

Технічні науки

УДК 681.5:519.876.5

Аллахверанов Рауф Юсіф огли

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри КІТАРБІ

Харківський національний університет радіоелектроніки

Allakhveranov Rauf

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Kharkiv National University of Radio Electronics

Невлюдова Вікторія Валеріївна

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри КІТАРБІ

Харківський національний університет радіоелектроніки

Nevliudova Viktoriia

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Kharkiv National University of Radio Electronics

Трифонов Олег Миколайович

магістрант

Харківського національного університету радіоелектроніки

Tryfonov Oleh

Master Student of the

Kharkiv National University of Radio Electronics

DOI: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2026-5-12098>

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ТА НЕПАРАМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

ANALYSIS OF METHODS FOR PARAMETRIC AND NONPARAMETRIC IDENTIFICATION OF AUTOMATION OBJECTS

Анотація. Розглянуто сучасні методи параметричної та непараметричної ідентифікації об'єктів автоматизації, які використовуються під час побудови математичних моделей технологічних процесів і технічних систем. Проведено аналіз існуючих підходів до визначення параметрів моделей, досліджено особливості статичної та динамічної ідентифікації, а також розглянуто можливості використання методу найменших квадратів для обробки експериментальних даних. Особливу увагу приділено порівнянню параметричних і непараметричних методів, визначено їх переваги, недоліки та сфери практичного застосування. Показано, що ефективність функціонування сучасних систем автоматизації значною мірою залежить від точності математичної моделі об'єкта, яка формується на основі результатів ідентифікації. Обґрунтовано доцільність використання сучасних інформаційних технологій та спеціалізованого програмного забезпечення для автоматизації процесів побудови моделей та оцінювання їх параметрів.

Ключові слова: ідентифікація, об'єкт автоматизації, параметрична ідентифікація, непараметрична ідентифікація, математична модель, метод найменших квадратів, динамічна система, автоматичне керування.

Sumarry. The paper considers modern methods of parametric and nonparametric identification of automation objects used for constructing mathematical models of technological processes and technical systems. Existing approaches to parameter estimation are analyzed, and the features of static and dynamic identification are investigated. Particular attention is paid to the least

squares method as one of the most common techniques for processing experimental data. The advantages and limitations of parametric and nonparametric identification methods are compared, and their application areas in automation systems are determined. It is shown that the efficiency of modern automation systems directly depends on the adequacy of mathematical models obtained during the identification process. The use of modern software tools and computer technologies significantly improves the quality and speed of identification procedures.

Key words: *Identification, Automation Object, Parametric Identification, Nonparametric Identification, Mathematical Model, Least Squares Method, Dynamic System, Automatic Control.*

Вступ. Прогрес автоматизації виробничих процесів, робототехнічних комплексів, кіберфізичних систем та цифрових технологій зумовлює необхідність створення високоточних математичних моделей об'єктів керування. Саме математична модель є основою аналізу, проєктування, оптимізації та подальшого синтезу систем автоматичного керування. Достовірність результатів моделювання безпосередньо визначає ефективність роботи автоматизованої системи, її стійкість, точність регулювання та можливість прогнозування поведінки об'єкта в різних режимах функціонування.

У практиці автоматизації математичні моделі далеко не завжди можуть бути отримані виключно аналітичними методами. Реальні технологічні процеси характеризуються складною структурою, нелінійністю, впливом випадкових збурень, невизначеністю параметрів та зміною характеристик у процесі експлуатації. Саме тому дедалі більшого значення набувають методи ідентифікації, які дозволяють визначати характеристики об'єкта безпосередньо за результатами експериментальних досліджень.

Ідентифікація об'єктів автоматизації є одним із ключових напрямів сучасної теорії автоматичного керування. Вона забезпечує визначення параметрів або структури математичної моделі за експериментальними даними та дозволяє отримувати моделі, максимально наближені до реальної поведінки об'єкта. Отримані результати використовуються під час синтезу регуляторів, оптимізації технологічних процесів, створення цифрових двійників, прогнозування технічного стану обладнання та побудови інтелектуальних систем керування.

