



Левчук Ігор Леонідович

Кандидат технічних наук, доцент.
Доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та автоматизації ДВНЗ УДХТУ.
Декан факультету комп'ютерних наук та інженерії ДВНЗ УДХТУ



Манко Геннадій Іванович

Кандидат технічних наук, доцент.
Доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та автоматизації ДВНЗ УДХТУ



Тришкін Владислав Якович

Кандидат технічних наук, доцент.
Доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та автоматизації ДВНЗ УДХТУ



Корсун Валерій Іванович

Доктор технічних наук, професор.
Професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій та автоматизації ДВНЗ УДХТУ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

І. Л. Левчук, Г. І. Манко, В. Я. Тришкін, В. І. Корсун

ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ УПРАВЛІННЯ

Монографія

Дніпро 2019

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ»**

І. Л. Левчук, Г. І. Манко, В. Я. Тришкін, В. І. Корсун

**ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА
ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ
УПРАВЛІННЯ**

Монографія

Дніпро

2019

УДК 62.505

Л38

Рецензенти: Жученко А.І., д.т.н., проф., зав. кафедрою автоматизації хімічних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» ім. Ігоря Сікорського;
Гаврилбук В.І., д.ф.-м.н., проф., зав. кафедрою автоматизації та телекомунікації Дніпровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна;
Косолап А.І., д.ф.-м.н., проф., зав. кафедрою спеціалізованих комп'ютерних систем ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет».

Друкуються за рішенням Вченої ради

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

{протокол № 3 від 29.03.2019 р.}

Левчук, І. Л.

Л38 Теорія і практика ідентифікації об'єктів управління : Монографія / І. Л. Левчук, Г. І. Манко, В. Я. Тришкін, В. І. Корсун. – Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2019. – 203 с.

ISBN 978-617-7478-46-0

Розглядаються теоретичні і практичні питання створення математичних моделей об'єктів управління.

Досліджується використання принципів симетрії при розробці методів адаптивної ідентифікації. Викладаються особливості методів ідентифікації для синтезу математичних моделей хіміко-технологічних об'єктів управління. Розглядаються принципи використання інформаційного підходу в задачах ідентифікації. Наводяться алгоритми і методи автоматизації процесів ідентифікації з використанням засобів комп'ютерної техніки.

Монографія призначена для фахівців проектних і науково-дослідницьких організацій, а також буде корисною професорсько-викладацькому складу, аспірантам та студентам технічних заходів вищої освіти.

УДК 62.505

ISBN 978-617-7478-46-0

© Левчук, І.Л., Манко Г.І., Тришкін В.Я., Корсун В.І., 2019

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень і термінів .5	
Вступ	6
Розділ 1. Сучасний стан проблеми ідентифікації об'єктів управління .9	
1.1 Загальні питання ідентифікації.....	9
1.2 Класифікація методів ідентифікації.....	21
1.3 Структурна ідентифікація динамічних систем.....	27
1.4 Параметрична ідентифікація динамічних систем	31
1.5 Непараметрична ідентифікація.....	32
1.7 Методи оцінки адекватності математичних моделей	42
1.8 Література до розділу 1	48
Розділ 2. Використання принципів симетрії для адаптивної ідентифікації.....	59
2.1 Принцип симетрії.....	59
2.2 Метод попарного зближення параметрів моделей	60
2.3 Метод попарно-зустрічного руху параметрів моделей	70
2.4 Методи узагальненого входу	77
2.5 Метод багатокрокової ідентифікації квазістаціонарних об'єктів	97
2.6 Література до розділу 2	99
Розділ 3. Специфіка ідентифікації хіміко-технологічних об'єктів.....	102
3.1 Особливості моделювання процесів хімічної технології ...	102
3.2 Моделювання вакуум-випарних установок.....	104
3.3 Моделювання процесу каталітичного риформінгу.....	110
3.4 Моделювання процесу одержання сірчастого ангідриду ..	127
3.5 Моделювання процесу контактного окислювання сірчастого ангідриду в сірчаній.....	131
3.6 Моделювання процесу початкової етеріфікації у виробництві тетрабутокситану	140
3.7 Моделювання процесу багатоконпонентної ректифікації з урахуванням рухомих керуючих впливів	150
3.8 Література до розділу 3	162
Розділ 4. Використання інформаційного підходу в задачах ідентифікації.....	165

4.1 Використання концепції невизначеності	165
4.2 Інформаційний критерій адекватності математичної моделі технологічного процесу	167
4.3 Інформаційна оцінка точності моделювання детермінованих процесів	170
4.4 Використання інформаційного підходу при ідентифікації стохастичних моделей.....	175
4.5 Література до розділу 4.....	183
Розділ 5. Використання комп'ютерних засобів для ідентифікації об'єктів управління	186
5.1 Імітаційне середовище моделювання об'єктів управління	186
5.2 Комбінований ітераційно-нейромережевий алгоритм ідентифікації об'єктів управління.....	191
5.3 Автоматизація процесів ідентифікації динамічних об'єктів управління.....	197
5.4 Література до розділу 5.....	202
Висновки	203

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

BDE – Borland Database Engine

GUI – Graphical User Interface

АСДАУ – автоматизована система дослідження алгоритмів управління

АСК ТП – автоматизована система керування технологічними процесами

ВВГ – воденьвмісний газ

ВВУ – вакуум-випарна установка

ІХМ – інтегральна характеристика мінливості

ММ – математична модель

НМ – нейронна мережа

НС – нечітка система

ОУ – об'єкт управління

ПФ – передатна функція

СІМ – система імітаційного моделювання

СКВ – середньоквадратичного відхилення

ХТП – хіміко-технологічний процес

ХТС – хіміко-технологічна система

ВСТУП

Essentially, all models are wrong, but some are useful.

George E. P. Box

Синтез ефективно працюючих систем управління неможливий без наявності у розробника якісної моделі об'єкта управління. І кожний розробник таких систем неодмінно зустрічається з необхідністю того, що зветься ідентифікацією.

Поняття ідентифікації є доволі широким. І дефініцій цього терміну є багато, оскільки його застосовують у різноманітних сферах і галузях. Відповідно використовуються словосполучення «ідентифікація особистості», «ідентифікація національності», «судово-медична ідентифікація», «ідентифікація радіочастотна», «ідентифікація тварин» тощо. Згідно тлумачним словникам, ідентифікація (від лат. *identifico* — ототожнюю), визнання тотожності, ототожнення об'єктів, пізнання.

Один з фундаторів теорії нечітких множин L. Zadeh стверджував: «Ідентифікація полягає у відшукуванні по вхідних і вихідних сигналах деякої системи еквівалентної їй системи з деякого заданого класу»¹. Нас, звичайно, у першу чергу це поняття цікавить стосовно процесів і систем управління. Згідно ДСТУ 2226-93 ідентифікація – процес установалення відповідності між об'єктом та його ідентифікатором.

Проте і в царині управління використовуються різні словосполучення: «ідентифікація об'єктів», «ідентифікація моделей», «ідентифікація параметрів моделей», «ідентифікація динаміки». Мабуть, узагальнюючим є поняття «ідентифікація об'єктів управління». Більшість дослідників розуміють це як побудову математичної моделі об'єкта. То ж виникає проблема виявлення змісту поняття моделі.

P. Eukhoff дає наступне визначення: «Ми визначимо модель як відображення істотних сторін реальної системи (або конструйованої

¹ Zadeh, L.A., From Circuit Theory to System Theory / L.A. Zadeh // Proc. IRE. – 1962. – Vol. 50. – Pp. 856—865

системи), що в зручній формі віддзеркалює інформацію про систему»². Згідно Encyclopaedia Britannica, математична модель – це математичне представлення реальності. Звучить надто узагальнено. Більш вдалим, на наш погляд, є тлумачення, яке дає А. Neumaier: «Математичне моделювання - це мистецтво перекладу проблем з прикладної області в прийнятні математичні формулювання, теоретичний і чисельний аналіз яких дає уявлення, відповіді та рекомендації, корисні для початкової задачі»³.

Від математичної моделі вимагається, з одного боку, якомога більш точний опис явищ, що відбуваються у модельованому об'єкті, з іншого, математичний апарат не повинен бути надто складним, а обчислення за моделлю не повинні вимагати значних витрат часу.

Звичайно, кожен об'єкт має багато аспектів, для опису яких потрібен свій окремий математичний апарат. Тому і з'являється потреба в ідентифікації структури і параметрів, статички і динаміки об'єктів управління.

Автори усвідомлюють те, що станом на сьогодні вже опублікована безліч наукових праць, присвячених проблемам ідентифікації. Навіть для того, щоб коротко ознайомитись з усіма ними, може не вистачити життя. Узнявши на себе сміливість ошчасливити наукову спільноту ще одним твором, ми поставили собі за мету:

- дати короткий огляд найбільш, на наш погляд, необхідних для уясування проблеми наукових публікацій;
- дослідити застосування принципів симетрії до побудови методів і алгоритмів адаптивної ідентифікації багатовимірних стаціонарних і квазістаціонарних об'єктів управління;
- запропонувати придатні для практичного використання математичні моделі ряду хіміко-технологічних процесів;
- представити науковій спільноті пропозицію ввести у

² Эйкхофф, П. Основы идентификации систем управления / П. Эйкхофф. – М. : Мир, 1975. – 680 с.

³ A. Neumaier, *Mathematical Model Building*, Chapter 3 in: *Modeling Languages in Mathematical Optimization*. – Boston : Kluwer, 2004. – Pp. 37–43.

використання новий інформаційний підхід до розв'язання задач ідентифікації;

- ознайомити фахівців з деякими нашими розробками.

Книга містить п'ять розділів, у яких розкриваються викладені вище задачі. В кінці кожного розділу наведений перелік використаних літературних джерел, ознайомлення з якими дасть можливість читачеві поширити бачення проблем, що тут розглядаються.

Книга розрахована на увагу інженерних і наукових фахівців, які займаються розробкою і дослідженням систем управління. Крім того, представлені тут матеріали можуть бути використані в навчальному процесі освітніх закладів: викладачами для підготовки лекцій і практичних занять, студентами для поглиблення знань, аспірантами і пошуковувачами вчених звань для роботи над дисертаціями.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ УПРАВЛІННЯ

1.1 Загальні питання ідентифікації

Задачею ідентифікації системи, або просто ідентифікації, є побудова оптимальної в сенсі заданих критеріїв математичної моделі цієї системи, яка враховує випадковість спостережень, за результатами вимірювань вхідних та вихідних змінних, тобто побудова формалізованого математичного представлення системи [1]. Задачі ідентифікації прийнято розрізняти у вузькому та широкому сенсі. У вузькому сенсі задача ідентифікації полягає в оцінці параметрів та стану системи за результатами спостережень над вхідними та вихідними змінами. При цьому відомі структура системи і заданий клас моделей, до яких відноситься дана система. При ідентифікації в широкому сенсі вирішуються такі задачі, як вибір структури системи та завдання класу моделей, оцінка ступеня стаціонарності та лінійності системи, вибір інформативних змінних та ін.

Теорія ідентифікації динамічних об'єктів широко представлена в науковій літературі. Значний вклад внесли Р. Ейкгофф, А. Седж, І. Задех, А.М. Дейч, В.В. Кафаров, Н.С. Райбман, Я.З. Ципкін та ін.

Загальні питання філософії та методології процесів ідентифікації і адекватності математичних і комп'ютерних моделей розглянуті в [2]. Окрема увага приділена питанням оцінки невизначеності, яка ускладнює процес обґрунтування правильності моделей, створюючи ситуацію, в якій ані модельована, ані спостережувана поведінка системи не відомі з упевненістю.

Н.С. Райбман виконав огляд методів ідентифікації, розроблених в Інституті проблем управління [3]. Це, переважно, теоретичні розробки. Особливу увагу в ньому приділено АСІ – адаптивним системам управління з ідентифікатором у колі зворотного зв'язку.

У статті [4] отримані аналітичні вирази, що дозволяють визначити динамічні характеристики об'єктів управління по параметрах перехідних функцій замкнутих систем. Проте автоматизація такого процесу вкрай затруднена.

У роботі [5] розглянуті особливості ідентифікації об'єктів управління засобами Toolbox PID Tuner у середовищі MATLAB. Треба зазначити, що розглянутий підхід накладає ряд обмежень. Наприклад, вибір структури передавальної функції обмежений такими варіантами:

один дійсний корінь (перший порядок);

два дійсні корені (другий порядок);

два комплексно зв'язаних кореня (другий порядок);

два комплексно зв'язаних кореня і один дійсний корінь (третій порядок).

Указується, що автоматична ідентифікація не завжди дає задовільні результати.

Ряд публікацій присвячений проблемам оцінки адекватності моделей динамічних об'єктів. О.М. Трунов [6] дає огляд робіт, присвячених пошуку загальних закономірностей добору критеріїв встановлення адекватності, в яких використовуються для цього різні поняття та способи кількісного виміру, а також різні міри близькості моделі до ідентифікованого об'єкта. Автор справедливо констатує, що вибір практичної реалізації процесу апроксимації суттєво ускладнюється у силу відсутності єдиного способу виміру адекватності, і пропонує використання «єдиного виразу оцінки адекватності, що дозволяє враховувати декілька факторів впливу та запропонувати вирази для їх розрахунку». Пропонується як оцінку нижньої границі величини адекватності використовувати показник ефективності процесу створення моделі, зворотно пропорційний до середньоквадратичного відхилення (СКВ) моделі від експериментальних значень. Такий підхід не можна вважати зовсім коректним, оскільки ідентифікація звичайно відбувається методом найменших квадратів, тобто і отримання моделі і її оцінка здійснюються однаково – з визначенням квадрату різниці вихідних сигналів об'єкта і моделі. До того ж вибір критичного значення оцінки точності моделі методом найменших квадратів пов'язаний, як правило, з цільовим призначенням моделі, при цьому однозначно не вирішується.

Дисперсійні методи оцінки адекватності відомі з середини минулого сторіччя. Вони отримують подальший розвиток і у наш час. Е. П. Черногоров [13] визначає, що модель системи дозволяє нам

моделювати деяку генеральну сукупність. Маючи окремий експеримент, відтворюючий "життя" деякої системи, ми можемо стверджувати, що маємо окрему реалізацію цієї генеральної сукупності. На моделі, відтворюючи умови експерименту, ми також отримуємо окрему реалізацію генеральної сукупності. Кількісна оцінка адекватності полягає в перевірці статистичних гіпотез про приналежність цих реалізацій одній і тій же генеральній сукупності.

Треба зауважити, що використання дисперсійних критеріїв адекватності строго справедливо лише для випадку нормального розподілу ймовірностей значень вихідних змінних моделі. На практиці закон розподілу вихідної змінної може істотно відрізнятися від нормального. В цьому випадку виникає значна погрішність при розрахунку міри точності моделі. Крім того, дисперсійні оцінки типу критерію Фішера [7] не можуть бути використані для порівняльної оцінки точності моделей, побудованих для об'єктів, які істотно відрізняються один від одного.

В [8] розглянуті моделі детермінованих і стохастичних об'єктів та розглянуті основні методи їх ідентифікації. Матеріали стосовно параметричної ідентифікації динамічних систем орієнтовані на отримання імітаційних математичних моделей на основі використання експериментально-аналітичного методу з проведенням активних чи пасивних фізичних експериментів в досліджуваному об'єкті. Розглянуті питання побудови та ідентифікації математичних моделей з використанням апарату матричних операторів чи спектральних методів в ортогональних базисах різноманітних функцій.

І. В. Бурлаєм і М. А. Тітовим на основі концепції обернених задач динаміки з використанням регуляційних процедур вирішена задача ідентифікації параметрів нелінійних об'єктів з використанням апріорної інформації про ймовірнісні характеристики шумів вимірювань і збурень [9]. Запропонований алгоритм стійкий до погрішностей вхідних даних і допустимий для сучасних засобів вимірювальної техніки.

Л. А. Нестеров в своїй статті [10] розглянув метод дослідження динамічних властивостей об'єктів автоматичного регулювання шляхом зняття і обробки перехідної характеристики, що дозволяє визначити

основні показники, які визначають його динамічні властивості. На основі цих показників проводиться вибір регулятора і корегуючих ланок, які забезпечують стійкість і високу якість процесу регулювання.

Першим систематичним викладенням різноманітних алгоритмів і способів ідентифікації є книга одного з основоположників теорії ідентифікації професора П. Ейкхоффа [11]. У книзі подано основні поняття моделі, постановки завдань ідентифікації, викладені базові підходи до вирішення завдань побудови моделей для різних класів об'єктів, способів їх опису, використовуваних сигналів при різних підходах і алгоритмах ідентифікації. Дана книга містить багато аспектів теорії ідентифікації і по теперішній час є актуальною при вивченні проблем побудови і всебічного аналізу моделей процесів або систем.

В [12] розглянуті основні поняття про моделі, процеси ідентифікації, постановку задач побудови моделі, приведені класифіковані за базовими ознаками основні типи моделей об'єктів. Також розглянута актуальна задача оцінювання стану об'єкта, який в подальшому може використовуватися для синтезу управляючого впливу.

Рутковським А.Л. [14] розглянута задача ідентифікації об'єктів управління в замкнутих системах регулювання, які функціонують в режимі нормальної експлуатації при наявності збурюючих впливів. Даний метод дозволяє при відомих структурах моделей об'єкта і формуючого фільтру збурень на основі поточної інформації про вхідну змінну оцінювати їх невідомі параметри. У статті розглядається задача оцінки параметрів лінійного різницевого рівняння з багатовимірним входом при наявності шумів спостереження у вхідних і вихідних сигналах. Це завдання відрізняється від стандартної задачі регресійного оцінювання, запропоновано новий критерій оцінювання на основі відносин двох квадратичних форм, який узагальнює стандартний метод найменших квадратів і дозволяє отримати спроможні оцінки параметрів. Пропонується також чисельний метод визначення оцінок параметрів лінійних різницевого рівнянь, що зводиться до багаторазового вирішення лінійних різницевого рівнянь.

Теорія ідентифікації *динамічних систем* в даний час має в своєму розпорядженні поруч досить ефективних методів і алгоритмів. При

проектуванні систем автоматичного управління технічними об'єктами найбільш часто використовуються класичні методи ідентифікації [15, с.74], градієнтні алгоритми, стохастична апроксимація, метод максимальної правдоподібності [16, с.101], спектральні [17, с.75] та інші алгоритми. Незважаючи на це, проблема синтезу ефективних методів побудови моделей об'єктів управління є актуальним завданням і в даний час. У статті [18] запропонований алгоритм оцінки параметрів передавальної функції об'єкта на основі даних «вхід-вихід» з використанням нового критерію ідентифікації.

В роботі [19] описані основні терміни перевірки адекватності математичних моделей та способи перевірки адекватності.

В [20] розроблений програмний комплекс, який дозволяє автоматизувати процес проектування нечітких систем та їх оптимізацію. Він дозволяє значно скоротити час оптимізації. Проблема ідентифікації в цьому випадку зводиться до проблеми пошуку мінімуму заданої функції в багатомірному просторі, координати якого відповідають параметрам нечіткої системи.

Моделювання стало основною методологією пізнання дійсності. Традиційні підходи до математичного моделювання вимагають від розробників досить глибоких математичних знань та навиків. Тому більшість математичних моделей – це результат роботи математиків, але не дослідників конкретної проблеми або предметної області. Проте, навіть якщо цей дослідник не в змозі розробити математичну модель, він може описувати вивчену систему та її поведінку лінгвістично. Залишається вирішити питання, як перетворити лінгвістичний опис у математичне представлення. Нечітке моделювання – ефективний підхід до перетворення лінгвістичних даних у математичні формули та алгоритми. Нечітка модель представляє реальну систему у формі, легко зрозумілій і інтерпретованій непрофесійним математиком, така модель може бути легко модифікована. В системі нечіткого моделювання знання або модель досліджуваної системи відокремлені від засобів маніпулювання цією інформацією, що дозволяє дослідникам прискорити процес розробки моделі, зосереджуючись на питанні «що робити» замість питання «як робити» [21].

Відомо, що моделювання систем включає два основні етапи: ідентифікація структури та ідентифікація параметрів. Ідентифікація структури – визначення таких характеристик нечіткої системи, як число нечітких правил, кількість лінгвістичних терм, на які розбиті вхідні та вихідні змінні. Параметрична ідентифікація нечіткої системи полягає в тому, що необхідно оптимально підібрати параметри функцій приналежності лінгвістичних змінних таким чином, щоб мінімізувати помилку системи на навчальних даних. Для оптимізації параметрів нечітких систем використовуються дві групи методів. Перша група – класичні методи оптимізації, основані на похідних: метод найменших квадратів, градієнтний метод, фільтр Калмана, метод Левенберга-Марквардта. Ці методи дають точні результати, але вони мають тенденцію збігатися з локальними оптимумами. Труднощі застосування класичних методів оптимізації, зокрема проблема локального екстремуму та «прокляття розмірності», змушують звертатися до другої групи методів – метаевристичних, таких як алгоритми мурашиної колонії [22–26], частинок, що рояться [27,28], імітації відпалювання [29, 30], диференціальної еволюції [31]. Метаевристика – це методика оптимізації, багаторазового використання простих правил або евристики для досягнення оптимального або субоптимального рішення [29]. Перевага метаевристичних методів полягає в більшій стійкості. Але це методи грубої настройки, що вимагають великих часових ресурсів. Крім того, застосування метаевристичних не гарантує знаходження оптимального рішення і, як правило, пов'язано з емпіричною настройкою параметрів використовуваних алгоритмів. Використання гібридних алгоритмів дозволить об'єднати переваги метаевристичних методів з перевагами класичних методів. Таке об'єднання підвищить якість рішень при помірній кількості ресурсів і за прийнятний час.

На прикладі конкретних задач управління запропонований І. В. Бойковим [32] метод ідентифікації параметрів динамічних систем з розподіленими параметрами, які описуються різницевиими рівняннями. Основними математичними моделями, що використовуються при описі систем з розподіленими параметрами, є диференціальні рівняння в часткових похідних (наприклад, рівняння теплопровідності, дифузії і т.д.).

При цьому вимір значень фізичного поля, яке характеризує протікання фізичного процесу, як правило, відомо в дискретні значення часу і в певній точці простору. У разі систем, описуваних звичайними диференціальними рівняннями з дробовою похідною, відновлення коефіцієнтів рівнянь розглянуто в роботах [33, 34].

У книзі [35] викладений оригінальний підхід до проблеми адаптації в нелінійних динамічних системах. Адаптивність як властивість пристосування розглядається стосовно до задач обробки інформації в нелінійних динамічних системах, математична модель яких відома не повністю. В першу чергу теорія і методи адаптації орієнтовані на задачі управління в відкритих динамічних системах. Методи, які представлені у книзі І. Ю. Тюкіна, можуть бути розповсюджені і на вирішення задач обробки емпіричної інформації в різних областях науки і техніки.

Методам і алгоритмам параметричної ідентифікації присвячені праці багатьох відомих вчених у вітчизняній і зарубіжній літературі [36, 37, 38]. Традиційно при розробці практичних алгоритмів використовуються методи ідентифікації, що базуються на принципах регресійного аналізу [39] і статистичного синтезу [36], а також і градієнтні методи [16, 40]. Отримувані на їх основі рішення далеко не завжди володіють необхідною точністю. При цьому їх використання, як правило, вимагає великих обчислювальних витрат навіть при параметрах, що досить повільно змінюються. Позбутися від цих недоліків дозволяє використання варіаційного принципу Гамільтона-Остроградського [41], який дозволяє представити рівняння динаміки об'єкта в формі диференціальних рівнянь Лагранжа другого роду. Стаття [42] присвячена багатопараметричній варіаційній ідентифікації моделі динамічної системи за критерієм мінімуму функціонала нев'язки. Досліджена ефективність розробленого методу в порівнянні з традиційним алгоритмом Калмановського типу [16]. Аналіз результатів чисельного моделювання показує, що рішення задачі ідентифікації на основі варіаційних принципів дозволяє отримати ефективний алгоритм багатопараметричної ідентифікації динамічних систем. При цьому ефективність розуміється як стійкість і збільшення, порівняно з рішенням Калмана, швидкості сходимості та точності отримуваних оцінок параметрів, відносна

погіршність яких не перевищує 3,7%.

В [43] розглянуто метод ідентифікації систем автоматичного управління за допомогою сигналу «білого шуму». Виконано дослідження на великій кількості різних систем автоматичного управління, і визначені найкращі умови для ідентифікації даним методом. Даний метод дозволяє отримати імпульсну перехідну характеристику системи, по якій вже можна відновити вихідний сигнал з будь-якого вхідного впливу. Білий шум – це стаціонарний випадковий процес з постійною спектральною щільністю [44]. Метод ідентифікації за допомогою сигналу «білого шуму» найкраще ідентифікує коливальні системи та системи з помірною коливальністю, в той час як погано ідентифікує аперіодичні системи. Системи, ідентифіковані за допомогою сигналу «білого шуму», добре відновлюють вихідні сигнали по синусоїдальним і експоненціальним вхідним сигналам і погано відновлюють вихідний сигнал при лінійних вхідних сигналах.

В посібнику [45] розглянуто основні положення теорії ідентифікації систем: структурна і параметрична ідентифікація; лінійний регресійний аналіз, ідентифікація нелінійних систем і методи оцінювання параметрів і стану. Наведено методи дослідження ідентифікаційних моделей. Розглянуто можливості пакета MatLab для побудови і аналізу моделей ідентифікації.

В [46] розглянута і вирішена з використанням статистичної та часової лінеаризації задача активної параметричної ідентифікації на основі планування вхідних сигналів для стохастичних нелінійних безперервно-дискретних систем, що описуються моделями в просторі станів, містять, в тому числі, і суттєві нелінійності. Розглянуто загальний випадок входження невідомих параметрів: в рівняння стану, спостереження, початкові умови і коваріаційні матриці шумів системи і вимірювань. Розроблено алгоритми обчислення критеріїв максимального правдоподібності і їх градієнтів для лінійних нестационарних і лінеаризованих моделей, що дозволяють відповідно до заданого дискретним планом експерименту здійснювати оцінювання невідомих параметрів.

Побудова математичної моделі доволі складного об'єкта

представляє собою трудомісткий процес, який включає етапи вибору структури і моделі об'єкта, який ідентифікують, вибору або розробки методу та числових алгоритмів ідентифікації з врахуванням можливостей апаратури та обчислювальної техніки, попередньої обробки результатів, отримання оцінок характеристик моделі, аналізу цих оцінок і перевірки степені ідентичності (адекватності моделі та реального об'єкта). Задача кожного з етапів складає доволі складну проблему. А.Д. Семенов [47] розглянув основні методи автоматичного управління з використанням математичного опису цих систем у просторі станів, моделей на базі матричних операторів та рядів Вольтера та нейронних мереж, методи аналізу та синтезу лінійних систем, а також структуровані моделі систем управління, передатні функції, структуровані схеми, часові та частотні характеристики. Викладені питання спостережуваності, керованості і стійкості одномірних та багатомірних систем управління, яким задовольняють різноманітні критерії якості. Приведені основні методи покращення якості процесів управління і синтезу автоматичних регуляторів. Проаналізовані основні методи їх ідентифікації, показані особливості застосування часових, частотних спектральних, стохастичних непараметричних і параметричних методів ідентифікації. Все це доповнюється прикладами, які пояснюють технологію використання MatLab для вирішення задач управління та ідентифікації.

Структурно-параметрична ідентифікація математичних моделей може бути виконана сьогодні з використанням останніх досягнень у галузі інформаційних технологій. Зокрема, метод генетичного програмування [48] і його розвиток, метод граматичної еволюції [49] і метод аналітичного програмування [50] можуть бути використані для отримання математичних моделей різних систем і процесів. До того ж класу методів відноситься метод мережевого оператора [51]. Різниця між цими методами полягає в тому, що за допомогою методу мережевого оператора можна отримати математичні вирази, що включають лише унітарні та бінарні операції. Методи генетичного програмування, граматичної еволюції та аналітичного програмування призначені для синтезу текстових програм, тому вони можуть включати будь-які функції та оператори. З іншого боку, метод мережевого оператора при пошуку

структури та параметрів математичного вираження використовує базову модель для даного виразу, яка може задаватися на підставі досвіду. Такий підхід дозволяє реалізувати цілеспрямований пошук оптимального рішення в окрузі базового, що істотно скорочує час пошуку та можливості можливих рішень.

В статті [52] пропонується метод вирішення задач параметричної ідентифікації, що дозволяє, по-перше, звільнитися від притаманних відомих методів обмежень (таких як лінійність моделі вимірювача відносно параметрів, необхідність нормального вигляду розподілу додаткових шумів об'єкту та завад спостережуваних сигналів та ін.), А по-друге, підвищити потенційну точність процедур ідентифікації за рахунок використання узагальненого імовірнісного критерію, який залежить в загальному випадку нелінійно від апостеріорної густини розподілу ймовірностей вектора стану. Варто відзначити при цьому, що питання ідентифікації за критеріями, заснованими на мінімізації середньоквадратичного відхилення помилок оцінювання, розглянуті в роботах [11, 16, 36].

В [53] Розглядається проблема параметричної ідентифікації багатовимірних нелінійних об'єктів з шумами у вихідних сигналах. На основі модифікованого нелінійного методу найменших квадратів доведена стабільність матриць параметрів нелінійного різноспрямованого рівняння. Розроблений метод параметричної ідентифікації дозволяє підвищити ефективність автоматизованих систем управління технологічними процесами, а також математичного моделювання в технічних областях науки.

Сучасні вимоги до розвитку комп'ютерних систем управління та моніторингу передбачають підвищення якості таких систем. При цьому функціональні можливості систем автоматичного управління та їх бажані характеристики визначаються тим об'єктом, для якого створюється ця система. Від рівня складності технологічного процесу, його багаторежимного функціонування та перестановки на різні умови роботи властивості таких об'єктів істотно змінюються як в параметричному, так і в структурному плані.

На цей час застосовуються два основних способи управління

такими об'єктами з параметричними та структурними змінами: адаптивний, робастний та їх комбінація. Адаптивне управління передбачає використання ідентифікаторів параметричних та структурних характеристик об'єкта, при цьому однією з складних проблем є розробка та налаштування контуру адаптації моделі (особливо при структурно-параметричній ідентифікації) [54, 55, 56, 57]. Тому останнім часом застосування адаптивного підходу істотно обмежено параметричною ідентифікацією, складністю реалізації та недостатньою швидкістю контуру адаптації моделі.

У цей час позбавленим зазначених недоліків виявилось робастне управління об'єктами з параметрами, що змінюються. Це стало причиною масового створення таких систем навіть на базі типових аналогових регуляторів з новими підходами їх налаштування [54, 55], що забезпечує управління технологічними та виробничими об'єктами в умовах нормального функціонування та гарантує прийнятну якість роботи в умовах різних видів невизначеностей.

В роботі [58] пропонується підхід побудови ідентифікаторів в структурах та алгоритмах систем адаптивного управління динамічними об'єктами на основі дробно-раціональної апроксимації дискретних передавальних функцій з використанням алгоритмів теорії безперервних дробів [59, 54]. Представлений підхід до вирішення завдання структурно-параметричної ідентифікації об'єктів в режимі реального часу має низку переваг, таких як:

а) для початку застосування методу не потрібна вся історія функціонування об'єкта, що дає вигоду як у швидкості обробки даних, так і в розмірі пам'яті, необхідній для їх розміщення;

б) підвищується швидкість прийняття рішення, що важливо при виникненні критичних ситуацій;

в) з'являється можливість вирішити проблему адаптивного управління в режимі реального часу в небезпечних об'єктах, які вимагають чіткого і швидкого реагування на зміни їх властивостей.

В роботі [60] реалізується задача ідентифікації каналів передачі вхід-вихід системи керування, яка складається з технологічного об'єкта та регулятора, на основі застосування нейронних мереж як інструменту для

апроксимації взаємозв'язків технологічних змінних автоматизованих об'єктів. Клас нейронних мереж, що мають у своєму складі елементи у вигляді зворотних зв'язків, називається рекурентними мережам і дозволяє моделювати поведінку динамічних об'єктів [61, 62]. Часові затримки вхідних сигналів і сигналів зворотних зв'язків дозволяють моделювати поведінку інерційних об'єктів з чистим відставанням, якими, як правило, управляються об'єкти переробки галузей промисловості. Розглянуті об'єкти є технологічними системами з безперервним характером виробництва хімічної, металургійної, горно-збагачувальної, целюлозно-паперової та інших галузей промисловості. Технологічні об'єкти, автоматизовані на базі розподілених систем управління, що описуються великим числом взаємозв'язаних змінних і що володіють транспортним запізненням, часто практично не піддаються класичним методам ідентифікації динамічних характеристик каналів їх передачі.

В склад системи управління входить нелінійна автокореляційна нейронна мережа, яка є рекурентною мережею з зворотним зв'язком і прихованим шаром і дозволяє апроксимувати поведінку системи, яка працює в динамічних режимах. Навчена модель, представлена динамічною нейронною мережею та моделлю регулятора з відомою функцією регулювання, моделює поведінку системи управління та дозволяє проводити на ньому досліди активного експерименту. Модель системи управління дозволяє отримати відклик системи на випробувальний вплив. За отриманою комплексною частотною характеристикою із застосуванням методу найменших квадратів знаходять параметри передаточної функції каналу.

Для ілюстрації викладеного підходу до ідентифікації в [62] представлені результати дослідження на імітаційному об'єкті управління. Проведені дослідження тестовими прикладами показали, що розглянутий в статті метод дозволяє параметрично ідентифікувати об'єкт, що входить до складу системи управління, передаточною функцією. Метод застосовується для ідентифікації складних автоматизованих технологічних об'єктів управління з безперервним характером виробництва за даними пасивних спостережень технологічних змін у режимах нормальної експлуатації. Знайдені передаточні функції каналів

контрольних збурень використовуються при налаштуванні алгоритмів компенсації збурень в автоматичних системах управління.

В [63] розглянуто підхід до формування нечітких систем (НС) з використанням виключних ознак та деталізації правил, що розширює загальні можливості методів нечітко-логічного аналізу при моделюванні складних процесів і систем та, зокрема, можливості моделювання при неповних або сильно викривлених даних.

Використання деталізованих правил та виключних ознак в структурі правил приносить в НС ряд принципово нових якостей. Крім підвищення загальних виражених можливостей вирішуючих правил, підвищуються адаптаційні властивості НС, пов'язані з можливістю адаптації параметрів НС по параметрам операцій, що додаються в опис правил з метою представлення виключних і деталізуючих ознак. При цьому в максимальному степені може бути використаний весь корисний для моделювання потенціал, закладений в операції нечіткого виводу [64]. Крім того, з'являється можливість ефективного представлення в НС одиничних сильно викривлених даних, які, при традиційних методах навчання, попадають в не свої класи розбиття, порушуючи можливість їх компактного опису. Використання виключних ознак і деталізуючих правил дає можливість представити в НС ці одиничні викиди у вигляді автономних одиниць, які за мірою роботи системи можуть оперативнo додаватися і виключатися з опису правил, зберігаючи в цілому високі загальні можливості прямих загальних ознак, присутніх у правилах.

1.2 Класифікація методів ідентифікації

В загальній постановці проблема ідентифікації полягає у пошуку деякого формалізованого (математичного чи логічного) опису, який несе інформацію про динамічні властивості об'єкта (системи). Ця інформація має бути достатньою для здійснення задач управління і для вирішення поставлених задач синтезу оптимальних параметрів системи [65].

При ідентифікації велика роль відводиться концептуальному вибору класу системи і степеня її структурної складності. Оскільки клас системи визначає найбільш загальні форми її опису, то варто привести основні признаки їх класифікації.

За ступенем ідеалізації і за типом опису операторних рівнянь системи розділяють на лінійні і нелінійні динамічні системи. До лінійних відносять класи систем, який описується лінійними операторними рівняннями, окремим випадком яких є лінійні диференціальні і різницеві рівняння, а також системи рівнянь. Всі інші системи, які не підходять під клас лінійних, визначаються в клас нелінійних систем. Оскільки лінійні системи підкоряються принципу суперпозиції, а способи опису процесів всередині таких систем широко досліджені, то їх ідентифікація в більшості випадків зводиться до пошуку оптимальних методик та алгоритмів, які забезпечують успіх застосування розроблених за їх допомоги моделей на практиці. Нелінійні системи, навпаки, не підкоряються принципу суперпозиції, і їх ідентифікація викликає суттєві труднощі. До теперішнього часу розроблено велику кількість методів і підходів до ідентифікації нелінійних систем [66, 67]. В основному ці методи, в залежності від ступеня нелінійності, визначають нелінійну систему в клас квазілінійних систем з використанням методів гармонійної лінеаризації або поданням систем за допомогою функціональних рядів Вольтера, Гамерштейна, Вінера і Вінера-Гамерштейна. Такі ряди описують нелінійні динамічні системи, утворені різними комбінаціями лінійних динамічних ланок і безінерційних нелінійних елементів. До таких систем відносять також системи типу фільтрів Заде і узагальнену модель Вінера.

За зміною параметрів системи в часі розрізняють детерміновані і стохастичні системи. У свою чергу ці два види систем поділяють на стаціонарні та нестаціонарні динамічні системи. До класу стаціонарних систем відносять такі системи, у яких коефіцієнти диференціальних рівнянь незалежно від режиму роботи системи є постійними. До нестаціонарних систем відносять ті системи, поведінка яких описується диференціальними рівняннями зі змінними коефіцієнтами. Визначення системи в клас стаціонарних систем набагато полегшує ідентифікацію. Якщо система нестаціонарна, то таку систему для кожного режиму роботи або інтервалу часу, в якому коефіцієнти диференціальних рівнянь постійні або змінюються на незначні величини, розбивають на підсистеми і відносять до класу квазістаціонарних систем. Для кожної такої

підсистеми проводять окрему ідентифікацію подібно як для стаціонарної системи. В даний час також для ідентифікації нестационарних динамічних систем використовуються методи, що базуються на Вейвлет-перетвореннях.

Динамічні системи поділяють на зосереджені і розподілені. У першому випадку вони описуються звичайними диференціальними рівняннями, а в другому диференціальними рівняннями в часткових похідних. У природі всі системи мають розподілені параметри. Однак, при обмежених робочих частотних діапазонах їх можна розглядати як системи з зосередженими параметрами, що полегшує аналіз системи.

За кількістю керуючих впливів розглядають одновимірні і багатовимірні динамічні системи. До одновимірних відносяться системи з одним входом і одним виходом. Але така ідеалізація процесів в деяких випадках не дозволяє описати модель, адекватну реальному процесу. Тому в багатьох випадках доцільно розглядати систему як багатовимірну, що має кілька входів і виходів. Ідентифікація багатовимірної системи відрізняється від подібної процедури для системи з одним входом і виходом тим, що виникає проблема, пов'язана з встановленням принципової можливості здійснення оцінки параметрів системи при наявних вимірах процесів на її вході і виході. Її рішення в прямому вигляді без інформації про властивості самої системи не є можливим. Тому вибір вхідних та вихідних змінних процесів повинен бути проведений шляхом аналізу теоретичної моделі, яка сформована на базі апріорних даних про властивості системи [68].

Залежно від приналежності системи до наведених вище класифікаційних ознак розглядають такі основні методи і підходи до ідентифікації динамічних систем.

За метою ідентифікації розрізняються параметричні, непараметричні і структурні методи. Параметрична ідентифікація використовується для встановлення порядку і числа параметрів моделі системи, а також їх визначення. Відомі методи параметричної ідентифікації засновані на переборі різних моделей і відрізняються високою трудомісткістю. При непараметричній ідентифікації система розглядається як «чорний ящик» і на базі апріорної інформації про процес

визначаються чисельні значення вагової або частотної характеристик. Методи структурної ідентифікації забезпечують аналіз структури системи і встановлення форми аналітичного опису процесу, тобто визначають завдання ідентифікації в широкому сенсі.

За характером проведення експериментів поділяють методи активної і пасивної ідентифікації. У першому випадку використовуються спеціально обрані тестові сигнали, а в другому – сигнали, що виникають в процесі нормальної експлуатації системи. Кожен з цих методів має як переваги, так і недоліки. При пасивній ідентифікації не порушується технологічний процес роботи системи, але при ній важко отримати повну інформацію про систему через обмеженість динамічних і частотних діапазонів сигналів, що існують у системі в процесі її нормальної експлуатації. Часто буває, що більш точні показники можна отримати, лише перериваючи нормальний хід технологічного процесу і проводячи активну ідентифікацію. Тим не менше, роль пасивних методів ідентифікації дуже велика.

Проведення активного або пасивного експерименту безпосередньо пов'язано з поділом методів і підходів до ідентифікації за виглядом вхідних сигналів. Для отримання повної інформації про динаміку системи використовують гармонійні, періодичні, стрибкоподібні, імпульсні і випадкові вхідні збурення. Використання стрибкоподібних і імпульсних сигналів можливо при активній ідентифікації, але ускладнене практично. Використання гармонійних і періодичних сигналів дає важливу перевагу: досягається частотна вибірковість методу. Також до переваги в використанні цих сигналів можна віднести і простоту в проведенні дослідження. Головним недоліком є велика кількість експериментів і відповідно тривале спостереження, необхідну для повного дослідження системи. Для отримання більш точних оцінок динаміки системи доцільно використовувати широкосмугові сигнали. Як такі сигнали використовуються випадкові або псевдовипадкові сигнали. Зокрема представляється дуже підходящим кандидатом для використання в якості вхідного сигналу білий (або рожевий) шум, що несе потужність на всіх частотах. Перерахуємо переваги, які є основними причинами в використанні таких сигналів:

а) густини розподілу ймовірностей мають зручний для аналітичних досліджень вигляд;

б) випадковий шум несе в середньому рівні потужності на всіх частотах;

в) для стороннього шуму дуже зручно проводити усереднення і по відрізках ряду відповідної довжини і по частотах в досить широких діапазонах, що дає можливість збільшувати статистичну стійкість і підвищувати тим самим точність оцінок;

г) використання випадкового шуму як однієї зі складових вхідного сигналу може бути застосовано як для активної ідентифікації, так і для пасивної;

д) застосування швидкодіючих комп'ютерів і аналогово-цифрових систем заклало міцну практичну основу під дану методику.

