентифікації зводиться до розв'язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь, що побудована за допомогою метода найменших квадратів, та системи лінійних алгебраїчних рівнянь, що впливає із лінійного зв'язку між параметрами математичної моделі та проміжним невідомими параметрами. Такий підхід може бути реалізований формальними процедурами для диференціальних рівнянь довільного порядку.

Перехідні процеси в досліджуваному об'єкті автоматизації, який визначається диференціальним рівнянням другого порядку, залежать від початкових значень керованого параметра та його похідної. Встановлено відносно малу чутливість впливу початкового значення похідної керованого параметра, який зводиться до незначного збільшення розмаху перехідних процесів при збільшенні початкового значення похідної. Показано чутливість процесів, що відбуваються в досліджуваному об'єкті автоматизації, до початкового значення керованого параметра. Одержані результати наочно показують типовий для диференціального рівняння другого порядку характерний вигляд перехідних процесів, що характеризуються осциляціями навколо нового усталеного значення керованого параметра, які зменшуються протягом часу. Показано, що нове усталене значення керованого параметра не залежить від початкових значень, що наочно ілюструється отриманими результатами.

Результати параметричної ідентифікації свідчать про досить високу точність запропонованої моделі параметричної ідентифікації. В той же час, для одного із параметрів маємо відносно високу відносну похибку визначення, яка перевищує 12 %. Така похибка може свідчити про недостатньо малий крок інтегрування, а також про недостатню точність використовуваних формул наближеного диференціювання, що потребує подальших досліджень.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методичні вказівки з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І.Ш. Невлюдов, Р.В. Артюх, Н.П. Демська, В.В. Євсєєв, О.І. Филипенко, О.М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 50 с.

2. Положення про кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні [Електронний ресурс] : Наказ ХНУРЕ від 06 травня 2021 р. № 143. – Режим доступу: https://nure.ua/wpcontent/uploads/Main_Docs_NURE/143-vid-06.05.2021-pro-vvedennja-v-dijurishennja-vchenoi-radi-universitetu.pdf.

3. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» : навч. посіб. / за ред. І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова. Київ, 2016. – 320с.

4. ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація «Звіти у сфері науки і техніки». Структура правила оформлення. / В. Земцева; Ю. Поліщук, канд. фіз.-мат. наук; Р. Санченко, канд. техн. наук; Л. Шрамко; А. Ямчук (науковий керівник) ДП «УкрНДНЦ» від 22 червня 2015р. № 61 з 2017-07-01.

5. Vladyslav Onyshchenko, Yurii Romashov. Improved parametric identification for the linear automation objects based on the digitalised measurements / I st International Conference “Digital innovation & sustainable development 2024” Kharkiv, November 15, 2024. pp. 62-63.

6. Safiullah, Yogesh V. Hote, Robust load frequency control in interval power systems via reduced-order generalized active disturbance rejection control, Computers

and Electrical Engineering, Volume 120, Part B, 2024, 109788, ISSN 0045-7906.

7. M. Oulghelou, A. Ammar, R. Ayoub, Greedy identification of latent dynamics from parametric flow data, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Volume 432, Part A, 2024, 117332, ISSN 0045-7825.

8. Md. Ashiqul Islam Shuvo, Syed Mainul Hossain Joy, A data driven approach to assess the petrophysical parametric sensitivity for lithology identification based on ensemble learning, *Journal of Applied Geophysics*, Volume 222, 2024, 105330, ISSN 0926-9851.

9. Xiaolong He, Youngsoo Choi, William D. Fries, Jonathan L. Belof, Jiun-Shyan Chen, gLaSDI: Parametric physics-informed greedy latent space dynamics identification, *Journal of Computational Physics*, Volume 489, 2023, 112267, ISSN 0021-9991.

10. Leqia He, Chiara Castoro, Angelo Aloisio, Zhiyong Zhang, Giuseppe C. Marano, Amedeo Gregori, Changgen Deng, Bruno Briseghella, Investigation of a butterfly-arch stress-ribbon pedestrian bridge under ambient excitation: dynamic identification, FE modelling and parametric optimization, *Procedia Structural Integrity*, Volume 44, 2023, Pages 1594-1601, ISSN 2452-3216.

11. Abu Hasnat Mohammad Rubaiyat, Duy H. Thai, Jonathan M. Nichols, Meredith N. Hutchinson, Samuel P. Wallen, Christina J. Naify, Nathan Geib, Michael R. Haberman, Gustavo K. Rohde, Data-driven identification of parametric governing equations of dynamical systems using the signed cumulative distribution transform, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Volume 422, 2024, 116822, ISSN 0045-7825.

12. Yongjun Yang, Jiankang Zhong, Hanling Mao, Tao Yang, Ruixuan Wu, Xinxin Li, Yongchuan Lin, Parametric identification of ultrasonic guided wave aliasing modes based on dispersion effect, *Measurement*, Volume 218, 2023, 113162, ISSN 0263-2241.

13. L.I. Reyes, L.M. Pérez, L. Pedraja-Rejas, P. Díaz, J. Mendoza, J. Bragard, M.G. Clerc, D. Laroze, Characterization of Faraday patterns and spatiotemporal chaos in parametrically driven dissipative systems, *Chaos, Solitons & Fractals*, Volume 186,

2024, 115244, ISSN 0960-0779.

14. Zinat Javanmard, Jamshid Davtalab, Mansour Nikpour, Abbas Sivandipour, Integrating machine learning and parametric design for energy-efficient building cladding systems in arid climates: Sport hall in Kerman, *Journal of Building Engineering*, Volume 97, 2024, 110693, ISSN 2352-7102.

15. Bingwei Zhang, Xi Wu, Jin-San Cheng, Kexin Ding, Computing the intersection between a rational parametric curve and a rational parametric surface, *Computer Aided Geometric Design*, Volume 109, 2024, 102275, ISSN 0167-8396.

16. Jonas Dirr, Andre Siepmann, Daniel Gebauer, Rüdiger Daub, Evaluation metric for instance segmentation in robotic grasping of deformable linear objects, *Procedia CIRP*, Volume 120, 2023, Pages 726-731, ISSN 2212-8271.

17. Karam Almaghout, Andrea Cherubini, Alexandr Klimchik, Robotic co-manipulation of deformable linear objects for large deformation tasks, *Robotics and Autonomous Systems*, Volume 175, 2024, 104652, ISSN 0921-8890.

18. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни "Організація керування умовами праці" підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стиценко, Г. В. Пронюк, Н. М. Сердюк. – Харків, 2017. – 108 с.