Особливе місце серед сучасних методів займають параметрична та непараметрична ідентифікація. Параметричний підхід передбачає використання математичної моделі із заздалегідь відомою структурою та визначення її невідомих параметрів. Непараметричні методи, навпаки, дозволяють досліджувати поведінку об'єкта без попереднього припущення щодо структури математичної моделі, що значно розширює можливості їх практичного застосування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика ідентифікації об'єктів автоматизації протягом останніх десятиліть є одним із провідних напрямів розвитку автоматичного керування та комп'ютерного моделювання. Значний внесок у розвиток теоретичних основ параметричної ідентифікації зроблено у працях, присвячених математичному моделюванню, оцінюванню параметрів динамічних систем та статистичній обробці експериментальних даних. У сучасних дослідженнях особлива увага приділяється підвищенню точності математичних моделей, зменшенню впливу випадкових завад та автоматизації процедур оцінювання параметрів.

Паралельно активно розвиваються непараметричні методи ідентифікації, які використовують експериментальні перехідні, імпульсні або частотні характеристики без необхідності попереднього визначення структури математичної моделі. Такі підходи широко застосовуються під

час дослідження складних технологічних процесів, характеристики яких змінюються в часі або залежать від великої кількості зовнішніх факторів.

Суттєвий розвиток комп'ютерної техніки та спеціалізованого програмного забезпечення значно розширив можливості застосування сучасних методів ідентифікації. Використання математичних пакетів, засобів цифрової обробки сигналів та технологій комп'ютерного моделювання дозволяє значно скоротити тривалість експериментальних досліджень, підвищити точність оцінювання параметрів моделей та автоматизувати процес побудови математичних моделей об'єктів автоматизації.

Разом із тим залишаються актуальними питання вибору найбільш ефективного методу ідентифікації для конкретного класу об'єктів, оцінювання достовірності отриманих моделей та забезпечення їх адекватності реальним технологічним процесам.

Класифікація задач ідентифікації об'єктів автоматизації. Ідентифікація об'єктів автоматизації являє собою процес побудови математичної моделі об'єкта на основі аналізу його вхідних і вихідних сигналів, експериментальних досліджень та статистичної обробки отриманих результатів. Основною метою ідентифікації є одержання моделі, яка з необхідною точністю відображає поведінку реального об'єкта в заданому діапазоні режимів функціонування.

Залежно від поставленої задачі розрізняють структурну та параметричну ідентифікацію. Під час структурної ідентифікації визначається форма математичної моделі, кількість змінних, порядок диференціальних рівнянь або структура передавальної функції. Параметрична ідентифікація передбачає визначення числових значень параметрів уже вибраної математичної моделі. У практиці автоматизації ці два етапи взаємопов'язані, оскільки точність отриманої моделі залежить як від правильності вибору її структури, так і від достовірності оцінених

параметрів.

За характером досліджуваних процесів задачі ідентифікації поділяють на статичні та динамічні. Статична ідентифікація використовується для визначення залежностей між усталеними значеннями вхідних і вихідних величин. Такий підхід застосовується під час дослідження технологічних процесів, у яких перехідні явища практично не впливають на кінцевий результат. Динамічна ідентифікація враховує зміну параметрів у часі та дозволяє досліджувати перехідні процеси, часові затримки, інерційність і коливальні властивості об'єктів автоматизації.

Важливим напрямом є також класифікація методів за способом отримання експериментальної інформації. У пасивній ідентифікації використовуються дані, отримані під час нормальної експлуатації обладнання без спеціального втручання у технологічний процес. Активна ідентифікація передбачає подачу спеціально сформованих тестових сигналів, що дає можливість отримати більш повну інформацію про властивості об'єкта та підвищити точність математичної моделі.

Параметрична ідентифікація об'єктів автоматизації.
Параметрична ідентифікація є одним із найпоширеніших методів побудови математичних моделей технічних систем. Її особливістю є використання моделі із заздалегідь визначеною структурою, параметри якої уточнюються за результатами експериментальних досліджень. Такий підхід широко застосовується під час моделювання технологічних процесів, систем автоматичного керування, мехатронних комплексів, робототехнічних систем та енергетичного обладнання.

Процес параметричної ідентифікації складається з декількох взаємопов'язаних етапів. На першому етапі виконується аналіз фізичних процесів, що відбуваються в об'єкті, та формується математична модель. Далі проводяться експериментальні дослідження, під час яких

реєструються вхідні та вихідні сигнали. Отримані дані підлягають попередній обробці, фільтрації випадкових завад і статистичному аналізу. На завершальному етапі визначаються параметри моделі та здійснюється перевірка її адекватності шляхом порівняння результатів моделювання з експериментальними даними.

Основними перевагами параметричної ідентифікації є висока точність отримуваних моделей, можливість використання відомих фізичних закономірностей, відносно невелика кількість параметрів та ефективне використання сучасних чисельних методів оптимізації. Разом із тим застосування параметричного підходу потребує правильного вибору структури моделі, оскільки навіть незначна помилка на цьому етапі може суттєво погіршити якість результатів.