Методи ідентифікації поділяють за способом опису процесів в системі, а також по виду характеристик, використовуваних при їх реалізації. Розрізняються часові, дисперсійні, кореляційні та спектральні методи ідентифікації. Серед цих методів важливе місце займають кореляційні та спектральні методи ідентифікації. Вони забезпечують високу перешкодозахищеність і статистичну стійкість, а також дають можливість проведення експериментів в режимі нормальної експлуатації об'єктів, класифікація методів представлена на рис. 1.1 [69].

Зазвичай ідентифікація – багатоетапна процедура. Основні її етапи наступні:

а) структурна ідентифікація полягає у визначенні структури математичної моделі на підставі теоретичних міркувань;

б) параметрична ідентифікація включає в себе проведення ідентифікуючого експерименту і визначення оцінок параметрів моделі за експериментальними даними;

в) перевірка адекватності – перевірка якості моделі в сенсі обраного критерію близькості виходів моделі і об'єкта.

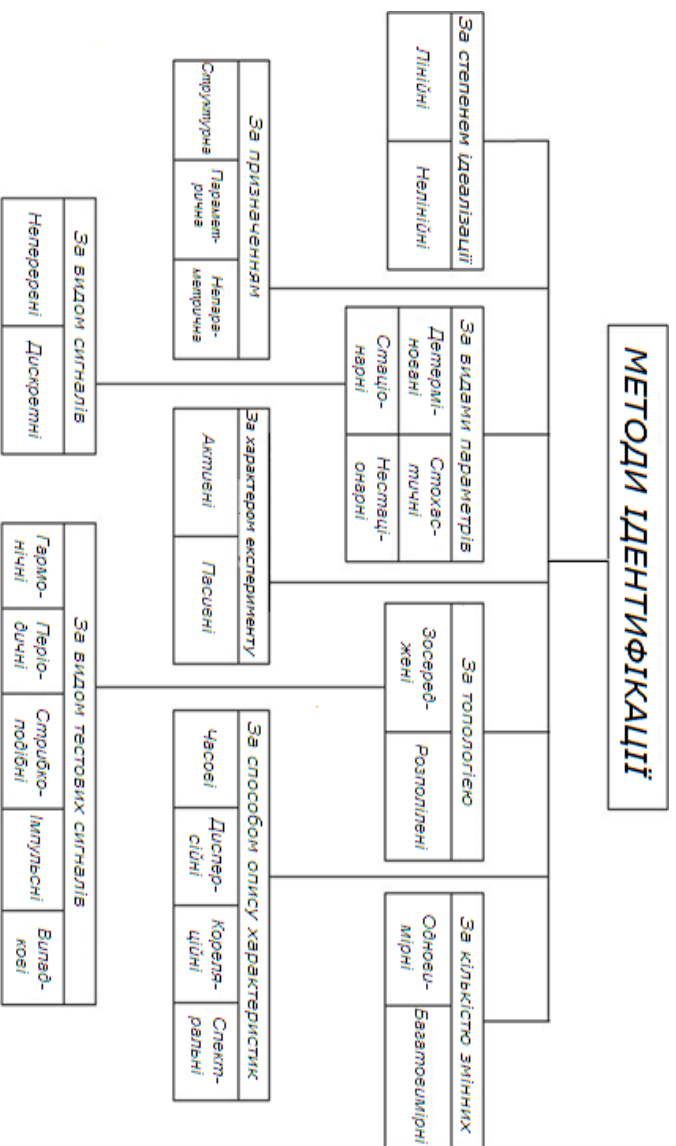


Рисунок 1.1 – Класифікація методів ідентифікації

1.3 Структурна ідентифікація динамічних систем

Як стверджує автор огляду [70], визначення, яке якнайповніше відбиває традиційні інтуїтивні уявлення про структурну ідентифікацію звучить так: структурна ідентифікація – це пошук адекватного сімейства математичних моделей (альтернатив) для параметричної або непараметричної ідентифікації або, іншими словами, це пошук адекватного типу математичної моделі фізичної системи для параметричної або непараметричної ідентифікації. Щоправда, тут же відмічається, що. нині відсутнє не лише загальновизнане тлумачення сенсу і значення слів "пошук", "адекватність", але і детально розроблені трактування.

Далі – більше. Автор взагалі ставить під сумнів правомірність використання поняття "структура математичної моделі об'єкту". Хоча зміст цього виразу інтуїтивно ясний, складність викликає обґрунтування вживання слова "структура", оскільки у математиці це слово має сенс, який істотно відрізняється від традиційно прийнятого в теорії ідентифікації. Тому пропонується вживати вираз "тип моделі об'єкту", яке слід трактувати як сімейство рівнянь, якому належить модель об'єкту.

На цей час методи визначення структури моделі мало формалізовані. У більшості робіт по синтезу математичних моделей структура вважається відомою апіорі з точністю до деякої множини невідомих параметрів. Надалі ця множина є основним об'єктом дослідження. Домінуючим підходом при виборі структури є статистичний підхід, і рішення приймається на заданому класі моделей-претендентів. Але будь-які формалізовані підходи і методи, що дозволяють вибрати структуру моделі на основі доступного для спостереження інформаційного об'єкта, відсутні. Це пояснюється тим, що деякі елементи структури моделі не піддаються адекватному математичному трактуванню. Тому структурну множину часто звужують до таких математичних категорій і об'єктів, які можна описати існуючою математичною мовою і, отже, поставити на класі функцій із заданої множини. Найбільш складною і найменш вивченою є проблема оцінки структури нелінійних систем. Якщо для класу статичних регресійних

моделей запропонований ряд методів, заснованих на статистичному підході, то для динамічних систем будь-які формалізовані процедури відсутні.

Ідентифікація систем і об'єктів управління часто зводиться до визначення структури і параметрів моделі за спостережуваними даними (входу і виходу об'єкта) і наявною апріорною інформацією. Всі існуючі підходи до ідентифікації можна розбити на дві групи – статистичні і функціональні (детерміновані). Зазначені класи розрізняються урахуванням природи збурень (завад), що діють на систему, і одержуваними оцінками.

На початковому етапі створення теорії ідентифікації переважав статистичний підхід до задачі оцінювання параметрів. В рамках цього підходу визначалась структура моделі об'єкта, а щодо всіх невизначених факторів і завад вважалося, що вони носять випадковий характер [71– 74]. Моделі діючих збурень і завад задавалися у вигляді закону розподілу, а більшість застосовуваних алгоритмів ґрунтувалося на методі найменших квадратів. Реалізація цих підходів і процедур в системах управління вимагала залучення потужних обчислювальних засобів, розробки стабільних методів оцінки імовірнісних характеристик збурень. Але, незважаючи на це, стохастичний підхід до проблеми ідентифікації застосовувався і в подальшому в зв'язку з розвитком і застосуванням адаптивних методів ідентифікації. В рамках даного підходу структура моделі визначалась апріорі. Такий же стан проблеми структурної ідентифікацією зберігся до теперішнього часу. Незважаючи на велику різноманітність алгоритмів і методів ідентифікації, так і не вдалося запропонувати будь-які процедури регулярного синтезу структури моделі [75].

Основні підходи до вибору структури, як і раніше, ґрунтуються на інтуїції дослідника і методі перебору претендентів із заданого класу моделей. Пояснюється така ситуація складністю і різноманітністю об'єктів управління, поганою вивченістю процесів, що протікають в об'єкті.

Для оцінки параметрів моделі на основі даних, отриманих в процесі нормальної експлуатації, використовувалися методи ретроспективної ідентифікації [71–74], а трохи пізніше, у зв'язку з підвищенням вимог до

якості управління і розвитком засобів обчислювальної техніки і автоматизації, стали застосовуватися моделі, що налаштовуються [71, 74, 76, 77].

В умовах апріорної невизначеності для управління об'єктами широко застосовуються системи з непрямим адаптивним керуванням, оскільки дозволяють забезпечити високу якість функціонування. Основною ланкою таких систем є блок ідентифікації. Залежно від властивостей об'єкта і вимог, що пред'являються до системи, можуть застосовуватися як методи ретроспективної, стратегічної ідентифікації (модель визначається поза контуром управління), так і підходи, засновані на поточній або оперативній ідентифікації [74]. Незважаючи на велику кількість публікацій, можна виділити лише кілька підходів до адаптивного параметричного оцінювання. В основному це методи найменших квадратів, стохастичної апроксимації і їх модифікації, а так само, різні градієнтні алгоритми. При вирішенні практичних завдань теорії управління теоретичні передумови, що лежать в основі зазначених методів, як правило, не виконувалися і тому ефективність багатьох процедур ідентифікації була невисокою. Неврахування реальних властивостей приводило, зокрема, до втрати властивостей оптимальності, уповільнення або погіршення швидкості збіжності [78]. Тому в теорії ідентифікації гостро постала проблема забезпечення грубості застосовуваних алгоритмів і методів, безпосередньо пов'язана з урахуванням обмежень і умов функціонування системи «об'єкт + середовище».

Структурна ідентифікація зводиться до вибору математичної моделі, яка описує процеси в досліджуваному об'єкті. Будь-яких формалізованих процедур апріорного вибору структури моделі до теперішнього часу не існує. Пояснюється це тим, що [79]:

а) в системах управління використовуються математичні моделі, що відображають найбільш суттєві сторони процесів, що протікають. Тому в системах ідентифікації домінує концепція чорного ящика;

б) спроба використовувати фізичні закони для опису природи процесів може істотно ускладнити процедуру отримання математичного опису. Тому вибір структури математичної моделі може перетворитися в

нереалізовану мрію, оскільки потрібно описувати процеси, які не знайшли відображення в фізичних законах або мають дуже складне математичне уявлення;

в) ідентифікація нових (недостатньо вивчених) об'єктів базується тільки на концепції чорного ящика, а це, в свою чергу, призводить до появи апіорної невизначеності, яку необхідно якимось чином долати;

г) будь-який реальний об'єкт завжди пов'язаний із зовнішнім середовищем, і тому на етапі вибору структури моделі необхідно враховувати реальні обмеження. Це істотно впливає на сам підхід до отримання математичного опису. Математична модель повинна бути конкретизована тільки до того рівня, який допускає наявну інформаційна множина системи.

Домінуючу роль в теорії ідентифікації займають статистичні методи. За допомогою цих методів [79, 80, 77] вдалося вирішити такі завдання структурної ідентифікації як вибір найбільш істотних змінних, оцінка ступеня нелінійності об'єкта, вибір кроку дискретизації знімання експериментальних даних та інші, тобто такі проблеми, які дозволяють більш обгрунтовано підходити до вибору структури моделі.

В [70] пропонується теоретико-емпіричний підхід до вибору структури моделі. Спочатку на основі апіорної інформації про досліджуваному процесі або об'єкті формується передбачувана структура моделі. Потім на основі експериментальних даних виконується перевірка моделі на адекватність і в разі незадовільних результатів в неї вносяться структурні зміни або виконується адаптація її параметрів. Це загальноприйнятий підхід до вибору структури.

В [77] наводиться процедура, яка деталізує підхід, запропонований в [70], з урахуванням додаткової апіорної інформації про систему «об'єкт + середовище». Процедура включає в себе вибір типу моделі (нелінійна, лінійна і т. п.), визначення порядку моделі. Далі слід провести параметризацію моделі, яка для класу лінійних моделей зводиться до завдання множини передавальних функцій і моделі опису шуму.

Оскільки будь-які формалізовані процедури запропонувати дуже складно в силу зазначених вище причин, то для отримання структури моделі зазвичай застосовуються переборні методи на заданому апіорі

класі моделей. Такий підхід є домінуючим. Він так само становить основу методу групового обліку аргументів [81].

Застосування переборних процедур вимагає прийняття рішення про зупинку процедури структурної ідентифікації. Зараз найбільш розроблені методи структурної ідентифікації для лінійних за параметрами моделей. Вибір критерію залежить від типу збурень, що діють на об'єкт, і цілей, які переслідуються при ідентифікації.

1.4 Параметрична ідентифікація динамічних систем

Методи параметричної ідентифікації широко застосовуються при вирішенні практичних завдань ідентифікації лінійних і нелінійних систем. Параметрична ідентифікація моделей дозволяє знаходити значення параметрів моделі. При цьому передбачається, що структура і порядок моделі об'єкта вже відомий. Знаючи коефіцієнти моделі та її структуру, можна перейти до неперервних структурованих моделей і моделей в просторі станів [77]. Важливою перевагою методів параметричної ідентифікації є можливість використання рекурентних алгоритмів, що дозволяють проводити поточну ідентифікацію в реальному часі при номінальних режимах роботи об'єкта. Ці переваги визначили широке використання методів параметричної ідентифікації в задачах управління та автоматизації. До таких методів належать: метод найменших квадратів, метод максимальної правдоподібності та метод стохастичної апроксимації.

Метод допоміжних змінних дозволяє обчислити тільки оцінки параметрів об'єкта ідентифікації. В тому випадку, якщо необхідні оцінки параметрів моделі формуючого фільтра шуму, можна скористатися методом найменших квадратів.

Оцінки максимальної правдоподібності, як правило, є спроможними і асимптотично ефективними. Основний недолік цього методу пов'язаний з труднощами розрахунку оцінок, а також і те, що для побудови оцінок і забезпечення їх «найкращими» властивостями необхідно знати закон розподілу випадкової величини, що у багатьох випадках виявляється практично нереальним. Метод стохастичної апроксимації (МСА) [82] розроблений для визначення коренів рівняння,

коли значення функції при заданому значенні аргументу спостерігаються з завадою (похибкою). Незважаючи на повільну збіжність оцінок, алгоритми МСА через свою простоту знаходять застосування в практичних завданнях ідентифікації лінійних і нелінійних моделей об'єктів з незалежним адитивним шумом.

1.5 Непараметрична ідентифікація

При непараметричній ідентифікації дослідника мало цікавить, які саме процеси протікають у досліджуваному об'єкті. Об'єкт розглядається як «чорний ящик», входи і виходи якого є функціями часу. Ідентифікація полягає у визначенні оператора, що пов'язує ці функції між собою.

Н.С. Райбман у збірнику [80] пише, що значення входу $u(t)$ і виходу $y(t)$, отримані в процесі нормальної експлуатації об'єкта, використовуються для визначення найкращої в певному сенсі оцінки \hat{A}_t оператора невідомого об'єкта A_t , яка належить до заданого класу операторів. Поняття «найкраща» конкретизується шляхом вибору критерію оптимальності. Вводиться функція втрат ρ , яка залежить від змінних виходу об'єкта і моделі. Вид функції втрат пов'язаний з використанням критерієм оптимальності. близькість оцінки \hat{A}_t до істинного оператору об'єкта A_t розуміється в сенсі мінімуму наступного математичного очікування:

$$E \{ \rho (y(t), \hat{y}(t)) \} \rightarrow \min_{\hat{A}_t}. \quad (1.1)$$

Зазвичай знаходять оцінку \hat{A}_t , оптимальну в сенсі мінімуму середньоквадратичної помилки, тобто $\rho = (y - \hat{y})^2$. Цю оцінку можна визначити з умови (1.1) у вигляді

$$\hat{y}(t) = \hat{A}_t u(\tau) = E \{ y(t) | u(\tau) \}.$$

Таким чином, оператор умовного математичного очікування (чи регресії) вихідної змінної $y(t)$ по відношенню до $u(t)$ визначає оцінку оператора об'єкта в класі усіх можливих операторів.

Непараметричну модель можна побудувати за результатами експериментальних досліджень, в яких на вхід об'єкта подається тестовий сигнал і спостерігається реакція на виході. Як тестові можна брати ступінчастий, лінійний і параболічний сигнали, які можна представити

формулою $r(t)=K_1 t^n$. Використовують також імпульсний та синусоїдальний сигнали. Результатом при цьому виступають перехідна, вагова, передатна або частотна передатна функція.

Проте таку ідентифікацію навряд чи можна вважати в чистому вигляді непараметричною. Фактично дослідник вибирає певну структуру моделі і оцінює значення її параметрів, наприклад коефіцієнтів передачі та сталих часу.

До того ж в умовах реально діючого технологічного об'єкта управління в багатьох випадках неможливо застосувати тестове збурення, не наражаючись на отримання бракованої продукції і навіть аварійну ситуацію. У таких випадках застосовують статистичні методи, використовуючи випадкові збурення, що виникають природним шляхом. Методи стохастичної ідентифікації докладно описані в науковій літературі, див., наприклад, [83].

Вибір того чи іншого методу ідентифікації значною мірою залежить від апріорної інформації, яка є в наявності. Розрізняють наступні види апріорної інформації [84]:

а) у системах з параметричною невизначеністю параметричний рівень апріорної інформації передбачає наявність параметричної структури моделі і деяких характеристик випадкових збурень (зазвичай нульове математичне очікування і обмежена дисперсія);

б) непараметричний рівень апріорної інформації не передбачає визначення параметричної структури моделі з точністю до вектора параметрів, але вимагає мати деякі відомості якісного характеру про процес, наприклад, однозначність, або неоднозначність його характеристик, для вирішення завдань ідентифікації застосовуються методи непараметричної статистики;

в) важливими з точки зору практики є завдання ідентифікації багатозв'язних систем в умовах, коли обсяг вихідної інформації не відповідає жодному з вищеописаних типів. Наприклад, для окремих характеристик багатозв'язного процесу можуть бути виведені параметричні співвідношення, а для інших немає. Таким чином, виникає ситуація, коли задача моделювання і ідентифікації формулюється в умовах і параметричної, і непараметричної апріорної інформації.

Для ідентифікації в умовах параметричної невизначеності, коли інформація про вхід об'єкта $u(t)$ неповна, А.В. Медведєв [84, 85] запропонував наступний підхід. Нехай об'єкт описується лінійним диференціальним рівнянням невідомого порядку. В цьому випадку при нульових початкових умовах вихід визначиться формулою

$$y(t) = \int_0^t h(t-\tau)u(\tau)d\tau, \quad (1.2)$$

де $h(t-\tau)$ – вагова функція. Формула (1.2) представляє оператор невідомого об'єкта A_r . Зворотний оператор A^{-1} буде представлений виразом:

$$u(t) = \int_0^t v(t-\tau)y(\tau)d\tau,$$

де $v(t)$ - вагова функція об'єкта в напрямку «вихід-вхід» і $v(t) = w'(t)$, тут $w(t)$ – перехідна функція системи в тому ж напрямку.

Рішення проблеми полягає в знаходженні вагових функцій $h(t)$, $v(t)$. Один з можливих шляхів вирішення цього питання полягає у вирішенні рівняння Вінера-Хопфа. Інший – в знятті перехідної характеристики на реальному об'єкті з подальшою оцінкою його вагової функції за результатами вимірювань $\{y_i = k_i, t_i, i = 1 \dots s\}$. Вагова функція визначиться виразом:

$$h_s(t) = \frac{1}{sc_s} \sum_{i=1}^s k_i H' \left(\frac{t-t_i}{c_s} \right),$$

де $H(\cdot)$ - дзвоноподібні (ядерні) функції, c_s - параметр розмитості.

Оскільки вагову функцію реального об'єкта у напрямі «вихід-вхід» зняти неможливо, пропонується виконати це на моделі. Отримується вибірка $\{u_j, t_j, j = 1 \dots s\}$. Тоді непараметричний алгоритм управління лінійної динамічної системою набуде вигляду

$$u_s^*(t) = \int_0^t \left(\frac{1}{sc_s} \sum_{j=1}^s w_j H' \left(\frac{t-\tau-t_j}{c_s} \right) \right) x^*(\tau) d\tau,$$

де $x^*(\tau)$ – задаючий вплив.

Зокрема для безінерційного об'єкта $y = f(u, \mu)$, де μ – контрольований, але некерований вхідний вплив, за оцінку приймається

непараметрична оцінка функції регресії за спостереженнями $\{y_i, u_i, \mu_i, i = 1 \dots s\}$ і пропонується використовувати модель у наступному вигляді:

$$y_s(u, \mu) = \frac{\sum_{i=1}^s x_i \Phi\left(\frac{u - u_i}{c_s}\right) \Phi\left(\frac{\mu - \mu_i}{c_s}\right)}{\sum_{i=1}^s \Phi\left(\frac{u - u_i}{c_s}\right) \Phi\left(\frac{\mu - \mu_i}{c_s}\right)},$$

де дзвоноподібні функції $\Phi(\cdot)$ і параметр розмитості c_s задовольняють деяким умовам збіжності [84].

1.6 Питання якості моделювання

Параметри якості моделей розглядаються у дисертації [86]. Пропонується підхід з позицій кваліметрії, згідно якого якість – це сукупність властивостей, що обумовлюють придатність застосування об'єктів за призначенням. Як міри якості тут розглядаються показники якості. Показник якості повинен відповідати на питання: в якому степені даний об'єкт (явище) має властивість (здатність) задовольняти громадську потребу (інтерес, цінність)?

Відмічається, що згідно [87], якість моделі – складна властивість моделі, що характеризує її здатність заміщати досліджуваний об'єкт (оригінал) для отримання нової інформації про об'єкт, що заміщається. До основних показників якості моделі відносяться адекватність, складність, інформативність, інтерпретованість.

Адекватність моделі – властивість моделі, що характеризує її відповідність оригіналу, її здатність віддзеркалювати або відтворювати оригінал.

Складність моделі визначається будовою моделі і характеризує можливість її використання при моделюванні. Чим складніше модель, тим більше труднощів виникає при її використанні.

Інформативність – властивість моделі, що характеризує її здатність в процесі моделювання відображати або відтворювати інформацію про оригінал.

Інтерпретованість моделі – властивість моделі, яка характеризує можливість перенесення нової інформації, що отримується за допомогою

моделі, на оригінал.

Останнім часом стосовно моделей усе ширше застосовуються терміни «верифікація» і «валідація». Стосовно них автор дисертації [86] робить висновок, що верифікація моделі виконується для оцінки її адекватності оригіналу шляхом порівняння поведінки моделі та реального об'єкта при різних збуреннях. Для визначення можливостей використання цифрової моделі для правильного вирішення відповідних задач виконується валідація.

У звіті (report LA-14167-MS) [2] пропонується наступна термінологія.

Верифікація (Verification) – процес визначення того, що модельна реалізація точно представляє собою концептуальне опис моделі та рішення (solution) для моделі.

Валідація (Validation) – процес визначення степеня, в якому модель є точним представленням реального світу з точки зору передбачуваного використання моделі.

Концептуальна модель (Conceptual Model) – збірник припущень, алгоритмів, взаємозв'язків і даних, які описують реальність і на основі яких можна побудувати математичну модель і провести експеримент для валідації.

Математична модель (Mathematical Model) – математичні рівняння, граничні значення, початкові умови та дані моделювання, необхідні для опису концептуальної моделі.

Комп'ютерна модель (Computer Model) – чисельне впровадження математичної моделі, як правило, у формі чисельної дискретизації, алгоритмів розв'язання та критеріїв конвергенції.

Імітаційне моделювання (Simulation) – ансамбль моделей (детермінованих, моделей навантаження, граничних, матеріальних, моделей продуктивності та невизначеності), які використовуються для отримання результатів моделювання.

Калібрування (Calibration) – процес налаштування параметрів чисельного або фізичного моделювання в комп'ютерній моделі з метою покращення узгодження з експериментальними даними.

Адекватність (Adequacy) – рішення про те, що точність (fidelity)

моделі достатня для передбачуваного використання.

Точність (Fidelity) – різниця між даними імітаційного моделювання (simulation) і експериментальними даними.

Більш влучним, на наш погляд, є наступні визначення, наведені у [88].

Концептуальна модель: опис дійсності з точки зору вербальних описів, рівнянь, управлінських відносин або "законів природи", які мають на меті опис реальності. Іншими словами, концептуальна модель є науковою гіпотезою або теорією, яку ми припускаємо для нашого конкретного дослідження об'єкта моделювання.

Модельний код (Model code): математичне формулювання у формі комп'ютерної програми, настільки загальне, що воно, без змін програми, може бути використана для створення моделі з тими самими базовими типами рівнянь (але дозволяючи різні вхідні змінні і значення параметрів) для різних областей вивчення.

Верифікація коду (Code verification): обґрунтування того, що код моделі в певному сенсі є справжнім уявленням концептуальної моделі в межах певних визначених меж або діапазонів застосування та відповідних діапазонів точності.

Калібрування моделі (Model calibration): процедура налагодження значень параметрів моделі для відтворення реагування реальності в діапазоні точності, заданого в критеріях продуктивності.

Валідація моделі (Model validation): обґрунтування того, що модель у межах її сфери застосування має задовільний діапазон точності, що відповідає передбаченому застосуванню моделі.

Налаштування моделі (Model set-up): створення специфічної моделі, що використовує модельний код. Це вимагає, серед іншого, визначення граничних та початкових умов та оцінки параметрів з польових та лабораторних даних.

Імітаційне моделювання: використання перевіреної моделі для розуміння реальності та отримання прогнозів, які можуть бути використані для керування. У зв'язку з цим дуже важливим є оцінювання невизначеності прогнозних моделей.

Для ілюстрації цієї термінології наводиться схема (рис. 1.2),

вперше запропонована в [89] і модифікована авторами [88].

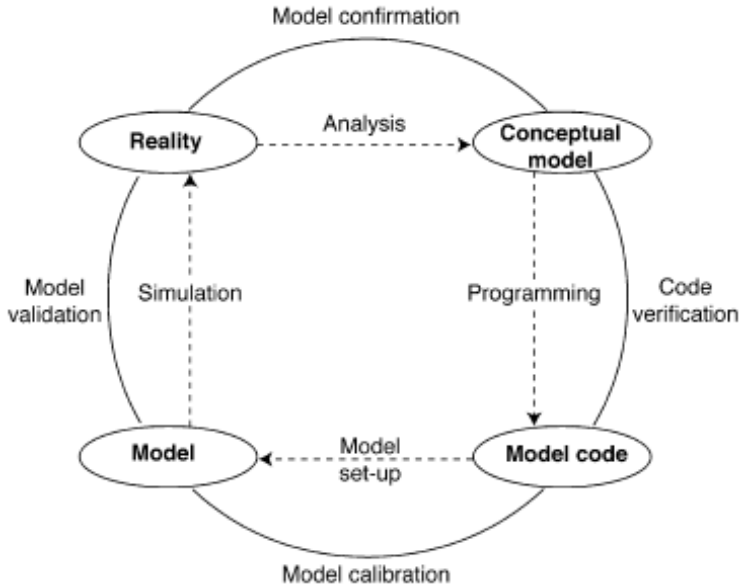


Рис. 1.2. Елементи термінології моделювання [33].

Як показано в [2], схеми типу рис. 1.2 є ефективними для зв'язку з основними концепціями верифікації і валідації, проте деякі важливі дії не показані. На рис. 1.2 не представлені чітко:

- 1) різні заходи, пов'язані з проектуванням, виконанням та поданням експериментальних результатів;
- 2) паралельна та спільна роль експериментів і моделювання;
- 3) кількісне визначення невизначеностей як в експериментальних, так і в модельних результатах;
- 4) об'єктивний механізм покращення узгодження експерименту та моделювання.

Рис. 1.3 розширює рис. 1.2, надаючи більш детальну інформацію для позбавлення цих та інших недоліків.

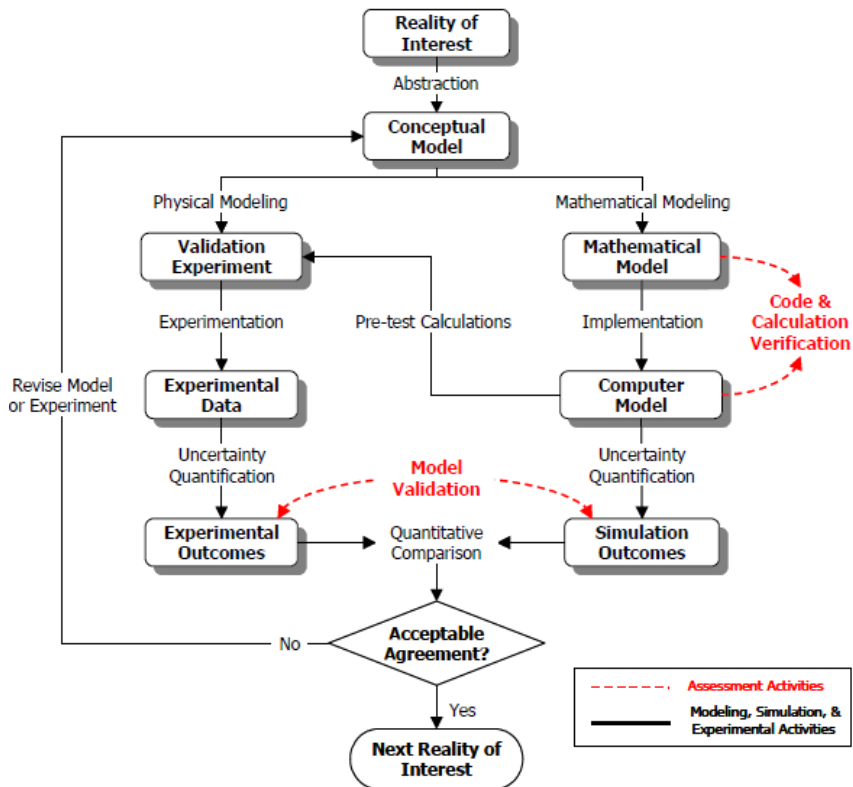


Рисунок 1.3 – Алгоритм процесу розробки, верифікації і валідації моделі

На рис. 1.3 права гілка ілюструє процес розробки та реалізації моделі, а ліва гілка ілюструє процес отримання відповідних та якісних експериментальних даних за допомогою фізичного тестування. Блоки позначають об'єкти або дані, з'єднувачі в суцільних лініях позначають моделювання або експериментальні операції, а з'єднувачі в пунктирних лініях позначають оціночні операції.

Математична модель, представлена на рисунку 1.2, поділяється на концептуальну модель та математичну модель на рис. 1.3. В ідеалі розробник та експериментатор спільно розробляють концептуальну модель. Розробка концептуальної моделі передбачає визначення цілі

обчислень, необхідного рівня узгодженості між експериментом та результатами моделювання, область інтересу, всі важливі фізичні процеси та припущення, а також метрики валідації (величини, що підлягають вимірюванню та основи для порівняння).

Коли концептуальна модель розроблена, модельєр буде математичну модель, а експериментатор розробляє експеримент з перевірки. Математична модель являє собою набір математичних рівнянь, призначених для опису фізичної реальності.

Computer Model (комп'ютерна модель) – це реалізація рівнянь, розроблених у *Mathematical Model*, як правило, у формі цифрової дискретизації, алгоритмів розв'язання та критеріїв збіжності. Комп'ютерна модель, як правило, являє собою чисельну процедуру з комп'ютерним кодом для вирішення рівнянь, запропонованих у математичній моделі.

Частина комп'ютерної моделі представляє методи недетермінованого розв'язання. Типові недетерміністичні теорії включають імовірнісні методи, нечіткі множини, теорія доказів тощо.

Uncertainty Quantification (кількісна оцінка невизначеності) проводиться для розрахунку впливу всіх форм невизначеностей у вхідних даних та моделях на результати імітаційного моделювання. Таким чином, на додаток до відгуку моделі, *Simulation Outcomes* (результати моделювання) включають кількісні границі помилок (або впевненості) відгуку обчисленої моделі.

Code and Calculation Verification оцінки виконуються на комп'ютерній моделі для виявлення та усунення помилок у програмуванні, недостатній розрізняльній здатності сітки, допустимих розв'язків та арифметики кінцевої точності.

На експериментальній (лівій) частині рисунка 1.3 задумано і розроблено фізичний експеримент. Результатом є *Validation Experiment*. Метою експерименту з валідації є надання інформації, необхідної для перевірки моделі; отже, всі припущення повинні бути зрозумілими, чітко визначеними та контрольованими в експерименті. Щоб допомогти в цьому процесі, має бути виконаний *Pretest Calculations* (включаючи аналіз чутливості), наприклад, для визначення найбільш ефективних місць та типів вимірювань, необхідних для експерименту. Ці дані включатимуть не

тільки виміри відгуку, але також виміри, необхідні для визначення вхідних даних моделі та вхідних неточностей моделі, пов'язаних з навантаженнями, початковими умовами, граничними умовами тощо.

Pre-test Calculations, що зв'язує експериментальну і розрахункову гілки на рис. 1.3, також відображає важливу взаємодію між модельєром та експериментатором, яка повинна відбутися, щоб забезпечити необхідність, відповідність та точність виміряних даних. Доки *Validation Experiment and Pretest Calculations* не завершені, модельєр та експериментатор повинні працювати самостійно, доки не досягнемо точки порівняння результатів експерименту та моделювання.

Experimentation (експеримент) передбачає збір вихідних даних з різних датчиків, які використовуються у фізичному експерименті для отримання *Experimental Data* (експериментальні дані). При необхідності експериментальні дані можуть бути перетворені в експериментальні "функції", щоб бути більш корисними для порівняння з результатами моделювання. Для підтримки кількісного визначення експериментальних невизначеностей, як правило, необхідні повторювані експерименти для кількісного визначення нестабільності внаслідок систематичної похибки та неконтрольованої мінливості.

Далі проводиться *Uncertainty Quantification* – кількісне вимірювання для кількісного визначення ефекту похибки вимірювання, допусків проектування, вбудованих невизначеностей, помилок виготовлення та інших невизначеностей щодо *Experimental Outcomes* (експериментальних результатів).

Uncertainty Quantification показано в лівій та правій частинах рис. 1.3, щоб підкреслити його важливу роль у кількісному вимірюванні невизначеності для впевненості як в експериментальних даних, так і в результатах моделювання. *The Quantitative comparison of Experimental and Simulation Outcomes* може приймати форму статистичної заяви про вибрані показники валідації. Наприклад, якщо метрика валідації була різницею між результатами моделювання та експерименту (або просто "помилка"), *the Quantitative Comparison* має прорахувати очікувану точність моделі, наприклад: "Ми на 95% впевнені, що помилка становить від 5% до 10%".

Оцінка валідації моделі визначає степінь, наскільки модель є точним представленням реального світу з точки зору передбачуваного використання моделі. Ця інформація використовується для вирішення, чи призвела модель до відповідності з експериментом. Питання про те, чи модель *адекватна* її призначеному використанню, є ширшим, ніж передбачено в блоці *Acceptable Agreement*. Рішення *Acceptable Agreement* зосереджується лише на рівні угоди між *Experimental and Simulation Outcomes*, критерії яких були визначені як частина Концептуальної Моделі.

Якщо угода між експериментальними даними та результатами моделювання неприйнятна, модель та/або експеримент можуть бути переглянуті. Редагування моделей – це процес зміни базових припущень, структури, оцінок параметрів, граничних значень або початкових умов моделі для покращення узгодження з експериментальними результатами. Перегляд експерименту – це процес зміни експериментального тестового проекту, процедур або вимірювань для покращення узгодження з результатами моделювання. Незалежно від того, переглядається модель чи експеримент (або обидва), це залежить від судження розробника моделі та експериментатора.

1.7 Методи оцінки адекватності математичних моделей

Загально відомо, що якість сформованої математичної моделі об'єкту є визначальною в математичному програмуванні, управлінні складними об'єктами та автоматизованими системами, автоматизованому проектуванні та управлінні [90, 91]. Формування моделі за рахунок встановлення та використання фізичних закономірностей разом із використанням практичних даних є інструментом для її побудови у тому числі за допомогою апроксимації. Таким чином, доведення адекватності, як етап побудови моделі, є невід'ємною частиною усіх досліджень. Відтворення явищ, моделювання процесів та аналіз результатів таких чисельних експериментів завжди ґрунтується на впевненості у правомірності вибору абстрактних припущень та дієвості застосування критеріїв, за допомогою яких, у свою чергу, доводять достовірність та точність отриманих результатів та правильність висновків. Адекватність,

як поняття за своїм визначенням, має таке призначення, але його застосування до практичного аналізу стримується відсутністю єдиного виразу як міри, яка б дозволяла кількісно оцінювати альтернативи різних стратегій. Останнє робить задачу обґрунтування, виводу єдиного виразу оцінки адекватності актуальною, оскільки реалізація пошуку оптимальних рішень, шляхом аналізу різних управлінських стратегій для автоматизованих технологічних систем, здійснюється тільки шляхом моделювання.

Більшість робіт присвячених пошуку загальних закономірностей добору критеріїв встановлення адекватності використовує для цього різні поняття [90–93] та способи кількісного виміру, а також різні міри близькості. Одним із поширених способів побудови моделі у вигляді функцій однієї або декількох змінних є апроксимація. Такий процес умовно поділяється на два етапи: доведення виду функції та знаходження її параметрів – констант за даними практичних спостережень або спеціально поставленого експерименту, що попередньо оброблено. Для пошуку набору констант у більшості робіт використовується метод найменших квадратів. Однак, як показано у роботах [71, 94, 95] для підвищення відповідності поведінки моделі, особливо це доцільно для динамічних моделей, ефективним є застосування двох типів умов. Перша з яких забезпечує безпосереднє її виконання у окремих фіксованих точках, а друга – наближення тим чи іншим способом на окремій множині точок, що дає нові переваги такому підходу у порівнянні з простим методом найменших квадратів [94, 96, 97]. Крім того, за допомогою кожної із цих умов подається одразу декілька характеристик адекватності, що суттєво ускладнює вибір практичної реалізації процесу апроксимації у силу відсутності єдиного способу виміру адекватності. Таким чином, застосування одразу декількох характеристик властивостей, що характеризують адекватність моделі у статичному стані або її зміни у часі, а інакше кажучи відсутність єдиної комплексної характеристики [94] є головною перешкодою обґрунтування виду моделі та її кількісної реалізації шляхом апроксимації і тому є головною не розв'язаною проблемою, що підлягає розв'язку. Разом з тим, досвід, отриманий під час розв'язку споріднених задач керування та пошуку єдиного методу

формування критерію оцінки ефективності технологічного процесу за умов декількох факторів впливу, розв'язку диференціальних та інтегральних рівнянь, рекурентного розкладу у ряди Тейлора, ітераційних методів розв'язку рівнянь [95], побудови бази знань, дозволяє поставити метою даного дослідження: сформувати метод побудови єдиного виразу оцінки адекватності як оцінку ефективності технологічного процесу формування математичної моделі.

Найбільш поширеним способом перевірки моделей на адекватність є використання методів математичної статистики [99].

Відповідно до статистичного підходу фактичне значення об'єкта, що досліджується, можна представити як складову

$$y_i = \hat{y}_i + e_i, \quad (1.3)$$

де \hat{y}_i – значення, що отримане в процесі моделювання;

e_i – випадкова (залишкова) компонента.

Отже, модель відповідає процесу, що досліджується, якщо комплексно буде оцінена якість моделі з перевіркою точності та проведенням аналізу випадкової компоненти:

а) математичне очікування значень залишкового ряду є близьким ч и дорівнює нулю;

б) значення залишкового ряду:

1) випадкові;

2) незалежні (визначається відсутність в залишковому ряді автокореляції з допомогою d-критерію Дарбіна-Уотсона);

3) підпорядковані нормальному закону розподілу (застосування RS-критерію).

Виходячи із вище визначених понять, можна стверджувати, що висока міра точності моделі не є гарантією того, що модель правильно відбиває реальне середовище. Перевірка на точність моделі є лише першим етапом процедури дослідження адекватності, а отже завжди слід здійснювати, як перевірку точності моделі, так і її адекватність.

Способи перевірки моделі на адекватність близькі між собою по суті, а тому можна навести найбільш поширені з них:

а) за середнім значеннями оцінки моделі та системи. Перевіряється гіпотеза про близькість середнього значення спостережуваної зміни до

середнього значення відгуку реальної системи;

б) за дисперсією відхилень відгуку моделі від середнього значення відгуку системи. Даний спосіб дозволяє підтвердити постулат, що дисперсія для вихідного чинника не залежить від абсолютної величини. Здійсненність цього постулату перевіряється за допомогою критеріїв однорідності дисперсій у різних точках факторного простору. Порушення цього постулату неприпустимо;

в) за максимальним значенням відносних відхилень відгуків моделей від відгуків системи.

Відповідно до вищесказаного, всі відомі способи перевірки на адекватність є однаково прийнятними, а при застосуванні комплексного підходу можуть використовуватись різні статистичні гіпотези.

При створенні математичної моделі дуже важливо досягти необхідного співвідношення між поведінкою реальної системи та поведінкою моделі. Для формалізації оцінки цієї відповідності необхідний відповідний механізм визначення адекватності моделі [100].

Модель вважається адекватною, якщо відбиває задані властивості об'єкта з прийнятною точністю (точність визначається як ступінь співпадіння значень вихідних величин моделі та об'єкта). В даний час застосовуються наступні способи визначення адекватності:

а) експертний метод;

б) експериментальний метод (результат одиничного безпосереднього виміру або результат статистичної обробки декількох вимірів);

в) результат розрахунку на основі кореляційних залежностей;

г) результат визначення з допомогою загальних теорій на основі прийнятих допущень та аксіом.

Експертний метод – призначення якісних, порівняльно-кількісних чи кількісних показників на підставі їх прийняття або узгодження. Часто застосовується для математичних моделей, «імітуючих» поведінку системи шляхом показу заздалегідь підготовлених даних. Часто оцінюється експертами, що мають досвід роботи на імітованому об'єкті.

Переваги методу: не вимагає наявності метричного пакету, немає необхідності в проведенні вимірювань (експерименту), статистичної

обробки тощо. Недоліки методу: суб'єктивність оцінки, значна залежність точності оцінки від компетенції експертів, велика ризик виявлення помилок під час експлуатації тренажера.

Експериментальний метод як результат одиничного безпосереднього виміру або результат статистичної обробки декількох вимірів добре підходить для математичних моделей, побудованих на наявних статистичних даних і для тих випадків, коли можна провести реальний експеримент. Переваги методу: оцінка об'єктивності. Недоліки методу: значна залежність від достовірності вихідних даних та адекватності методу статистичної обробки, висока складність при багатофакторному аналізі.

Кореляційний метод – метод дослідження взаємозалежності ознак у генеральній сукупності, які є випадковими величинами з нормальним характером розподілу [101].

Основними вимогами до застосування кореляційного аналізу є достатня кількість спостережень, сукупності факторних і результативних показників, а також їх кількісний вимір і відображення в інформаційних джерелах.

Застосування кореляційного аналізу тісно пов'язане з регресійним аналізом, тому його часто називають кореляційно-регресійним. Головними завданнями кореляційного аналізу є:

- а) визначення форми зв'язку;
- б) вимірювання щільності (сили) зв'язку;
- в) виявлення впливу факторів на результативну ознаку.

Здійснення кореляційного аналізу передбачає такі послідовні етапи:

а) встановлення причинно-наслідкових зв'язків між досліджуваними ознаками (виявлення факторів та вибір серед них тих, які найбільше впливають на результативний показник);

б) формування кореляційно-регресійної моделі (інформаційне забезпечення аналізу, вибір типу і форми зв'язку, складання моделі);

в) визначення кореляційних характеристик (показників зв'язку);

г) статистична оцінка параметрів зв'язку (економічна інтерпретація, оцінка значимості коефіцієнтів кореляції (наскільки

відібрані фактори пояснюють варіацію результативного показника) та використання їх для вирішення практичних завдань, наприклад прийняття рішень, прогнозування, планування, нормування тощо.

Крім питань адекватності математичних моделей розглядаються також і питання адекватності методів розв'язування рівнянь, що складають моделі. У роботі [102] даються достатні умови адекватності (збереження властивості асимптотичної стійкості рішень) для спеціальних класів лінійних диференціальних моделей складних технічних об'єктів при їх збуреннях вищого порядку малості. Вводиться поняття k -адекватності для кінечно-різницевих моделей диференціальних динамічних систем.

В ході моделювання для рішення систем диференціальних рівнянь використовують числові методи. Найбільш поширеним і універсальним методом є метод кінцевих різниць. При використанні цього методу область неперервної зміни аргументу (наприклад, відрізок прямої) замінюється дискретною множиною точок, що називаються вузлами. Ці вузли складають різницеву сітку. Шукана функція неперервного аргументу приблизно замінюється функцією дискретного аргументу на заданій сітці. Ця функція називається сітковою. Початкове диференціальне рівняння замінюється різницеvim рівнянням відносно сіткової функції. При цьому для похідних, що входять в рівняння, використовуються відповідні кінечно-різницеві співвідношення. Така заміна диференціального рівняння різницеvim називається його апроксимацією на сітці. Таким чином, рішення диференціального рівняння зводиться до відшукування значень сіткової функції у вузлах сітки.

Початкове диференціальне рівняння моделі замінюється різницеvim рівнянням шляхом апроксимації похідних відповідними кінечно-різницеvими співвідношеннями. При цьому в області L зміни аргументу x вводиться сітка з постійним кроком $h>0$. Значення початкової функції y у вузлах сітки замінюються значеннями сіткової функції y_h , яка є рішенням різницевого рівняння

$$A_h y_h = f_h, \quad x \in U_h, \quad (1.4)$$

де A_h – різницеvий оператор, що апроксимує диференціальний

оператор A .

Погрішність апроксимації похідних, а отже, і погрішність апроксимації (1.4) в деякій точці x може бути представлена у вигляді

$$\varepsilon(x) = O(h^k).$$

При цьому говорять, що в цій точці x має місце апроксимація k -го порядку. Індекс h в різницевому рівнянні (1.4) підкреслює, що величина кроку ϵ параметром різницевого завдання. Тому (1.4) можна розглядати як ціле сімейство різницевих рівнянь,

Тут важливу роль грають такі поняття як стійкість і збіжність різницевої схеми.

Під стійкістю схеми розуміється неперервна залежність її рішень від вхідних даних (коефіцієнтів рівнянь, правих частин, початкових і граничних умов).

При використанні методу кінцевих різниць необхідно знати точність наближення рішення різницевої схеми до рішення початкової диференціальної задачі :

$$\sigma_h \equiv y(h) - y_h.$$

Якщо ввести характерне значення σ погрішності рішення σ_h , то різницева схема сходиться, якщо для величини σ справедливо наступне граничне співвідношення:

$$\sigma \rightarrow 0, \text{ коли } h \rightarrow 0.$$

Якщо при цьому σ допускає оцінку $\sigma = O(h^k)$, то говорять, що різницева схема має точність k -го порядку або сходиться зі швидкістю $O(h^k)$. Різницеву модель, що сходиться із швидкістю $O(h^k)$, пропонується називати k -адекватною по відношенню до початкової диференціальної моделі.

Далі в роботі [102] приведені достатні умови адекватності (збіжності з точністю k -го порядку) кінечно-різницевих моделей диференціальних динамічних систем.

1.8 Література до розділу 1

1. Кориков, А.М. Интегрированные системы идентификации с учетом априорной информации / А.М. Кориков, В.Л. Сергеев // Доклады

Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2004. – № 1 (9). – С. 130–151.

2. Thacker, B. H. Concepts of Model Verification and Validation [Text] / B. H. Thacker, S. W. Doebbling, F. M. Nemez et al. – Los Alamos : LANL, 2004. – 41 p.

3. Райбман, Н. С. Идентификация объектов управления [Текст] / Н. С. Райбман // Автоматика и телемеханика. – 1979. – Вып. 6. – С. 80–93.

4. Стрижнев, А. Г. Идентификация объекта управления по переходной характеристике замкнутой системы [Текст] / А. Г. Стрижнев, А. В. Марков, А. Н. Русакович // Доклады БГУИР. – 2012. – № 5 (67). С. – 65–72.

5. Бильфельд, Н. В. Идентификация объектов управления в Toolbox PID Tuner [Текст] / Н. В. Бильфельд // Новый университет: серия «Технические науки». – 2016. – № 6–7. – С. 52–53.

6. Трунов, О. М. Критерій адекватності як оцінка ефективності процесу побудови моделі [Текст] / О. М. Трунов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 1/4 (73). – С. 36–41.

7. Yang, J. What's wrong with Fisher criterion? [Text] / J. Yang, J. Y. Yang, D. Zhang // Pattern Recognition. – 2002. – V. 35 (11). – Pp. 2665–2668.

8. Семенов, А. Д. Идентификация объектов управления [Текст] : учеб. пособие / А. Д. Семенов, Д. В. Артамонов, А. В. Брюхачев. - Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. – 211 с.

9. Бурлай, И. В. Регуляризирующий алгоритм идентификации параметров непрерывных динамических систем на базе процедуры инвариантного погружения [Текст] / И. В. Бурлай, М. А. Титов // Автоматизация и современные технологии. – 2007. – № 3. – С. 31-35.

10. Nesterov, L. A. Experimental determination of dynamic properties of adjusting objects [Text] / L. A. Нестеров // Resources and Technology. – 2003. – № 4. – Pp. 87–89.

11. Эйкхофф, П. Основы идентификации систем управления [Текст] / П. Эйкхофф. - М.: Мир, 1975. – 686 с.

12. Дилигенская, А. Н. Идентификация объектов управления [Текст] : учеб. пособие / А. Н. Дилигенская. – Самара: Изд-во Самар. гос.

ун-та, 2009. – 136 с.

13. Черногоров, Е. П. Некоторые вопросы оценки адекватности модели [Текст] / Е. П. Черногоров // Наука ЮУрГУ: материалы 66-й научн. конф. – Челябинск : Издат. центр ЮУрГУ, 2014. – С. 162–168.

14. Рутковский, А. Л. Параметрическая идентификация объектов управления в замкнутых системах [Текст] / А. Л. Рутковский, Д. Н. Дюнова // Вестник Томского государственного университета. – 2012. – №1(18). – С. 169-179.

15. Eukhoff, P. Trends And Progress In System Identification [Text] / Pieter Eukhoff. – New York : Pergamon Press, 1983. – 402 p.

16. Сейдж, Э. П. Идентификация систем управления [Текст] / Э. П. Сейдж, Дж. Л. Мелс. – М.: Наука, 1974. – 248 с.

17. Солодовников, В. В. Спектральные методы расчета и проектирования систем управления [Текст] / В. В. Солодовников, А. Н. Дмитриев, Н. Д. Егупов – М.: Машиностроение, 1986. – 440 с.

18. Оморов, Т. Т. Идентификация передаточной функции управляемой системы [Электронный источник] / Т. Т. Оморов, Р. Н. Курманалиева, Г. А. Кожекова, Р. Ч. Осмонова // Universum: Технические науки – Электрон. научн. журн. – 2014. – № 11 (12). – Режим доступа : [http : www/7universum.com/ru/tech/archive/item/1758](http://www7.universum.com/ru/tech/archive/item/1758)

19. Кубланов, М. С. Проверка адекватности математических моделей [Текст] / М. С. Кубланов // Научный вестник МГТУ ГА – 2015. – № 211. – С. 29–36.

20. Корниенко, И. С. Программно-инструментальный комплекс идентификации нечетких систем [Текст] / И. С. Корниенко, И. А. Серебренникова // Доклады ТУСУРа. – 2012. – № 1(25). – С. 60-64.

21. Tron, E. Mathematical modeling of observed natural behavior: a fuzzy logic approach [Text] / E. Tron, M. Margaliot // Fuzzy Sets and Systems. – 2004. – Vol. 146. – Pp. 437–450.

22. Ходашинский, И. А. Идентификация нечетких систем на основе непрерывного алгоритма муравьиной колонии [Текст] / И. А. Ходашинский, П. А. Дудин // Автометрия. – 2012. – Т. 48. – № 1. – С. 63–71.

23. Khodashinskii, I. A. Identification of fuzzy systems using a

continuous ant colony algorithm [Text] / I. A. Khodashinskii, P. A. Dudin // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2012. – Vol. 48. – № 1. – Pp. 54–61.

24. Ходашинский, И. А. Идентификация нечетких систем на основе прямого алгоритма муравьиной колонии [Текст] / И. А. Ходашинский, П. А. Дудин // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2011. – № 3. – С. 26–33.

25. Ходашинский, И. А. Параметрическая идентификация нечетких моделей на основе гибридного алгоритма муравьиной колонии [Текст] / И. А. Ходашинский, П. А. Дудин // Автометрия. – 2008. – Т. 44. – № 5. – С. 24–35.

26. Khodashinsky, I. A. Parametric Fuzzy Model Identification Based on a Hybrid Ant Colony Algorithm [Text] / I. A. Khodashinskii, P. A. Dudin // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2008. – Vol. 44. – № 5. – Pp. 402–411.

27. Ходашинский, И. А. Идентификация параметров нечетких систем на основе адаптивного алгоритма роящихся частиц [Текст] / И. А. Ходашинский, Д. С. Синьков // Информационные технологии. – 2011. – № 8. – С. 2–5.

28. Ходашинский, И. А. Идентификация параметров нечетких моделей типа сингтон на основе алгоритма роящихся частиц [Текст] / И. А. Ходашинский // Информационные технологии. – 2009. – №6. – С. 8–11.

29. Ходашинский, И. А. Идентификация нечетких систем: методы и алгоритмы [Текст] / И. А. Ходашинский // Проблемы управления. – 2009. – № 4. – С. 15–23.

30. Ходашинский, И. А. Идентификация нечетких систем на базе алгоритма имитации отжига и методов, основанных на производных [Текст] / И. А. Ходашинский // Информационные технологии. – 2012. – № 3. – С. 14–20.

31. Ходашинский, И. А. Идентификация нечетких систем на основе метода дифференциальной эволюции [Текст] / И. А. Ходашинский, П. А. Дудин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2011. – Т. 23. – № 1. – Ч. 1. – С. 178–

183.

32. Бойков, И. В. Идентификация дискретных динамических систем с распределенными параметрами [Текст] / И. В. Бойков, Н. П. Кривулин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Физико-математические науки. – 2014. – № 2(30). – С. 34-48.

33. Бойков, И. В. Параметрическая идентификация систем, математические модели которых описываются дифференциальными уравнениями с производными дробных порядков [Текст] / И. В. Бойков, Н. П. Кривулин // Метрология. – 2013. – № 9. – С. 3–17.

34. Бойков, И. В. Параметрическая идентификация эрдитарных систем с распределенными параметрами [Текст] / И. В. Бойков, Н. П. Кривулин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 2 (26). – С. 120–129.

35. Тюкин, И. Ю. Адаптация в нелинейных динамических системах [Текст] / И. Ю. Тюкин, В. А. Терехов. – Санкт-Петербург, 2006. – 378 с.

36. Гропп, Д. Методы идентификации систем [Текст] / Д. Гропп. – М. : Мир, 1975. – 302 с.

37. Карабутов, Н. Н. Адаптивная идентификация систем [Текст] / Н. Н. Карабутов – М.: КомКнига, 2006. – 384 с.

38. Миронов, В. И. Вариационный подход к комплексному оцениванию параметров состояния нелинейных динамических систем [Текст] / В. И. Миронов, Ю. В. Миронов // Тр. СПИИРАН. – 2005. – Вып. 2. – С. 298–307.

39. Кику, А. Г. Адаптивные системы идентификации [Текст] / А. Г. Кику, В. И. Костюк и др. – Киев. : Техника. – 1975. – 284 с.

40. Справочник по теории автоматического управления [Текст] : справочник / под ред. А. А. Красовского. – М.: Наука. 1987. – 712 с.

41. Лурье, А. И. Аналитическая механика [Текст] / А. И. Лурье. – М.: Гос. изд. физ.-мат. лит. 1961. – 824 с.

42. Костоглотов, А. А. Регуляризованный алгоритм многопараметрической вариационной идентификации динамических систем [Текст] / А. А. Костоглотов, С. В. Лазаренко, Д. С. Андрашитов // Сервис в России и за рубежом. – 2011. – № 8(27). – С. 25–36.

43. Леготкина, Т. С. Идентификация систем автоматического управления при помощи «белого шума» [Текст] / Т. С. Леготкина, В. С. Мальков // – Пермь : Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – С. 245–252
44. Леготкина, Т. С. Методы идентификации систем [Текст] / Т. С. Леготкина, С. А. Данилова // Пермь : Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – С. 48–50.
45. Андриевская, Н. В. Идентификация систем управления : учеб. пособие [Текст] / Н. В. Андриевская, Н. Н. Матушкин, А. А. Южаков. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 170 с.
46. Филиппова, Е. В. Активная параметрическая идентификация стохастических нелинейных непрерывно-дискретных систем на основе планирования входных сигналов [Текст] : автореф. дисс. 01.02.2013 / Филиппова Елена Владимировна ; Новосибирский гос. техн. ун-т – Новосибирск, 2014. – 23 с.
47. Семенов, А. Д. Основы теории управления и идентификации в технических системах [Текст] : учеб. пособие. в 2 кн. / А. Д. Семенов, М. А. Щербаков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012/ – Кн.2. – 128 с.
48. Koza, J. R. Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection [Text] / J. R. Koza // Cambridge, Massachusetts, London, MA, MIT Press, 1992. – 819 p.
49. O'Neill, M. Automatic Programming in an Arbitrary Language [Text] / M. O'Neill // Evolving Programs in Grammatical Evolution: PhD thesis. University of Limerick, 2001. – 163 p.
50. Zelinka, I. Analytic programming by Means of Soma Algorithm. [Text] / I. Zelinka // Proc. 8th International Conference on Soft Computing Mendel'02. Brno, Czech Republic. – 2002. – Pp. 93-101.
51. Дивеев, А. И. Метод сетевого оператора [Текст] / А. И Дивеев. – М., 2010. – 178 с.
52. Соколов, С. В. Решение задачи нелинейной параметрической идентификации стохастических объектов с использованием критерия минимума вероятности ошибки оценивания [Текст] / С. В. Соколов, П. А. Кучеренко // Изв. ВУЗов. Приборостроение. – 2009. – Т. 52. – № 3. – С. 5–12.
53. Руднев, К. К. Параметрическая идентификация многомерной

нелинейной стационарной динамической системы при наличии автокоррелированных помех в выходных сигналах [Текст] / К. К. Руднев // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 3 (31). – С. 14–23.

54. Goodwin, G. Control System Design / G.C. Goodwin, S.F. Graebe, M.E. Salgado. – New Jersey : Prentice Hall, 2001. – 908 p.

55. Dorf, R. Modern Control Systems [Text] / R.C. Dorf, R.H. Bishop. – Davis, USA : Addison-Wesley, 2002. – 832 p.

56. Карташов, В. Я. Идентифицирующая функция и её свойства [Текст] / В. Я. Карташов, Л. В. Карташова, О. А. Махарева, Д. Ю. Сахнин, Т. А. Хорошева // Материалы VII Всероссийской НПК AS 2009. – Новокузнецк, – 2009. – С. 399–405.

57. Рабинер, Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов [Текст] / Л. Рабинер, Б. Гоулд. – М.: Мир, 1978. – 848 с.

58. Карташов, В. Я. Структурно-параметрическая идентификация динамических объектов в режиме реального времени [Текст] / В. Я. Карташов, Л. В. Карташова, С. С. Самойленко // Вестник Кемеровского государственного университета. – 2015. – № 1 (61). – Т. 1. – С. 13–18.

59. Карташов, В. Я. Непрерывные дроби и их приложения к задачам технической кибернетики [Текст] : учебное пособие / В. Я. Карташов, С. Г. Гутова – Кемерово: КемГУ, 2013. – 138 с.

60. Шумихин, А. Г. Применение нейросетевых динамических моделей в задаче параметрической идентификации технологического объекта в составе системы управления [Текст] / А. Г. Шумихин, А. С. Бояршинова // Вестник ПНИПУ, – 2015 – №3. – С. 21–38.

61. Идрисов, И. И. Алгоритмы адаптации и обеспечения отказоустойчивости систем управления газотурбинными двигателями на основе нейросетевых технологий [Текст] : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 02.09.14 / Идрисов Ильдар Ирекович ; Уфимский гос. авиационный техн. ун-т. – Уфа, 2009. – 19 с.

62. Аведьян, Э. Д. Алгоритмы настройки многослойных нейронных сетей [Текст] / Э. Д. Аведьян // АиТ. – 1995. – № 4. – С. 106–118.

63. Ковалев, С. М. Структурно-параметрическая идентификация

нечетких систем с использованием обобщенного критерия адекватности [Текст] / С. М. Ковалев // Известия ТРТУ. – 2005. – № 3. – с. 10–17.

64. Батыршин, И. З. Основные операции нечеткой логики и их обобщение [Текст] / И. З. Батыршин. – Казань: Отечество, 2001. – 102 с.

65. Дьяконица, С. А. Применение компенсирующего регулирования для многосвязного управления многопараметрической системой [Текст] / С. А. Дьяконица, И. Р. Сугачевский // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – Вып. 1 (21). – С. 86–90.

66. Леготкина, Т. С. Идентификация систем автоматического управления при помощи «белого шума» [Текст] / Т. С. Леготкина, В. С. Мальков // Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – С. 245-252

67. Пупков, К. А. Функциональные ряды в теории нелинейных систем [Текст] / К. А. Пупков, В. И. Капалин, А. С. Ющенко. – М. : Наука, 1976. – 448 с.

68. Имаев, Д. Х. Синтез систем управления в среде MATLAB [Текст] : Пособие по выполнению курсового проектирования по дисциплинам «Теория автоматического управления», «Основы теории управления» / Д. Х. Имаев. – СПб : ЛЭТИ, 2010. – 78 с.

69. Классификация методов идентификации динамических систем [Электронный ресурс] // В univere.ru. – Режим доступа : <https://vunivere.ru/work2573>. – Заголовок с экрана.

70. Прангишвили, И. В. Идентификация систем и задачи управления: на пути к современным системным методологиям / И. В. Прангишвили, В. А. Лотоцкий, К. С. Гинсберг, В. В. Смолянинов // Пробл. управл. – 2004. – Вып. 4. – С. 2–15.

71. Гропп, Д. Методы идентификации систем [Текст] / Д. Гропп. – М. : Мир, 1975. – 302 с.

72. Дейч, А. М. Методы идентификации динамических объектов [Текст] / А. М. Дейч – М. : Энергия, 1979. – 240 с.

73. Кашьяп, Р. Л. Построение динамических стохастических моделей по экспериментальным данным [Текст] / Р. Л. Кашьян, А. Р. Лао. – М. : Наука, 1983. – 389 с.

74. Райбман, Н. С. Построение моделей процессов производства [Текст] / Н. С. Райбман, В. М. Чадеев. – М. : Энергия, 1975. – 376 с.

75. Перельман, И. И. Методология выбора структуры модели при идентификации объектов управления [Текст] / И. И. Перельман // Автоматика и телемеханика. – 1983. – № 11. – С. 5–29.
76. Astrom, J. K. System Identification [Text] / J. K. Astrom, P. Eykhoff // Automatica. – 1971. – Vol. 7. – № 2. – Pp. 123-162.
77. Ljung, L. System Identification [Text] / L. Ljung // Theory for the User. Prentice Hall, Upper Saddle River, N. J. 2nd edition, 1999. – 499 p.
78. Цыпкин, Я. З. Основы информационной теории идентификации [Текст] / Я. З. Цыпкин. – М. : Наука, 1995. – 336 с.
79. Карабутов, Н. Н. Адаптивная идентификация систем: информационный синтез [Текст] / Н. Н. Карабутов. – М. : УРРС, 2006. – 384 с.
80. Эйкхофф, П. Современные методы идентификации систем [Текст] / Под ред. П. Эйкхоффа – М. : Мир, 1983. – 400 с.
81. Ивахненко, А. Г. Самоорганизация прогнозирующих моделей [Текст] / А. Г. Ивахненко, И. А. Мюллер. – Киев : Техника, 1984. – 350 с.
82. Семенов, А. Д. Идентификация динамических объектов: учеб. пособие [Текст] / А. Д. Семенов, Д. В. Артамонов, А. В. Брюхачев. – Пенза : Пенз. гос. ун-т, 2003. – 211 с.
83. Кашьяп, Р. Л. Построение динамических стохастических моделей по экспериментальным данным [Текст] / Р. Л. Кашьяп, А. Р. Рао. – М. : Наука, 1983. – 384 с.
84. Медведев, А.В. Непараметрические системы адаптации [Текст] / А.В. Медведев. – Новосибирск : Наука, 1983. – 174 с.
85. Медведев, А.В. Теория непараметрических систем. Управление-I [Текст] / А. В. Медведев // Вестник СибГАУ. – 2013. – № 2(48). – С. 57–63.
86. Смирнов, А. Н. Верификация цифровых динамических моделей крупных энергообъединений по данным СМПП : дисс. ... канд. тех. наук : 05.14.02 : защищена / Смирнов Андрей Николаевич. – Санкт-Петербург, 2013. – 202 с.
87. Заболотский, В.П. Математические модели в управлении : учеб. пособие [Текст] / В.П. Заболотский, А.А. Оводенко, А.Г. Степанов. – СПб.: Изд-во СПбГУАП, 2001. – 196 с.

88. Refsgaard, J.C. Modelling guidelines – terminology and guiding principles [Text] / J.C. Refsgaard, H.J. Henriksen // *Advances in Water Resources*. – 2004. – Vol. 27. – Pp. 71–82.

89. Schlesinger, S. Terminology for model credibility [Text] / S. Schlesinger, R.E. Crosbie, R.E. Gagne, G.S. Innis, C.S. Lalwani, J. Loch, et al. // *SCS Tech. Comm. Model Credibil. Simul.* – 1979. – Vol. 32 (3). – Pp. 103–104.

90. Коган, Б. Я. Общие вопросы моделирования и моделирование с помощью вычислительных машин, Теория и методы математического моделирования [Текст] / Б. Я. Коган, И. М. Тетельбаум. – М. : Наука, 1978. – 13 с.

91. Климов, У. Н. Формирование математических моделей как сложный многоуровневый процесс, Теория и методы математического моделирования [Текст] / У. Н. Климов // – М. : Наука, 1978. – С. 14–16.

92. Кондратенко, Ю. П. Применение методов осредняющих операторов к исследованию нестационарных объектов. Теория и методы математического моделирования [Текст] / Ю. П. Кондратенко, А. Н. Трунов // – М. : Наука, 1978. – С. 123–124.

93. Trounov, A. N. Mathematical aspects of image recognition [Text] / A. N. Trounov // *Proc. Of International tecnology 90, Szezecin, Poland, 1990.* – P. 479–493.

94. Трунов, О. М. Рекурентна апроксимация у задачах моделювання та проектування : монографія [Текст] / О. М. Трунов. – Миколаїв : Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2012. – 270 с.

95. Козеев, А. А. Методы аппроксимации выходных координат нелинейных систем управления [Текст] / А. А. Козеев // *Изв. АН СССР. Техническая кибернетика.* – 1979. – № 3. – С. 194–199.

96. Батунер, Л. М. Математические методы в химической технике [Текст] / Л. М. Батунер, М. Е. Позин. – Изд. Химия, Ленинградское отделение, 1968. – 823 с.

97. Хемминг, Р. В. Численные методы [Текст] / Р. В. Хемминг. – М. : Наука, 1972. – 400 с.

98. Трауб, Дж. Итерационные методы решения уравнений [Текст] / Дж. Трауб; пер. с англ. – М. : Мир, 1985. – 264 с.

99. Прохорченко, А. Дослідження адекватності математичної моделі. Моя думка... [Електронний ресурс] / А. Прохорченко. – Режим доступу: <https://pr0hogy.livejournal.com/3943.html>

100. Гаммер, М.Д. Адекватность и универсальность математической модели [Електронний ресурс] / М.Д. Гаммер // Свежие решения в области ИТ. – 2012. – Режим доступа: <http://www.professionalgroup.ru/resheniya/ispolzuemyie-technologii/adekvatnost-i-universalnost-matematicheskoy-modeli.html>

101. Купалова, Г.І. Теорія економічного аналізу : навчальний посібник [Текст] / Г. І. Купалова. – К. : Знання, 2008. – 639 с.

102. Ахрем, А.А. Математические методы анализа адекватности моделей сложных технических объектов / А. А. Ахрем // Труды ИСА РАН – 2007. – Т. 29 – С. 245–264.

РОЗДІЛ 2. ВИКОРИСТАННЯ ПРИНЦИПІВ СИМЕТРІЇ ДЛЯ АДАПТИВНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ

2.1 Принцип симетрії

Серед багатьох концепцій, на основі яких будуються наукові теорії, надзвичайно важливе місце займає ідея симетрії.

Особлива роль поняття симетрії в науці і техніці пов'язана перш за все з тим, що воно відображає найбільш загальні закономірності величезної кількості тіл і явищ природи. При цьому може йтися не тільки про симетрії матеріальних об'єктів, а й про симетрії систем понять і теорій.

Згідно "Філософської енциклопедії" [1], принцип симетрії – евристичний і методологічний принцип наукового дослідження, відповідно до якого певні властивості і взаємозв'язки об'єктів, що формулюються як закони в складі наукових теорій, інваріантні щодо деяких перетворень (складають групу симетрії); в цьому сенсі принцип симетрії можна розуміти як певне узагальнення принципів відносності, інваріантності. Принцип симетрії можна звести до наступних положень:

- 1) повний опис системи зберігається при всіх перетвореннях в будь-яких еквівалентних системах координат;
- 2) всі рухи, які можливі в одній системі координат, можливі у всіх еквівалентних системах;
- 3) рівняння руху інваріантні у всіх еквівалентних системах.

Принцип симетрії сприяє виявленню структури наукових теорій і взаємозв'язку законів, які фігурують у них.

Різним аспектам і сферам застосування принципів симетрії присвячена велика кількість публікацій [2–11].

Що ж стосується теорії і практики адаптивної ідентифікації та управління технологічними процесами, то тут існує ще досить широке коло проблем, успішне вирішення яких можливе за допомогою активного використання принципів симетрії.

2.2 Метод попарного зближення параметрів моделей

2.2.1 Передумови до використання принципів симетрії

Практичне рішення завдань автоматизації і управління технічними об'єктами в реальному масштабі часу пов'язаного, як правило, з оперативною ідентифікацією останніх адаптивними моделями. Мінімізація градієнтними алгоритмами координатних критеріїв самоналаштування призводить у ряді випадків до небажаних сильних коливань вихідної координати і параметрів, що настроюються. Такі коливання, коли значення функцій чутливості є лінійно незалежними, не дають можливості здійснити якісну ідентифікацію параметрів об'єкту.

Причину коливань параметрів адаптивної моделі можна пояснити, якщо розглянути динаміку маятників, що мають різні приведені довжини.

Відхилимо три маятники від стану рівноваги так, щоб їх абсциси придбали одну і ту ж величину l . При цьому ординати маятників отримують різні прирости: $h_1 > h > h_2$. Найбільший приріст потенційної енергії отримає короткий маятник, а найменший – довгий маятник. Якщо тепер впродовж малого проміжку часу довжину короткого маятника збільшити, а довжину довгого маятника зменшити до довжини середнього маятника, то короткий маятник збільшить, а довгий зменшить амплітуду своїх коливань. Таким чином, попри те, що параметри маятників набудуть однакових значень, динаміка маятників буде різною.

Щоб короткий і довгий маятники стали коливатися так, як коливається маятник з середньою довжиною, необхідно одночасно з вирівнюванням параметрів маятників вирівнювати також рівні їх енергій.

Вирівнювання енергетичних характеристик адаптивної моделі і об'єкту, що ідентифікується, при налаштуванні параметрів моделі градієнтними алгоритмами якраз і призводить до згаданих вище коливань вихідної координати і параметрів моделі. Шляхом організації подібних коливань модель позбавляється від надлишків енергії. Якщо ж у об'єкту, що ідентифікується, енергетичні характеристики вище, ніж у адаптивної моделі, то має місце тривале "дотягування" значень параметрів моделей до значень параметрів об'єкту [21].

Описаних вище небажаних явищ, що мають місце при

налаштуванні моделей, можна уникнути, якщо замість однієї адаптивної моделі узяти дві. При цьому одна з моделей повинна мати більш високі енергетичні характеристики, ніж об'єкт, що ідентифікується, а друга – нижчі. Якщо забезпечити між цими моделями енергетичну взаємодію через параметри, що налаштовуються, то модель з великим рівнем енергії замість того, щоб розсіювати її надлишок за допомогою небажаних коливань параметрів і вихідних координат, здійснюватиме енергетичне підживлення моделі з меншим рівнем енергії. Остання ж, отримуючи додаткову енергію, зможе прискорити процеси своєї адаптації.

Оскільки структури таких моделей мають бути однаковими і, крім того, еквівалентними структурі об'єкту, що ідентифікується, взаємодія адаптивних моделей має бути організована з використанням принципів симетрії. При цьому може бути задіяний метод пошуку екстремуму симетричної цільової функції. Крім того, замість традиційних симетричних координатних критеріїв самоналаштування, що використовуються при синтезі систем адаптивної ідентифікації з однією моделлю, можуть бути застосовані принципово нові критерії – симетричні координатно-параметричні.

Якщо структура використовуваної при адаптивній ідентифікації моделі еквівалентна структурі об'єкту, то на її вхід подається той же сигнал, що і на об'єкт. Ця дія підводить до об'єкта і до моделі однакові порції енергії.

У загальному випадку структура моделі може відрізнятись від структури об'єкта, що ідентифікується, і для вирівнювання енергетичних характеристик моделі і об'єкту необхідно додати у модель або вилучити у неї деяку кількість енергії. Останнє може бути здійснене за допомогою організації для моделі спеціальної вхідної дії відповідно до принципу узагальненого входу [19].

2.2.2 Побудова симетричної цільової функції і алгоритму адаптивної ідентифікації

Нехай динаміка багатовимірною об'єкту управління, що перебуває під впливом шумів низького рівня, якими можна нехтувати, описується векторно-матричним диференціальним рівнянням

$$\frac{dx}{dt} = Ax + f, \quad x(t_0) = x_0, \quad (2.1)$$

де $x = x(t)$ – n -мірний вектор стану об'єкту (він же є вектором вихідних координат), $f = f(t)$ – n -мірний вектор вхідного сигналу, $A = \left\| a_{ij} \right\|$ – матриця невідомих параметрів, що повільно міняються, $a_{ij}(i, j = \overline{1, n})$.

Ідентифікацію невідомих параметрів об'єкта, число яких може бути зменшене шляхом застосування канонічних форм, здійснюватимемо за допомогою зближення параметрів двох еквівалентних по структурі моделей, що настроюються, описуються диференціальними рівняннями [13, 14]:

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dt} &= By + f, \quad y(t_0) = x_0, \\ \frac{dz}{dt} &= Cz + f, \quad z(t_0) = x_0. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Тут $y = y(t)$ и $z = z(t)$ – n -мірні вектори стану моделей (вони ж є векторами вихідних координат), $B = \left\| b_{ij} \right\|$ і $C = \left\| c_{ij} \right\|$ – матриці параметрів, що налаштовуються, b_{ij} та $c_{ij}(i, j = \overline{1, n})$.

Для синтезу алгоритму адаптивної ідентифікації параметрів об'єкта (2.1) може бути використана цільова функція, яка:

- є ненегативною або позитивно визначеною;
- є симетричною функцією відносно параметрів b_{ij} і c_{ij} моделей і змінних стану y_j та $z_j(i, j = \overline{1, n})$;

- має екстремум-мінімум, що відповідає умові

$$B = C \text{ при } y = z = x. \quad (2.3)$$

У загальному випадку ця функція має вигляд

$$R = R(B, C, y, z, x).$$

Рух до її мінімуму в просторі параметрів b_{ij} та c_{ij} можна

реалізувати за допомогою якого-небудь методу пошуку екстремуму. Якщо ж скористатися градієнтним методом, то алгоритм налаштування моделей (2.2) матиме вигляд:

$$db_{ij} / dt = -k \cdot \partial R / \partial b_{ij}, \quad dc_{ij} / dt = -k \cdot \partial R / \partial c_{ij}.$$

В процесі налаштування параметрів b_{ij} та c_{ij} моделей (2.2) розузгодження $\varepsilon = y - z$ між поведінкою моделей підкоряється диференціальному рівнянню

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = By - Cz, \quad \varepsilon(t_0) = 0. \quad (2.4)$$

У [13] на базі використання елементів правої частини рівняння (2.4) і складових згладженого вектора вихідного сигналу об'єкту x побудована симетрична координатно-параметрична цільова функція

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [(b_{ij}x_j - c_{ij}z_j)^2 + (c_{ij}x_j - b_{ij}y_j)^2 + b_{ij}^2(x_j - y_j)^2 + c_{ij}^2(x_j - z_j)^2] J. \quad (2.5)$$

Ця функція має мінімальне значення $R=0$ в точці простору параметрів моделей (2.2), що задовольняє умові (2.3). Рух параметрів b_{ij} та c_{ij} ($i, j = \overline{1, n}$) у точку мінімуму симетричної цільової функції R реалізується за допомогою алгоритму градієнтного методу пошуку екстремуму.

В даному випадку він має вигляд:

$$\begin{cases} db_{ij} / dt = -k_{ij} \left\{ x_j [(2x_j - y_j)b_{ij} - z_j c_{ij}] + Q_{ij} \right\}, \\ dc_{ij} / dt = -k_{ij} \left\{ x_j [(2x_j - z_j)c_{ij} - y_j b_{ij}] + P_{ij} \right\}, \end{cases} \quad (2.6)$$

де

$$Q_{ij} = \sum_{r=1}^n \sum_{q=1}^n \frac{\partial (b_{rq} y_q)}{\partial b_{ij}} [(2y_q - x_q) b_{rq} - x_q c_{rq}],$$

$$P_{ij} = \sum_{r=1}^n \sum_{q=1}^n \frac{\partial (c_{rq} z_q)}{\partial c_{ij}} [(2z_q - x_q) c_{rq} - x_q b_{rq}].$$

Для організації зближення параметрів b_{ij} та c_{ij} , в результаті якого

виконується умова (2.3), їх початкові значення $b_{ij}(t_0)$ і $c_{ij}(t_0)$ вибираються неоднаковими. Вони можуть розташовуватися як по одну, так і по різні сторони від шуканого значення a_{ij} параметра об'єкта.

На практиці у зв'язку з неможливістю визначення точних значень функцій чутливості $\partial y_q / \partial b_{ij}$ та $\partial z_q / \partial c_{ij}$ ($i, j, q = \overline{1, n}$) використовується усічений варіант алгоритму (2.6), в якому елементи Q_{ij} та P_{ij} відсутні.

2.2.3 Збіжність алгоритму ідентифікації

Знайдемо умови асимптотичної збіжності параметрів b_{ij} та c_{ij} моделей до параметрів, що ідентифікуються a_{ij} ($i, j = \overline{1, n}$). Для цього скористаємося другим методом Ляпунова.

Виберемо позитивно певну квадратичну форму

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^n \frac{\varphi_{ij}^2 + \psi_{ij}^2}{k_{ij}} + \varepsilon_i^2 + \eta_i^2 \right], \quad (2.7)$$

де $\varphi_{ij} = a_{ij} - b_{ij}$, $\psi_{ij} = a_{ij} - c_{ij}$, $\varepsilon_i = x_i - y_i$, $\eta_i = x_i - z_i$.

Квадратична форма V має екстремум-мінімум в точці, що задовольняє умові (2.3) при $B = C = A$.

Повна похідна за часом від квадратичної форми (2.7) має вигляд

$$\frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^n \frac{\varphi_{ij} \dot{\varphi}_{ij} + \psi_{ij} \dot{\psi}_{ij}}{k_{ij}} + \varepsilon_i \dot{\varepsilon}_i + \eta_i \dot{\eta}_i \right]. \quad (2.8)$$

Представимо похідні $\dot{\varepsilon}_i$ та $\dot{\eta}_i$ сигналів розузгодження між вихідними координатами моделей і об'єкту, а також алгоритми налаштування параметрів b_{ij} и c_{ij} ($i, j = \overline{1, n}$) таким чином:

$$\dot{\varepsilon}_j = \sum_{i=1}^n (x_i \varphi_{ij} + b_{ij} \varepsilon_j), \quad \dot{\eta}_i = \sum_{j=1}^n (x_j \psi_{ij} + c_{ij} \eta_j),$$

$$\dot{b}_{ij} = -k_{ij} [X_j (b_{ij} \varepsilon_j + c_{ij} \eta_j - x_j \varphi_{ij} + x_j \psi_{ij}) + Q_{ij}],$$

$$\dot{c}_{ij} = -k_{ij} [X_j (b_{ij} \varepsilon_j + c_{ij} \eta_j + x_j \varphi_{ij} - x_j \psi_{ij}) + P_{ij}],$$

де

$$Q_{ij} = \sum_{r=1}^n \sum_{q=1}^n \frac{\partial(b_{rq} y_q)}{\partial b_{ij}} (-2b_{rq} \varepsilon_q + x_q \psi_{rq} - x_q \varphi_{rq}), \quad P_{ij} = \sum_{r=1}^n \sum_{q=1}^n \frac{\partial(c_{rq} z_q)}{\partial c_{ij}} (-2c_{rq} \eta_q + x_q \varphi_{rq} - x_q \psi_{rq}).$$

Враховуючи, що $\dot{\varphi}_{ij} = -\dot{b}_{ij}$ і $\dot{\psi}_{ij} = -\dot{c}_{ij}$, перетворимо вираження (2.8), підставивши в нього значення нев'язок $\varepsilon_i, \eta_i, \varphi_{ij}, \psi_{ij}$ та їх похідних. Отримаємо:

$$\begin{aligned} dV/dt = & \sum_{i=1}^n \left\{ \sum_{j=1}^n [b_{ij} x_j \varphi_{ij} \varepsilon_j + c_{ij} x_j \varphi_{ij} \eta_j - x_j^2 \varphi_{ij}^2 + x_j^2 \varphi_{ij} \psi_{ij} + b_{ij} x_j \psi_{ij} \varepsilon_j + \right. \\ & + \sum_{r=1}^n \sum_{q=1}^n \frac{\partial(b_{rq} y_q)}{\partial b_{ij}} (x_q \psi_{rq} - 2b_{rq} \varepsilon_q - x_q \varphi_{rq}) \cdot \varphi_{ij} + \sum_{r=1}^n \sum_{q=1}^n \frac{\partial(c_{rq} z_q)}{\partial c_{ij}} (x_q \varphi_{rq} - 2c_{rq} \eta_q - \\ & \left. - x_q \psi_{rq}) \psi_{ij} + c_{ij} x_j \psi_{ij} \eta_j + x_j^2 \varphi_{ij} \psi_{ij} - x_j^2 \psi_{ij}^2 + x_j \varepsilon_i \varphi_{ij} + b_{ij} \varepsilon_i \varepsilon_j + x_j \eta_i \psi_{ij} + c_{ij} \eta_i \eta_j \right\} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Помітимо, що вираження (2.9) також є квадратичною формою.

Асимптотично стійкий монотонний рух параметрів b_{ij} та c_{ij} у точку екстремуму функції V матиме місце тоді, коли у будь-якій точці, що лежить на траєкторії спуску, окрім точки, що задовольняє умові (2.3), буде виконана нерівність

$$dV/dt < 0, \quad (2.10)$$

тобто повна похідна за часом від функції V буде негативно визначеною.

З нерівності (2.9), (2.10) витікає, що воно може бути виконане лише за наявності деяких обмежень на коефіцієнти квадратичної форми dV/dt , якими є $b_{ij} X_j, c_{ij} X_j, b_{ij}, c_{ij}, X_j, X_j^2, c_{rq} \partial(c_{rq} z_q) / \partial c_{ij}, b_{rq} \partial(b_{rq} y_q) / \partial b_{ij}, x_q \partial(b_{rq} y_q) / \partial b_{ij}$ і $x_q \partial(c_{rq} z_q) / \partial c_{ij}$ (i, j, r, q = 1, n).

Оскільки коефіцієнти квадратичної форми (2.9) є функціями часу,

то для знаходження умов негативної визначеності функції dV/dt можна скористатися узагальненою умовою Сильвестра [15].

Як було відмічено вище, при ідентифікації стаціонарних і квазістаціонарних об'єктів добрі результати можуть бути отримані без застосування функцій чутливості вихідних координат моделей від параметрів, що налаштовуються:

$$\begin{cases} \frac{db_{ij}}{dt} = -k_{ij}x_j[(2x_j - y_j)b_{ij} - z_jc_{ij}], \\ \frac{dc_{ij}}{dt} = -k_{ij}x_j[(2x_j - z_j)c_{ij} - y_jb_{ij}], \quad i, j = \overline{1, n}. \end{cases} \quad (2.11)$$

Заміна алгоритму (2.6) на алгоритм (2.11) при рішенні завдань адаптивної ідентифікації призводить до необхідності вибору неспівпадаючих початкових значень для різних пар параметрів моделей і знаходження умови, при якій процес зближення цих параметрів є асимптотично стійким.