Сучасні системи автоматизації дедалі частіше використовують параметричну ідентифікацію в адаптивних системах керування, де параметри математичної моделі можуть уточнюватися безпосередньо під час роботи обладнання. Це дозволяє компенсувати вплив старіння обладнання, зміну характеристик технологічного процесу та дію зовнішніх збурень.

Непараметрична ідентифікація об'єктів автоматизації. На відміну від параметричної, непараметрична ідентифікація не потребує попереднього визначення структури математичної моделі. Основною метою є безпосереднє отримання функціональних залежностей між вхідними та вихідними сигналами на основі експериментальних даних. Такий підхід є особливо ефективним під час дослідження складних нелінійних систем, математичний опис яких є невідомим або надто складним.

У непараметричній ідентифікації широко використовуються перехідні характеристики, імпульсні характеристики, частотні характеристики, кореляційні функції та спектральний аналіз сигналів.

Отримані залежності дозволяють оцінити динамічні властивості об'єкта, визначити його часові характеристики та виконати подальший синтез систем автоматичного керування.

Важливою перевагою непараметричного підходу є універсальність застосування. Він практично не залежить від фізичної природи об'єкта та може використовуватися для дослідження механічних, електричних, теплотехнічних, хімічних, біотехнічних та інформаційних систем. Завдяки цьому непараметрична ідентифікація широко використовується під час первинного аналізу нових технологічних процесів, коли інформація про внутрішню структуру об'єкта є недостатньою.

Разом із тим отримані непараметричні характеристики не завжди придатні для безпосереднього використання під час математичного моделювання. У багатьох випадках вони є лише початковою інформацією для подальшої побудови параметричних моделей. Саме тому сучасні програмні комплекси часто поєднують параметричні та непараметричні методи, що дозволяє підвищити достовірність моделей та скоротити тривалість їх побудови.

Порівняння параметричної та непараметричної ідентифікації свідчить, що кожен із підходів має власну область ефективного застосування. Параметрична ідентифікація забезпечує високу точність за умови правильно вибраної структури моделі, тоді як непараметричні методи характеризуються більшою універсальністю та меншою залежністю від попередніх припущень щодо властивостей об'єкта. У сучасній практиці автоматизації найкращих результатів досягають шляхом комплексного використання обох підходів, що дозволяє максимально повно враховувати особливості реальних технологічних процесів.

Метод найменших квадратів у задачах параметричної ідентифікації. Одним із найбільш поширених методів оцінювання параметрів математичних моделей є метод найменших квадратів, який

широко застосовується під час параметричної ідентифікації об'єктів автоматизації. Його популярність пояснюється високою точністю отриманих результатів, математичною обґрунтованістю та можливістю ефективної комп'ютерної реалізації навіть для моделей великої розмірності.

Основна ідея методу полягає у визначенні таких параметрів математичної моделі, за яких сума квадратів відхилень між експериментальними значеннями вихідної величини та значеннями, отриманими за допомогою моделі, набуває мінімального значення. Таким чином забезпечується найбільш точне узгодження математичної моделі з експериментальними даними.

Нехай експериментально отримано множину вимірювань, що складається з пар значень вхідних та вихідних величин. Якщо математична модель описується функцією:

$$y = F(x, \theta), \quad (1)$$

де x – вектор вхідних величин;

y – вихідна величина;

θ – вектор невідомих параметрів математичної моделі.

Тоді функція похибки, яка використовується в методі найменших квадратів, визначається співвідношенням:

$$J(\theta) = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i), \quad (2)$$

де y_i – експериментально виміряне значення вихідної величини;

$\hat{y}_i$ – значення вихідної величини, отримане за математичною моделлю;

n – кількість експериментальних вимірювань.

Оптимальні значення параметрів θ визначаються шляхом мінімізації функції похибки $J(\theta)$. У результаті знаходиться така сукупність параметрів математичної моделі, для якої сумарне квадратичне відхилення між експериментальними та розрахунковими значеннями є мінімальним. Для лінійних моделей задача має аналітичний розв'язок, тоді як для нелінійних моделей використовуються чисельні ітераційні методи оптимізації.

Метод найменших квадратів забезпечує високу стійкість до випадкових похибок вимірювань за умови їх нормального статистичного розподілу. Саме тому він широко використовується під час побудови математичних моделей технологічних процесів, автоматичного налаштування регуляторів, визначення характеристик електромеханічних систем, робототехнічних комплексів та інших об'єктів автоматизації.