Для чого відніmemo з першого рівняння системи (2.11) її друге рівняння. Отримаємо

$$\frac{d(b_{ij} - c_{ij})}{dt} = -2k_{ij}x_j^2(b_{ij} - c_{ij}), \quad b_{ij}(t_0) - c_{ij}(t_0) \neq 0. \quad (2.12)$$

Рішення диференціального рівняння (2.12) має вигляд:

$$b_{ij}(t) - c_{ij}(t) = [b_{ij}(t_0) - c_{ij}(t_0)] \cdot \exp[-2k_{ij} \int_{t_0}^t x_j^2(\tau) d\tau]. \quad (2.13)$$

З вираження (2.13) виходить, що асимптотично стійке зближення параметрів b_{ij} та c_{ij} можливо за умови

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_{t_0}^t x_j^2(\tau) d\tau = \infty. \quad (2.14)$$

У свою чергу, параметри b_{ij} та c_{ij} здійснюватимуть асимптотично стійкий рух в точку, що задовольняє умові (2.3), у тому випадку, коли справедливо (2.14) і квадратична форма

$$\begin{aligned} \Omega = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (b_{ij}x_j\varphi_{ij}\varepsilon_j + c_{ij}x_j\varphi_{ij}\eta_j - x_j^2\varphi_{ij}^2 + x_j^2\varphi_{ij}\psi_{ij} + b_{ij}x_j\psi_{ij}\varepsilon_j + c_{ij}x_j\psi_{ij}\eta_j - \\ - x_j^2\psi_{ij}^2 + x_j^2\psi_{ij}\varphi_{ij} + x_j\varepsilon_i\varphi_{ij} + x_j\eta_i\psi_{ij} + b_{ij}\varepsilon_i\varepsilon_j + c_{ij}\eta_i\eta_j) \end{aligned} \quad (2.15)$$

є негативно визначеною, тобто в усіх точках з координатами $(\varphi_{ij}, \psi_{ij}, \varepsilon_i, \eta_i)$, що задовольняють умові [15]:

$$\sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=1}^n (\varphi_{ij}^2 + \psi_{ij}^2) + \varepsilon_i^2 + \eta_i^2 \right] \leq \mu \quad \text{при } t \geq t_q$$

(t_q – досить велика, а μ – досить мала величини), окрім точки $(\varphi_{ij}, \psi_{ij}, \varepsilon_i, \eta_i) = (0, 0, 0, 0)$, виконується нерівність: $\Omega < 0$.

2.2.4 Вплив шуму на точність оцінки параметрів об'єкту

Усе описане вище відноситься до ситуації, коли ідентифікація параметрів $a_{ij}(i, j = \overline{1, n})$ об'єкта управління здійснюється за результатами обробки малозашумленого вихідного сигналу $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$.

Цей сигнал розглядається як детермінований. Проте у багатьох випадках подібне припущення не можна виправдати і з перешкодами доводиться вважатися.

Якщо j -я координата вихідного сигналу $x(t)$ об'єкта, що ідентифікується, схильна до дії адитивної завади $\xi_j(t)$, що є стаціонарною випадковою функцією часу з $M[\xi_j(t)] = 0$ і $D[\xi_j(t)] = d_j$, то вираження, що описує процес зближення параметрів b_{ij} и \tilde{n}_{ij} адаптивних моделей, має вигляд:

$$b_{ij}(t) - c_{ij}(t) = [b_{ij}(t_0) - c_{ij}(t_0)] \cdot \exp[-2k_{ij} \int_{t_0}^t (x_j(\tau) + 2\xi_j(\tau)) \cdot x_j(\tau) d\tau] \times \\ \times \exp[-2k_{ij} \int_{t_0}^t \xi_j^2(\tau) d\tau] \quad (2.16)$$

Помітимо, що справедливе наступне

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \exp[-2k_{ij} \int_{t_0}^t \xi_j^2(\tau) d\tau] \rightarrow 0.$$

Тому присутність адитивної завади $\xi_j(t)$ на виході об'єкту

забезпечує асимптотично стійкий процес зближення параметрів моделей b_{ij} та c_{ij} навіть у тому випадку, коли сигнал $x_j(t)$ такий, що умова (2.14) не виконується.

Оцінимо тепер погрішність ідентифікації параметрів a_{ij} об'єкту на тлі перешкод. Розглянемо випадок, коли на виході об'єкту діє адитивна багатовимірна завада $\xi = [\xi_1 \xi_2 \dots \xi_n]^T$. Спостережуваний вихідний сигнал об'єкту при цьому має вигляд:

$$\bar{x} = x + \xi. \quad (2.17)$$

Функцію Ляпунова V , використовувану для знаходження достатніх умов асимптотичної збіжності параметрів моделей до параметрів об'єкту, запишемо таким чином [16]:

$$\bar{V} = V(\bar{x}, d), \quad (2.18)$$

де $d = [d_1 d_2 \dots d_{2n^2}]^T = [b_{11} b_{12} \dots b_{1n} b_{21} \dots b_{n1} \dots b_{nn} c_{11} \dots c_{1n} \dots c_{n1} \dots c_{nn}]^T$ – вектор параметрів моделей, що налаштовуються.

Відомо, що функція Ляпунова V у відсутність шумів досягає мінімуму на векторі d^* , що задовольняє умові (2.3). Тому градієнт V по d в точці $d = d^*$ дорівнює нулю, тобто

$$(\partial V / \partial d)^* = 0. \quad (2.19)$$

Тут і далі значок * означає, що величина змінної, що стоїть в дужках, обчислюється в точці екстремуму.

Розклавши функцію в ряд Тейлора в околиці d^* і нехтуючи членами вище другого порядку, отримаємо:

$$\begin{aligned} \bar{V} \approx V + \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial V}{\partial x_j} \right)^* \xi_j + \frac{1}{2} \left[\sum_{i=1}^{2n^2} \sum_{k=1}^{2n^2} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial d_i \partial d_k} \right)^* \delta d_i \cdot \delta d_k + \right. \\ \left. + 2 \sum_{i=1}^{2n^2} \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial^2 V}{\partial d_i \partial x_j} \right)^* \delta d_i \xi_j + \sum_{j=1}^n \sum_{q=1}^n \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x_j \partial x_q} \right)^* \xi_j \xi_q \right], \end{aligned} \quad (2.20)$$

де $\delta d = d - d^*$, $\xi = \delta x = \bar{x} - x$.

Для виведення робочої формули, за якою робитимемо оцінку впливу адитивної завади на точність ідентифікації параметрів об'єкта, зробимо мінімізацію функції, що описується вираженням (2.20), по δd .

Умова мінімуму \bar{V} у просторі приростів параметрів $(\delta d_1, \delta d_2, \dots, \delta d_{2n^2})$ має вигляд:

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial \delta d_i} = \sum_{k=1}^{2n^2} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial d_i \partial d_k} \right)^* \delta d_k + \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial^2 V}{\partial d_i \partial x_j} \right)^* \xi_j = 0, \quad i = \overline{1, 2n^2}. \quad (2.21)$$

Рішення системи (2.21) можна записати таким чином:

$$\delta d = P \cdot N, \quad (2.22)$$

де P – матриця, зворотна матриці кривизни $\left\| \left(\partial^2 V / \partial d_i \partial d_k \right)^* \right\|$;

N – вектор, i -й компонент якого рівний

$$N_i = - \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x_j \partial d_i} \right)^* \xi_j, \quad i = \overline{1, 2n^2}.$$

Застосувавши до вираження (2.22) оператор математичного очікування, отримаємо формулу для знаходження величини очікуваної помилки в оцінці d^* :

$$M[\delta d_k] = - \sum_{i=1}^{2n^2} P_{ki} \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x_j \partial d_i} \right)^* \cdot M[\xi_j]. \quad (2.23)$$

З вираження (2.23) виходить, що якщо середнє значення випадкової функції, що описує шум $\xi(t)$, дорівнює нулю, то оцінка вектора d є незміщеною: $M[\delta d] = 0$.

У свою чергу, формула для обчислень ковариационної функції погрішності має вигляд:

$$M[\delta d_i(t) \cdot \delta d_j(\tau)] = \sum_{k=1}^{2n^2} \sum_{l=1}^{2n^2} \sum_{s=1}^n \sum_{p=1}^n P_{ik} P_{jq} \left(\frac{\partial^2 V(t)}{\partial x_s \partial d_k} \right)^* \cdot \left(\frac{\partial^2 V(\tau)}{\partial x_p \partial d_q} \right)^* \cdot R_{sp}(t, \tau), \quad (2.24)$$

де $R_{sp}(t, \tau)$ – ковариційна функція шуму.

Відмітимо, що обидва вираження (2.23) і (2.24) залежать від часткових похідних, вчислених в точці мінімуму функції V за відсутності

шуму. На практиці ж вимірювані дані є зашумленими. Отже, найкращі оцінки, які можна отримати за допомогою цих формул, виражаються через початкові дані з шумами. Проте, якщо шум не дуже потужний, вони цілком прийнятні.

2.3 Метод попарно-зустрічного руху параметрів моделей

2.3.1 Побудова симетричної цільової функції

Якщо про значення параметрів об'єкту (2.1) відомо, що вони належать областям $[a_{ij}^{min}, a_{ij}^{max}]$, то ідентифікацію $a_{ij}(i, j = \overline{1, n})$ доцільно здійснювати не за допомогою зближення відповідних параметрів двох еквівалентних за структурою адаптивних моделей, а шляхом їх попарно-зустрічного руху.

При цьому має сенс замість моделей (2.2) використати адаптивні моделі, динаміка яких описується диференціальними рівняннями [17, 18]:

$$\begin{aligned} \dot{y}_0 &= y, & y_0(0) &= 0, & y &= By_0 + f_0, \\ \dot{z}_0 &= z, & z_0(0) &= 0, & z &= Cz_0 + f_0, \\ \dot{f}_0 &= f, & f_0(0) &= 0, \end{aligned} \quad (2.25)$$

де $y = y(t)$ и $z = z(t)$ – n -мірні вектори, що визначають стани моделей;

$B = \|b_{ij}\|$ та $C = \|c_{ij}\|$ – матриці варійованих параметрів, що здійснюють попарно-зустрічні рухи в областях $[c_{ij}(0), b_{ij}(0)]$, причому $[a_{ij}^{min}, a_{ij}^{max}] \subset [c_{ij}(0), b_{ij}(0)]$, $(i, j = \overline{1, n})$;

$f_0 = f_0(t)$ – n -мірний вектор управління моделями.

Перевага використання моделей (2.25) замість моделей (2.2) можна побачити, якщо їх привести до наступного виду:

$$\begin{aligned} \dot{y} &= By + \dot{B}y_0 + f, & y(0) &= 0, \\ \dot{y}_0 &= y, & y_0(0) &= 0, \\ \dot{z} &= Cz + \dot{C}z_0 + f, & z(0) &= 0, \\ \dot{z}_0 &= z, & z_0(0) &= 0. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Наявність в правих частинах записаних вище диференціальних рівнянь (2.26) доданків $\dot{B}y_0$ та $\dot{C}z_0$ робить їх, а отже і моделі (2.25), динамічнішими при тих же законах зміни параметрів b_{ij} та c_{ij} ($i, j = \overline{1, n}$), ніж моделі (2.2).

Розузгодження $\varepsilon(t)$ між поведінкою $y(t)$ та $z(t)$ адаптивних моделей (2.25) визначається формулою

$$\varepsilon = By_0 - Cz_0. \quad (2.27)$$

Скориставшись елементами $b_{ij}y_{0j} - c_{ij}z_{0j}$ правій частині вираження (2.27), сконструюємо таку симетричну цільову функцію, яка була б інформативна не лише по відношенню до кожної пари варійованих параметрів b_{ij} та c_{ij} ($i, j = \overline{1, n}$) і вихідних координат моделей y_{0j} и z_{0j} , але і по відношенню до вихідних координат X_{0j} об'єкта ($\dot{x}_0 = x$, $x_0(0) = 0$).

Для цього спочатку кожен з виразів $b_{ij}y_{0j} - c_{ij}z_{0j}$ послідовно доповнимо нульовими сумами $b_{ij}x_{0j} - b_{ij}x_{0j}$ і $c_{ij}x_{0j} - c_{ij}x_{0j}$, а потім, піднесши результати цих дій в квадрат, накладемо на отримане обмеження згори:

$$\begin{aligned} (b_{ij}y_{0j} - b_{ij}x_{0j} + b_{ij}x_{0j} - c_{ij}z_{0j})^2 &\leq (b_{ij}x_{0j} - c_{ij}z_{0j})^2 + b_{ij}^2(x_{0j} - y_{0j})^2 + \\ &+ 2|b_{ij}x_{0j} - c_{ij}z_{0j}||b_{ij}x_{0j} - b_{ij}y_{0j}|, \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} (b_{ij}y_{0j} - c_{ij}x_{0j} + c_{ij}x_{0j} - c_{ij}z_{0j})^2 &\leq (c_{ij}x_{0j} - b_{ij}y_{0j})^2 + c_{ij}^2(x_{0j} - z_{0j})^2 + \\ &+ 2|c_{ij}x_{0j} - b_{ij}y_{0j}||c_{ij}x_{0j} - c_{ij}z_{0j}|, \end{aligned} \quad (2.29)$$

Використовуючи праві частини нерівностей (2.28) і (2.29), побудуємо симетричну цільову функцію виду

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[|b_{ij}x_{0j} - c_{ij}z_{0j}||b_{ij}x_{0j} - b_{ij}y_{0j}| + |c_{ij}x_{0j} - b_{ij}y_{0j}||c_{ij}x_{0j} - c_{ij}z_{0j}| \right]. \quad (2.30)$$

Неважко побачити, що цільова функція (2.30) має екстремум-мінімум, який відповідає умові: $B = C$ і $y_0 = z_0 = x_0$.

2.3.2 Алгоритм налаштування параметрів моделей

Цільову функцію (2.30) розглянемо як функцію, визначену в паралельному просторі, утвореному n^2 парами параметрів b_{ij} і c_{ij} ($i, j = \overline{1, n}$). Рух до мінімуму цієї симетричної цільової функції здійснимо за допомогою попарно-зустрічних рухів відповідних параметрів моделей у поєднанні з елементами градієнтного методу пошуку екстремуму. При цьому вектор швидкості параметра, що рухається в паралельному просторі b_{ij} одній моделі буде колінеарний вектора швидкості c_{ij} параметра іншої моделі.

Оскільки $a_{ij} \in [c_{ij}(0), b_{ij}(0)]$, то й напрям цих векторів задається так, щоб параметри b_{ij} и c_{ij} здійснювали зустрічні рухи і набували в сукупності усіх значень замкнутого відрізка $[c_{ij}(0), b_{ij}(0)]$. Величини швидкостей параметрів b_{ij} та c_{ij} ($i, j = \overline{1, n}$) визначаються з виразів, що складають $\text{grad}R$.

При цьому слід мати на увазі, що значення $\text{grad}R$ є невизначеними в точках паралельного простору, що задовольняють умовам $y_{0j} = x_{0j}$, $z_{0j} = x_{0j}$, $b_{ij}x_{0j} = c_{ij}z_{0j}$, $c_{ij}x_{0j} = b_{ij}y_{0j}$ і $b_{ij} = c_{ij} = 0$.

У усіх інших точках простору параметрів значення часткових похідних $\partial R / \partial b_{ij}$ и $\partial R / \partial c_{ij}$ визначені і рівні

$$\partial R / \partial b_{ij} = N_{ij} + Q_{ij}, \quad \partial R / \partial c_{ij} = M_{ij} + P_{ij}, \quad (2.31)$$

де

$$N_{ij} = \left| b_{ij}x_{0j} - c_{ij}z_{0j} \right| \left| x_{0j} - y_{0j} \right| \cdot \text{sgn}(b_{ij}),$$

$$M_{ij} = \left| c_{ij}x_{0j} - b_{ij}y_{0j} \right| \left| x_{0j} - z_{0j} \right| \cdot \text{sgn}(c_{ij}),$$

$$\begin{aligned}
Q_{ij} &= x_{0j} \left| b_{ij} x_{0j} - b_{ij} y_{0j} \right| \cdot \operatorname{sgn}(b_{ij} x_{0j} - c_{ij} z_{0j}) - \\
&\quad - \sum_{r=1}^n \sum_{q=1}^n \frac{\partial y_{0q}}{\partial b_{ij}} b_{rq} \left| b_{rq} x_{0q} - c_{rq} z_{0q} \right| \cdot \operatorname{sgn}(b_{rq} x_{0q} - b_{rq} y_{0q}) - \\
&\quad - \sum_{r=1}^n \sum_{q=1}^n \frac{\partial (b_{rq} y_q)}{\partial b_{ij}} \left| c_{rq} x_{0q} - c_{rq} z_{0q} \right| \cdot \operatorname{sgn}(c_{rq} x_{0q} - b_{rq} y_{0q}), \\
P_{ij} &= x_{0j} \left| c_{ij} x_{0j} - c_{ij} z_{0j} \right| \cdot \operatorname{sgn}(c_{ij} x_{0j} - b_{ij} y_{0j}) - \\
&\quad - \sum_{r=1}^n \sum_{q=1}^n \frac{\partial z_{0q}}{\partial c_{ij}} c_{rq} \left| c_{rq} x_{0q} - b_{rq} y_{0q} \right| \cdot \operatorname{sgn}(c_{rq} x_{0q} - c_{rq} z_{0q}) - \\
&\quad - \sum_{r=1}^n \sum_{q=1}^n \frac{\partial (c_{rq} z_q)}{\partial c_{ij}} \left| b_{rq} x_{0q} - b_{rq} y_{0q} \right| \cdot \operatorname{sgn}(b_{rq} x_{0q} - c_{rq} z_{0q}), \\
\operatorname{sgn}(\varphi) &= \begin{cases} +1 & \text{при } \varphi > 0, \\ -1 & \text{при } \varphi < 0. \end{cases}
\end{aligned}$$

З метою побудови простого алгоритму налаштування параметрів b_{ij} та c_{ij} скористаємося першими доданками N_{ij} і M_{ij} правих частин виразів (2.31), які визначені в усіх точках паралельного простору, окрім точки $b_{ij} = c_{ij} = 0$, і для яких умова перетворення на нуль співпадає з умовою мінімуму цільової функції R .

Оскільки параметри b_{ij} та c_{ij} здійснюватимуть зустрічні рухи в області $[c_{ij}(0), b_{ij}(0)]$, вибір якої обумовлений областю $[a_{ij}^{\min}, a_{ij}^{\max}]$ і точністю ідентифікації параметрів об'єкту, початкові значення параметрів, що настроюються, задамо таким чином:

$$\begin{aligned}
b_{\alpha\beta}(0) &= a_{\alpha\beta}^{\max} + \Delta_{\alpha\beta}, \quad c_{\alpha\beta}(0) = a_{\alpha\beta}^{\min} - \Delta_{\alpha\beta}, \\
b_{\nu\rho}(0) &= a_{\nu\rho}^{\min} - \Delta_{\nu\rho}, \quad c_{\nu\rho}(0) = a_{\nu\rho}^{\max} + \Delta_{\nu\rho}, \quad (2.32)
\end{aligned}$$

де $\{\alpha\} \cup \{\nu\} = \{i\}$, $\{\beta\} \cup \{\rho\} = \{j\}$, $(\alpha = \nu) \wedge (\beta = \rho) \equiv (1 > 5)$;

Δ_{ij} – деякі позитивні добавки, що забезпечують задовільну

ідентифікацію a_{ij}^{min} і a_{ij}^{max} ($i, j = \overline{1, n}$).

Враховуючи вищесказане, алгоритм налаштування параметрів b_{ij} та c_{ij} ($i, j = \overline{1, n}$) адаптивних моделей запишемо у вигляді

$$\frac{db_{ij}}{dt} = k_{ij} |N_{ij}| \cdot \text{sign}(c_{ij} - b_{ij}), \quad \frac{dc_{ij}}{dt} = k_{ij} |M_{ij}| \cdot \text{sign}(b_{ij} - c_{ij}). \quad (2.33)$$

Тут k_{ij} – коефіцієнт, що визначає швидкість налаштування ij -ї пари параметрів моделей;

$$\text{sign}(b_{ij} - c_{ij}) = \begin{cases} +1 & \text{при } b_{ij} > c_{ij}, \\ 0 & \text{при } b_{ij} = c_{ij}, \\ -1 & \text{при } b_{ij} < c_{ij}. \end{cases}$$

Підставивши в систему (2.33) значення N_{ij} і M_{ij} з (2.34), отримаємо

$$\begin{cases} \frac{db_{ij}}{dt} = k_{ij} |b_{ij}x_{0j} - c_{ij}z_{0j}| |x_{0j} - y_{0j}| \cdot \text{sign}(c_{ij} - b_{ij}), \\ \frac{dc_{ij}}{dt} = k_{ij} |c_{ij}x_{0j} - b_{ij}y_{0j}| |x_{0j} - z_{0j}| \cdot \text{sign}(b_{ij} - c_{ij}), \end{cases} \quad i, j = \overline{1, n}. \quad (2.34)$$

З вираження (2.34) виходить, що процеси налаштування параметрів b_{ij} та c_{ij} ($i, j = \overline{1, n}$) є монотонними функціями часу. Одна з них монотонно зростає, а інша – монотонно убуває. При $b_{ij} = c_{ij}$ маємо $\text{sign}(c_{ij} - b_{ij}) = 0$ і, отже, $db_{ij} / dt = dc_{ij} / dt = 0$.

Це відповідає закінченню процесу налаштування параметрів b_{ij} та c_{ij} ($i, j = \overline{1, n}$) і стабілізації їх значень на досягнутому рівні.

Таким чином, процеси налаштування параметрів моделей є стійкими і монотонними функціями часу.

2.3.3 Збіжність алгоритму ідентифікації

Знайдемо умови асимптотичної стійкості зустрічного руху параметрів, що настраюються b_{ij} и c_{ij} . Для цього скористаємося позитивно певною функцією Ляпунова

$$W = 0,5(b_{ij} - c_{ij})^2. \quad (2.35)$$

Її повна похідна за часом з урахуванням залежностей (2.33) має вигляд

$$\frac{dW}{dt} = -k_{ij} |b_{ij} - c_{ij}| \left[|b_{ij} x_{0j} - c_{ij} z_{0j}| |x_{0j} - y_{0j}| + |c_{ij} x_{0j} - b_{ij} y_{0j}| |x_{0j} - z_{0j}| \right]. \quad (2.36)$$

Права частина вираження (2.36) є негативною напіввизначеною. Тому зустрічний рух параметрів b_{ij} та c_{ij} завжди буде стійким.

Асимптотично стійким попарно-зустрічний рух буде у тому випадку, коли

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \left[|b_{ij} x_{0j} - c_{ij} z_{0j}| |x_{0j} - y_{0j}| + |c_{ij} x_{0j} - b_{ij} y_{0j}| |x_{0j} - z_{0j}| \right] = 0$$

та

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{|b_{ij} x_{0j} - c_{ij} z_{0j}| |x_{0j} - y_{0j}| + |c_{ij} x_{0j} - b_{ij} y_{0j}| |x_{0j} - z_{0j}|}{|b_{ij} - c_{ij}|} = L_{ij}, \quad 0 < L_{ij} < \infty.$$

Для асимптотично стійкого руху параметрів b_{ij} та c_{ij} у точку, що задовольняє умові $B = C$ и $y_0 = z_0 = x_0$, необхідно, щоб їх зустрічний рух був асимптотично стійким і повна похідна за часом позитивно визначеної функції Ляпунова

$$V = 0,5 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[(b_{ij} - c_{ij})^2 + (x_{0j} - y_{0j})^2 + (x_{0j} - z_{0j})^2 \right], \quad (2.37)$$

вчисленою з обліком (2.1), (2.25) і (2.34), була негативно визначеною. Останнє буде у разі, коли

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n k_{ij} \left| b_{ij} - c_{ij} \left[\left| b_{ij} x_{0j} - c_{ij} z_{0j} \right| \left| x_{0j} - y_{0j} \right| + \left| c_{ij} x_{0j} - b_{ij} y_{0j} \right| \left| x_{0j} - z_{0j} \right| \right] \right| >$$

$$> \sum_{j=1}^n (x_{0j} - y_{0j})(x_j - y_j) + \sum_{j=1}^n (x_{0j} - z_{0j})(x_j - z_j).$$

Крім того, праві частини виразів db_{ij}/dt та dc_{ij}/dt для різних значень i та j мають бути лінійно-незалежні.

Помітимо, що процес безперервного налаштування однієї пари параметрів b_{ij} та c_{ij} можна представити рухом зображуючої точки на площині параметрів (c_{ij}, b_{ij}) . Точка з координатою $b_{ij} = c_{ij}$, що задовольняє умові еквівалентності вихідних координат моделей і об'єкту, є особливою точкою площини (c_{ij}, b_{ij}) , оскільки в ній справедливо

$$db_{ij}/dt = 0;$$

$$dc_{ij}/dt = 0.$$

Рух зображуючої точки припиняється, коли вона попадає в асимптотично стійку точку рівноваги (особливу точку).

Особлива точка має місце тільки при одночасному перетворенні на нуль чисельника і знаменника вираження

$$\frac{db_{ij}}{dc_{ij}} = - \frac{\left| b_{ij} x_{0j} - c_{ij} z_{0j} \right| \left| x_{0j} - y_{0j} \right|}{\left| c_{ij} x_{0j} - b_{ij} y_{0j} \right| \left| x_{0j} - z_{0j} \right|}. \quad (2.38)$$

У тих випадках, коли чисельник і знаменник вираження (2.38) перетворюються на нуль не одночасно, матимемо два характерні сімейства точок на площині (c_{ij}, b_{ij}) . Одне сімейство точок з'являється при перетворенні на нуль чисельника, інше – при перетворенні на нуль знаменника. У першому випадку $db_{ij}/dc_{ij} = 0$, і, отже, дотична до траєкторії руху зображуючої точки паралельна осі c_{ij} . У другому випадку

$db_{ij}/dc_{ij} = \infty$, і дотична до траєкторії руху зображуючої точки паралельна осі b_{ij} .

Через наявність цих характерних сімейств точок на площині (c_{ij}, b_{ij}) траєкторія руху зображуючої точки має ступінчастий вигляд.

Якщо порівнювати цю траєкторію руху зображуючої точки з траєкторією, що реалізується алгоритмом зближення параметрів моделей, то вона ближча до оптимальної траєкторії руху, який являється відрізок прямої лінії, що сполучає початкову точку $(c_{ij}(0), b_{ij}(0))$ з особливою точкою площини (c_{ij}, b_{ij}) (рис. 2.1).

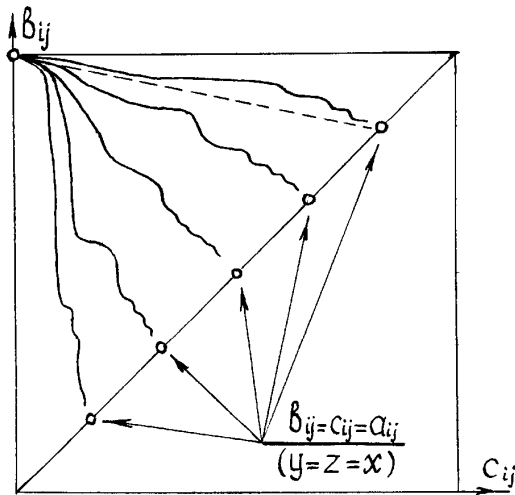


Рисунок 2.1

2.4 Методи узагальненого входу

2.4.1 Симетрія моделей сигналу і системи

Як правило, сигнал і система розглядаються як два самостійні поняття. Сигнали ототожнюють з потоками інформації між системами, а

системи – із засобами обробки інформації. Проте між поняттями сигналу і системи існує тісний зв'язок, оскільки кожен сигнал можна розглядати як продукт функціонування деякої системи.

Проілюструємо симетрію математичних моделей сигналу і системи, обмежившись класом лінійних динамічних систем. Оскільки і сигнали і імпульсні характеристики цих систем є функціями часу, то з інтеграла Дюамеля виду

$$y(t) = \int_0^t g(\tau) \cdot x(t - \tau) d\tau = \int_0^t x(\tau) \cdot g(t - \tau) d\tau \quad (2.39)$$

не можна визначити, яка з підінтегральних функцій представляє вхідний сигнал, а яка – імпульсну перехідну характеристику системи.

Така ситуація виникає внаслідок комутативності операції згортки, яку можна записати у виді

$$y(t) = g(t) * x(t) = x(t) * g(t),$$

де * означає операцію згортки функцій часу.

Аналогічне укладення можна зробити і аналізуючи комутативність операції множення зображень за Лапласом сигналу і імпульсної перехідної функції

$$Y(s) = G(s) \cdot X(s) = X(s) \cdot G(s).$$

Подібні формули можна отримати і для дискретних моделей сигналу і системи :

$$y[n] = \sum_{i=0}^n g[i] \cdot x[n-i] = \sum_{i=0}^n x[i] \cdot g[n-i],$$

$$Y(z) = G(z) \cdot X(z) = X(z) \cdot G(z).$$

Тут розглянутий тільки клас лінійних динамічних систем. Проте симетрія математичних моделей сигналу і системи має ширшу сферу застосування.

2.4.2 Принцип узагальненого входу

Явище симетрії, місце, що має, між моделями сигналу і системи, можна вигідно використати як для підвищення ефективності існуючих, так і для створення нових методів і систем ідентифікації об'єктів

управління.

Вихідний сигнал будь-якого об'єкту несе в собі різноманітну інформацію і розглядається як продукт переробки об'єктом вхідного сигналу. Так, наприклад, якщо вхідний $f(t)$ і вихідний $x(t)$ сигнали об'єкту пов'язані оператором $W(p, t)$:

$$x(t) = W(p, t) \cdot f(t), \quad (2.40)$$

($p = d/dt$ – оператор диференціювання), та зміна $x(t)$ може статися як за рахунок зміни структури і параметрів об'єкту $W(p, t)$, так і за рахунок $f(t)$. Отже, один і той же сигнал $x(t)$ можна отримувати в різних ситуаціях.

Тому при розробці методів ідентифікації об'єктів управління за допомогою моделей можлива постановка наступного завдання: яким має бути вхідний сигнал $\varphi(t)$ моделі, що має оператора $F(p, t)$ і такий, що описується диференціальним рівнянням

$$y(t) = F(p, t) \cdot \varphi(t),$$

щоб вона мала однаковий рух з об'єктом, властивості якого визначені рівнянням (2.40) з оператором $W(p, t)$.

При цьому матиме місце наступна рівність:

$$W(p, t) \cdot f(t) = F(p, t) \cdot \varphi(t). \quad (2.41)$$

Вираження (2.41) встановлює динамічну еквівалентність двох систем, що мають різну внутрішню структуру. В даному випадку в систему (модель) шляхом відповідної зміни вхідної дії $\varphi(t)$ як би вводяться бракуючі елементи структури і параметри.

Такий вхідний сигнал системи, який стає еквівалентним в динамічному сенсі її внутрішній структурі, в роботі [19] названий узагальненим входом.

Отже, вхідний сигнал моделі (4.5)

$$\varphi(t) = F^{-1}(p, t) \cdot W(p, t) \cdot f(t)$$

є узагальненим входом.

Слід зазначити той факт, що згідно залежності (2.39) для

отримання одного і того ж вихідного сигналу використовується повна взаємозамінюваність імпульсної перехідної характеристики системи і вхідної дії. Принцип же узагальненого входу забезпечує однакову динаміку системам, що мають різні оператори. При його використанні відбувається заміна лише частини імпульсної перехідної характеристики системи на відповідну вхідну дію. Вираження (2.39) є часткою випадком загальнішої залежності (2.41).

Таким чином, є усі підстави вважати, що принцип узагальненого входу реалізує симетрію участі математичних моделей вхідних сигналів і різних систем при формуванні вихідних сигналів з однаковим описом.

2.4.3 Застосування принципу узагальненого входу в завданнях ідентифікації

Для ідентифікації об'єкту управління зазвичай застосовують модель, що налаштовується. На її вхід і на вхід об'єкту поступає один і той же сигнал. Завдання ідентифікації в даному випадку зводиться до того, щоб параметри моделі в результаті налаштування набули значень, близьких до поточних значень параметрів об'єкту.

Застосовуючи принцип узагальненого входу, можна значно розширити можливості існуючих способів ідентифікації.

Можливі наступні випадки застосування узагальненого входу для цілей ідентифікації [20].

Варіант 1. Структура і параметри моделі (4.5) не співпадають із структурою і параметрами об'єкту (2.40); узагальнений вхід має вигляд (4.7).

Варіант 2. Структура і параметри моделі співпадають із структурою і параметрами якої-небудь частини об'єкту, оператор якого можна представити у виді

$$W(p, t) = W_1(p, t) \cdot W_2(p, t).$$

Нехай $F(p, t) = W_1(p, t)$, тоді

$$\varphi(t) = W_j(p, t) \cdot f(t),$$

$$j \neq i, i, j = 1, 2.$$

Варіант 3. Структура і параметри моделі співпадають із структурою і параметрами об'єкту; узагальнений вхід моделі рівний

$$\varphi(t) = f(t).$$

Останній випадок найбільш поширений на практиці.

При адаптивній ідентифікації об'єктів управління поведінка моделей, що настроюються, є асимптотично еквівалентною поведінці об'єкту управління, тобто

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (y(t) - x(t)) = \lim_{t \rightarrow \infty} [F(p, t) \cdot \varphi(t) - x(t)] = 0.$$

З цього вираження виходить, що асимптотична еквівалентність поведінки моделі і об'єкту досягається або при відповідній зміні $F(p, t)$ чи $\varphi(t)$, або при одночасній зміні $F(p, t)$ та $\varphi(t)$.

Якщо ідентифікуюча система синтезована із застосуванням узагальненого входу, то алгоритм оцінки параметрів об'єкту зводиться до наступних операцій:

- формується вхідний сигнал $\varphi(t)$ для моделі, що описується рівнянням

$$y(t) = F(p, t) \cdot \varphi(t)$$

при дії $f(t)$ на вході об'єкту (2.40), що ідентифікується, із заданою структурою оператора $W(p, t)$;

- параметри моделі підлаштовуються під відповідні параметри об'єкту, оскільки тільки в цьому випадку можна отримати найбільш простий вид вхідного сигналу моделі.

2.4.5 Метод послідовної ідентифікації за допомогою узагальненого входу і моделі, що організовується

Розглянемо детальніше процес налаштування параметрів адаптивної моделі градієнтними методами, що використовують функції чутливості вихідних координат моделей від параметрів, що налаштовуються, при поданні дій певного виду на вхід об'єкта з оператором

$$W(p) = \frac{k}{p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3}. \quad (2.42)$$

Нехай модель має оператор, еквівалентний операторові об'єкта (2.42):

$$F(p) = \frac{k}{p^3 + b_1 p^2 + b_2 p + b_3}.$$

На об'єкт і на модель подамо, наприклад, дію $f = I[i]$. Можна легко показати, що при цьому вхідному сигналі тільки параметр моделі b_3 асимптотично прагнучим до параметра a_3 об'єкта; параметри b_1 та b_2 прагнутимуть до деяких своїх рівноважних положень γ_1 та γ_2 відповідно. Причому, $\gamma_i \neq a_i (i=1,2)$. У свою чергу, при $f = t$ параметри $b_i \rightarrow a_i (i=2,3)$, а $b_1 \rightarrow \gamma_1 \neq a_1$. Тільки при $f = t^2$ можливе таке градієнтне налаштування параметрів b_i , що усі $b_i \rightarrow a_i (i=1,2,3)$.

Це відбувається з наступної причини. Нехай як критерій самонастройки використовується цільова функція $R = E(p) \{ \varepsilon^2(b_i) \}$, де $E(p)$ – оператор усереднювання, $\varepsilon = (x - y)$ – сигнал розузгодження між вихідними сигналами об'єкта x і моделі y .

При градієнтному методі налаштування алгоритм варіації параметрів $b_i (i=1,2,3)$ моделі має вигляд:

$$\frac{db_i}{dt} = -k \frac{\partial R}{\partial b_i} = 2kE(p) \left\{ \varepsilon(b_i) \frac{\partial y}{\partial b_i} \right\}. \quad (2.43)$$

Функції чутливості $\partial y / \partial b_i (i=1,2,3)$, отримані за допомогою допоміжних операторів, описуються виразами:

$$\frac{\partial y}{\partial b_i} = -\frac{k \cdot p^{3-i}}{p^3 + b_1 p^2 + b_2 p + b_3} y. \quad (2.44)$$

З виразів (2.43) і (2.44) витікає, що при $f = I[t]$ налаштування

параметра b_3 завершується тоді, коли $\varepsilon = 0$, оскільки $\partial y / \partial b_3 \neq 0$. Для параметрів b_1 і b_2 процес налаштування припиняється, в основному, при досягненні функціями чутливості $\partial y / \partial b_i$ ($i = 1, 2$) нульових значень. При цьому не обов'язково $b_i \rightarrow a_i$.

З метою забезпечення закінчення процесу налаштування за рахунок $\varepsilon(b_i) \rightarrow 0$ намагаються впродовж часу налаштування усіх параметрів моделі підтримувати $\partial y / \partial b_i \neq 0$ ($i = 1, 2, 3$), наприклад, шляхом застосування вхідної дії виду $f = \text{sign}(\sin \omega t)$. Причому, величина $T = 2\pi/\omega$ вибирається менше часу перехідного процесу об'єкту, що має місце при $f = I[t]$.

Використовуючи принцип узагальненого входу, можна і при вхідній дії $f = I[t]$ з великою точністю ідентифікувати усі параметри стаціонарного об'єкту управління, динаміка якого описується диференціальним рівнянням

$$\sum_{i=1}^n a_i x^{(i)} + a_0 x = f, \quad x^{(j)}(0) = 0, \quad j = \overline{0, n-1}, \quad (2.45)$$

де $x = x(t)$ – вихідний сигнал об'єкта.

Для ідентифікації параметра a_0 застосуємо модель, що описується рівнянням

$$\sum_{i=1}^n b_i y^{(i)} + b_0 y = \varphi_0, \quad y^{(j)}(0) = 0, \quad j = \overline{0, n-1}, \quad (2.46)$$

де $\varphi_0 = \varphi_0(t)$ і $y = y(t)$ – вхідний і вихідний сигнали моделі.

Оскільки при $\varphi_0(t) = f(t) = I[t]$ асимптотично налаштовується тільки параметр b_0 , незалежно від того, до яких значень прагнуть інші b_i ($i = \overline{1, n}$) параметри моделі (2.46), то будемо налаштовувати тільки цей параметр. Значення параметрів b_i ($i = \overline{1, n}$) залишимо незмінними. Така постановка питання цілком закономірна.

Дійсно, якщо параметри $b_i \rightarrow \gamma_i \neq a_i (i = \overline{1, n})$, то має сенс не будувати для їх зміни цілу систему (n штук) допоміжних або істотних допоміжних операторів [19]. Адже ці параметри вже мають початкові значення $b_i(0) \neq a_i$, а перехід від значень $b_i(0)$ до значень $\gamma_i \neq a_i$ не вирішує задачу ідентифікації параметрів $a_i (i = \overline{1, n})$. Більше того, оскільки параметри $b_i \rightarrow \gamma_i \neq a_i (i = \overline{1, n})$, то функції чутливості $\partial y / \partial b_i$, по суті справи, не беруть участь в рішенні задачі ідентифікації.

Тому у тому випадку, коли налаштуванню підлягає тільки параметр b_0 , використовуватимемо лише одну функцію чутливості $\partial y / \partial b_0$, а, отже, і один допоміжний оператор.

Після закінчення перехідного процесу об'єкту і оцінки параметра a_0 зробимо таку перебудову моделі, щоб вона описувалася рівнянням

$$\sum_{i=2}^n b_i y^{(i-1)} + b_1 y = \varphi_1, \quad y^{(j)}(T) = 0, \quad j = \overline{0, n-2}, \quad (2.47)$$

де $y = y(t)$ і $\varphi_1 = \int_T^t (f - a_0 x) dt$ – вихідний і вхідний сигнали

моделі відповідно. Тут $f = f[t]$, $x^{(j)}(T) = 0 (j = \overline{0, n-1})$, T – тривалість перехідного процесу об'єкту.

Допоміжний оператор, побудований для налаштування тільки одного параметра b_1 , є еквівалентним операторові моделі (2.47). На його вхід як і раніше надходить сигнал $-y$.

Розглядаючи процес почергового налаштування параметрів $b_i (i = \overline{0, n})$, можна, окрім моделей (2.46) і (2.47), побудувати ще $n-1$ модель, динаміка яких описуватиметься рівняннями:

$$\sum_{i=3}^n b_i y^{(i-2)} + b_2 y = \varphi_2, \quad y^{(j)}(2T) = 0, \quad j = \overline{0, n-3};$$

$$\sum_{i=4}^n b_i y^{(i-3)} + b_3 y = \varphi_3, \quad y^{(j)}(3T) = 0, \quad j = \overline{0, n-4};$$

.....

$$b_n y = \varphi_n.$$

(2.48)

Тут

$$\varphi_2 = \int_{2T}^t \int_{2T}^t f dt^2 - a_0 \int_{2T}^t \int_{2T}^t x dt^2 - a_1 \int_{2T}^t x dt,$$

$$\varphi_3 = \int_{3T}^t \int_{3T}^t \int_{3T}^t f dt^3 - a_0 \int_{3T}^t \int_{3T}^t \int_{3T}^t x dt^3 - a_1 \int_{3T}^t \int_{3T}^t x dt^2 - a_2 \int_{3T}^t x dt,$$

.....

$$\varphi_n = \int_{nT}^t \dots \int_{nT}^t f dt^n - a_0 \int_{nT}^t \dots \int_{nT}^t x dt^n - \dots - a_{n-2} \int_{nT}^t \int_{nT}^t x dt^2 - a_{n-1} \int_{nT}^t x dt.$$

Відмітимо, що вхідні сигнали $\varphi_i (i = \overline{0, n})$ моделей (2.46), (2.47) і (2.48) при $b_i = a_i$ є не що інше, як узагальнені входи моделей.

У тому випадку, коли на вхід об'єкта (2.45) поступає дія виду $f = t$, тільки два параметри b_0 і b_1 моделі (2.46) в процесі градієнтного налаштування асимптотично сходяться до параметрів a_0 і a_1 об'єкта. Інші параметри $b_i \rightarrow \gamma_i \neq a_i (i = \overline{2, n})$.

Для отримання функцій чутливості використовуються два допоміжні оператори, еквівалентні (2.46), на входи яких надходять сигнали $-u$ та $-y^{(1)}$, з виходів знімаються сигнали, пропорційні $\partial y / \partial b_0$ і $\partial y / \partial b_1$ відповідно.

Після оцінки параметрів a_0 і a_1 , в момент $t = T$, відбувається така перебудова моделі, що її динаміка починає описуватися рівнянням

$$\sum_{i=4}^n b_i y^{(i-2)} + b_3 y^{(1)} + b_2 y = -a_1 \int_T^t x dt - a_0 \int_T^t \int_T^t x dt^2 + \int_T^t \int_T^t f dt^2, \quad y^{(j)}(T) = 0, \quad j = \overline{0, n-3}.$$

Аналогічним чином відбувається ідентифікація інших параметрів об'єкту.

Якщо як вхідний сигнал об'єкта використати квадратичну функцію часу, то за кожен перебудову моделі можна оцінювати по три параметри. При цьому допоміжні оператори увесь час залишаються еквівалентними операторів моделі, а на їх входи кожного разу поступають сигнали $-y$, $-y^{(1)}$, $-y^{(2)}$.

Проте застосування допоміжних операторів при градієнтному налаштуванні параметрів моделей обмежене наступними причинами:

- використання функцій чутливості доцільне лише поблизу екстремуму цільової функції;
- необхідно експериментально підбирати коефіцієнт спуску, від якого залежать швидкість налаштування параметра і стійкість процесу налаштування [21].

Доцільніше в даному випадку для налаштування параметрів моделі, що організовується, використати алгоритми попарного зближення, зокрема, алгоритм (2.11):

$$\begin{cases} \frac{db_i}{dt} = -k_i x [(2x - y)b_i - zc_i], & b_i(0) = b_{i0}, \\ \frac{dc_i}{dt} = -k_i x [(2x - z)c_i - yb_i], & c_i(0) = c_{i0}, \quad i = \overline{0, n}. \end{cases} \quad (2.49)$$

Нехай $f = I[t]$ і в момент T закінчення перехідного процесу об'єкту зближення параметрів b_i та c_i припиняється, тобто $|b_i(T) - c_i(T)| < \delta$ (δ – скільки завгодно мала позитивна величина), тоді коефіцієнт k_i може бути визначений формулою

$$k_i = 0,5 \ln \frac{|b_i(0) - c_i(0)|}{\delta_i} \bigg/ \int_0^T x^2 dt.$$

Покажемо тепер, що параметри моделей, зближуючись,

асимптотично сходяться до параметра об'єкту, що ідентифікується. Дійсно, після припинення перехідних процесів на виходах об'єкту і моделей сигнали X , Y та Z можна представити таким чином:

$$x = \varphi_i / a_i, \quad y = \varphi_i / b_i, \quad z = \varphi_i / c_i, \quad (2.51)$$

де φ_i – дія на входах моделей, що має місце при ідентифікації параметра об'єкта a_i .

Після підстановки x , y та z з (2.51) в (2.49) і подальшого спрощення отриманого вираження знайдемо формули, що описують динаміку параметрів b_i та c_i :

$$b_i = a_i + (b_{i0}^* - a_i) \exp\left(-\frac{2k_i}{a_i^2} \int_{jT}^t \varphi_i^2 dt\right),$$

$$c_i = a_i + (c_{i0}^* - a_i) \exp\left(-\frac{2k_i}{a_i^2} \int_{jT}^t \varphi_i^2 dt\right),$$

де $b_{i0}^* = b_i(jT)$ і $c_{i0}^* = c_i(jT)$.

При ідентифікації невідомих параметрів об'єкта за допомогою моделей, що організуються [22], використовуються такі вхідні дії, що

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \int_{jT}^t \varphi_i^2 dt = \infty, \quad i = \overline{0, n}.$$

Тому $b_i \rightarrow a_i$ і $c_i \rightarrow a_i$ при $t \rightarrow \infty$, тобто параметри b_i і c_i моделей сходяться не лише один до одного, але і до параметрів, що ідентифікуються a_i ($i = \overline{0, n}$) об'єкта.

На рис. 2.2 представлена структурна схема системи адаптивної ідентифікації з моделями, що організуються. Положення перемикачів П1, П2 і П3 відповідають ситуаціям оцінки параметрів об'єкту a_1 , a_2 і a_3 .

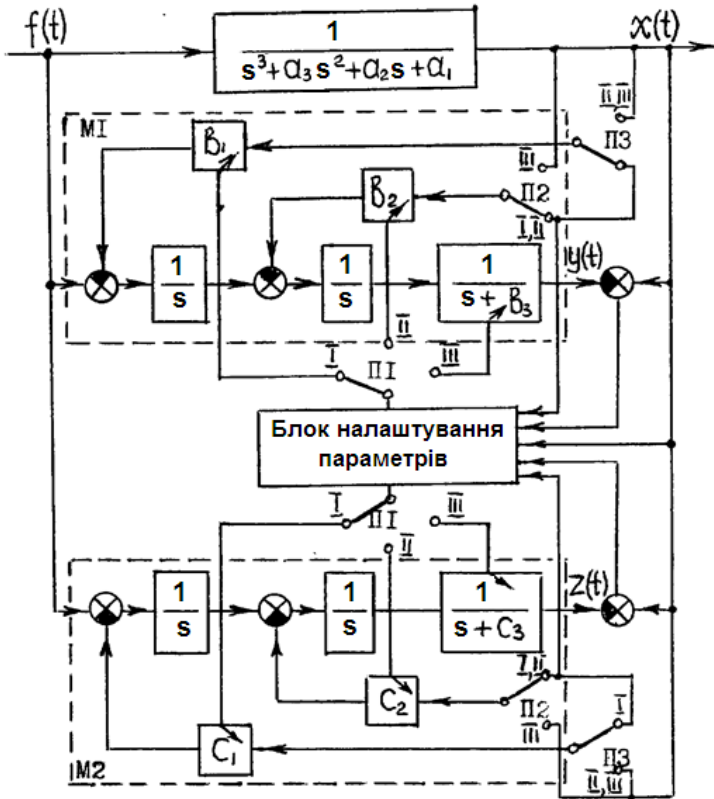


Рисунок 2.2 – Структурна схема системи адаптивної ідентифікації з моделями, що організуються

2.4.6 Метод адаптивної ідентифікації за допомогою налаштування "уявних" моделей

Вище була описана процедура ідентифікації параметрів стаціонарного (квазістаціонарного) об'єкту, згідно якої почергова ідентифікація a_i ($i = \overline{0, n}$) параметрів об'єкту здійснювалася за допомогою налаштування лише одного з параметрів моделі, що змінює свою структуру після оцінки чергового параметра об'єкту. При цьому інші параметри моделі не змінювали своїх значень.

Тут виникає необхідність не лише увесь час забезпечувати стійкість моделей, але і робити їх менш коливальними і інерційними, ніж об'єкт, що ідентифікується.

У зв'язку з цим виникає питання, чи не можна ля ідентифікації параметрів об'єкта використати безінерційні моделі, що мають тільки один параметр, що налаштовується.

Відповідь на це питання, як буде показано нижче, є позитивною. Дійсно, застосуємо для ідентифікації параметрів a_i ($i = \overline{0, n}$) об'єкта моделі вигляду

$$b_i y = \varphi_i, \quad c_i z = \varphi_i, \quad (2.52)$$

де

$$\varphi_0 = f = I[t],$$

$$\varphi_1 = \int_T^t (f - a_0^* x) dt.$$

$$\varphi_2 = -a_1^* \int_{2T}^t x dt + \int_{2T}^t \int_{2T}^t (f - a_0^* x) dt^2, \quad (2.53)$$

.....

$$\varphi_n = -a_{n-1}^* \int_{nT}^t x dt - a_{n-2}^* \int_{nT}^t \int_{nT}^t x dt^2 - \dots + \int_{nT}^t \dots \int_{nT}^t (f - a_0^* x) dt^n,$$

a_i^* – знайдені оцінки a_i параметрів об'єкта;

$$x^{(j)}(iT) = 0, \quad i = \overline{0, n}, \quad j = \overline{0, n-1}.$$

Алгоритм налаштування параметрів в цьому випадку має вигляд:

$$\frac{db_i}{dt} = -kx(xb_i - \varphi_i), \quad b_i(iT) = b_{i0}, \quad (2.54)$$

$$\frac{dc_i}{dt} = -kx(xc_i - \varphi_i), \quad c_i(iT) = c_{i0}. \quad (2.55)$$

Помітимо, що вирази (2.53) і (2.54) є еквівалентними і незалежними між собою. Тому замість двох моделей (2.52) можна скористатися однією.

Крім того, у виразах (2.54) і (2.55) від моделей (2.52) залишилися

параметри, що тільки настраювалися, а вихідні сигнали y та Z не використовуються взагалі.

В даному випадку сталося "відчуження" алгоритму налаштування від адаптивних моделей, він придбав самостійність. Тому тут має сенс говорити про ідентифікацію параметрів a_i ($i = \overline{0, n}$) об'єкта за допомогою налаштування "уявних" моделей виду (2.52).

Алгоритм налаштування параметрів цих "уявних" моделей має вигляд (2.54). Структурна схема фрагмента системи адаптивної ідентифікації (2.53), (2.54) зображена на рис. 2.3. Вона має симетрію типу "трансляція".

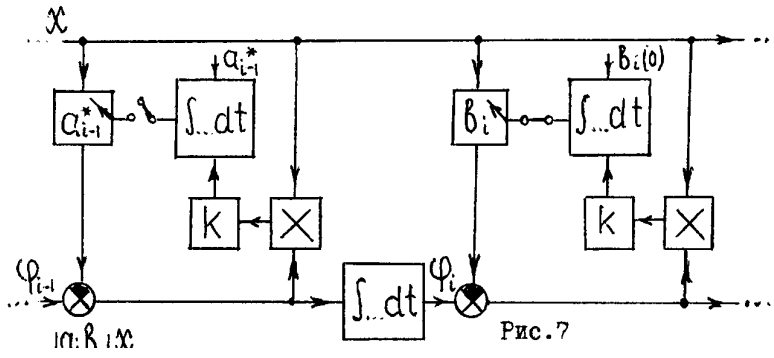


Рисунок 2.3 – Структурна схема системи адаптивної ідентифікації "уявних" моделей

2.4.7 Метод ідентифікації неперервного і дискретного об'єктів за допомогою узагальненого входу

Розглянемо диференціальне рівняння, що описує динаміку стаціонарного об'єкта при ступінчастій дії на його вході:

$$\sum_{i=0}^n a_i x^{(i)}(t) = f(t), \quad x^{(i)}(0) = 0, \quad j = \overline{0, n-1}, \quad (2.56)$$

де $f(t) = 1[t]$ – вхідний і $x(t)$ – вихідний сигнали об'єкта.

При $t \rightarrow \infty$ значення похідних $x^{(i)}(t) \rightarrow 0$ ($i = \overline{1, n}$). Отже,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^n a_i x^{(i)}(t) = a_0 x(\infty)$$

Оскільки $\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = 1$, то коефіцієнт a_0 диференціального рівняння (2.56) може бути визначений таким чином:

$$a_0 = [x(\infty)]^{-1}. \quad (2.57)$$

Визначивши a_0 за формулою (2.57), перетворимо вираження (2.56):

$$\sum_{i=1}^n a_i x^{(i-1)}(t) = \int_0^t (f(\tau) - a_0 x(\tau)) d\tau, \quad x^{(i)}(0) = 0, \quad j = \overline{0, n-2}.$$

При $t \rightarrow \infty$ з отриманого вираження знайдемо

$$a_1 = a_0 \int_0^{\infty} (1 - a_0 x(\tau)) d\tau \quad (2.58)$$

Після знаходження значень a_0 та a_1 , визначимо параметр a_2 . Для цього диференціальне рівняння (2.56) представимо у виді:

$$\sum_{i=2}^n a_i x^{(i-2)}(t) = \int_0^t \int_0^t (f(\tau) - a_0 x(\tau)) d\tau^2 - a_1 \int_0^t x(\tau) d\tau, \quad x^{(i)}(0) = 0, \quad j = \overline{0, n-3}$$

Звідси при $t \rightarrow \infty$ отримаємо:

$$a_2 = a_0 \left[\int_0^{\infty} \int_0^t (1 - a_0 x(\tau)) d\tau^2 - a_1 \int_0^{\infty} x(\tau) d\tau \right]. \quad (2.59)$$

Продовжуючи процедуру визначення коефіцієнтів a_i ($i = \overline{3, n}$) диференціального рівняння (2.56) за описаною методикою, отримаємо:

$$a_3 = a_0 \left[\int_0^{\infty} \int_0^t \int_0^t (1 - a_0 x(\tau)) d\tau^3 - a_1 \int_0^{\infty} \int_0^t x(\tau) d\tau^2 - a_2 \int_0^{\infty} x(\tau) d\tau \right],$$

..... (2.60)

$$a_n = a_0 \left[\int_0^{\infty} \dots \int_0^t (1 - a_0 x(\tau)) d\tau^n - a_1 \int_0^{\infty} \dots \int_0^t x(\tau) d\tau^{n-1} - \dots - a_{n-1} \int_0^{\infty} x(\tau) d\tau \right].$$

Помітимо, що вирази (2.57) –(2.60) можна представити таким чином:

$$a_i = \lim_{t \rightarrow \infty} b_i(t), \quad i = \overline{0, n}, \quad (2.61)$$

де

$$b_i(t) = \varphi_i(t) / x(t). \quad (2.62)$$

У вираженні (2.62) $\varphi_i(t)$ – це узагальнені входи динамічно еквівалентних моделей. Вони описуються формулами:

$$\varphi_0(t) = f[t] = l[t],$$

$$\varphi_1(t) = \int_0^t (f(\tau) - a_0 x(\tau)) d\tau,$$

$$\varphi_2(t) = \int_0^t \int_0^t (f(\tau) - a_0 x(\tau)) d\tau^2 - a_1 \int_0^t x(\tau) d\tau,$$

.....

$$\varphi_n(t) = \int_0^t \dots \int_0^t (f(\tau) - a_0 x(\tau)) d\tau^n - a_1 \int_0^t \dots \int_0^t x(\tau) d\tau^{n-1} - \dots - a_{n-1} \int_0^t x(\tau) d\tau \quad (2.63)$$

Не важко побачити, що вираження $x(t)b_i(t) - f_i(t) = 0 \quad (i = \overline{0, n})$, яке можна отримати з (2.62), є співмножник правої частини алгоритму (2.54). Дійсно в законі налаштування параметрів "уявних" моделей $db_i/dt \rightarrow 0 \quad (i = \overline{0, n})$, при $t \rightarrow \infty$ у тому випадку, коли для вираження того, що стоїть в дужках правої частини (2.54), справедливо:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (x(t) \cdot b_i(t) - \varphi_i(t)) = 0. \quad (2.64)$$

Оскільки $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) \neq 0$, то з вираження (2.64) отримуємо алгоритм

(2.62), (2.63).

Помітимо, що алгоритм, подібний до алгоритму (2.62), (2.63), можна побудувати і для оцінки параметрів стаціонарного

(квазістаціонарного) об'єкту управління, динаміка якого описується різницеvim рівнянням

$$\sum_{i=0}^n a_i \Delta^i x[kT] = 1[kT], \quad \Delta^j x[0] = 0, \quad j = \overline{0, n-1}. \quad (2.65)$$

Оскільки при $k \rightarrow \infty$ значення кінцевих різниць $\Delta^i x[kT] \rightarrow 0$ ($i = \overline{1, n}$), то

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{i=0}^n a_i \Delta^i x[kT] = a_0 x[\infty]. \quad (2.66)$$

Враховуючи (2.65) і (2.66), маємо:

$$a_0 = [x[\infty]]^{-1}. \quad (2.67)$$

Визначивши a_0 за формулою (2.67), рівняння (2.65) запишемо таким чином:

$$\sum_{i=1}^n a_i \Delta^i x[IT] = 1[IT] - a_0 x[IT],$$

чи

$$\sum_{i=1}^n a_i (\Delta^{i-1} x[(1+1)T] - \Delta^{i-1} x[IT]) = 1[IT] - a_0 x[IT]. \quad (2.68)$$

Підставивши замість 1 в (2.68) значення 0, 1, 2, ..., $k-1$, отримаємо:

$$\sum_{i=1}^n a_i (\Delta^{i-1} x[T] - \Delta^{i-1} x[0]) = 1[0] - a_0 x[0],$$

$$\sum_{i=1}^n a_i (\Delta^{i-1} x[2T] - \Delta^{i-1} x[T]) = 1[T] - a_0 x[T],$$

.....

$$\sum_{i=1}^n a_i (\Delta^{i-1} x[kT] - \Delta^{i-1} x[(k-1)T]) = 1[(k-1)T] - a_0 x[(k-1)T].$$

Підсумуємо ліві і праві частини рівнянь, що входять в систему (2.69). Результат підсумовування має вигляд:

$$\sum_{i=1}^n a_i \Delta^{i-1} x[kT] = \sum_{l=0}^{k-1} (1[lT] - a_0 x[lT]). \quad (2.70)$$

Спрямувавши в (2.70) значення $k \rightarrow \infty$, отримаємо

$$a_1 = a_0 \sum_{l=0}^{\infty} (1[lT] - a_0 x[lT]). \quad (2.71)$$

Визначивши значення коефіцієнтів a_0 і a_1 , виконаємо ідентифікацію параметра. З цією метою рівняння (2.70) запишемо таким чином:

$$\sum_{i=2}^n a_i \Delta^{i-2} x[kT] = \sum_{l=0}^{k-1} (1[lT] - a_0 x[lT]) - a_1 x[kT],$$

або

$$\sum_{i=1}^n a_i (\Delta^{i-2} x[(j+1)T] - \Delta^{i-2} x[jT]) = \sum_{l=0}^{j-1} (1[lT] - a_0 x[lT]) - a_1 x[jT].$$

Підставивши замість j в (2.72) значення $1, 2, \dots, k-1$, отримаємо:

$$\begin{aligned} \sum_{i=2}^n a_i (\Delta^{i-2} x[2T] - \Delta^{i-2} x[T]) &= \sum_{l=0}^0 (1[lT] - a_0 x[lT]) - a_1 x[T], \\ \sum_{i=2}^n a_i (\Delta^{i-2} x[3T] - \Delta^{i-2} x[2T]) &= \sum_{l=0}^1 (1[lT] - a_0 x[lT]) - a_1 x[2T], \\ &\dots \\ \sum_{i=2}^n a_i (\Delta^{i-2} x[kT] - \Delta^{i-2} x[(k-1)T]) &= \sum_{l=0}^{k-2} (1[lT] - a_0 x[lT]) - a_1 x[(k-1)T]. \end{aligned} \quad (2.73)$$

В результаті роздільного підсумовування правих і лівих частин, що входять в систему (2.73), матимемо

$$\sum_{i=2}^n a_i (\Delta^{i-2} x[kT] - \Delta^{i-2} x[T]) = \sum_{j=1}^{k-1} \sum_{l=0}^{j-1} (1[lT] - a_0 x[lT]) - a_1 \sum_{j=1}^{k-1} x[jT]. \quad (2.74)$$

Оскільки $\Delta^i x[0] = \Delta^{i-1} x[0] = 0$ при $j = \overline{1, n-1}$, то

$$\Delta^{j-1} x[T] = \Delta^j x[0] + \Delta^{j-1} x[0] = 0,$$

або

$$\Delta^{i-2} x[T] = 0, \text{ де } i = j + 1.$$

Таким чином, рівняння (2.74) можна записати так:

$$\sum_{i=2}^n a_i \Delta^{i-2} x[kT] = \sum_{j=1}^{k-1} \sum_{l=0}^{j-1} (1[lT] - a_0 x[lT]) - a_1 \sum_{j=1}^{k-1} x[jT]. \quad (2.75)$$

Спрямувавши у вираженні (2.75) значення $k \rightarrow \infty$, отримаємо:

$$a_2 = a_0 \left[\sum_{j=1}^{\infty} \sum_{l=0}^{j-1} (1[lT] - a_0 x[lT]) - a_1 \sum_{j=1}^{\infty} x[jT] \right]. \quad (2.76)$$

Аналогічним чином можна визначити

$$\begin{aligned} a_3 &= a_0 \left[\sum_{m=2}^{\infty} \sum_{j=0}^{m-1} \sum_{l=0}^{j-1} (1[lT] - a_0 x[lT]) - a_1 \sum_{m=2}^{\infty} \sum_{j=1}^{m-1} x[jT] - a_2 \sum_{m=2}^{\infty} x[mT] \right], \\ a_4 &= a_0 \left[\sum_{n=3}^{\infty} \sum_{m=3}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{l=0}^{j-1} (1[lT] - a_0 x[lT]) - a_0 \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=2}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} x[jT] - \right. \\ &\quad \left. - a_2 \sum_{n=3}^{\infty} \sum_{m=2}^{n-1} x[mT] - a_3 \sum_{n=3}^{\infty} x[nT] \right], \end{aligned} \quad (2.77)$$

$$\begin{aligned} a_j &= a_0 \left[\sum_{n_i=i-1}^{\infty} \sum_{n_{i-1}=j-2}^{n_i-1} \dots \sum_{n_2=1}^{n_3-1} \sum_{n_1=0}^{n_2-1} (1[n_1 T] - a_0 x[n_1 T]) - a_1 \sum_{n_i=i-1}^{\infty} \dots \sum_{n_2=1}^{n_3-1} x[n_2 T] - \right. \\ &\quad \left. - a_2 \sum_{n_i=i-1}^{\infty} \sum_{n_{i-1}=i-2}^{n_i-1} \dots \sum_{n_3=2}^{n_4-1} x[n_3 T] - \dots - a_{i-1} \sum_{n_i=i-1}^{\infty} \sum_{n_{i-1}=i-2}^{n_i-1} x[n_{i-1} T] - a_{i-1} \sum_{n_i=i-1}^{\infty} x[n_i T] \right], \\ &\quad i = \overline{5, n}. \end{aligned}$$

Вирази (2.67), (2.71), (2.76) і (2.77) можна представити таким чином:

$$a_i = \lim_{k \rightarrow \infty} b_i[kT], \quad i = \overline{0, n}, \quad (2.78)$$

де

$$b_i[kT] = \varphi_i[kT] / x[kT]. \quad (2.79)$$

Тут сигнали $\varphi_i[kT]$ по аналогії з (2.63) є узагальненими входами динамічно еквівалентних панелей.

Вони описуються виразами:

$$\varphi_0[kT] = 1[kT],$$

$$\varphi_1[kT] = \sum_{l=1}^{k-1} (1[lT] - a_0 x[lT]),$$

.....

$$\begin{aligned} \varphi_i[kT] = & \sum_{n_i=i-1}^{k-1} \sum_{n_{i-1}=i-2}^{n_i-1} \dots \sum_{n_2=1}^{n_{i-1}-1} \sum_{n_1=0}^{n_2-1} (1[n_1T] - a_0 x[n_1T]) - a_1 \sum_{n=i-1}^{k-1} \dots \sum_{n_2=1}^{n_{i-1}-1} x[n_2T] - \\ & a_2 \sum_{n_i=i-1}^{k-1} \dots \sum_{n_3=2}^{n_4-1} x[n_3T] - \dots - a_{i-2} \sum_{n_i=i-1}^{k-1} \sum_{n_{i-1}=i-2}^{n_i-1} x[n_{i-1}T] a_{i-1} \sum_{n_i=i-1}^{k-1} x[n_iT], \end{aligned} \quad (2.80)$$

З синтезованих вище алгоритмів почергової ідентифікації параметрів неперервного і дискретного об'єктів при $f = const$ можна отримати алгоритми синхронної оцінки параметрів цих об'єктів.

Замінюючи у виразах (2.63) a_i на $b_i (i = \overline{0, n-1})$, отримаємо

$$b_0 = f / x,$$

$$b_1 = f \cdot \left(\int_0^t f dt - f dt - b_0 \int_0^t x dt \right) / x,$$

.....

$$b_n = f \cdot \left(\int_0^t \dots \int_0^t f dt^n - b_0 \int_0^t \dots \int_0^t x dt^n - b_1 \int_0^t \dots \int_0^t x dt^{n-1} - \dots - b_{n-1} \int_0^t x dt \right) / x. \quad (2.81)$$

Послідовно підставляючи в подальші рівняння системи (2.81) значення $b_i (i = \overline{0, n-1})$, отримані з попередніх рівнянь цієї ж системи, побудуємо алгоритм синхронної ідентифікації параметрів $a_i (i = \overline{0, n})$. Він має вигляд:

$$\begin{aligned}
b_0 &= \frac{f}{x}, \\
b_1 &= \frac{1}{x} \left(\int_0^t f dt - \frac{f}{x} \int_0^t x dt \right), \\
b_2 &= \frac{1}{x} \left(\int_0^t \int_0^t f dt^2 - \frac{f}{x} \int_0^t \int_0^t x dt^2 - \frac{1}{x} \left(\int_0^t f dt - \frac{f}{x} \int_0^t x dt \right) \int_0^t x dt \right), \\
&\dots\dots\dots (2.82)
\end{aligned}$$

Для алгоритму (2.82) справедливо, що $\lim_{t \rightarrow \infty} b_i(t) = a_i (i = \overline{0, n})$.

Поступаючи аналогічно з алгоритмом послідовної ідентифікації параметрів (2.79), (2.80), постоїмо алгоритм синхронної оцінки параметрів дискретного об'єкта (2.65):

$$\begin{aligned}
b_0[kT] &= f[kT] / x[kT] \\
b_1[kT] &= \frac{1}{x[kT]} \sum_{l=0}^{k-1} \left(f[lT] - \frac{f[kT]}{x[kT]} x[lT] \right), \\
b_2[kT] &= \frac{1}{x[kT]} \sum_{j=1}^{k-1} \sum_{l=0}^{j-1} \left(f[lT] - \frac{f[kT]}{x[kT]} x[lT] \right) - \\
&\quad - \frac{1}{x[kT]} \sum_{l=0}^{k-1} \left(f[lT] - \frac{f[kT]}{x[kT]} x[lT] \right) \sum_{j=1}^{k-1} x[jT], \\
&\dots\dots\dots (2.83)
\end{aligned}$$

Тут так само справедливі вирази:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} b_i[kT] = a_i (i = \overline{0, n})$$

2.5 Метод багатокрокової ідентифікації квазістаціонарних об'єктів

Дуже часто критерії ідентифікації, на базі яких будують алгоритми адаптивної ідентифікації, мають декілька екстремумів. Тому на практиці отримання точних оцінок параметрів об'єкту здійснюють в два етапи. Спочатку за допомогою, наприклад, методів випадкового пошуку отримують "грубі" оцінки параметрів об'єкту, тобто виходять в область

глобального екстремуму критерію ідентифікації. Потім, використовуючи отримані оцінки як наближених, уточнюють їх градієнтними методами.

Нижче наводиться алгоритм багатокрокової процедури ідентифікації параметрів об'єкту, який не використовує функції чутливості. Тут пошук значень параметрів об'єкту здійснюється по декількох напрямленнях з точок, що лежать далеко від екстремуму критерію ідентифікації.

Суть багатокрокової процедури ідентифікації [23] полягає в тому, що на кожному її кроці використовується три пари адаптивних моделей, поведінка яких підкоряється диференціальним рівнянням (2.2). Причому тут слід мати на увазі ту обставину, що на кожному подальшому кроці у взаємодію вступають моделі, параметри яких не взаємодіяли на попередньому кроці. Якщо ідентифікація параметрів об'єкту здійснюється по записах кінцевої тривалості T його вхідних і вихідних сигналів, то значення коефіцієнта налаштування k може бути розраховане по формулі (2.50).

Загальна схема комутації адаптивних моделей при визначенні параметрів об'єкта управління представлена на рис. 2.4.

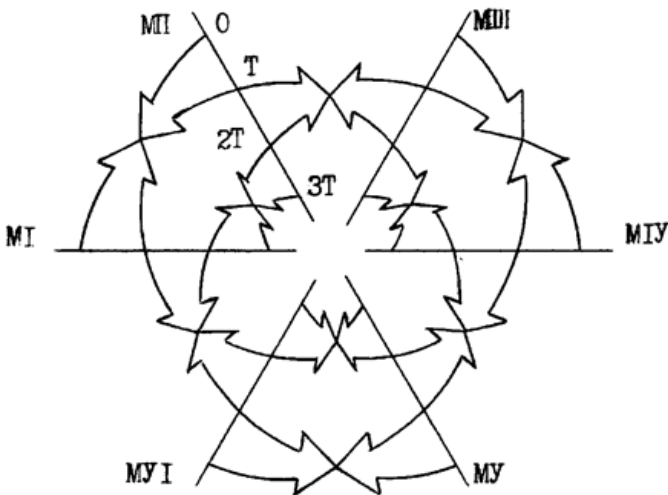


Рисунок 2.4 – Загальна схема комутації адаптивних моделей

Тут стрілками умовно позначена взаємодія параметрів різних моделей при багатокроковій ідентифікації відповідного параметра об'єкту. Зміна напрямку орієнтації стрілки відбувається через час T і відповідає моменту закінчення чергового кроку ідентифікації і початку наступного. Іменами МІ - МУІ позначені адаптивні моделі.

Застосування описаної вище процедури ідентифікації дозволяє визначити з достатньою для практики точністю оцінки значень параметрів об'єкта. При цьому параметри усіх адаптивних моделей, що настроюються, безперервно змінюють свої значення, зближуючись один з одним (рис. 2.5).

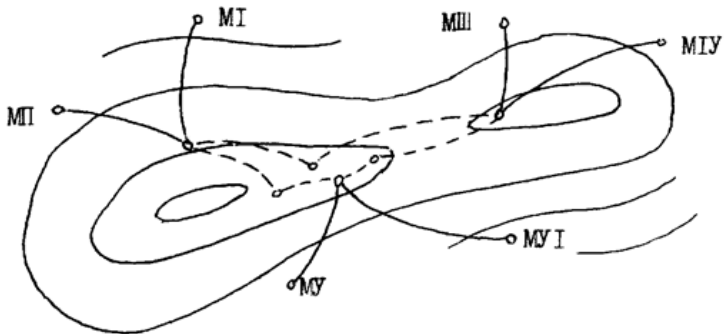


Рисунок 2.5 – Ілюстрація процесу адаптивної ідентифікації

2.6 Література до розділу 2

1. Симметрии принцип [Электронный ресурс] // Академик. Философская энциклопедия. – Режим доступа : https://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_philosophy/9069/СИММЕТРИИ. – Заголовок с экрана.
2. Болтянский, В. Г. Симметрия в алгебре [Текст] / В. Г. Болтянский, Н. Я. Виленкин. – М. : Наука, 1967. – 284 с.
3. Вейль, Г. Симметрия [Текст] / Г. Вейль. – М. : Наука, 1968. – 194 с.
4. Вигне, Е. Этюды о симметрии [Текст] / Е. Вигнер. – М. : Мир, 1971. – 318 с.
5. Джаффе, Г. Симметрия в химии [Текст] / Г. Джаффе,

М. Орчин. – М. : Мир, 1967. – 234 с.

6. Компанеец, А. С. Симметрия в микро- и макромире [Текст] / А. С. Компанеец. – М.: Наука, 1978. – 207 с.

7. Крутько, П. Д. Симметрия в автоматических системах и алгоритмах управления [Текст] / П. Д. Крутько, Е. П. Попов // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. – 1979. – № 1. – С. 161–168.

8. Урманцев, Ю. А. Симметрия природы и природа симметрии [Текст] / Ю. А. Урманцев. – М. : Мысль, 1974. – 229 с.

9. Шафрановский, И. И. Симметрия в природе [Текст] / И. И. Шафрановский. – Л. : Недра, 1985. – 168 с.

10. Шубников, А. В. Симметрия в науке и искусстве [Текст] / А. В. Шубников, В. А. Копчик. – М. : Наука, 1972. – 339 с.

11. Эллиот, Дж. Симметрия в физике [Текст] / Дж. Эллиот, П. Добер. – М. : Мир, 1983. – 364 с.

12. Бахвалов, Н. С. Численные методы [Текст] / Н. С. Бахвалов. – М. : Наука, 1973. – 623 с.

13. Ивахненко, М. М. Алгоритм идентификации параметров объектов управления [Текст] / М. М. Ивахненко, В. И. Корсун // Некоторые вопросы динамики и управления движением: Сб. научн. тр. – К. : Наук. думка, 1976. – С. 139–148.

14. Ивахненко, М. М. Алгоритм попарного сближения параметров двух адаптивных моделей в задаче идентификации [Текст] / М. М. Ивахненко, В. И. Корсун // Адаптивн. сист. автомат. упр.: Респ. межвед. научн.-техн. сб. – 1976. – Вып. 4. – С. 13–19.

15. Меркин, Д. Р. Введение в теорию устойчивости движения [Текст] / Д. Р. Меркин. – М. : Наука, 1976. – 320 с.

16. Корсун, В. И. Влияние шума на точность оценки параметров объекта управления [Текст] / В. И. Корсун // Динамика систем и устройств автоматического управления : Сб. научн. тр. – Днепропетровск: Днепропетровский государственный университет, 1975. – С. 53–57.

17. Ивахненко, М. М. Алгоритм адаптивной идентификации стационарных объектов [Текст] / М. М. Ивахненко, В. И. Корсун

//Адаптив. сист. автомат. упр. : Респ. межвед. науч. – техн. сб. – 1975. – Вып. 3. – С. 41–49.

18. А.с. 788113 СССР М.Кл² G05B 13/02. Дифференциальная система идентификации [Текст] / Ивахненко М. М., Корсун В. И, Иванов Л. Ф. – Оpubл. 15.04.80, Бюл. № 14.

19. Голубенцев, А. Н. Обобщенный вход в динамике [Текст] / А. Н. Голубенцев. – К. : Техніка, 1971. – 136 с.

20. Ивахненко, М. М. Применение принципа обобщенного входа в задачах идентификации [Текст] / М. М. Ивахненко, В. И. Корсун //Автоматизация и радиоэлектроника: Сб. научн. тр. – Днепропетровск: Днепропетровский государственный университет, 1974. – С. 69–73.

21. Костюк, В. И. Беспойсковые градиентные самонастраивающиеся системы [Текст] / В. И. Костюк. – К. : Техніка, 1969. – 276 с.

22. Корсун, В. И. Исследование динамики адаптивной дифференциальной системы идентификации параметров квазистационарного объекта [Текст] / В. И. Корсун // Системы автоматизации научных исследований: Межвузовский сб. научн. тр. – Днепропетровск : Днепропетровский государственный университет, 1989. – С. 11–15.

23. Корсун В. И. Алгоритм многошаговой процедуры идентификации квазистационарного объекта управления [Текст] / В. И. Корсун // Биологические и технические системы управления : Межвузов. сб. научн. тр. – Днепропетровск: Днепропетровский государственный университет, 1986. – С. 103–108.

РОЗДІЛ 3. СПЕЦИФІКА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

3.1 Особливості моделювання процесів хімічної технології

Побудова математичної моделі хіміко-технологічного процесу (ХТП) вимагає докладного дослідження ряду окремих процесів, що складають технологічний процес вироблення цільової продукції. Загальний алгоритм проведення таких досліджень, що упереджують безпосереднє моделювання, наведений у [103].

Спочатку досліджується гідродинаміка технологічного процесу як основа структури математичного опису. Далі досліджують кінетику хімічних реакцій, процесів масо- і теплообміну з урахуванням гідродинамічних умов. Складають математичні описи окремих процесів-складових, які збирають у єдину систему рівнянь ХТП.

У складі математичного опису ХТП виділяють наступні типи математичних співвідношень:

- а) рівняння балансів мас і енергії, записані з урахуванням гідродинамічної структури руху технологічних потоків;
- б) рівняння процесів-складових (кінетика хімічних реакцій, масо- і теплопередача тощо);
- в) теоретичні або емпіричні співвідношення між різними параметрами процесу (залежності для розрахунку тепломісткості, коефіцієнтів масопередачі та дифузії і т.п.);
- г) обмеження на значення параметрів.

Створення високоякісних математичних моделей ХТП можливе тільки при умові використання системного підходу, у відповідності з яким хімічне виробництво розглядається як складна інтегрована хіміко-технологічна система (ХТС). Системний підхід передбачає, що взаємозв'язок і взаємодія окремих ХТП, що входять в деяку ХТС, забезпечують появу у цій ХТС принципово нових властивостей, які не є притаманними її окремим невзаємопов'язаним ХТП [104].

Математичні моделі ХТС підрозділяють на символічні та іконографічні [105].

Символічні математичні моделі реальної ХТС являють собою

сукупність математичних співвідношень у вигляді формул, рівнянь, операторів, логічних умов або нерівностей, які визначають характеристики стану ХТС в залежності від конструкційних і технологічних параметрів ХТС, від параметрів стану елементів системи і від параметрів вхідних технологічних потоків системи. Така модель є результатом формалізації хіміко-технологічних процесів, що відбуваються в системі, тобто результатом створення чіткого формально-математичного опису процесу функціонування ХТС з необхідним ступенем наближення до дійсності. Іконографічні математичні моделі ХТС – це графічне відображення таких якісних властивостей ХТС, за якими можна визначити кількісні характеристики системи, або графічне відображення функціональних співвідношень між параметрами і змінними ХТС, що є по своїй суті чисто математичними. Такі моделі поділяють на дві великі групи – топологічні і мережеві моделі.

Топологічний метод аналізу ХТС заснований на розгляді математичних іконографічних (топологічних) моделей систем, якими є поточкові і структурні графи, інформаційно-поточкові мультиграфи, інформаційні та сигнальні графи ХТС. Застосування цих топологічних моделей дозволяє великий обсяг суттєвої інформації про складну ХТС представляти в компактній і наочній формі, яка вже сама по собі дає можливість скласти якісне уявлення про деякі властивості досліджуваної системи.

Використовують два методи складання систем рівнянь математичного опису ХТС: аналітичний і статистичний. Перший метод заснований на глибокому вивченні фізико-хімічної суті технологічних процесів функціонування ХТС і її елементів, інший – на застосуванні формально-емпіричних математичних залежностей, отриманих в результаті статистичного обстеження діючої ХТС. Математичні моделі ХТС другого типу зазвичай називаються статистичними моделями. Останні мають вигляд регресійних або кореляційних співвідношень між параметрами вхідних і вихідних технологічних потоків.

Математичні моделі звичайно використовуються для дослідження процесів хімічної технології методом імітаційного моделювання з використанням комп'ютерів. Часто внаслідок складності ХТП моделі

виходять громіздкими, розрахунки по таких моделях вимагають значних витрат машинного часу комп'ютера. З іншого боку, повне врахування усіх тонкощів фізичних і хімічних процесів є неможливим. У результаті вірогідність математичного опису знижується. Для отримання адекватних математичних моделей мінімальної складності нами запропонований апроксимаційно-інформаційний підхід [106], що передбачає виконання наступних дій:

а) для ХТП, що моделюється, будується аналітична модель, у рівняння якої вводяться апріорно невизначені коефіцієнти, які враховують складну стохастичну природу взаємного впливу окремих складових ХТП (елементарних процесів тепло- і масообміну, хімічних реакцій тощо);

б) статистичними методами на основі даних експериментальних досліджень здійснюється ідентифікація невизначених коефіцієнтів;

в) аналітична модель апроксимується степеневим поліномом такого порядку, який забезпечує достатній рівень адекватності моделі при невеликій складності математичних виразів. Для порівняльної оцінки і вибору оптимального порядку поліномів застосовується інформаційний критерій адекватності [107].

3.2 Моделювання вакуум-випарних установок

3.2.1 Характеристика вакуум-випарної установки як об'єкта керування

Вакуум-випарні установки (ВВУ) широко застосовуються в хімічній і мікробіологічній промисловості для підвищення концентрації розчиненої речовини в розчині, а також для одержання кристалічного продукту. Основними показниками їхньої роботи є продуктивність по випареному розчиннику, концентрація розчиненого компонента (кристалів) в упареному розчині (суспензії), витрата пари, що гріє. Серед режимних величин варто виділити вакуум у випарних апаратах, від якого залежить температурний режим і продуктивність установки, і рівень розчину (суспензії) у випарних апаратах.

ВВУ відносяться до складних інерційних об'єктів керування з великим числом збурюючих величин, серед яких маються і невимірювані,

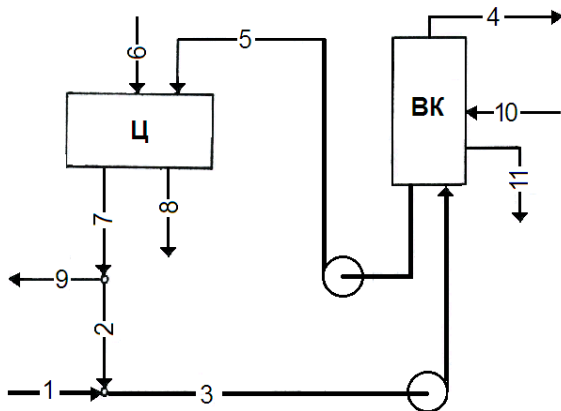
наприклад, зміна коефіцієнта теплопередачі. Бурхливе кипіння розчину, піноутворення утруднюють застосування прямих методів виміру рівня, а тверді вимоги до герметизації системи – одержання інформації про витрату випареного розчинника (вологи). Вищевказані особливості ВВУ як об'єкта керування, а також, як правило, відсутність надійних концентратомірів обумовлюють необхідність застосування непрямих методів вимірювання і керування процесами випарювання.

Створення систем непрямого й оптимального керування ВВУ базується на математичному описі процесу. Розглянуті два різних по енергоємності типи ВВУ.

3.2.2 Агрегат упарювання і кристалізації в безсатураторному виробництві сульфату амонію

Безсатураторне виробництво сульфату амонію є енергоємним. Близько 80% від загальних енергетичних витрат складають витрати пари на упарювання розчину.