Сучасні програмні комплекси Matlab, Scilab, Python (NumPy, SciPy), LabVIEW та спеціалізовані SCADA-системи містять реалізації алгоритмів методу найменших квадратів, що дозволяє автоматизувати процедури обробки експериментальних даних та суттєво скоротити час побудови математичних моделей.

Особливості статичної та динамічної ідентифікації. Практична реалізація методів ідентифікації значною мірою залежить від характеру досліджуваного процесу. Якщо об'єкт працює переважно в усталених режимах, достатньою є статична ідентифікація, яка дозволяє визначити функціональну залежність між вхідними та вихідними параметрами. У цьому випадку математична модель описує лише стаціонарні режими роботи без урахування часових змін.

На відміну від статичної, динамічна ідентифікація враховує зміну стану об'єкта в часі. Саме цей підхід використовується під час дослідження більшості сучасних систем автоматизації, оскільки практично всі технологічні процеси характеризуються наявністю перехідних режимів, інерційності та часових затримок.

Під час динамічної ідентифікації визначаються такі характеристики, як коефіцієнт підсилення, постійні часу, коефіцієнти демпфування, власні частоти, транспортне запізнення та інші параметри, що визначають поведінку системи у перехідних режимах. Для цього використовуються реакції об'єкта на ступінчасті, імпульсні або гармонічні вхідні сигнали.

Суттєвою особливістю динамічної ідентифікації є необхідність високої точності вимірювання часових характеристик. Навіть незначні похибки вимірювань можуть призвести до значного відхилення параметрів моделі. Саме тому сучасні системи збору даних використовують високоточні аналого-цифрові перетворювачі, цифрову фільтрацію сигналів та алгоритми статистичної обробки результатів.

Важливою складовою процесу ідентифікації є перевірка адекватності отриманої моделі. Для цього результати математичного моделювання порівнюють із незалежними експериментальними даними. Якщо відхилення не перевищують допустимих значень, модель може використовуватися для подальшого синтезу систем автоматичного керування, оптимізації параметрів регуляторів та прогнозування поведінки об'єкта в різних режимах експлуатації.

Практичне застосування сучасних методів ідентифікації.
В промисловості методи параметричної та непараметричної ідентифікації використовуються практично на всіх етапах життєвого циклу систем автоматизації. На етапі проєктування вони забезпечують побудову математичних моделей технологічних процесів та дозволяють оцінити майбутні характеристики системи ще до створення дослідного зразка. Під час введення обладнання в експлуатацію методи ідентифікації використовуються для налаштування регуляторів, визначення оптимальних параметрів систем автоматичного керування та перевірки відповідності реальних характеристик проєктним.

Особливої актуальності методи ідентифікації набули у концепції

цифрових двійників (Digital Twin), де математична модель постійно уточнюється на основі поточних експериментальних даних. Це дозволяє прогнозувати технічний стан обладнання, своєчасно виявляти відхилення від нормального режиму роботи, виконувати прогнозне технічне обслуговування та мінімізувати ризик аварійних ситуацій.

Подальший розвиток методів ідентифікації пов'язаний із застосуванням технологій штучного інтелекту, машинного навчання, великих даних та адаптивних алгоритмів обробки інформації. Поєднання класичних математичних методів із сучасними інформаційними технологіями забезпечує істотне підвищення точності моделей, скорочення часу їх побудови та розширення можливостей автоматизації складних технічних систем.

Порівняльний аналіз параметричної та непараметричної ідентифікації. Аналіз сучасних методів ідентифікації свідчить, що універсального підходу, який був би однаково ефективним для всіх класів об'єктів автоматизації, не існує. Вибір конкретного методу визначається фізичною природою досліджуваного процесу, обсягом наявної експериментальної інформації, вимогами до точності математичної моделі та умовами її подальшого використання.

Параметрична ідентифікація характеризується високою точністю за умови правильного вибору структури математичної моделі. Вона забезпечує можливість безпосереднього визначення фізично інтерпретованих параметрів, що суттєво спрощує аналіз поведінки системи та подальший синтез алгоритмів автоматичного керування. Крім того, параметричні моделі є компактними, потребують меншого обсягу пам'яті та ефективно використовуються під час комп'ютерного моделювання складних технічних систем.

Разом із тим ефективність параметричної ідентифікації значною мірою залежить від правильності вибору структури моделі. Якщо

математична модель не відповідає реальним фізичним процесам, навіть найбільш точне оцінювання параметрів не забезпечить необхідної адекватності результатів. Саме тому побудова параметричних моделей потребує глибокого аналізу фізичних закономірностей функціонування об'єкта автоматизації.