Спрощена технологічна схема агрегату упарювання і кристалізації приведена на рис. 3.1.



Ц – центрифуга; ВК – випарник-кристалізатор

Рисунок 3.1 – Спрощена технологічна схема агрегату упарювання і кристалізації

Кожний з матеріальних потоків позначений відповідною цифрою: 1 – слабокислий розчин, що відводиться з агрегату абсорбції на упарювання; 2 – матковий розчин, що повертається з центрифуги на упарювання; 3 – розчин, що подається на випарник; 4 – вторинна пара; 5 – суспензія; 6 – промивна вода; 7 – відфугований матковий розчин; 8 – сульфат амонію на транспортер; 9 – матковий розчин, що надходить з центрифуги в циркуляційний збірник агрегату абсорбції; 10 – пара, що гріє кип'ятильник.

У подальшому викладенні матеріалу використовуються наступні позначення:

B – продуктивність установки з сульфату амонію; G – витрата потоку; C – концентрація сульфату амонію в потоці; S – концентрація кислоти в потоці; G_{mp} – витрата маткового розчину (рідкої фази) з суспензією; $G_{кр}$ – витрата кристалічного сульфату амонію (твердої фази) з суспензією; G_c і G_s – витрата відповідно сульфату амонію і кислоти з потоком; C_{mp} і S_{mp} – концентрація відповідно сульфату амонію і кислоти в матковому розчині суспензії; β – частка потоку маткового розчину, що надходить з центрифуги в циркуляційний збірник агрегату абсорбції; v – частка твердої фази суспензії, що розчиняється промивною водою; ξ – частка рідкої фази, уносима з кристалічним сульфатом амонію на транспортер; t – температура потоку; θ – питома теплоємність потоку; i – ентальпія потоку; $t_{кип}$ – температура кипіння суспензії у випарнику-кристалізаторі; Q_n – утрати тепла в навколишнє середовище; $Q_{кр}$ – теплота кристалізації. Цифрові індекси при умовних позначках відповідають номеру потоку за схемою.

В агрегаті упарювання і кристалізації протікають наступні процеси: змішання слабокислого розчину, що надходить з агрегату абсорбції на упарювання, з частиною маткового розчину з центрифуги; упарювання початкової суміші в випарнику-кристалізаторі з утворенням кристалічної солі; промивання суспензії водою і поділ рідкої і твердої фаз у центрифугі; поділ потоку маткового розчину після центрифуги на два потоки, один із яких повертається на упарювання, а інший направляєється в агрегат абсорбції.

Математичний опис статичних режимів агрегату, складений з

рівнянь матеріального балансу зазначених процесів, теплового балансу всього агрегату й експериментально отриманих залежностей, включає наступні співвідношення.

Змішання потоків:

$$G_3 = G_1 + G_2 = G_1 + (1-\beta) \cdot G_7; \quad (3.1)$$

$$G_{S_3} = G_3 \cdot S_3 = G_1 \cdot S_1 + (1-\beta) \cdot G_7 \cdot S_7; \quad (3.2)$$

$$G_{C_3} = G_3 \cdot C_3 = G_1 \cdot C_1 + (1-\beta) \cdot G_7 \cdot C_7. \quad (3.3)$$

Упарювання розчину і кристалізація солі:

$$G_3 = G_4 + G_5; \quad (3.4)$$

$$G_5 = G_{кр5} + G_{мп5}; \quad (3.5)$$

$$G_3 \cdot S_3 = G_{мп5} \cdot S_{мп5}; \quad (3.6)$$

$$G_3 \cdot C_3 = G_{мп5} \cdot C_{мп5} + G_5 \cdot C_{кр5} = G_5 \cdot (1 - C_{кр5}) \cdot C_{мп5} + G_5 \cdot C_{кр5}; \quad (3.7)$$

$$C_{мп5} = 43,0 + 0,093 \cdot (t_5 - 30). \quad (3.8)$$

Промивання суспензії водою і розділення рідкої і твердої фаз

$$G_5 + G_6 = G_7 + G_8; \quad (3.9)$$

$$G_8 = (1-\nu) \cdot G_{кр5} + \zeta \cdot (G_{мп5} + G_6 + \nu \cdot G_{кр5}); \quad (3.10)$$

$$G_{мп5} \cdot S_{мп5} = G_7 \cdot S_7 + G_8 \cdot S_8; \quad (3.11)$$

$$G_8 \cdot S_8 = G_{мп5} \cdot S_{мп5} \cdot \zeta = G_3 \cdot S_3 \cdot \zeta; \quad (3.12)$$

$$S_8 = f(G_6, S_{мп5}, G_{кр5}); \quad (3.13)$$

$$G_{мп5} \cdot C_{мп5} + G_{кр5} = B + G_7 \cdot C_7; \quad (3.14)$$

$$B = (1-\nu) \cdot G_{кр5} + \zeta \cdot \nu \cdot G_{кр5} + \zeta \cdot G_{мп5} \cdot C_{мп5}; \quad (3.15)$$

$$C_7 = C_{мп5}; \quad (3.16)$$

$$G_6 = \frac{G_{кр5} \cdot \nu}{C_7} \cdot (100 - C_7 - S_7). \quad (3.17)$$

Поділ потоку:

$$G_7 = G_9 + G_2 = \frac{G_9}{\beta}; \quad (3.18)$$

$$G_7 \cdot S_7 = G_9 \cdot S_7 + G_2 \cdot S_7 = \frac{G_9 \cdot S_7}{\beta}; \quad (3.19)$$

$$G_7 \cdot C_7 = G_9 \cdot C_7 + G_2 \cdot C_7 = \frac{G_9 \cdot C_7}{\beta}. \quad (3.20)$$

Тепловий баланс всього агрегату:

$$G_{10} \cdot (i_{10} - i_{11}) + G_1 \cdot \theta_1 \cdot t_1 + G_6 \cdot \theta_6 \cdot t_6 + Q_{кр} = G_8 \cdot \theta_8 \cdot t_8 + \beta \cdot G_7 \cdot \theta_7 \cdot t_7 + G_4 \cdot i_4 + Q_{п} . \quad (3.21)$$

На деякі вхідні і вихідні змінні накладаються обмеження, викликані особливостями процесу й апаратури й економічними міркуваннями. Так на концентрацію сульфату амонію в слабокислому розчині накладається обмеження зверху:

$$C_1 = 43,0 + 0,093 \cdot (t_1 - 30) , \quad (3.22)$$

обумовлене розчинністю сульфату амонію. Обмеження, викликані технічними характеристиками насосів, мають вид

$$C_{кр5} \leq C_{кр}^* ; \quad (3.23)$$

$$G_5 \leq G_5^* ; \quad (3.24)$$

$$G_3 \leq G_3^* . \quad (3.25)$$

Необхідною умовою одержання сульфату амонію заданої якості є дотримання обмеження на кислотність готового продукту:

$$S_8 \leq S_8^* . \quad (3.26)$$

Таким чином, система рівнянь матеріального і теплового балансів (3.1–3.21) і обмеження (3.22–3.26) являють собою математичну модель агрегату упарювання і кристалізації, використовуючи яку можна розрахувати статичний режим агрегату.

Дослідження, проведені на математичній моделі, показали, що для мінімізації витрати пари, що гріє, необхідно підтримувати на максимально припустимих рівнях концентрацію сульфату амонію в розчині, що подається на упарювання, його температуру, ступінь упарювання розчину і на мінімальному рівні температуру кипіння в апараті. Підвищити температуру розчину, що подається на упарювання, і концентрацію сульфату амонію в ньому можна шляхом підвищення значень цих параметрів у початковому розчині і шляхом повернення у випарник частини маткового розчину, що відводиться з центрифуги.

3.2.3 ВВУ – проміжна ланка виробництва

Як другий приклад розглянута ВВУ, що, на відміну від агрегату упарювання і кристалізації сульфату амонію, є проміжною в технологічному ланцюжку виробництва і характеризується великими енергетичними витратами в порівнянні з іншими стадіями виробництва, наприклад, сушінням. Тому основним показником роботи даної ВВУ є

концентрація розчиненої речовини в упареному розчині, а задачею керування – підтримка її на заданому значенні.

Технологічна схема такої ВБУ відносно проста, у ній відсутні зворотні зв'язки, процес випарювання не супроводжується кристалізацією. Рівняння матеріального і теплового балансу ВБУ мають вигляд:

$$G_p = G_{вт.п} + G_{уп}; \quad (3.27)$$

$$G_p \cdot C_p = G_{уп} \cdot C_p; \quad (3.28)$$

$$G_p \cdot \Delta i_p + G_p \cdot \theta_p \cdot t_p = G_{уп} \cdot \theta_{уп} \cdot t_{уп} + G_{вт.п} \cdot i_{вт.п} + Q_n. \quad (3.29)$$

де G_p , C_p , θ_p , t_p – відповідно витрата, концентрація, питома теплоємність і температура початкового розчину;

$G_{уп}$, $C_{уп}$, $\theta_{уп}$, $t_{уп}$ – відповідно витрата, концентрація, питома теплоємність і температура упареного розчину;

$G_{ем.п.}$, $i_{ем.п.}$ – витрата і ентальпія вторинної пари;

G_n , Δi_n – витрата і зміна ентальпії пари, що гріє;

Q_n – втрати тепла.

Основною керуючою дією установки є витрата пари, що гріє. Аналіз рівнянь матеріального балансу (3.27, 3.28) показує, що для забезпечення заданого значення концентрації упареного розчину необхідно випаровувати відповідну витраті і концентрації початкового розчину кількість вологи. Значення керуючої дії, витрати пари, що гріє, може бути розраховане по рівнянню теплового балансу (3.29). Залежність між витратою випареної вологи $G_{ем.п.}$ і витратою пари, що гріє, G_n близька до прямо пропорційної. Використовуючи цю залежність можна простіше, ніж по рівнянню теплового балансу, розрахувати необхідну витрату пари, що гріє.

Слід зазначити, що значення коефіцієнта пропорційності між витратою випареної вологи і витратою пари, що гріє, змінюється зі зміною тепловтрат, коефіцієнта теплопередачі, параметрів пари, що гріє. Визначення його значень необхідно робити періодично по усередненим експериментальним значенням витрат випареної вологи і пари, що гріє. Час усереднення повинен перевищувати час перехідного процесу випарки, але, у той же час, повинен бути значно менше часу загасання автокореляційних функцій сигналів концентрації і витрати початкового розчину.

З огляду на вище викладене, спрощений алгоритм розрахунку статичного режиму процесу випарювання можна представити як послідовність наступних операцій:

- 1) знаючи витрату і концентрацію початкового розчину і задане значення концентрації упареного розчину по рівнянню (3.28) розраховують значення витрати упареного розчину;
- 2) згідно рівнянню (3.27) визначають витрату вторинної пари (випареної вологи);
- 3) за усередненими експериментальними значеннями витрати пари, що гріє, і випареної вологи розраховують коефіцієнт пропорційності між ними;
- 4) визначають витрату пари, що гріє, згідно прямопропорційній залежності від витрати випареної вологи.

Даний алгоритм може бути використаний при створенні системи непрямого керування ВВУ.

3.3 Моделювання процесу каталітичного риформінгу

3.3.1 Коротка характеристика процесу

Каталітичний риформінг (або платформінг) – один з основних способів одержання високооктанових бензинів. Сучасні установки платформінга постачені надійно працюючими автоматичними системами стабілізації окремих технологічних величин, що, однак, не задовольняє зрості вимоги до керування цими складними хіміко-технологічними системами. Основною перешкодою для розробки і впровадження автоматизованих систем оптимального керування установками продовжує залишатися відсутність надійного математичного опису процесу, що дозволяє при мінімальній інформації про його протікання і мінімальну кількість використовуваних засобів контролю, оперативно здійснювати пошук оптимальних режимів роботи установки. Платформінг здійснюється у 3-х послідовно включених реакторах з нерухомим шаром каталізатора, умови роботи яких близькі до адіабатичного.

На рис. 3.2 представлена спрощена технологічна схема реакторного блоку установки.

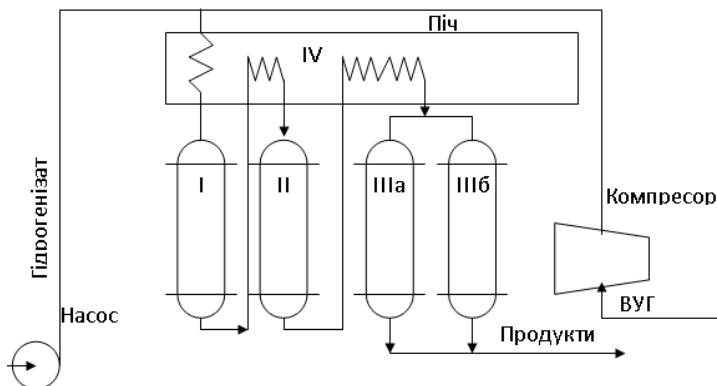


Рисунок 3.2 – Спрощена технологічна схема реакторного блоку установки платформінга

Сировина (фракції прямогонних бензинів, що містять ароматичні, нафтенові і парафінові вуглеводні) після змішування з циркуляційним воденьвмісним газом (ВВГ) надходить у трубчасту піч IV для підігріву до температури 490–520 °С і далі в реактор I реакторного блоку, а потім проходить послідовно через реактор II і паралельно включені реактори IIIa та IIIб. Процес протікає з поглинанням тепла, тому реакційна суміш перед кожним реактором підігрівається в печі IV до заданої температури.

Після реактора III реакційна суміш охолоджується і направляється у сепаратор для відділення ВВГ від каталізатора. Частина ВВГ приділяється на сторону, а частина – використовується як циркуляційний газ. У процесі риформінгу відбувається ароматизація нафтової сировини, у результаті чого в одержуваному продукті підвищується вміст ароматичних вуглеводнів, що викликає підвищення октанового числа.

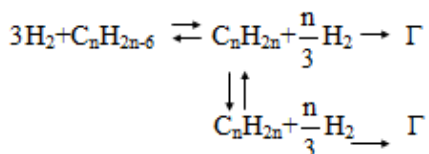
При керуванні процесом каталітичного риформінгу основні керуючі впливи здійснюються шляхом нагрівання газосировинної суміші на входах у реактори до температур, що забезпечують оптимальний режим, відносно обраного критерію й у рамках обмежень, що накладаються, на координати технологічного процесу. Якість продукції і техніко-економічних показників процесу залежать не тільки від температури газосировинної суміші на входах у реактори, але також від тиску в реакторах, кратності циркуляції ВВГ, складу суміші, навантаження, стану каталізатора.

3.3.2 Математичний опис кінетики каталітичного риформінгу

Існує кілька підходів до побудови математичного опису процесу риформінгу. Відомі математичні моделі процесу каталітичного риформінгу, побудовані на основі рівнянь що описують кінетику хімічного перетворення вуглеводнів в реакторному блоці риформінгу і базуються на математичній моделі J. Smith [108], що отримала подальший розвиток в роботах Ю.М. Жорова, Г.М. Панченкова [109] і M. Vervorner [110].

Найбільш плідною виявилася кінетична модель J. Smith, що склала основу робіт Жорова-Панченкова. Центральною ідеєю цього підходу до побудови математичного опису є розгляд процесу каталітичного риформінгу як наслідку хімічної взаємодії не індивідуальних речовин, а групових компонентів, що дозволить побудувати кінетичні схеми, досить прості для розробки ефективних математичних моделей, придатних як для проектних розрахунків, так і для створення систем оптимального керування. Виділено три групи компонентів: ароматичні (А), нафтові (Н) і парафінові (П) вуглеводи.

Кінетична схема їхніх перетворень спрощено може бути представлена наступним чином:



Структура математичного опису процесу платформінгу представляється системою рівнянь [111]:

$$\frac{dn_i}{dV} = \sum_i W_i ;$$

$$\frac{dT}{dV} = \frac{1}{G \cdot C_p} \cdot \sum_i \Delta H_i \rightarrow jW_i ,$$

для реакцій циклізації, ароматизації і ізомеризації:

$$W_i = k_{0i} \cdot \exp(-E_i / RT) \left(\frac{n_i}{n_{нр}} \right),$$

для реакцій гідрогенолізу і гідрокрекінгу:

$$W_i = k_{oi} \cdot \exp(-E_i / RT) \left(\frac{n_i}{\sum n_i} \right) \cdot P,$$

де n_i – мольний потік i -го вуглеводня;

V – обсяг реакційної зони;

T – температура реакційної суміші;

W_i – швидкість i -ї хімічної реакції;

G , C_p – маса реакційної суміші, що надходить у реактор, і її середня теплоємність;

ΔH_i – тепловий ефект i -ї реакції, віднесений до 1 моль i -го компонента;

K_{oi} , E_i – передекспонентний множник і енергія активації i -ї реакції.

Кінетичні моделі спочатку були створені для опису роботи одного реактора каталітичного риформінгу, а потім поширювалися на багатореакторний блок. При цьому настроювальні коефіцієнти моделі приймалися однаковими для кожного з трьох реакторів.

Такий підхід до створення моделі реакторного блоку має кілька недоліків.

У подібних моделях не повністю враховується специфіка протікання процесу в окремих реакторах реакторного блоку. Так, наприклад, в першому реакторі складаються найбільш сприятливі умови для реакцій дегідроциклізації 5-ти і 6-ти членних нафтенів, що призводить до утворення тут до 70% ароматичних вуглеводнів. Дегідроциклізація парафінів переважно протікає в другому і третьому реакторах. Що стосується гідрокрекінгу вуглеводнів, то реакція з найбільшою інтенсивністю протікає в останньому реакторі.

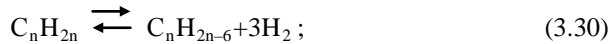
Модель Сміта не враховує нестационарності процесу каталітичного риформінгу. У цьому відношенні модель Жорова-Панченкова має безсумнівні переваги, оскільки її досить просто можна доповнити рівняннями, що дозволяють вносити корекцію в модель зі зміною активного каталізатора.

З метою адаптації моделей Сміта і Жорова може бути використаний алгоритм періодичної корекції окремих коефіцієнтів

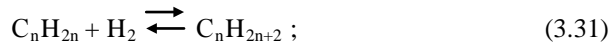
(констант) на основі інформації, одержуваної в процесі нормальної експлуатації устаткування. Як відзначається в [111], найбільш чутливою до зміни стану каталізатора є константа швидкості реакції $H \rightarrow A$. Її уточнення (корекція) не складає труднощів, можна використовувати для цієї мети уже відомі методи.

Практика розрахунків технологічного устаткування і процесів нафтопереробки показала, що основними реакціями каталітичного риформингу, що визначають точність кількісних оцінок параметрів процесу, є [110, 111]:

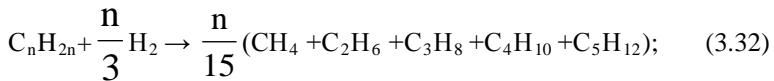
а) дегідрування шестичленних нафтенів



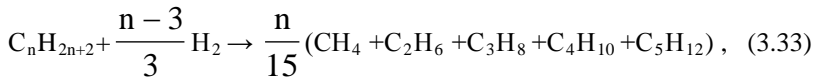
б) дегідроциклізація парафінів:



в) гідрокрекінг нафтенів:



г) гідрокрекінг парафінових:



де n – вуглецеве число.

Кінетика реакцій (3.30 – 3.33) може бути описана наступними рівняннями [110, 112]:

$$-\frac{dy_{смн}}{dV_R} = k_1 p_H - \frac{k_1}{k_{p1}} p_A \cdot p_{H_2}^3 \quad (3.34)$$

$$-\frac{dy_{смн}}{dV_R} = k_2 p_H p_{H_2} - \frac{k_1}{k_{p2}} p_{II} \quad (3.35)$$

$$-\frac{dy_{смн}}{dV_R} = k_3 \frac{p_H}{\pi} \quad (3.36)$$

$$-\frac{dy_{смп}}{dV_R} = k_4 \frac{p_H}{\pi} \quad (3.37)$$

де $u_{смн}$, $u_{смп}$ – мольні частки нафтенів і парафінових вуглеводнів

відповідно в сировині, кмоль/кмоль;

V_R – величина, зворотна об'ємної швидкості живлення кГ катализатора/(кмоль/ч) сировини;

k_1 – константа швидкості реакції (3.34), кмоль/(г Па кГ катализатора);

k_{p1} – константа хімічної рівноваги реакції (3.34), Па³;

k_2 – константа швидкості реакції (3.35), кмоль/(г Па кГ катализатора);

k_{p2} – константа хімічної рівноваги реакції (3.36), Па⁻¹;

k_4, k_3 – константи швидкості реакцій (3.36) і (3.37), кмоль/(г Па кГ катализатора);

P_n, P_A, P_n, P_{n2} – парціальні тиски нафтових, ароматичних, парафінових вуглеводнів і водню, Па;

Константа швидкості K_1 реакції ароматизації (3.30) може бути знайдена по графіках, приведеним у [110, 112] чи по рівнянню, отриманому обробкою цих графіків:

$$k_1 = 3,6 \cdot 10^{-7} \cdot e^{5,5176 - \frac{4522,6}{T_1}}, \quad (3.38)$$

а константа хімічної рівноваги цієї реакції

$$k_{p1} = 9,81^3 \cdot 10^{12} \cdot e^{46,15 - \frac{25600}{T_1}}. \quad (3.39)$$

Константа швидкості реакції перетворення нафтових вуглеводнів у парафінові (3.31):

$$k_2 = 3,55 \cdot 10^{-15} \cdot e^{11,77(1,22 - \frac{1000}{T_1})}, \quad (3.40)$$

а константа хімічної рівноваги цієї реакції

$$k_{p2} = 98,1^{-1} \cdot 10^{-3} \cdot e^{\frac{4450}{T_1} - 7,12}. \quad (3.41)$$

Константа швидкостей хімічних реакцій (3.32) і (3.33) обчислюється згідно рівнянню

$$k_{3,4} = 0,18 \cdot e^{23,95(1,22 - \frac{1000}{T_1})}, \quad (3.42)$$

отриманому, як і вищевказані, по графіках, приведених у [110, 112].

У деяких випадках у функцію F уводять додатково доданки,

зв'язані з виходом каталізатору, що може істотно позначитися на результатах пошуку.

При рішенні задачі оптимального керування процесом риформінгу модель варто доповнити співвідношеннями для розрахунку виходу каталізатору і його октанового числа:

$$\lambda = \frac{\sum G_i}{\sum y_i \cdot M_i};$$
$$O_r = \sum y_i O_{ri} + by_a^2,$$

де λ – вихід каталізатору;

G_i – кількість і-го вуглеводню, що залишає реактор;

p_i – мольний потік і-го вуглеводню на вході в реактор;

M_i – молекулярна маса і-го вуглеводню;

O_r – октанове число каталізатору;

O_{ri} – октанове число і-го групового компонента;

y_i – зміст і-го групового компонента в каталізаторі;

b – коефіцієнт, значення якого близько до 13;

y_a – утримання ароматичних вуглеводнів у каталізаторі

Якщо задача оптимального керування процесом риформінгу, як це показано вище, зводиться до максимізації виходу каталізатору при заданому октановому його числі, то перше з приведених рівнянь представить критерій оптимальності, а друге при рішенні цієї задачі ввійде в число обмежень типу рівностей.

3.3.3 Алгоритм моделювання процесу каталітичного риформінгу бензинових фракцій

Оскільки математична модель орієнтована на пошук оптимальних режимів роботи устаткування в умовах промислової експлуатації, джерелами інформації, необхідної для рішення задач керування, є засоби автоматичного контролю протікання процесу, установлені на технологічному устаткуванні, цехова і заводська лабораторії, технологічний регламент і проектна документація, а також довідкова література. Перелік вихідної інформації, джерела її одержання, прийняті позначення і розмірності зведені в табл. 3.1. Частину відсутньої інформації визначають розрахунковим шляхом.

Таблиця 3.1 – Перелік вихідних даних, їх позначення, описи і джерела одержання

Найменування	Одиниця вимірювання	Позначення	Джерело одержання
Об'ємна швидкість подачі гідрогенізата на реакційний блок	м ³ /час	G ₀	Виробничі дані
Температура сировини на вході в I-й реактор	°С	t	те ж
Тиск на вході в реакторний блок (I-й реактор)	Па	π	те ж
Густина гідрогенізата Γ склад гідрогенізата:	кг/м ³	ρ _Г	Лабораторія
Початок кипіння (п.к.)	°К	T _{нк}	те ж
Температура 10% википання	°К	T ₁₀	те ж
Температура 50% википання	°К	T ₅₀	те ж
Температура 90% википання	К	T ₉₀	Лабораторія
Температура кінця кипіння	К	T _к	те ж
Вуглеводневий склад гідрогенізата			
Зміст ароматичних вуглеводнів	масова частка	У _а	те ж
Те ж нафтоених вуглеводнів	те ж	У _н	те ж
Те ж парафінових і неграничних	те ж	У _п	те ж
Склад циркуляційного газу, що надходить на реакторний блок			
H ₂	об'ємні частки	У _в	Лабораторія
СН ₄	те ж	У ₄	те ж
С ₂ Н ₆	те ж	У ₆	те ж
С ₃ Н ₈	те ж	У ₈	те ж
С ₄ Н ₁₀	те ж	У ₁₀	те ж
С ₅ Н ₁₂	те ж	У ₁₂	те ж
Молекулярна маса водню		M _в	Довідникові дані
Те ж СН ₄		M ₄	те ж
Те ж С ₂ Н ₆		M ₆	те ж
Те ж С ₃ Н ₈		M ₈	те ж
Те ж С ₄ Н ₁₀		M ₁₀	те ж
Те ж С ₅ Н ₁₂		M ₁₂	те ж
Сумарна кількість каталізатора в реакторному блоці	кг	G _к	Проектні та лабораторні дані
Кількість каталізатора в 1-ому реакторі	кг	G _{к1}	те ж
Те ж у 2-ому реакторі	кг	G _{к2}	те ж
Те ж у реакторі 3а	кг	G _{к3а}	те ж
Те ж у реакторі 3б	кг	G _{к3б}	те ж

Насипна маса каталізатора	кг/м ³	ρ_k	Лабораторія
---------------------------	-------------------	----------	-------------

Уся вихідна інформація піддається перетворенню з метою її представлення у формі, необхідної для виконання подальших розрахунків.

У рівняннях кінетики (3.34) – (3.37) зміна утримання вуглеводнів у процесі хімічних перетворень виражено в мольних частках, а склад живлення – у масових частках.

Перерахування складу живлення можна виконати відповідно до залежності:

$$M_C \cdot y_i = M_i \cdot y_i', \quad (3.43)$$

де M_C – середня молекулярна маса сировини;

M_i – середня молекулярна маса i -ої фракції (компонента);

y_i – утримання i -го компонента в живленні, виражене в масових частках;

y_i' – те ж саме в мольних частках.

Середні молекулярні маси ароматичних, нафтових і парафінових вуглеводів можна визначити за вуглецевим числом n :

$$\begin{aligned} M_a &= 14n - 6 \\ M_{\text{н}} &= 14n \\ M_{\text{п}} &= 14n + 2 \end{aligned} \quad (3.45)$$

Вуглецеве число приблизно можна визначити за лабораторним методом. Оскільки звичайні лабораторні аналізи дають масові частки вуглеводнів кожної групи y_i , то вуглецеве число в першому наближенні рекомендується визначити через масові частки вуглеводнів:

$$n' = \frac{1}{14} (M_C - 2y_c + 6y_a) \quad (3.46)$$

після чого за n' знайти наближені значення середніх молекулярних мас групи вуглеводнів з (3.45) і зі співвідношення

$$y_i' = \frac{y_i / M_i}{\sum y_i / M_i} \quad (3.47)$$

визначити мольні частки групових компонентів живлення.

Більш точне значення вуглецевого числа визначається по мольних частках y_i' :

$$n = \frac{1}{14} (M_c - 2y'_c + 6y'_a). \quad (3.48)$$

Розрахунок M_i і y'_i повторюється доти, поки відхилення величини $\sum y'_i$ від одиниці не стане порівнянним з відносними помилками аналізів.

Остаточний вміст вуглеводнів у живленні, виражений в мольних частках, знаходимо за співвідношенням:

$$y'_i = y_i \frac{M_c}{M_i}. \quad (3.49)$$

Розрахунок парціальних тисків групових компонентів у живленні виконується за рівнянням:

$$p_i = \pi \cdot y'_i, \quad (3.50)$$

де π – загальний тиск в апараті, Па.

Кількість гідрогенізата, що надходить на реакторний блок, у кг/годину:

$$G_c = G_0 \cdot \rho_r, \quad (3.51)$$

де G_0 – витрата гідрогенізата в $\text{м}^3/\text{год}$;

ρ_r – густина гідрогенізата, $\text{кг}/\text{м}^3$, або в $\text{кмоль}/\text{год}$:

$$n_{cl} = G_c / M_c. \quad (3.52)$$

Кількісний склад гідрогенізата:

$$n_{cli} = n_{ci} \cdot y'_i. \quad (3.53)$$

Об'ємна швидкість живлення:

$$V_0 = G_c / G_k, \quad (3.54)$$

де G_k – сумарна кількість каталізатора, використовувана в реакторному блоці, кг.

Кратність циркуляції знаходиться зі співвідношення

$$n_\Gamma = G_{B\Gamma} / G_c, \quad (3.55)$$

а кількість циркуляційних газів, виражена в $\text{кмоль}/\text{год}$

$$n_\Gamma = G_{B\Gamma} / 22,4. \quad (3.56)$$

Середня молекулярна маса циркуляційного газу

$$M_\Gamma = \sum M_i y'_i. \quad (3.57)$$

Кількісний склад циркуляційного газу, виражений у $\text{кмоль}/\text{год}$

$$n_{\Gamma i} = n_\Gamma \cdot y'_{\Gamma i}, \quad (3.58)$$

а загальна кількість парафінових вуглеводневих газів

$$n_{u\Gamma} = n_\Gamma - n_{\Gamma B}, \quad (3.59)$$

де $n_{ГВ}$ – кількість водню в циркуляційному газі, кмоль/год.

Кількість реакційної суміші $n_{см}$ характеризується сумою складових гідрогенізата, що надходить на реакторний блок, і складових циркуляційного газу, виражених через кмоль/год:

$$n_{см} = n_{c1a} + n_{c1H} + n_{c1П} + n_{ГВ} + n_{ун} , \quad (3.60)$$

а склад (мольні частки) і парціальні тиски компонентів відповідають залежностям:

$$\begin{aligned} y_{см1}^{\wedge} &= n_{c1i} / n_{см} ; \\ y_{смВ}^{\wedge} &= n_{ГВ} / n_{см} ; \\ y_{смП}^{\wedge} &= n_{ун} / n_{см} \end{aligned} \quad (3.61)$$

а також

$$P_{смi} = \pi \cdot y_{смi}^{\wedge} . \quad (3.62)$$

3.2.4 Алгоритм розрахунку матеріального балансу реакторів

Розрахунок виходу каталізатору і його октанового числа здійснюється за матеріальними балансами кожного реактора блоку, що дозволяє забезпечити оптимальні режими роботи кожного з них у складі обраного критерію оптимальності з урахуванням технологічних обмежень і вимог до якості продукту.

Основу алгоритму розрахунку матеріальних балансів реакторів складають кінетичні залежності (3.34) – (3.42), що відповідають прийнятій кінетичній схемі процесу (3.30) – (3.33).

Константа швидкості k_1 і константа хімічної рівноваги K_{p1} розраховуються по рівняннях (3.38) і (3.39) відповідно і, далі обчислюється права частина рівняння (3.34), для чого використовується інформація блоку підготовки вихідної інформації. Після поділу змінних і інтегрування рівняння (3.34) приводиться до виду

$$-y_{смП1} = B_1 \cdot V_{R1} , \quad (3.63)$$

де $y_{смП1}$ – відносне зменшення кількості нафтових вуглеводнів у першому реакторі в результаті протікання реакції (3.34);

B_1 – обчислене значення правої частини рівняння (3.34), якщо $B_1 > 0$ то переважає пряма реакція і навпаки;

$$V_{R1} = \frac{G_{K1}}{n_{C1}} \frac{\text{кг каталізатора I-го реактора}}{(\text{кмоль/год}) \text{ сировини}} \quad (3.64)$$

Кількість нафтових вуглеводнів, що залишилися в реакційній суміші:

а) після ароматизації

$$n_{H11} = (y'_H - u_{CMH1}) \cdot n_{C1} ; \quad (3.65)$$

б) перетворених в ароматичні вуглеводні

$$n_{HA1} = n_{C1A} - n_{H11} . \quad (3.66)$$

Константа швидкості k_2 і константа хімічної рівноваги k_{p2} реакції (3.35) обчислюються по рівняннях (3.40) і (3.41) відповідно. Якщо $k_{p2} < 1$, то переважає зворотна реакція.

Розраховується права частина B_2 рівняння (3.35), а після поділу перемінних і інтегрування, рівняння приводиться до виду:

$$-u_{CMH2} = B_2 \cdot V_{R1} , \quad (3.67)$$

що і служить для визначення збільшення кількості нафтових за рахунок перетворення парафінових вуглеводнів.

Кількість нафтових вуглеводнів після завершення першої і другої реакцій:

$$n_{H12} = (y'_H - u_{CMH1} - u_{CMH2}) \cdot n_{C1} . \quad (3.68)$$

Кількість парафінових вуглеводнів, перетворених у нафтові :

$$n_{HP2} = n_{H12} - n_{H11} . \quad (3.69)$$

Константа швидкості реакції гідрокрекінгу нафтових вуглеводнів (3.36) розраховується по рівнянню (3.42). При цьому $k_4 = k_3$.

Частка нафтових вуглеводнів, підданих гідрокрекінгу, знаходиться по рівнянню (3.36), відкіля одержуємо залежність

$$-u_{CMH3} = B_3 \cdot V_{R1} , \quad (3.70)$$

де B_3 – обчислене значення правої частини (3.36).

Кількість нафтових, що залишилася після завершення реакцій (3.30)– (3.32):

$$n_{H13} = (y'_H - u_{CMH1} + u_{CMH2} - u_{CMH3}) \cdot n_{C1} . \quad (3.71)$$

Кількість нафтових, підданих гідрокрекінгу:

$$n_{HP2} = n_{H12} - n_{H13} . \quad (3.72)$$

Зменшення частки парафінових вуглеводнів у результаті реакції гідрокрекінгу знаходиться з рівняння (3.37), у результаті поділу перемінних і інтегрування якого знаходимо:

$$-y_{\text{СМПІ}} = V_4 \cdot V_{R1}, \quad (3.73)$$

де V_4 – обчислене значення правої частини рівняння (3.37).

Залишок парафінових вуглеводнів:

$$n_{\text{НІ4}} = (y'_{\text{П}} - y_{\text{СМПІ}}) \cdot n_{\text{СІ}}. \quad (3.74)$$

Кількість парафінових вуглеводнів, що перетворюється в газ у результаті гідрокрекінгу:

$$n_{\text{ПГ1}} = n_{\text{СІП}} - n_{\text{ПІ4}}. \quad (3.75)$$

Кількісний склад реакційної суміші на виході реактора:

а) бензинової фракції

$$n_{\text{СІА1}} = n_{\text{СІА}} + n_{\text{НА1}};$$

$$n_{\text{СІН1}} = n_{\text{СІН}} - n_{\text{НА1}} + n_{\text{НП1}} - n_{\text{НГ1}}; \quad (3.76)$$

$$n_{\text{СІП1}} = n_{\text{СІП}} - n_{\text{НП1}} - n_{\text{ПГ1}};$$

$$n_{\text{СІ1}} = n_{\text{СІА1}} + n_{\text{СІН1}} + n_{\text{СІП1}}; \quad (3.77)$$

б) циркуляційного газу

$$n_{\text{ГВ1}} = n_{\text{Г13}} + 3n_{\text{а1}} + n_{\text{НП1}} - \frac{n}{3} \cdot n_{\text{НГ1}} - \frac{n-3}{3} \cdot n_{\text{ПГ1}}; \quad (3.78)$$

$$B_5 = (n_{\text{НГ1}} + n_{\text{ПГ1}}) \cdot n / 15; \quad (3.79)$$

$$n_{\text{Г11}} = n_{\text{Г1}} + B_5, \quad 1, \dots, 5. \quad (3.80)$$

Кількість циркуляційного газу на виході реактора:

$$n_{\text{ГS1}} = n_{\text{ГВ1}} + n_{\text{Г41}} + n_{\text{Г61}} + n_{\text{Г81}} + n_{\text{Г101}} + n_{\text{Г121}}. \quad (3.81)$$

Склад циркуляційного газу:

$$y'_{\text{Г}} = n_{\text{Г}} / n_{\text{ГS1}}, \quad 1, \dots, 6. \quad (3.82)$$

Молекулярна маса циркуляційного газу:

$$M_{\text{Г1}} = \sum_{i=1}^6 M_i \cdot y_{\text{Гi}}. \quad (3.83)$$

Кількість збагаченого циркулюючого газу на виході з реактора:

$$G_{\text{Г1}} = n_{\text{ГS1}} \cdot M_{\text{Г1}}, \quad \text{кг/год}. \quad (3.84)$$

Якість реакційної суміші на виході реактора:

$$n_{\text{УП1}} = n_{\text{ГS1}} - n_{\text{ГВ1}}. \quad (3.85)$$

$$n_{\text{СМ1}} = n_{\text{СІА1}} + n_{\text{СІН1}} + n_{\text{СІП1}} + n_{\text{ГВ1}} + n_{\text{УП1}}. \quad (3.86)$$

Склад реакційної суміші на виході з реактора:

$$y'_{\text{CMI}} = n_{\text{CII}} / n_{\text{CMI}} \quad (3.87)$$

Кількість вуглеводнів, що залишають реактор:

$$\begin{aligned} G_{a1} &= n_{\text{C1A1}} \cdot M_{a1}; \\ G_{\text{H1}} &= n_{\text{C1H1}} \cdot M_{\text{H1}}; \\ G_{\text{П1}} &= n_{\text{C1П1}} \cdot M_{\text{П1}}; \\ G_{\text{C1}} &= G_{a1} + G_{\text{H1}} + G_{\text{П1}}. \end{aligned} \quad (3.88)$$

Уточнимо вуглецеве число n на виході реактора, виходячи з умови:

$$G_{\text{C1}} = n_{\text{C1A1}} \cdot (14n - 6) + n_{\text{C1П1}} \cdot 14n + n_{\text{C1П1}} \cdot (14n + 2),$$

відкіля:

$$n = \frac{G_{\text{C1}} + 6n_{\text{C1A1}} - 2n_{\text{C1П1}}}{14 \cdot n_{\text{C1}}} \quad (3.89)$$

Уточнимо молекулярні маси вуглеводнів на виході з реактора:

$$\begin{aligned} M_{a1} &= 14n - 6; \\ M_{\text{H1}} &= 14n; \\ M_{\text{П1}} &= 14n + 2. \end{aligned} \quad (3.90)$$

Уточнюємо кількісний склад бензинової фракції, що залишає реактор:

$$\begin{aligned} G_{a1} &= n_{\text{C1a1}} \cdot M_{a1}; \\ G_{\text{H1}} &= n_{\text{C1H1}} \cdot M_{\text{H1}}; \\ G_{\text{П1}} &= n_{\text{C1П1}} \cdot M_{\text{П1}}. \end{aligned} \quad (3.91)$$

Вихід каталізата (платформату) визначається відношенням мольних потоків на виході і вході реактора:

$$\lambda = \frac{G_{a1} + G_{\text{H1}} + G_{\text{П1}}}{n_{\text{C1a}} \cdot M_a + n_{\text{C1H}} \cdot M_{\text{H}} + n_{\text{C1П}} \cdot M_{\text{П}}} \quad (3.92)$$

Октанове число платформата:

$$O_r = \sum y_{i1} \cdot O_{ri} - b \cdot y_{a1}^2, \quad (3.93)$$

де $y_{i1} = \frac{G_{i1}}{G_{\text{C1}}}$ – вміст i -го групового компонента в платформаті;

b – коефіцієнт, що враховує відхилення від адитивності і близький по величині до 13;

O_{pi} – октанове число i -го групового компонента в платформаті.

3.2.5 Адаптація математичної моделі

Процес каталітичного риформінгу є нестационарним і отже, математичний опис має потребу в періодичному уточненні (адаптації).

Корекція моделі при дезактивації каталізатора здійснюється за допомогою коригувального множника K_c за рахунок зміни найчутливіших передекспоненціальних множників, що входять у вирази для констант швидкостей k_1 , k'_1 , k_2 . Початкові значення передекспоненціальних множників і енергій активації також уточнюються на етапі адаптації математичної моделі [113], що дозволяє врахувати особливості хімічних перетворень реакційної суміші індивідуально для кожного реактора. Адаптація моделі здійснюється шляхом мінімізації суми середньоквадратичних відхилень експериментальних значень вихідних величин від значень розрахованих за моделлю.

При адекватній моделі, перепад температур, вимірний на відповідному реакторі каталітичного риформінгу, не повинен відрізнятися від перепаду температур, розрахованого за моделлю. В іншому випадку потрібна корекція моделі, яка здійснюється зміною коригуючого множника K_c , що в неявному вигляді входить в рівняння теплового балансу.

Існує кілька методів адаптації математичних моделей нестационарних об'єктів. Вибір того чи іншого методу адаптації залежить від виду моделі. Для моделей, розроблених на основі кінетичних даних звичайно застосовуються пошукові методи корекції кінетичних параметрів (констант швидкостей реакції й енергії активізації), виходячи з умови збігу розрахункових і експериментально встановлених значень мольних потоків компонентів (n_i), температури (T), тиску (P) на виході реактора.

Стосовно до математичної моделі блоку реакторів каталітичного риформінгу відома функція помилок [114]:

$$F(\bar{k}) = \frac{1}{m} \cdot \sum_{u=1}^m \left[\eta_{\lambda} \left(\frac{\lambda_u^p - \lambda_u^e}{\lambda_u^e} \right)^2 + \eta_y \sum_{i=1}^3 \left(\frac{y_{iu}^p - y_{iu}^e}{y_{iu}^e} \right)^2 + \eta_T \sum_{i=1}^3 \left(\frac{T_{iu}^p - T_{iu}^e}{T_{iu}^e} \right)^2 \right],$$

де m - число експериментів;

λ_u^p, λ_u^e - розрахункове і експериментальне значення виходу

каталізата, (частки);

y_{iu}^p, y_{iu}^e - розрахункове і експериментальне значення масових часток ароматичних, нафтоених і парафінових вуглеводнів відповідно;

T_{iu}^p, T_{iu}^e - розрахункове і експериментальне значення температур на виході відповідного реактора, К;

$\eta_{\lambda}, \eta_y, \eta_T$ - коефіцієнти значущості: виходу каталізата, масових часток вуглеводнів, температур;

\bar{k} - масив з векторів K_1, K_2, K_3 , тобто $\bar{K} = |K_1, K_2, K_3|^{-1}$.

Традиційно завдання адаптації вирішується шляхом мінімізації функції $F(\bar{k})$ з допущенням, що параметри настройки однакові для моделі кожного реактора ($K_{c1} = K_{c2} = K_{c3}$). Такий підхід спрощує процес адаптації, але разом з тим має істотний недолік, який полягає в тому, що налаштована подібним чином модель не повністю враховує специфіку протікання процесу в конкретному реакторі.

Дослідження математичної моделі, адаптованої з використанням функції $F(\bar{k})$, підтверджує сказане. Модель дає добрий збіг розрахункових і експериментальних значень для третього реактора, але велику помилку для першого і другого реакторів, що звужує область вхідних величин, на якій зберігається адекватність моделі. Це пояснюється тим, що адаптація математичної моделі проводиться тільки по вектора вихідних значень, що можна побачити в функції помилок (за винятком вихідних температур), без урахування проміжних векторів.

Таким чином, в силу зазначених причин, вектор настроювальних параметрів повинен бути функцією стану відповідного реактора, а, отже, модель кожного реактора повинна мати індивідуальні параметри

настройки, що підвищить точність апроксимації за все реакторного блоку за рахунок більш точного опису кожного реактора окремо.

$$F_{\Sigma} = \sum_{k=1}^2 F_0(k_k) + F(\bar{K}),$$

де $F(\bar{K})$ обчислюється для вихідних величин третього реактора;

$F_0(k_k)$ – функція залежності суми середньоквадратичних відхилень розрахункових та експериментальних значень масових часток вуглеводнів на виході k -го реактора ($k = 1, 2$) від коефіцієнтів налаштування реактора:

$$F_0(k_k) = \frac{1}{m} \eta_y \sum_{u=1}^m \left(\frac{y_{iu}^p - y_{iu}^3}{y_{iu}^b} \right)_k^2.$$

Мінімізація функції F_{Σ} дозволяє отримати коефіцієнти налаштування для моделі кожного реактора, проте розмірність завдання в цьому випадку в три рази перевищує розмірність вектора K_1 , що набагато ускладнює процес адаптації.

Пропонована нижче функція помилок математичної моделі реакторного блоку вільна від цього недоліку і дозволяє визначити індивідуальні настроювальні коефіцієнти кожного реактора методом послідовних наближень. При цьому розмірність завдання на кожному кроці зберігається рівною розмірності вектора K_1 .

Основною ідеєю запропонованого способу ідентифікації математичної моделі є послідовна настройка моделі кожного реактора при сталості настроювальних параметрів для інших реакторів, що має деяку схожість із зворотним ходом при вирішенні задачі динамічного програмування.

Наступна цільова функція є варіантом попередньої, але, на відміну від неї, залежить тільки від настроювальних коефіцієнтів k -го реактора

$$F_k(K_k) = F_0(K_k) + F(\bar{K}).$$

Розкривши $F_0(K_k)$, отримаємо

$$F_K(K_K) = \eta_Y \frac{1}{m} \sum_{u=1}^m \sum_{i=1}^3 \left(\frac{Y_{iu}^p - Y_{iu}^3}{Y_{iu}^3} \right)_K^2 + F(\bar{K}).$$

У ході адаптації перший доданок дозволяє знизити помилку моделі по ароматичних, нафтенових, парафінових вуглеводнях на виході К-го реактора. Другий доданок мінімізує помилку на виході третього реактора, а. отже, і всього блоку, а також відображає загальну помилку блоку реакторів, яка не повинна підвищуватися при ідентифікації окремого реактора. Крім того, в вираз $F(\bar{K})$ входять середньоквадратичні відхилення температур і виходу каталізатору, відсутні в першому доданку.

Перевірка адекватності моделі з використанням експериментальних даних, отриманих з установки каталітичного риформінгу Кременчуцького НПЗ, показала, що розроблена модель дає, у середньому, на 3–7% меншу помилку за основними розрахунковими параметрами у порівнянні з відомими аналогами. При цьому загальний час адаптації математичної моделі значно, в окремих випадках до 30%, скоротився.

3.4 Моделювання процесу одержання сірчистого ангідриду

3.4.1 Вибір об'єкта дослідження і його характеристика

Виробництво сірчистого ангідриду як вихідного продукту в сіркокислотному виробництві в залежності від виду сировини здійснюється в апаратах різного типу і принципу дії. При одержанні сірчистого ангідриду з рідкої сірки використовують печі циклонного чи тунельного типу, причому перші з них одержали найбільше поширення. Печі для одержання сірчистого ангідриду мають дуже істотні відмінності від нагрівальних печей. У нагрівальній печі цільовим продуктом є тепло, що виділяється в результаті згоряння якого-небудь виду палива, а топкові гази являють собою побічний продукт, що викидається в атмосферу. При випалі будь-якої сіркоутримуючої сировини, у тому числі і рідкій сірки, цільовим продуктом є сірчистий ангідрид, одержуваний у результаті реакції взаємодії сірки чи її з'єднання з киснем повітря при високій температурі, одержуваної за рахунок тепла реакції. Таким чином, данні печі фактично є високотемпературними аутотермічними хімічними реакторами.

Котлопічний агрегат визначає продуктивність установки по готовому продукту і забезпечує наступні агрегати газовою сумішшю

визначеного складу і температури. Склад газової суміші на виході, і її температура залежать від співвідношення витрат сірки і повітря й ефективності добору надлишкового тепла в котлі-утилізаторі. Зміна співвідношення вхідних матеріальних потоків впливає на режим горіння, у результаті чого змінюється ступінь згорання сірки в межах топкового простору. Для забезпечення найбільш ефективного проведення процесу необхідно визначити умови, при яких будуть досягнуті задані значення температури газу і концентрації сірчистого ангідриду в газовій суміші при максимізації ступеня згорання в межах топкового простору.

Котлопічний агрегат для спалювання рідкої сірки й одержання сірчистого ангідриду містить у собі піч і котел-утилізатор, змонтовані в одному корпусі. Котел-утилізатор призначений для виконання допоміжної функції (добір надлишкового тепла) і може бути розглянутий як самостійний об'єкт дослідження. Виконання основної функції – одержання сірчистого ангідриду – здійснюється в печі.

Спалювання рідкої сірки проводиться, як правило, у печах циклонного типу. Найбільше поширення одержали одноциклонні печі, однак, в останні роки ведуться роботи зі створення і впровадження більш могутніх двоциклонних печей. Нами розроблені математичні моделі як для одно-, так і для двоциклонних печей. При цьому математична модель одноциклонної печі описує процеси, що протікають в одному топковому просторі, а двоциклонної – роздільно в кожному з циклонів і в загальній частині перехідної камери. З огляду на ідентичність основних принципів побудови математичної моделі одноциклонної печі і циклону в двоциклонному агрегаті розглянемо математичну модель одноциклонної печі.

Циклонна піч являє собою горизонтально розташований циліндричний металевий корпус, футерований зсередини вогнетривкою цеглою і покритий зовнішнім кожухом. У простір між корпусом і кожухом печі подається осушене повітря, яке вводиться тангенціально у внутрішню порожнину через фурми, створюючи інтенсивно перемішуваний газовий потік. Через форсунки, розташовані на торцевій стінці печі, сюди ж подається в распиленному вигляді рідка сірка, що горить у результаті взаємодії з киснем повітря з утворенням сірчистого

ангідриду і виділенням тепла. На виході з печі газу через пережимне кільце попадають у перехідну камеру, а з неї – у котел-утилізатор. Математична модель процесу горіння сірки в топковому просторі печі побудована з урахуванням кінетичних закономірностей, а також рівнянь матеріальних і теплових балансів.

3.4.2 Математична модель процесу

За даними інституту основної хімії [115] реакція окислювання сірки протікає згідно рівнянню другого порядку.

$$-\frac{dC_s}{d\tau} = k \cdot C_s \cdot C_{O_2}, \quad (3.94)$$

де C_s – об'ємна концентрація пари сірки (до часу τ від початку дослідження);

C_{O_2} – об'ємна концентрація кисню;

k – константа швидкості реакції.

Об'ємні концентрації пари сірки і кисню зв'язані між собою співвідношеннями:

$$\begin{aligned} C_s &= a \cdot (1-x); \\ -dC_s &= a \cdot dx; \\ C_{O_2} &= b - 2ax, \end{aligned} \quad (3.95)$$

де a і b – початкові концентрації пар сірки і кисню, відповідно;

x – ступінь окислювання (згорання) пари сірки.

Інтегруючи рівняння (3.94 і 3.95), після перетворень одержимо:

$$x = \begin{cases} \frac{b\{1 - \exp[k\tau \cdot (b - 2a)]\}}{2a - b \cdot \exp[k\tau \cdot (b - 2a)]} & \text{при } b \neq 2a; \\ \frac{k\tau}{k\tau + 1/b} & \text{при } b = 2a. \end{cases}$$

За даними [115], $\lg K = B - A/T$, де T – температура в К.

Для інтервалу температур 850–1100 °С (приблизно до 1500°С) $A = 1875$, $B = 2,92$.

$$k = 831,692 \cdot \exp\left(-\frac{4317,29}{T}\right). \quad (3.97)$$

Середній час перебування суміші в зоні горіння:

$$\tau = \frac{2 \cdot 3600 \cdot V_{3Г}}{V_{ПВС} \cdot V_{ПГ}}, \quad (3.98)$$

де $V_{3Г}$ – обсяг зони горіння, м³;

$V_{ПГ}$ – витрата грубних газів, дорівнює витраті повітря в піч V_B , м³/год;

$V_{ПВС}$ – витрата пароповітряної суміші на початку зони горіння, м³/год.

$$V_{ПВС} = V_B + V_{пс} = V_B + \frac{G_s \cdot 21,9}{64}, \quad (3.99)$$

де $V_{пс}$ – витрата пар сірки на початку зони горіння, м³/год;

G_s – витрата рідкої сірки в піч, кг/год;

21,9 – мольний обсяг сірки;

64 – молекулярна маса сірки (за даними [116] у діапазоні температур 900–1600 °С пари сірки складаються практично тільки з молекул S₂).

Початкова концентрація пар сірки в зоні горіння:

$$a = \frac{V_{пс}}{V_{ПВС}}, \quad (3.100)$$

а початкова концентрація кисню:

$$b = \frac{0,21 \cdot V_B}{V_{ПВС}}. \quad (3.101)$$

Температура в зоні горіння визначається з рівняння теплового балансу печі:

$$(1 - Q_{п})(Q_s + Q_B + Q_{Г}) = Q_{вип} + Q_{ПГ}, \quad (3.102)$$

у який $Q_{п}$ – частка втрат тепла в навколишнє середовище.

Прихід тепла з рідкою сіркою:

$$Q_s = 0,248 \cdot G_s \cdot t_s, \quad (3.103)$$

де t_s – температура рідкої сірки, °С;

0,248 – її теплоємність, ккал/кг град.

Прихід тепла з повітрям:

$$Q_B = 0,318 \cdot G_B \cdot t_{п}, \quad (3.104)$$

де $t_{п}$ – температура повітря, °С.

0,318 – його теплоємність, ккал/м³ град.

Тепло, що виділяється в результаті згоряння сірки

$$Q_{\Gamma}=2213 \cdot G_S \cdot x, \quad (3.105)$$

де 2213 – тепловий ефект горіння рідкої сірки, ккал/кг.

Витрата тепла на випар незгорілої сірки (тепло, витрачене на випар згорілої сірки, враховується кінетичними константами):

$$Q_{\text{вип}}=312 \cdot G_S \cdot (x-1), \quad (3.105)$$

де 312 – теплота випару сірки, ккал/ кг.

Витрата тепла з пічним газом:

$$Q_{\text{пг}}=[0,358 \cdot V_B + 0,0021 \cdot G_S \cdot (1-x)] \cdot t_{\Gamma}, \quad (3.107)$$

де t_{Γ} – температура пічного газу, °С ;

0,358 – середня теплоємність пічного газу при $t_{\Gamma}=1100$ °С, ккал/м³ град;

0,0021 – середня теплоємність пар сірки при $t_{\Gamma}=1100$ °С, ккал/кг град.

З рівнянь (3.102 – 3.107) знаходимо:

$$t_{\Gamma} = \frac{(1 - Q_{\text{пг}}) \cdot (Q_S + Q_B + Q_{\Gamma}) - Q_{\text{исп}}}{0,358 \cdot V_B + 0,0021 \cdot G_S \cdot (1 - x)}. \quad (3.108)$$

Концентрація SO₂ приблизно може бути визначена виходячи з заданої продуктивності агрегату по сірчаній кислоті G_{H₂SO₄} і загальної витрати повітря на агрегат V_{во}:

$$C_{\text{SO}_2} = \frac{G_{\text{H}_2\text{SO}_4} \cdot 22,4}{98 \cdot V_{\text{во}}}. \quad (3.109)$$

Кількість рідкої сірки G_S, яку необхідно подавати в піч, щоб забезпечити необхідне значення C_{so₂}, визначається з рівняння реакції окислювання сірки до двоокису:

$$G_S = \frac{64 \cdot C_{\text{SO}_2} \cdot V_B}{2 \cdot 22,4 \cdot x}. \quad (3.110)$$

Система рівнянь (3.96–3.110) являє собою математичний опис процесу спалювання рідкої сірки.

3.5 Моделювання процесу контактного окислювання сірчистого ангідриду в сірчаній

3.5.1 Характеристика об'єкта дослідження .

Окислювання сірчистого ангідриду в сірчаній з помітною

швидкістю може протікати на каталізаторах при дотриманні необхідного температурного режиму. Найбільш розповсюдженим видом каталізатора є ванадієві каталізатори різних марок. Для проведення реакції необхідно, щоб газ, що вступає в контакт із каталізатором, мав температуру вище визначеної нижньої межі, званою "температурою запалювання". У процесі взаємодії сірчистого ангідриду з киснем на поверхні каталізатора виділяється велика кількість тепла і підвищується температура каталізатора і газу. При цьому процес наближається до стану рівноваги, при якому сумарна швидкість реакції наближається до нуля. У результаті сильного розігріву можливе спікання контактної маси каталізатора і вихід його з ладу. У зв'язку з цим при проведенні реакції контактного окислювання необхідно організувати температурний режим таким чином, щоб на початковій стадії процес мав достатню швидкість, але при цьому температура в шарі контактної маси не повинна перевищувати верхньої допустимої межі. Для досягнення високого ступеня перетворення потрібно проведення багаторазового контактного окислювання сірчистого ангідриду, створюючи оптимальні умови для кожної ступені. Перевищення швидкості прямої реакції окислювання сірчистого ангідриду над швидкістю зворотної реакції відбувається при зниженні температури контактування. При цьому чим вище ступінь контактування (окислювання), тим нижче повинна бути оптимальна температура [116]. Для досягнення як можливо більш високого ступеня контактування недостатньо ефективним виявляється керування тільки температурним режимом. У зв'язку з цим процес здійснюють у двох ступенях. На першій ступені процес проводять послідовно на трьох шарах каталізатора з проміжним охолодженням газу між шарами у виносних теплообмінниках. З виходу третього шару газ направляється на першу ступінь абсорбції, де він звільняється від утвореного на першій ступені сірчаного ангідриду. Таким чином, у газі, що надходить на вхід четвертого шару, за рахунок зміни співвідношення між вихідними компонентами і продуктами реакції, істотно зростає швидкість хімічної реакції, а отже, на виході може бути досягнута більш висока ступінь перетворення.

На заключному п'ятому шарі контактного апарата з метою підвищення концентрації кисню в газовій фазі і зниження температури

після четвертого шару роблять розведення газу підігрітим осушеним повітрям. Керування витратою повітря в цьому випадку здійснюється за температурою газу, що надходить на вхід у п'ятий шар.

Як видно з представленого короткого аналізу процесу контактного окислювання, контактний апарат є досить складним об'єктом керування, що характеризується наявністю складних кінетичних і енергетичних залежностей. При цьому навіть невеликі можливі відхилення складу і температури пічних газів, що надходять на вхід апарата, можуть привести до зміни кінцевого ступеня контактування, що приведе до помітних безповоротних утрат технологічної сировини і додаткового забруднення атмосфери. З метою більш детального вивчення процесів, що протікають у шарах каталізатора і правильної організації керування процесом нами розроблена математична модель даного процесу, у якій по можливості втрачені основні особливості процесу, що протікає у кожному шарі.

3.5.2. Математична модель процесу контактного окислювання

У виробничих умовах процес контактного окислювання здійснюється в багатошарових контактних апаратах. У межах кожного шару на каталізаторі протікає оборотна реакція, супроводжувана значним тепловим ефектом. При цьому в межах одного шару істотно змінюються склад і температура газового потоку, що не дозволяє описати процеси, що протікають у шару відповідно до моделі ідеального перемішування. У зв'язку з зазначеним, при описі процесів, що протікають у шарі каталізатора, прийнята модель осередку. Обсяг реакційної зони і висота осередку визначаються як заздалегідь задана частка шару.

Площа перетину будь-якого шару постійна і дорівнює:

$$S_{КА} = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) , \quad (3.111)$$

де D – внутрішній діаметр контактного апарата, м;

d – зовнішній діаметр опорного стовпа, м

Об'єм елементарного i -го осередку:

$$V_{Я} = \frac{S_{КА} \cdot h}{N} , \quad (3.112)$$

де h – висота шару, м;

N – прийняте число осередків у шарі.

Фіктивний час контактування газової суміші з контактною масою в межах осередку

$$\tau_i = \frac{V'_y}{G_{r_i} \cdot T_i / T_{ny}} \cdot 3600, \quad (3.113)$$

де G_{r_i} – об'ємна витрата газу, $\text{м}^3/\text{год}$;

T_i – поточна температура на вході в i -й осередок, $^\circ\text{K}$;

T_{ny} – температура, що відповідає нормальним умовам, ($T_{ny} = 293^\circ\text{K}$)

τ_i – фіктивний час контактування для i -го осередку, сек.

Загальний фіктивний час контактування газової суміші з контактною масою при проходженні усього шару:

$$\tau_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^N \tau_i. \quad (3.114)$$

Швидкість процесу окислювання SO_2 у SO_3 на нерухомому ванадієвому каталізаторі виражається рівнянням [116]:

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{K}{a} \cdot \frac{b-0.5ax}{1-0.5ax} \cdot \frac{1-x}{1-Ax} \cdot \left(1 - \frac{x^2}{K_p^2(1-x)^2} \cdot \frac{1-0.5ax}{b-0.5ax} \right), \quad (3.115)$$

де x – ступінь перетворення, частки;

$A = 0,2 \div 0,25$ (для ванадієвих каталізаторів);

τ – час контакту, с;

a – початкова концентрація двоокису сірки, частки;

b – початкова концентрація кисню, частки;

K – константа швидкості реакції, $\text{C}^{-1} \text{Па}$;

K_p – константа рівноваги, $\text{атм}^{-0,5}$.

Константа рівноваги реакцій окислювання SO_2 у SO_3 в інтервалі температур $390\text{--}650^\circ\text{C}$ обчислюється за формулою [117]:

$$K_p = 10^{\left(\frac{4905,5}{T_i} - 4,6455 \right)}. \quad (3.116)$$

Константа швидкості цієї реакції, як функція температури, описується рівнянням Ареніуса [116]:

$$K = K_0 \cdot e^{-\frac{E}{RT}}, \quad (3.117)$$

де K_0 – константа, що не залежить від температури і характеризує каталізатор;

E – енергія активації реакції окислювання, що також залежить від роду каталізатора і характерна для визначеної температурної області, кал/моль;

R – універсальна газова стала, кал/(моль·град);

T – температура, К.

Для вітчизняних каталізаторів залежність константи швидкості реакції $\lg K = Y(1/T) \cdot 10^{-3}$ може бути представлена на графіку рис. 3.3 [117,118] у вигляді чотирьох відрізків прямих, відділених один від одного точками перегину T_1^* , T_2^* , T_3^* , положення яких на площині визначається відповідними значеннями температур і ступенем перетворення.

Для точки з температурою T_i в інтервалі $T_i > T_3^*$ (пряма № 3), енергія активації $E = 0$, а рівняння Ареніуса приводиться до виду

$$K = K_0 \cdot e^{-\frac{E}{RT_i}} = K_0. \quad (3.118)$$

Для прямої № 4 рівняння Ареніуса приймає вигляд:

$$K = K_0 \cdot e^{-\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_3^*} - \frac{1}{T_i} \right)}. \quad (3.119)$$

При $X < 0,6$ для $T_i < T_2^*$ (пряма № 1):

$$K = K_0 \left[e^{-\frac{E_1}{R} \left(\frac{1}{T_3^*} - \frac{1}{T_2^*} \right)} \right] \cdot \left[e^{-\frac{E_2}{R} \left(\frac{1}{T_2^*} - \frac{1}{T_i} \right)} \right]. \quad (3.120)$$

При $x > 0,6$ для $T_i < T_1^*$ (пряма № 2):

$$K = K_0 \left[e^{-\frac{E_1}{R} \left(\frac{1}{T_3^*} - \frac{1}{T_1^*} \right)} \right] \cdot \left[e^{-\frac{E_2}{R} \left(\frac{1}{T_1^*} - \frac{1}{T_i} \right)} \right]. \quad (3.121)$$

Значення K_0 , енергії активації і температури точок перегину для різних каталізаторів приведені в табл. 3.2.

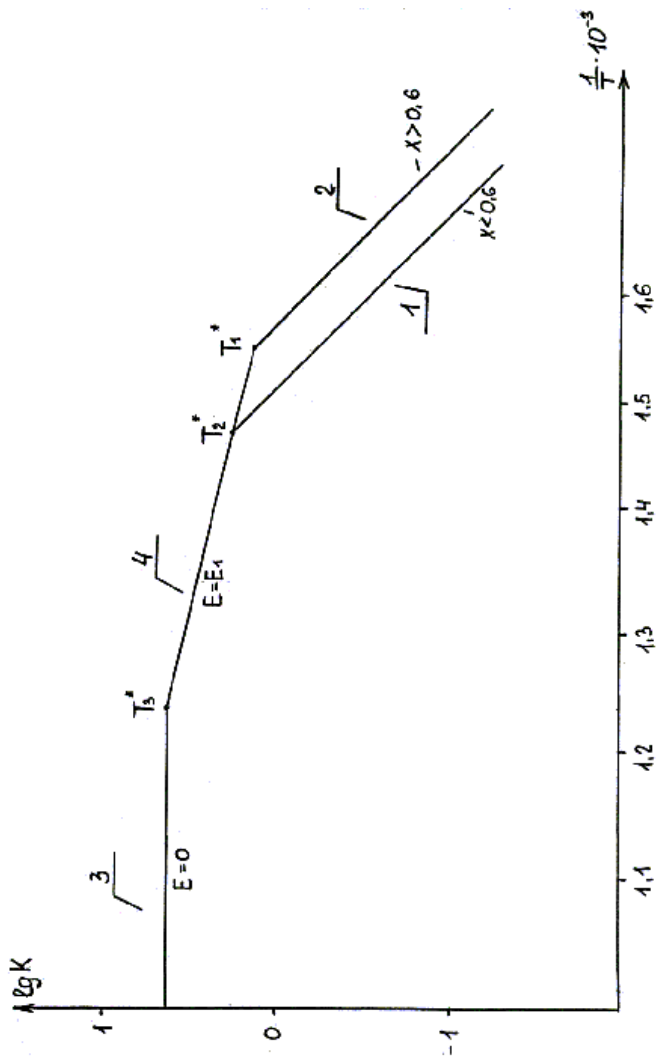


Рис. 3.3 — Залежність константи швидкості окислювання SO_2 на ванадівій контактній масі від температури

Таблиця 3.2 – Координати точок перегину для різних каталізаторів

Умовні позначення типу каталізатора	K_0	E_1	E_2	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$T_3, ^\circ\text{C}$
СВД БАВ ИК-1	1,7191	12000	53000	440	460	530
БАВ	2,792	14300	63800	440	460	530
ИК-1	1,7858	11500	30200	420	440	510
ИК-2	3,34	13800	60000	440	460	530

Зміна температури в зоні реакції при адіабатичних умовах протікання процесу окислювання виражається залежністю [116]:

$$T_K = T_H + \lambda \cdot \Delta x, \quad (3.122)$$

де T_H, T_K – початкова і кінцева температури, К;

Δx – прирощення ступеня перетворення, долі;

λ – коефіцієнт підвищення температури газу при $\Delta x = 1$

$$\lambda = \frac{Q_P \cdot C_{SO_2 H}}{C_\Gamma}, \quad (3.123)$$

де Q_P – тепловий ефект реакції окислювання:

$$Q_P = 101420 - 9,26 \cdot T_H, \text{ кДж/моль};$$

$C_{SO_2 H}$ – початкова концентрація SO_2 , долі;

C_Γ – теплоємність газової суміші, кДж / моль, К.

Об'ємна витрата газової суміші в результаті витрати кисню на окислювання сірчистого ангідриду змінюється у відповідність з рівнянням:

$$G_{\Gamma i} = G_{\Gamma H} - G_{\Gamma H} \cdot C_{SO_2} \cdot \frac{x_i - x_H}{2}, \quad (3.124)$$

де $G_{\Gamma i}$ – поточне значення витрати газу, м³/год;

$G_{\Gamma H}$ – початкове значення витрати газу, м³/год;

$C_{SO_2 H}$ – початкове значення концентрації SO_2 у газі, частки;

x_i, x_H – поточне і початкове значення ступеня перетворення.

Склад газової суміші в процесі протікання реакції визначається в такий спосіб:

$$C_{SO_2 i} = [C_{SO_2 H} - C_{SO_2 H} \cdot (x_i - x_H)] \cdot \frac{G_{GH}}{G_{Gi}} ; \quad (3.125)$$

$$C_{O_2 i} = [C_{O_2 H} - C_{O_2 H} \cdot \frac{(x_i - x_H)}{2}] \cdot \frac{G_{GH}}{G_{Gi}} ; \quad (3.126)$$

$$C_{SO_3 i} = [C_{SO_3 H} + C_{SO_3 H} \cdot (x_i - x_H)] \cdot \frac{G_{GH}}{G_{Gi}} ; \quad (3.127)$$

$$C_{N_2 i} = 1 - (C_{SO_2 i} + C_{O_2 i} + C_{SO_3 i}) . \quad (3.128)$$

Система рівнянь (3.111)–(3.128) являє собою математичний опис процесу окислювання SO_2 у SO_3 у шарі контактної маси, справедливе для кожного із шарів багат шарового апарата.

При моделюванні процесів, що протікають в апараті, необхідно додатково описати зміну параметрів газового потоку між сусідніми шарами каталізатора за рахунок теплообміну, витягу SO_3 із суміші на першій ступені абсорбції і розведення газової суміші повітрям перед останнім шаром каталізатора.

З метою перевірки приведених математичних залежностей за даними Сумського ВО "Хімпром" виконані розрахунки зміни складу газу і температури по висоті контактного апарата. При цьому було виявлено, що значення коефіцієнта λ , розраховане по рівнянню (3.123), істотно відрізняється від значення, обумовленого по рівнянню (3.122) за експериментальним значенням T_K , T_H , Δx . З метою приведення результатів розрахунку до даних експерименту запропоновано ввести поправочний коефіцієнт K_λ :

$$K_\lambda = \frac{\lambda_3}{\lambda} , \quad (3.129)$$

де λ_3 – значення коефіцієнта λ , визначене з рівняння (3.122) на основі експериментально визначених T_K , T_H , Δx ;

λ – значення коефіцієнта, визначеного з рівняння (3.123).

При використанні відкоректованого значення λ шляхом множення на K_λ розраховані значення температур і степені перетворення по шарах контактного апарата задовільно описують процеси, що проходять на

свіжому катализаторі. У процесі експлуатації знижується активність катализатора. Врахування зміни активності катализатора в [116] рекомендується виконувати коректуванням коефіцієнта K_0 у рівняннях (3.118)–(3.121).

Виходячи з того, що при частковій втраті активності, молекули кисню і сірчистого ангідриду не взаємодіють між собою, якщо вони адсорбувались на поверхні катализатора, що утратив свою активність, нами запропоновано множити на відповідним чином підібраний коефіцієнт адаптації K_A величину b у рівнянні (3.115). При використанні запропонованого методу адаптації був отриманий задовільний збіг з експериментальними даними як за кінцевими значеннями x і T , так і за чутливістю їх до зміни вхідних впливів.

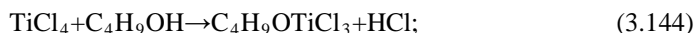
У первісному розрахунку коефіцієнти адаптації для всіх шарів приймаються рівними одиниці, а у всіх наступних розрахунках зберігаються значення, отримані в попередніх розрахунках. Як вхідну інформацію використовують отримані з об'єкта значення: витрати пічних газів, їхньої температури, концентрації сірчистого ангідриду. При підготовці інформації для розрахунку j -го шару готується інформація про витрату, температуру і склад газового потоку, що надходить на вхід j -го шару. На вхід першого шару надходить газовий потік з виходу котлопічного агрегату, його параметри вимірюються автоматично. Склад, температура і витрата газового потоку, що надходить на вхід наступних шарів, визначаються за результатами розрахунку попереднього шару з урахуванням наступних стадій (охолодження в теплообмінниках, абсорбція сірчаного ангідриду, розведення повітря) На основі підготовленої інформації виконується розрахунок степеня перетворення X_i на виході i -го осередку. Якщо до моменту входження в програму надійшли нові дані лабораторних аналізів $X_{jл}$, $T_{jл}$, $T_{jкл}$, розраховується значення поправочного коефіцієнта K_A , що запам'ятовується до одержання наступних результатів лабораторного аналізу. З використанням уточненого значення λ_j виконується розрахунок зміни температури в межах осередку, що розраховується, після чого здійснюється перехід до наступного осередку. По закінченні розрахунку шару, якщо до моменту входження в програму отримуються нові дані

лабораторного аналізу, по збігу лабораторних даних з результатами розрахунку оцінюється зміна активності каталізатора в j -му шарі. При наявності істотної зміни активності коректується значення коефіцієнта адаптації і перераховується величина b . Розрахунок шару повторюється до одержання задовільної збіжності результатів розрахунку з лабораторними аналізами. Задовольняюче останньому циклу розрахунку значення K_{Aj} запам'ятовується до наступного надходження даних аналізу. Потім здійснюється перехід на розрахунок наступного шару. Перед початком розрахунку наступного шару, у залежності від номера шару і способу його включення в технологічну схему вирішується задача підготовки інформації. При $j > t$ розрахунок контактного апарату завершується. Як вихідна інформація може бути виданий розподіл температур, степенів перетворення і складу газової фази по шарах контактного апарату, або по окремих осередках кожного із шарів.

3.6 Моделювання процесу початкової етерифікації у виробництві тетрабутоксититану

3.6.1 Основні передумови і загальна структура моделі

Процес етерифікації у виробництві тетрабутоксититану проводять у дві стадії. Перша стадія процесу проводиться в реакторі-десорбері – вертикальному колонному апараті з десятьма газорідними тарілчастими контактними пристроями. Вихідні реагенти тетрахлоридтитан і бутиловий спирт подаються на верхню тарілку реактора. Додатково спирт подається на третю тарілку для розведення. Знизу підводиться десорбуючий агент – газ. При взаємодії тетрахлориду титану з бутиловим спиртом, при деякому надлишку спирту вдається пронести лише першу стадію етерифікації (3.144) і тісно чи іншою мірою зрушити рівновагу в другій стадії (3.145)



Рівняння (3.146) відображає розчинення HCl у бутіловому спирті з теплою розчинення Q_p .

Необхідну інформацію про процес, істотну для розрахунків, дає кінетичний закон

$$r(T, C). \quad (3.147)$$

Однак доступні кінетичні дані про процес відсутні і проведення кінетичних досліджень утруднено через необхідність накладення на систему десорбційного процесу.

В основу розробленої математичної моделі покладені наступні допущення.

1. Уся маса компонентів фаз апарата зосереджена в осередках. Час перебування компонентів поза осередками нехтувано малий, що еквівалентно припущенню миттєвого переносу компонента з одного осередку в інший.

2. Усередині осередків усі компоненти ідеально перемішані. В осередку об'єму V концентрація компонента i , що міститься в кількості N_i молей, у будь-якій точці осередку точно дорівнює $C_i = N_i/V$.

3. Здійснюється режим протипотоку фаз. Відсутнє віднесення рідини газом і захоплення пухирців газу рідиною.

4. Перепадами тисків уздовж джерел фаз зневажаємо в порівнянні з загальним тиском в апараті.

5. Газова і рідка фази знаходяться на кожній ступені контакту в тепловій рівновазі – температури рідини і газу даної ступені однакові.

6. Хімічна реакція проходить у рідинній фазі.

7. Швидкість реакції першого заміщення нескінченно велика в порівнянні зі швидкістю другого заміщення. Отже, весь вхідний потік тетрахлориду титану миттєво конвертується в потік однозаміщеного напівпродукту – бутоксититантрихлориду. Концентрація тетрахлориду титану у всіх осередках дорівнює нулю.

8. Швидкість хімічної реакції другого заміщення формально описується кінетичним рівнянням гомогенної реакції ідеальних компонентів:

$$r = K_{12} \cdot C_1 \cdot C_2 - K_{21} \cdot C_3 \cdot C_4 \quad (3.148)$$

де r – швидкість реакції, моль/година;

K_{12}, K_{21} – константи швидкості прямої і зворотної реакції;

C_1 – концентрація спирту в рідкій фазі, моль/л;

C_2 – концентрація буюксититанхлориду, моль/л;

C_3 – концентрація хлористого водню, розчиненого в реакційній суміші, моль/л;

C_4 – концентрація дибуюксититандихлориду, моль/л.

9. Залежність констант швидкостей реакції від температури підкоряється закону Ареніуса.

10. Розчинність хлористого водню в реакційній суміші цілком визначається його розчинністю в бутиловому спирті.

11. Хімічна взаємодія хлористого водню і бутилового спирту відсутня.

12. Наявність інших компонентів у рідкій фазі не впливає на умови фазової рівноваги хлористого водню газу і хлористого водню, розчиненого в спирті.

13. Фазова рівновага хлористого водню формально описується законом Генрі:

$$y = m \cdot x_3, \quad (3.149)$$

де y , x_3 – мольні частки хлористого водню в газовій і рідкій фазах;

m – константа фазової рівноваги.

З огляду на допущення 12, розрахунок мольної частки хлористого водню в рідині проводимо без обліку інертних до фазової рівноваги компонентів

$$x_3 = C_3 / (C_1 + C_2). \quad (3.150)$$

14. Парогазова суміш в осередках газової фази підкоряється законам ідеальних газів. Зокрема, за законом Дальтона, мольна частка компонента дорівнює

$$y_i = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} = \frac{P_i}{P_0}, \quad (3.151)$$

де N_i – мольний зміст компонента;

n – число компонентів у фазі;

P_i – парціальний тиск компонента;

P_0 – загальний тиск у фазі.

15. При контакті рідини і газу відбувається випар спирту.

16. Випар інших компонентів рідкої фази відсутній.

17. Швидкість випару спирту формально описується кінетичним рівнянням масо передачі:

$$I = K_{\Gamma} \cdot (P_H - P_i), \quad (3.152)$$

де I – густина потоку парів спирту;

K_{Γ} – коефіцієнт масопередачі, розрахований за рушійною силою, віднесеною до газової фази;

P_H – тиск насиченої пари спирту при температурі газової фази.

3.6.2 Виведення рівнянь математичного опису.

Відповідно до прийнятих допущень система рівнянь моделі повинна містити:

- рівняння міжкомірних потоків;
- умови для кінцевих осередків;
- рівняння процесів у рідкій фазі;
- рівняння масопередачі в газову фазу;
- рівняння теплових ефектів;
- рівняння теплового балансу ступенів контакту.

Проведемо нумерацію всіх компонентів системи:

- 0 – тетрахлорид титана $TiCl_4$;
- 1 – бутиловий спирт C_4H_9OH ;
- 2 – бутоксититанхлорид $C_4H_9OTiCl_3$;
- 3 – хлористий водень, розчинений у спирті;
- 4 – дибутоксидхлортитан $(C_4H_9O)_2 TiCl_2$;
- 5 – хлористий водень у газовому стані;
- 6 – пари бутилового спирту;
- 7 – десорбуючий газ – азот.

З метою скорочення математичного опису нижніх рівнів ієрархії процеси масового руху фаз в апараті опишемо послідовністю пар осередків ідеального змішування. Один з осередків описує процеси в рідкій фазі, другий – у газовій фазі.

Кожна пара осередків характеризується своїм номером. Нумерація виробляється аналогічно прийнятій в ректифікації – знизу нагору. Загальна кількість пар осередків $N = 10$. Міжкомірні потоки компонентів складають елементи U_{ij} матриці $\{U_{ij}\}$. Перший індекс i – це номер

компонента, другий j – номер ступені контакту. Елементи з однаковим першим індексом утворюють вектор-рядок потоків i -го компоненту по всіх тарілках. Елементи з однаковим другим індексом утворюють вектор-стовпець витрат компонентів, що залишають даний контактний пристрій. При цьому компоненти рідкої фази (з номерами до чотирьох включно) рухаються вниз, в осередок з меншим номером, а компоненти газової фази – відповідно вгору, в осередок з більшим номером. Отже, для опису потоку, що входить в осередок з номером j треба брати підстовпець $U_{i,j+1}$ для рідкої фази і підстовпець $U_{i,j-1}$ для газової фази. Матриця потоків $\{U_{ij}\}$ розширюється двома стовпцями: ліворуч, з номером 0, і праворуч, з номером $N+1$.

Тим самим завдання граничних потоків моделі забезпечується з великою зручністю – простим привласненням елементам газової фази в стовпці $j=0$ початкових значень, (зокрема, усі U_{i0} , крім U_{70} дорівнюють нулю, якщо азот не містить домішок компонентів).

Відповідно до допущення 7, тетрахлорид титану в реакційній суміші не присутній. Тому діапазон зміни числа рядків матриці $\{U_{ij}\}$ складає від одиниці до семи.

Потоки живлення колони вихідними реагентами доцільно враховувати окремо, причому на кожній ступені контакту. Зокрема, при живленні тетрахлоридом титану на верхню тарілку, усі нижчележачі потоки прирівнюються нулю.

Уводимо вектори живлення:

G_j^0 – живлення тетрахлоридом титану;

G_j^1 – живлення бутиловим спиртом.

Для опису потоків між фазного обміну уводяться вектори:

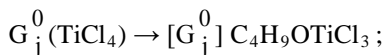
D_j – потік десорбційного HCl ;

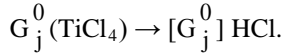
W_j – потік пари спирту;

S_j – потік пари спирту, що конденсується на стінках реактора.

Розмірність цих векторів N .

З урахуванням одиничних величин усіх стехіометричних коефіцієнтів, можна записати:





Відповідно спирт витрачається в кількості

$$[G_j^\bullet] \text{C}_4\text{H}_9\text{OTiCl}_3 \sim [G_j^0] \text{C}_4\text{H}_9\text{OH},$$

де $[\bullet]$ позначає «чисельне значення».

Швидкість хімічного перетворення першої стадії цілком визначається швидкістю подачі тетрахлориду титану.

Швидкість реакції другої стадії позначимо вектором R_j , а відносну молярну концентрацію хлористого водню, розчиненого в спирті, (моль HCl/моль ROH) позначимо вектором X_j .

Запишемо рівняння матеріального балансу для компонентів обох фаз відповідно до описаної системи позначень і виходячи з прийнятої структури моделі.

Для спирту:

$$G_j^1 - G_j^0 + U_{1,j+1} - U_{1,j} - R_j - W_j + S_j = 0, \quad (3.153)$$

де G_j^1 – подача на j -ту тарілку через живильний патрубок, моль/год;

G_j^0 – витрата на перше заміщення, що відповідає подачі на ту ж тарілку TiCl_4 ;

$U_{1,j+1}$ – потік з вище розташованої тарілки, моль/год;

$U_{1,j}$ – збиток компонента з вихідним потоком;

R_j – витрата на другу стадію хімічної реакції, моль/год;

W_j – швидкість випару, моль/год;

S_j – повернення пари, що зкондесувалась.

Аналогічно, для другого компонента бутоксититанхлориду:

$$G_j^0 + U_{2,j+1} - U_{2,j} - R_j = 0, \quad (3.154)$$

де G_j^0 – швидкість синтезу бутоксититанхлориду шляхом конвертування вхідного потоку тетрахлориду.

Матеріальний баланс для хлористого водню, розчиненого в спирті

$$G_j^0 + U_{3,j+1} - U_{3,j} + R_j - D_j + x_j \cdot S_j = 0. \quad (3.155)$$

Доданок $x_j S_j$ – це потік хлористого водню, що повертається в рідку фазу потоком спирту, що конденсується, який має концентрацію, приблизно рівну сталій в рідині на тарілці.

Матеріальний баланс дихлордибутокситану описує збагачення спадного потоку цим компонентом зі швидкістю реакції на даній тарілці:

$$R_j + U_{4,j+1} - U_{4,j} = 0. \quad (3.156)$$

У газовій фазі реакція відсутня. Тому баланс для компонентів цієї фази описує послідовне підсумовування десорбційних потоків для HCl-газу:

$$U_{5,j-1} - U_{5,j} + D_j - X_j \cdot S_j = 0 \quad (3.157)$$

і потоків пар спирту:

$$U_{6,j-1} - U_{6,j} + W_j - S_j = 0. \quad (3.158)$$

Потік азоту не міняється внаслідок інертності цього газу

$$U_{7,j-1} - U_{7,j} = 0. \quad (3.159)$$

Конкретизуємо вид функцій R_j , X_j , D_j , W_j , S_j у залежності від координат стану – концентрацій компонентів.