Непараметрична ідентифікація є більш універсальною, оскільки не вимагає попереднього формування структури математичної моделі. Вона дозволяє швидко отримати інформацію про динамічні властивості системи, використовуючи лише результати експериментальних вимірювань. Це робить її особливо ефективною під час дослідження складних багатофакторних процесів, нелінійних систем, а також нових технологічних об'єктів, математичний опис яких ще недостатньо вивчений.

Разом із перевагами непараметричні методи мають певні обмеження. Отримані експериментальні характеристики не завжди можуть бути безпосередньо використані для синтезу регуляторів або прогнозування поведінки системи. У багатьох випадках результати непараметричної ідентифікації використовуються як початкові дані для подальшої побудови параметричних моделей.

Практика проєктування сучасних систем автоматизації показує, що найвища ефективність досягається шляхом комплексного використання параметричних та непараметричних методів. Непараметрична ідентифікація забезпечує попередній аналіз властивостей об'єкта та формування початкової інформації, після чого параметрична ідентифікація дозволяє побудувати компактну математичну модель із високою точністю визначення її параметрів. Такий комбінований підхід забезпечує оптимальне співвідношення між точністю, швидкістю та обчислювальною складністю процедур моделювання.

Особливого значення комплексні методи ідентифікації набувають у сучасних кіберфізичних системах, концепції цифрових двійників,

інтелектуальних виробництвах та системах прогнозного технічного обслуговування. У цих сферах математична модель повинна безперервно адаптуватися до зміни параметрів технологічного процесу, що потребує використання адаптивних алгоритмів ідентифікації, засобів машинного навчання та технологій штучного інтелекту.

Висновки. Проведено комплексний аналіз сучасних методів параметричної та непараметричної ідентифікації об'єктів автоматизації. Показано, що ідентифікація є одним із ключових етапів побудови математичних моделей, необхідних для аналізу, синтезу та оптимізації систем автоматичного керування.

Розглянуто особливості класифікації задач ідентифікації, визначено відмінності між структурною, параметричною, непараметричною, статичною та динамічною ідентифікацією. Встановлено, що параметрична ідентифікація забезпечує високу точність математичних моделей за умови правильного вибору їх структури, тоді як непараметричні методи характеризуються універсальністю та можливістю дослідження складних технічних систем без попереднього визначення математичної моделі.

Досліджено можливості застосування методу найменших квадратів як одного з найбільш ефективних інструментів оцінювання параметрів моделей. Показано, що використання сучасних алгоритмів статистичної обробки експериментальних даних та спеціалізованого програмного забезпечення істотно підвищує точність ідентифікації та скорочує тривалість побудови математичних моделей.

Проведений порівняльний аналіз свідчить, що найбільш перспективним напрямом розвитку сучасних систем автоматизації є комплексне використання параметричних і непараметричних методів у поєднанні з адаптивними алгоритмами, цифровими двійниками, технологіями штучного інтелекту та машинного навчання. Такий підхід забезпечує підвищення точності моделей, покращення якості

автоматичного керування, скорочення витрат на експлуатацію обладнання та створює передумови для розвитку інтелектуальних автоматизованих виробництв нового покоління.

Література

1. Boutalis Y., Theodoridis D., Kottas T., Christodoulou M. A. *System Identification and Adaptive Control: Theory and Applications of the Neurofuzzy and Fuzzy Cognitive Network Models*. Cham ; Heidelberg ; New York ; Dordrecht ; London : Springer, 2014. 315 p.
2. Heij C., Ran A., van Schagen F. *Introduction to Mathematical Systems Theory: Linear Systems, Identification and Control*. Basel ; Boston ; Berlin : Birkhäuser Verlag, 2007. 174 p.
3. Ljung L. *System Identification: Theory for the User*. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall PTR, 1999. 628 p.
4. Graupe D. *Identification of Systems*. Malabar : Krieger Publishing Company, 1976. 276 p.
5. Wang L., Garnier H. (Eds.). *System Identification, Environmental Modelling, and Control System Design*. London ; Dordrecht ; Heidelberg ; New York : Springer, 2012. 673 p.
6. Eykhoff P. *System Identification: Parameter and State Estimation*. London : John Wiley & Sons, 1974. 555 p.
7. Speedy C. B., Brown R. F., Goodwin G. C. *Control Theory: Identification and Optimal Control*. Edinburgh : Oliver & Boyd, 1970. 293 p.