Уведемо матрицю концентрацій $\{C_{ij}\}$ розмірністю $(8 \times N)$. Перші чотири елементи вектор-стовпця C_{im} при $j=m$ – це значення концентрацій компонентів рідкої фази тарілки з номером $j=m$ і розмірністю моль/л. Елементи C_{5m} , C_{6m} , C_{7m} – концентрації компонентів газової фази, виражені в мольних частках.

Восьмий елемент C_{8m} – містить значення температури на m -му контактному пристрої:

$$C_{8m} = T_m, \quad m = 1, \dots, N.$$

Таким чином, матриця $\{C_{ij}\}$ містить повний набір координат стану об'єкта.

Відповідно до допущення (8) швидкість зворотної хімічної реакції описується рівнянням (6.5). Це швидкість приведена до 1 л реакційного об'єму.

Для осередків об'ємом V швидкість реакції буде дорівнювати

$$R_j = [K_{12}(T) \cdot C_{1j} \cdot C_{2j} - K_{21}(T) \cdot C_{3j} \cdot C_{4j}].$$

Оскільки, відповідно до допущення 10, хлористий водень розчиняється в спирті незалежно від присутності інших компонентів, при заданому ступені насичення ξ деякій кількості спирту відповідає

визначена кількість розчиненого хлористого водню. Зручно визначити концентрацію розчиненого хлористого водню як відносну молярну концентрацію:

$$X_j = \frac{C_{3j}}{C_{1j}} . \quad (3.161)$$

При відсутності десорбції, тиску P_0 і температурі T установлюється деяка рівноважна концентрація розчиненого хлористого водню

$$\xi(T, P_0) = \frac{C_{3j}}{C_{1j}} , \quad (3.162)$$

що є показником граничної (при заданій температурі і тиску) розчиненості бутилового спирту. Якщо тепер газову фазу розглянутої системи розбавити інертним газом до концентрації HCl , рівної u_{HCl} , парціальний тиск HCl -газу на поверхні розділу фаз зменшиться до величини $P_{\text{HCl}} = P_0 u_{\text{HCl}}$, і в результаті десорбції установиться нове, більш низьке, значення концентрації хлористого водню в спирті, обумовлене відповідно до допущення 13 за законом Генрі

$$u_{\text{HCl}} = m \cdot X_{\text{HCl}} , \quad (3.163)$$

де X_{HCl} – мольна частка хлористого водню в спирті;

m – деякий коефіцієнт розподілу.

Перейдемо від концентрації в мольній частці до відносної молярної концентрації

$$X_{\text{HCl}} = \frac{C_{3j}}{C_{1j} + C_{3j}} . \quad (3.164)$$

Розділивши чисельник і знаменник (3.164) на C_{1j} , одержимо з урахуванням (3.161)

$$X_{\text{HCl}} = \frac{X_j}{1 + X_j} . \quad (3.165)$$

Перепишемо (3.163) з урахуванням (3.165)

$$u_{\text{HCl}} = m \cdot \frac{X_j}{1 + X_j} . \quad (3.166)$$

При заданій температурі та тиску два компоненти зв'язані

співвідношенням:

$$y_{HCl} = 1 = \frac{m \cdot \xi(T, P_0)}{[1 + \xi(T, P_0)]}; \quad (3.167)$$

$$m = 1 + \frac{1}{\xi(T, P_0)}.$$

Залежність (3.167) отримана при вимозі, що (3.166) повинне задовольняти рівнянню (3.162) при концентрації хлористого водню рівній одиниці. Підставляючи (3.167) у (3.166) і виражаючи x_j як функцію, одержимо рівняння фазової рівноваги:

$$X_j = X_j^R = \frac{Y_{HCl} \cdot \xi(T, P_0)}{[1 + (1 - Y_{HCl})]} \cdot \xi(T, P_0), \quad (3.168)$$

де X_j^R – рівноважна концентрація розчиненого хлористого водню, що відповідає заданій концентрації газової фази y_{HCl} .

Оскільки для кожної ступені контакту є матриця стану C_{ij} , можна записати остаточно

$$X_j^R = \frac{C_{5j} \cdot \xi(T, P_0)}{[1 + (1 - C_{5j})]} \cdot \xi(T, P_0), \quad (3.169)$$

де X_j^R – статична, рівноважна концентрація.

У випадку безупинного підведення і відводу компонентів, дійсна концентрація може значно відрізнятись від рівноважної. З огляду на добру розчинність HCl у бутіловому спирті, можна вважати, що дійсна концентрація X_j мало відрізняється від статичної X_j^R . Це допущення стає вірним при наявності великих потоків десорбуючого агента – азоту, коли кількість пухирців газової фази велика, а отже, велика і поверхня міжфазного контакту і рідина постійно знаходиться в рівновазі з HCl-газом у газовій фазі. Хлористий водень, що утвориться в результаті хімічної реакції, надходить у газову фазу і паралельно розчиняється в бутіловому спирті. Припустимо, що

$$X_j = X_j^R. \quad (3.170)$$

Тоді в газову фазу повинний переходити весь надлишок HCl. Понад виведену кількість $U_{3,j}$, що зв'язано з потоком спирту співвідношенням

$$U_{3,j} = X_j \cdot U_{1,j} \quad (3.171)$$

надлишок складе потік десорбції D_j :

$$D_j = U_{3,j+1} - U_{3,j} + G_j^0 + R_j + X_j \cdot S_j . \quad (3.172)$$

Два потоки D_j і $U_{3,j}$ забезпечують повний сумарний відвід хлористого водню, що надходить в осередок, перший – у газову фазу, другий – у рідку фазу, що розташована на нижчій ступені контакту.

Швидкість випару спирту W_j , моль/год, визначається згідно (3.151) $I = K_r(P_H - P_i)$, однак застосувати його для опису кінетики випару спирту не можна, тому що невідома поверхня міжфазного обміну. Введемо, як прийняте в [18], питому поверхню контакту f_j , m^2/m^3 . Тоді поверхня контакту фаз F_j тарілки j виразиться так:

$$F_j = f_j \cdot V_j . \quad (3.173)$$

Параметр f_j є складною функцією гідродинаміки дисперсної газової фази. Оскільки вид цієї функції невідомий, припустимо, що для розглянутого режиму f_j – невідомий параметр.

Ще одні труднощі опису кінетики масопередачі полягають у тім, що спирт випаровується в присутності інертних компонентів у рідині. При цьому в результаті випару спирту приповерхній шар рідини збіднюється, виникає дифузія компонента з обсягу рідини. Рухливість міжфазної границі в деякій мірі прискорює відновлення поверхні.

Припустимо, що в (3.173) V_j являє собою парціальний обсяг рідкого спирту $V_{1,j}$. Тоді одержимо:

$$W_j = K_r f_j C_{1j} V_j (P_H - P_1),$$

Поєднуючи всі константи в одну, одержимо узагальнений параметр – константу швидкості випару спирту на тарілці:

$$W_j = J_w C_{1j} (P_H - P_1) . \quad (3.174)$$

Відповідно до допущення 14 виразимо парціальний тиск компонента через його концентрацію в газовій фазі:

$$W_j = J_w C_{1j} (P_H - C_{6j} P_0) , \quad (3.175)$$

де P_0 – тиск у реакторі-десорбері.

Тепловтрати в навколишнє середовище:

$$Q_j^L = K \cdot F \cdot (T_j - T_{EX}), \quad (3.182)$$

де K – коефіцієнт теплопередачі, F – поверхня контакту рідкої фази зі стінкою реактора.

Теплота нагрівання вхідних потоків:

$$Q_j^i = (G_j^0 G_0^p + G_j^1 G_1^p)(T_j - T_{iN}), \quad (3.183)$$

де C_0^p, C_1^p – теплоємність потоків, Дж/моль·град,

T_{iN} – температури вхідних потоків.

Теплота нагрівання газу, що надходить на тарілку:

$$Q_j^U = (U_{5,j-1} \cdot C_5^p + U_{6,j-1} \cdot C_6^p + U_{7,j-1} \cdot C_7^p)(T_j - T_U), \quad (3.184)$$

де C_5^p, C_6^p, C_7^p – теплоємність компонентів, T_U – температура вхідного потоку.

Теплота нагрівання рідини, що надходить на тарілку:

$$Q_j^V = (V_{1,j+1} \cdot C_1^p + V_{2,j+1} \cdot C_2^p + V_{3,j+1} \cdot C_3^p + V_{4,j+1} \cdot C_4^p)(T_j - T_V), \quad (3.185)$$

де $C_1^p, C_2^p, C_3^p, C_4^p$ – теплоємності компонентів, T_V – температура потоку рідини.

3.7 Моделювання процесу багатокомпонентної ректифікації з урахуванням рухомих керуючих впливів

Характерною особливістю такого технологічного об'єкта, як ректифікаційна колона, є багатовимірність, внутрішній взаємозв'язок між параметрами, їх розподіленість в просторі і в часі, наявність значного числа збурень. Управління таким об'єктом необхідно здійснювати з врахуванням наведених особливостей і з застосуванням інноваційних систем керування, оскільки традиційні методи не задовольняють високим вимогам, що ставляться до якості і собівартості одержуваних продуктів.

У роботах [121, 122] розглянуто теоретичні основи і принципи побудови нового класу систем управління розподіленими об'єктами – з використанням рухомих керуючих впливів. У ролі таких впливів можуть розглядатися окремо, попарно або в сукупності інтенсивність, форма і закон руху в просторі джерел речовини та енергії. Поява нового ступеня свободи – можливості вибору закону руху матеріального або

енергетичного джерела – дозволяє здійснювати переведення розподіленого об'єкта в стани, що недосяжні в класі нерухомих керуючих впливів.

В системах управління процесами ректифікації в якості рухомих керуючих впливів можуть використовуватися зміни точки введення сировини, зміни співвідношення витрат сировини або флегми при їх двухпоточному введенні в колону, а також зміни витрат, складів і ентальпій названих потоків.

Доцільність застосування дискретних розподілених керуючих впливів, які полягають у зміні номера тарілки живлення, обґрунтовано в [123]. Спосіб управління ректифікаційної колоною шляхом перерозподілу потоку сировини між тарілками живлення присвячено роботу [124].

Проте при цьому розглядався найпростіший процес бінарної ректифікації, а огляд діючих виробництв України показав, що суміші, які подаються на поділ і складаються з продуктів хімічного синтезу, переважно багатоконпонентні. У зв'язку з цим, актуальною науковою задачею залишається розробка систем автоматичного керування технологічними процесами багатоконпонентної ректифікації з використанням рухливих керуючих впливів, які носять дискретний або неперервний в просторовій області об'єкта характер.

Перш ніж здійснити вибір, розрахунок, синтез систем автоматичного керування, необхідно виявити основні властивості і залежності самої об'єкта – ректифікаційної колони. Статичні характеристики, що відображають взаємозв'язки параметрів і змінних процесу в усталеному режимі, дозволяють досліджувати можливості колони, обрати структуру систем автоматичного керування, оцінити доцільність і ефективність розроблених способів управління [125].

У зв'язку зі складністю проведення експериментів на діючому обладнанні, дослідження особливостей управління процесами ректифікації з рухливими керуючими впливами вимагає, в першу чергу, створення математичної моделі, адекватної об'єкту при зміні його параметрів в широких межах, і моделюючих програм. Застосування ж існуючих систем моделювання хіміко-технологічних процесів, таких як

Aspen HYSYS, Aspen Plus, CHEMCAD і ін., викликає складнощі. Причинами цього є великі витрати на придбання та підтримку програм, обмеження набору апаратів типовими або ідеалізованими моделями, неможливість використання авторських розробок [126].

У науковій літературі наведено велику кількість робіт, які присвячені розрахунку робочих режимів ректифікаційних установок, при цьому всі підходи можливо умовно розділити на наближені і точні. У першому випадку приймаються досить грубі припущення і залежності емпіричного характеру [127]; до таких методів належать всі розрахунки процесу, за винятком потарілчастих. Основу точних методів становить математичний опис і розрахунок окремого контактного пристрою колони, під яким маються на увазі також куб і дефлегматор.

В [128] наведено математичну модель контактної тарілчастої ректифікаційної колони, призначеної для поділу багатокомпонентних сумішей. Дану модель без істотних змін успішно використано для вирішення цілої низки завдань, пов'язаних з моделюванням установок [129–131]. Очевидно, що для дослідження рухливих керуючих впливів дане математичне забезпечення необхідно належним чином перетворити і доповнити.

Математична модель контактної тарілчастої ректифікаційної колони [132] містить рівняння загального і покомпонентного матеріальних балансів, рівняння теплового балансу, алгоритми розрахунку умов фазової рівноваги і розрахунку коефіцієнта ефективності масопередачі на тарілці. Система рівнянь нелінійна.

Точні (потарілчасті) методи розрахунку ректифікаційних колон дозволяють відмовитися від істотних припущень, які спотворюють результати досліджень, і враховувати розподіленість параметрів, що характеризують роботу установки. Однак, уникнути спрощень, які властиві математичній моделі, прийнятій за основу, або які значно знижують розмірність і трудомісткість розрахунків, неможливо. До них належать такі положення:

- рідина в колоні знаходиться за температури кипіння, а пар – конденсації;
- колона працює в адіабатичних умовах;

– на контактних пристроях колони в рідинній фазі приймається гідродинамічна модель повного змішування, в паровій – повного витіснення.

На рис. 3.4 схематично відображені основні матеріальні і енергетичні (теплові) потоки, що надходять і відводяться з контактного пристрою ректифікаційної колони.

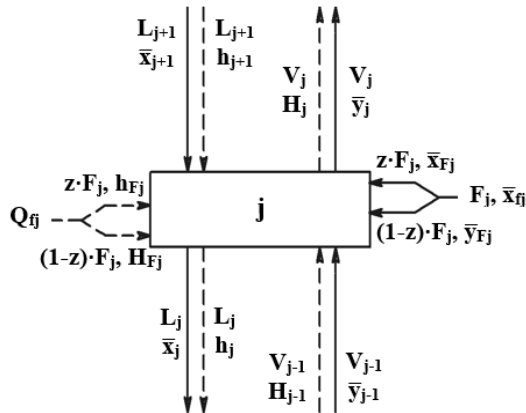


Рисунок 3.4 – Схема матеріальних та енергетичних потоків контактної тарілки ректифікаційної колони

Тут і далі використовуються наступні умовні позначення.

D – мольна витрата дистилляту, кмоль/год; F – мольна витрата живлення, кмоль/год; H – ентальпія парової фази, кДж/кмоль; h – ентальпія рідинної фази, кДж/кмоль; L – мольна витрата рідинної фази, кмоль/год; n – кількість компонентів в живленні; N – кількість тарілок в колоні; P – тиск, МПа; Q – витрата тепла, кДж/год; q – коефіцієнт перерозподілу сировини між тарілками живлення; t – температура, °С; u – коефіцієнт перерозподілу флегми; V – мольна витрата парової фази, кмоль/год; x – мольна концентрація компонента в рідинній фазі; y – мольна концентрація компонента в паровій фазі; z – частка рідинної фази в живленні, кмоль/кмоль; η – ефективність масопередачі на контактному пристрої.

Нижні індекси: f – параметр живлення; F – параметр рідинної або

парової фази живлення; i – розглянутий компонент суміші; j – розглянутий контактний пристрій колони; N – останній контактний пристрій колони.

Верхні індекси: * – рівноважний параметр; 0 – початкове наближення; k – номер ітерації.

З метою моделювання рухомих керуючих впливів на процес модель, що розробляється, повинна передбачати подачу живлення на будь-яку тарілку. Якщо на розглянуту тарілку сировина не подається, то $F_j = 0$, схема і розрахунки значно спрощуються. Від’ємні значення F_j відображають відбір проміжного продукту з тарілки.

Живлення, що подається в колону, може мати різні фазові стани: недогріта рідина, рідина, що кипить, парорідинна суміш (частка рідини в такій суміші позначена як z_j), пара, що конденсується, перегріта пара. Парорідинне живлення, що подається на тарілку, в загальному випадку можна розбити на рідинний (його витрата складає $z_j \cdot F_j$, склад – $\bar{x}_{F,j}$) і паровий ($(1-z_j) \cdot F_j$, $\bar{y}_{F,j}$) потоки. Кожен з цих потоків має свою концентрацію (виконується умова фазової рівноваги для рідини і пари) і ентальпію ($h_{F,j}$ і $H_{F,j}$ відповідно).

Загальний матеріальний баланс контактного пристрою:

$$L_j + V_j = L_{j+1} + V_{j-1} + F_j. \quad (3.186)$$

Сума мольних концентрацій в будь-якому матеріальному потоці дорівнює одиниці:

$$\sum_{i=1}^n x_{j,i} = \sum_{i=1}^n y_{j,i} = 1. \quad (3.187)$$

Це означає, що склад будь-якого потоку визначається $n-1$ концентраціями компонентів, концентрація останнього дорівнюватиме різниці між одиницею та їх сумою:

$$\begin{aligned} x_{j,n} &= 1 - \sum_{i=1}^{n-1} x_{j,i}; \\ y_{j,n} &= 1 - \sum_{i=1}^{n-1} y_{j,i}. \end{aligned} \quad (3.188)$$

Рівняння покомпонентного матеріального балансу:

$$L_j \cdot \bar{x}_j + V_j \cdot \bar{y}_j = L_{j+1} \cdot \bar{x}_{j+1} + V_{j-1} \cdot \bar{y}_{j-1} + F_j \cdot \bar{x}_{f,j}. \quad (3.189)$$

Система (3.189) складається з $n-1$ рівнянь, оскільки їх збіжність забезпечить відповідність матеріального балансу і за n -им компонентом.

Тепломісткість (ентальпія) потоків залежить від кількісного і якісного складу, температури і тиску. Так як прийнято припущення, що рідина в колоні знаходиться за температури кипіння, а пар – температури конденсації, то температури потоків в свою чергу також є функціями складів і тиску, а ентальпії визначаються відповідно до виразів:

$$h_{j+1} = f(\bar{x}_{j+1}, P_j); \quad (3.190)$$

$$H_j = f(\bar{y}_j, P_j); \quad (3.191)$$

$$h_{F,j} = f(\bar{x}_{F,j}, P_{f,j}, t_{f,j}); \quad (3.192)$$

$$H_{F,j} = f(\bar{y}_{F,j}, P_{f,j}, t_{f,j}). \quad (3.193)$$

Тепло, що вноситься в колону живленням:

$$Q_{f,j} = F_j \cdot (z_j \cdot h_{F,j} + (1 - z_j) \cdot H_{F,j}). \quad (3.194)$$

В усталеному режимі температура в кубі колони і температури потоків постійні. Тепловий баланс:

$$L_j \cdot h_j + V_j \cdot H_j = L_{j+1} \cdot h_{j+1} + V_{j-1} \cdot H_{j-1} + Q_{f,j}. \quad (3.195)$$

Склад парового потоку, що знаходиться в рівновазі з рідинною фазою, є функцією складу і температури цієї рідини, а також тиску на тарілці:

$$\bar{y}_j^* = f(\bar{x}_j, P_j). \quad (3.196)$$

Повна рівновага між парою і рідиною на контактних пристроях колони не досягається. Така обставина враховується коефіцієнтом корисної дії η , який в загальному випадку розраховується з врахуванням кінетики масопередачі і гідродинаміки потоків на тарілці. У зв'язку з високою складністю таких розрахунків, а також недостовірністю самих методів, заснованих на теорії подібності дифузійних процесів, даний коефіцієнт пропонується приймати у ролі налаштувального для отриманої моделі. Реальна концентрація i -ого компонента в паровій фазі, що залишає куб колони:

$$y_{j,i} = y_{j-1,i} + (y_{j,i}^* - y_{j-1,i}) \cdot \eta_{j,i}. \quad (3.197)$$

Рівняння (3.186)–(3.197) складають повний математичний опис контактної пристрою ректифікаційної колони. Рухомві керуючі впливи в даній моделі враховуються наступним чином.

Моделювання переключення подачі потоку сировини з однієї тарілки на іншу можливо виходячи з допустимості визначення в якості тарілки живлення будь-якої з усіх тарілок колони і навпаки.

Перерозподіл потоку живлення між двома тарілками пропонується враховувати шляхом введення в загальну модель ректифікаційної колони коефіцієнта перерозподілу q . Цей параметр показує, яка частина від загального потоку живлення подається на нижню тарілку. Таким чином, коефіцієнт q може приймати будь-які значення між 0 (весь потік живлення подається на верхню тарілку) і 1 (на нижню), а зміна цього значення дозволяє досліджувати робочі режими колони ректифікації при нанесенні неперервного рухливого керуючого впливу.

В цьому випадку, якщо витрата загального потоку живлення становить F кмоль/год, то витрата першого (нижнього) потоку живлення:

$$F_1 = q \cdot F,$$

а верхнього:

$$F_2 = F - F_1 = (1 - q) \cdot F.$$

Рухомі керуючі впливи, які полягають у перерозподілі флегми, можна моделювати аналогічно перерозподілу живлення з врахуванням того, що замість сировини на відповідну тарілку буде надходити флегма. Витрата такого потоку F_j визначається коефіцієнтом u :

$$F_3 = u \cdot Fl = u \cdot (V_N - D).$$

Дослідження впливу на статичні характеристики колони інтенсивності рухливих керуючих впливів – змін витрат і ентальпій потоків живлення або флегми – полягає в прийнятті даних параметрів в якості незалежних змінних і розрахунку ректифікаційної колони при їх різних значеннях.

Вирішення отриманої системи нелінійних рівнянь можливо здійснити тільки із застосуванням методів послідовних наближень

(ітерацій). Для їх реалізації попередньо необхідно:

а) здійснити вибір незалежних змінних і початкових даних для розрахунку;

б) визначити початкові наближення змінних, що ітераційно розраховуються;

в) обрати чисельні методи вирішення і критерій збіжності розрахунків, які дозволяють визначати нові, уточнені значення величин, які розраховуються, напрямок і момент припинення розрахунків.

Здійснити вибір незалежних змінних і початкових даних для розрахунку контактного пристрою ректифікаційної колони можливо тільки після рішення аналогічної задачі для всієї ректифікаційної установки. Для дослідження рухливих керуючих впливів, які полягають в переміщенні або перерозподілі потоку живлення або флегми в просторі апарату, найбільш придатний метод «від тарілки до тарілки» (метод Льюїса і Матісона). В цьому випадку незалежними змінними є склади продуктів поділу.

Однонаправлений потарілчастий розрахунок ректифікаційної колони методом «від тарілки до тарілки» часто призводить до появи різних аномалій, таких як від'ємні концентрації окремих компонентів, зменшення концентрацій легких компонентів від низу до верху по колоні і т.д. Основною причиною цього є недостатня точність у визначенні початкових наближень концентрацій компонентів в тому продукті, від якого ведеться розрахунок. Щоб уникнути таких ситуацій застосовують двонаправлений розрахунок колони – до тарілки живлення. У цьому випадку розрахунок контактної колони необхідно здійснювати знизу вгору для вичерпної частини колони і зверху вниз для зміцнюючої.

Основними контрольованими збуреннями, що діють на всю колону, є витрата, склад і температура потоків живлення: F_j , \bar{x}_{fj} , t_{fj} . Також вимірюються профіль тиску ректифікаційної колони \bar{P} і тиск в лінії подачі живлення P_{fj} .

При розрахунку контактної колони від низу до верху відповідно до обраного методу «від тарілки до тарілки» початковими і відомими даними для будь-якого контактної колони є витрати, концентрації, ентальпії рідинної і парової фаз, знайдені при розрахунках

попередньої тарілки: $L_j, V_{j-1}, \bar{x}_j, \bar{y}_{j-1}, h_j, H_{j-1}$. Завданням розрахунку j -го контактної пристрою є визначення характеристик потоків, що надходять (парова фаза) і залишають (рідина) контактний пристрій, розташований вище: $V_j, L_{j+1}, \bar{y}_j, \bar{x}_{j+1}, H_j, h_{j+1}$. При розрахунку зверху вниз завдання дзеркально протилежне.

Так як відомі склад рідинної фази, що знаходиться на тарілці, і тиск, то на підставі алгоритму фазової рівноваги розраховується склад рівноважної парової фази (3.196). За рівнянням (3.197) з урахуванням ККД тарілки визначаються реальні концентрації компонентів в парі, що залишає тарілку. Розрахований таким чином склад дозволяє визначити кількість тепла (3.191), що уноситься паровим потоком з тарілки. Далі, якщо на даний контактний пристрій подається сировина, визначається кількість тепла, внесеного на тарілку живленням (3.192)–(3.194).

Шляхом підстановки (3.186) в (3.189) і (3.195) можна отримати систему рівнянь для розрахунку складу і ентальпії рідини, що надходить на розглянуту тарілку:

$$\begin{cases} \bar{x}_{j+1} = \frac{L_j \cdot \bar{x}_j + V_j \cdot \bar{y}_j - V_{j-1} \cdot \bar{y}_{j-1} - F_j \cdot \bar{x}_{f,j}}{L_j + V_j - V_{j-1} - F_j}; \\ h_{j+1} = f(\bar{x}_{j+1}, P_j); \\ h_{j+1} = \frac{L_j \cdot h_j + V_j \cdot H_j - V_{j-1} \cdot H_{j-1} - Q_{f,j}}{L_j + V_j - V_{j-1} - F_j}. \end{cases}$$

Ця система складається з $n+1$ рівнянь і містить $n+1$ невідому: V_j, \bar{x}_{j+1} і h_{j+1} . В зв'язку з тим, що залежність ентальпії потоку від його концентрації задана неявно, то вирішення системи можливо тільки ітераційним способом.

Концентрації компонентів в рідинній фазі, яка надходить на тарілку, згідно матеріального балансу є функціями шуканого парового потоку, який тарілку залишає. Для будь-якого значення V_j виконується залежність:

$$\sum_{i=1}^n x_{j+1,i} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{L_j \cdot x_{j,i} + V_j \cdot y_{j,i} - V_{j-1} \cdot y_{j-1,i} - F_j \cdot x_{f,j,i}}{L_j + V_j - V_{j-1} - F_j} \right) = 1,$$

тому рівняння покомпонентного матеріального балансу

доповнюються тепловим. Тепловий баланс відображає залежність ентальпії рідинної фази h_{j+1} також від витрати пари V_j . Вирішення визначається спільною відповідністю балансових рівнянь, для чого знаходиться ентальпія рідинної фази, склад якої розраховується з матеріального балансу.

В околицях шуканої точки балансові залежності носять практично лінійний характер. В цьому випадку, якщо початкове наближення V_j обрано з високою точністю, то застосування таких методів вирішення систем нелінійних рівнянь, як метод Ньютона або інтерполяції, дозволяє знайти відповідь після єдиної ітерації.

Завдання можна сформулювати наступним чином: необхідно знайти таке значення V_j , при якому якась функція $f(V_j) = 0$. Як така функція виступає нев'язка теплового балансу колони:

$$f(V_j) = \frac{Q_{f,j} - F_j \cdot h_{j+1} + V_{j-1} \cdot (H_{j-1} - h_{j+1}) + L_j \cdot (h_{j+1} - h_j)}{H_j - h_{j+1}} - V_j = 0. \quad (3.198)$$

В цьому рівнянні величина ентальпії h_{j+1} розраховується згідно покомпонентного матеріального балансу і алгоритму розрахунку ентальпій. У зв'язку з цим визначення похідної функції $f(V_j)$ в загальному вигляді неможливо і найбільш зручним засобом для вирішення є метод інтерполяції. Відповідно до цього методу обирають довільні два значення V_j (V_j^0 і V_j^1) і розраховують відповідні їм значення функції (3.198): $f(V_j^0)$ і $f(V_j^1)$. Наступні наближення величини V_j :

$$V_j^{k+1} = \frac{V_j^{k-1} \cdot f(V_j^k) - V_j^k \cdot f(V_j^{k-1})}{f(V_j^k) - f(V_j^{k-1})}. \quad (3.199)$$

В якості початкового наближення шуканої величини парового потоку V_j пропонується використовувати значення, отримане за умови, що ентальпії рідинної фази, що надходить на тарілку і залишає її, рівні ($h_{j+1} = h_j$):

$$V_j^0 = \frac{Q_{f,j} - F_j \cdot h_j + V_{j-1} \cdot (H_{j-1} - h_j)}{H_j - h_j}.$$

Абсциса другої точки, V_j^1 , за умови лінійної залежності функції $f(V_j)$ від V_j , може бути обрана довільно:

$$V_j^1 = V_j^0 + \Delta V_j.$$

Якщо значення ΔV_j прийняти рівним 1 кмоль/год, то рівняння (3.199) для розрахунку першого наближення V_j можливо записати у вигляді:

$$V_j^2 = V_j^0 + \frac{f(V_j^0)}{f(V_j^0) - f(V_j^1)}.$$

Ітераційний процес завершується в тому випадку, якщо нев'язка теплового балансу (3.198) дорівнює нулю з необхідною точністю:

$$\left| f(V_j) \right| = \left| \frac{Q_{f,j} - F_j \cdot h_{j+1} + V_{j-1} \cdot (H_{j-1} - h_{j+1}) + L_j \cdot (h_{j+1} - h_j)}{H_j - h_{j+1}} - V_j \right| \leq \varepsilon.$$

Останньою дією алгоритму є розрахунок загального матеріального балансу контактної пристрою (3.186) і визначення останньої невідомої величини – L_{j+1} .

Зворотна задача – розрахунок контактної пристрою колони в напрямку від дефлегматора до куба – містить два ітераційні процеси (один всередині іншого), при цьому внутрішній цикл призначений для вирішення системи нелінійних рівнянь порядку $n-1$.

Основна складність вирішення задачі, яка на перший погляд видається дзеркальною розрахункам від низу до верху, полягає в використанні у всіх розрахунках величини ККД тарілки за паровою фазою. Провести розрахунок парорідинної рівноваги в цьому випадку можливо тільки ітераційно.

Зовнішній ітераційний цикл алгоритму призначений для знаходження величини парового потоку, що надходить на тарілку, V_{j-1} шляхом забезпечення збіжності теплового балансу (як і при розрахунках від низу до верху); в той же час внутрішній цикл проводить для кожного наближення V_{j-1} спільний розрахунок матеріального балансу і парорідинної рівноваги.

В рівнянні теплового балансу (3.195), здійснивши заміну величини невідомих ентальпій на значення ентальпій відомих потоків, отримаємо початкове наближення величини парового потоку:

$$V_{j-1}^0 = \frac{F_j \cdot h_j - Q_{f,j} + V_j \cdot (H_j - h_{j+1})}{H_j - h_{j+1}}. \quad (3.200)$$

Початкові концентрації цього парового потоку, які ітераційно уточнюються у внутрішньому циклі:

$$\bar{y}_{j-1} = \bar{y}_j. \quad (3.201)$$

Витрату рідини, що стікає з тарілки, з рівняння (3.186) $L_j = V_{j-1} + L_{j+1} + F_j - V_j$ підставимо в рівняння (3.189) і отримаємо вирази для концентрацій цього потоку:

$$\bar{x}_j = \frac{V_{j-1}}{L_{j+1} + V_{j-1} - V_j + F_j} \cdot \bar{y}_{j-1} + \frac{L_{j+1} \cdot \bar{x}_{j+1} - V_j \cdot \bar{y}_j + F_j \cdot \bar{x}_{f,j}}{L_{j+1} + V_{j-1} - V_j + F_j}. \quad (3.202)$$

Рівняння парорідинної рівноваги з врахуванням ККД (3.197) для шуканого складу пари:

$$y_{j-1,i} = \frac{y_{j,i} - \eta_{j,i} \cdot y_{j,i}^*}{1 - \eta_{j,i}}. \quad (3.203)$$

Це рівняння не вирішується при значенні ККД будь-якого компонента, що дорівнює 1. Однак в цьому випадку відпадає і необхідність даних ітераційних розрахунків і для визначення складів фаз необхідно використовувати тільки алгоритми фазової рівноваги.

З використанням початкового наближення витрати V_{j-1}^0 (3.200) і складу парового потоку \bar{y}_{j-1} (3.201) розраховується склад рідинної фази \bar{x}_j (3.202). За залежністю (3.196) знаходиться рівноважний склад парової фази $y_{j,i}^*$, який, при підстановці в рівняння (3.203), дозволяє провести уточнення концентрацій парового потоку \bar{y}_{j-1} . Розрахунки у внутрішньому циклі завершуються при виконанні умови:

$$\sum_{i=1}^{n-1} \left| \frac{y_{j,i} - \eta_{j,i} \cdot y_{j,i}^*}{1 - \eta_{j,i}} - y_{j-1,i} \right| \leq (n-1) \cdot \varepsilon.$$

Після цього знаходяться ентальпії потоків. Рівняння теплового балансу тарілки дозволяє провести уточнення величини парового потоку, після чого описані операції повторюються.

3.8 Література до розділу 3

103. Кафаров, В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии [Текст] / В. В. Кафаров. – М. : Химия, 1985. – 468 с.

104. Кафаров, В. В. Анализ и синтез химико-технологических систем : учебник для вузов [Текст] / В. В. Кафаров, В. П. Мешалкин. – М. : Химия, 1991. – 432 с.

105. Кафаров, В. В. Принципы математического моделирования химико-технологических систем [Текст] / В. В. Кафаров, В. Л. Перов, В. П. Мешалкин. – М. : Химия, 1974. – 343 с.

106. Манко, Г. И. Математическое и алгоритмическое обеспечение для синтеза оптимальных химико-технологических систем с использованием информационных критериев эффективности [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Манко Геннадий Иванович ; МХТИ им. Д.И. Менделеева. Москва, 1983. – 21 с.

107. Кафаров, В. В. Информационный метод оценки адекватности моделей химико-технологических систем [Текст] / В. В. Кафаров, В. П. Мешалкин, Г. И. Манко // Доклады АН СССР. – 1978. – Т. 242. – № 2. – С. 383–385.

108. Smith, J. M. Chemical engineering kinetics [Text] / J. M. Smith. – McGraw-Hill, 1981. – 676 p.

109. Жоров, Ю. М. Моделирование физико-химических процессов нефтепереработки и нефтехимии / Ю. М. Жоров – М. : Химия, 1978. – 376 с.

110. Vervorner M., Faatz G. // Chemische Technik. – 1962. – № 56. – Pp. 328–333.

111. Гуреев, А. А. Производство высокооктановых бензинов [Текст] / А. А. Гуреев, Ю. М. Жоров, С. В. Стидович. – М. : Химия, 1981. – 224 с.

112. Кузнецов, А. А. Расчеты процессов и аппаратов нефтеперерабатывающей промышленности [Текст] / А. А. Кузнецов, С. М. Кагерманов, Е. П. Судаков. – Л. : Химия, 1974. – 344 с.

113. Тришкин В.Я. Идентификация математической модели блока реакторов каталитического риформинга с использованием информационной оценки точности моделирования / В.Я. Тришкин,

Г.И. Манко, В.И. Пинский, И.Л. Левчук // Автоматика, Автоматизация, Электротехнические комплексы и системы. – 2001. – № 1 (8). – С. 12–15.

114. Слинко, М. Г. Основы и принципы математического моделирования каталитических процессов [Текст] / М. Г. Слинко. – Новосибирск : Ин-т катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, 2004. – 483 с.

115. Шварцштейн, Я. В. Получение сернистого газа из элементарной серы [Текст] / Шварцштейн Я. В., Кузьмин Г. А.. – М.: Химия, 1972. – 157 с.

116. Амелин, А. Г. Технология серной кислоты / А. Г. Амелин. – М. : Химия, 1983. – 360 с.

117. Боресков, Г. К. Катализ в производстве H_2SO_4 [Текст] / Г. К. Боресков. – М. : Госхимиздат, 1954. – 237 с.

118. Справочник серноокислотчика [Текст] / Под ред. К. М. Малина. – М. : Химия, 1971. – 744 с.

119. Боресков Г. К. Катализ. Вопросы теории и практики [Текст] /. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1987. – 198 с.

120. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. М. : ООО ТИД "Альянс", 2004. – 753 с.

121. Бутковский, А .Г. Методы управления системами с распределенными параметрами [Текст] / А. Г. Бутковский. – М. : Наука, 1975. – 568 с.

122. Рапопорт, Э. Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределенными параметрами [Текст] / Э. Я. Рапопорт. – М.: Высш. шк., 2005. – 292 с.

123. Белоброва, Е. В. Автоматическое управление тепломассообменными процессами с подвижными распределенными регулирующими воздействиями [Текст] / Е. В. Белоброва, А. Р. Шейкус, В. И. Корсун // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2014. – № 5/2 (71). – С. 51-55. doi: 10.15587/1729–4061.2014.28037.

124. Левчук, И. Л. Способ управления процессом ректификации с помощью распределенных управляющих воздействий [Текст] / И. Л. Левчук, А. Р. Шейкус, В. Я. Тришкин // Вісник НТУ «ХП». Серія: Нові рішення в сучасних технологях. – 2015. – № 14 (1123). – С. 100–105.

125. Sinnott, R. K. Chemical Engineering Design, SI Edition (5th Edition) [Text] / R. K. Sinnott, G. Towler. – Elsevier Butterworth-Heinemann, 2009. – 1038 p.

126. Никитина, С. Ю. Разработка и научное обеспечение ресурсосберегающих технологий ректификационной очистки пищевого этилового спирта [Текст] : Дис. ... д-ра техн. наук: 05.18.12, 05.18.01. – Воронеж, 2016. – 462 с.

127. Петлюк Ф. Б. Многокомпонентная ректификация. Теория и расчет [Текст] / Ф. Б. Петлюк. – М.: Химия, 1983. – 304 с.

128. Кафаров, В. В. Математическое моделирование основных процессов химических производств [Текст] / В. В. Кафаров, М. В. Глебов. – М. : Высш. шк., 1991. – 400 с.

129. Komissarov, Yu. A. Multicomponent distillation calculations using computer simulation principles [Text] / Yu. A. Komissarov, Quang Sang Dam // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2014. – Vol. 48, Issue 3. – Pp. 280–287.

130. Буряков, В. Г. Разработка одного класса математических моделей ректификации многокомпонентных смесей [Текст] / В. Г. Буряков, А. Н. Ходзинский // Компьютерная математика. – 2008. – № 2. – С. 13–24.

131. Ворошин, А. В. Модель процесса ректификации в колонне с пакетной вихревой насадкой [Текст] / А. В. Ворошин, А. О. Неробелов, А. В. Полянский // Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология : труды III Всероссийской студенческой научно-технической конференции. – Казань. – 2012. – С. 224–228.

132. Шейкус, А. Р. Моделювання процесу багатоконпонентної ректифікації з врахуванням рухливих керуючих впливів / А. Р. Шейкус, В. Я. Тришкін, І. Л. Левчук // Комп'ютерне моделювання: аналіз, управління, оптимізація. – 2018. – № 1. – С. 82–91.

РОЗДІЛ 4. ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО ПІДХОДУ В ЗАДАЧАХ ІДЕНТИФІКАЦІЇ

4.1 Використання концепції невизначеності

Поняття невизначеності вимірів міцно увійшло до міжнародної метрологічної практики і закріплено документами Міжнародної організації стандартизації ISO (див., наприклад, [1, 2]). Згідно дефініції [3], невизначеність виміру – це параметр, пов'язаний з результатом виміру і такий, що характеризує розкид значень, які з достатньою основою можуть бути приписані вимірюваній величині.

Для кількісної оцінки невизначеності природним є використання інформаційних критеріїв, оскільки інформацію зазвичай розглядають як міру зменшення невизначеності знань про який-небудь об'єкт в процесі його пізнання. У роботах [4] і [5] введено поняття інформаційної невизначеності і запропоновані методи її виміру.

У ряді робіт розглядаються питання управління в умовах невизначеності інформації. Наприклад, в [6] аналізуються види невизначеності, що вимагають обліку в процесах управління і контролю сучасних технологічних комплексів. Показані переваги застосування теорії нечітких великих кількостей при рішенні завдань контролю і управління.

У [7, 8] розроблені основи інформаційної теорії управління. Проте викладені тут підходи ще не знайшли широкого застосування в практиці.

У роботі [9] виконане обґрунтування доцільності використання концепції невизначеності для оцінки якості управління такими об'єктами, як технологічні процеси (ТП).

Вважається, що стан ТП характеризується вектором \dot{X} значень технологічних параметрів. Складовими x_i вектора \dot{X} є температури і тиски в апаратах, витрати і склади технологічних потоків і тому подібне.

Технологічним регламентом процесу визначається область \mathcal{Z} значень x_i , що відповідають нормальному протіканню процесу. Називатимемо таку область цільовою областю. У простому випадку цільова область може розглядатися як n -мірний куб, де n – число складових вектора \dot{X} .

Метою функціонування системи є приведення вектора \dot{X} у цільову область і утримання в ній. За термінологією [7, 8], вектор, що знаходиться в цільовій області, слід називати еталоном порядку, а систему в такому стані - впорядкованою. Міра відмінності реального вектора \dot{X} від еталонного $\dot{X}_{\text{ст}}$ називається невпорядкованістю функціонування системи.

Невпорядкованість – величина змінна, що набуває різних значень в різних ситуаціях і в різні моменти часу. Більше узагальненою характеристикою системи є організованість. Організованою ми можемо називати таку систему, яку у більшості ситуацій і велику частину часу можна вважати впорядкованою. Для кількісної оцінки організованості зручніше використати протилежну характеристику – неорганізованість, яка є узагальненням невпорядкованості для усіх ситуацій її прояву і для усіх даних моментів часу.

Нехай ми маємо m ситуацій, імовірності яких P_1, P_2, \dots, P_m . Для ансамблю ситуацій

$$\begin{pmatrix} \bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_m \\ P_1, P_2, \dots, P_m \end{pmatrix}$$

операцію узагальнення можна виконати зважуванням невпорядкованості по вірогідності. Тоді неорганізованість можна розрахувати по формулі [7]:

$$\bar{O} = \sum_{j=1}^m P_j \log \Pi_{\bar{y}_j}, \quad (4.1)$$

де $\Pi_{\bar{y}_j}$ – деяка числова характеристика відмінності \dot{X} від $\dot{X}_{\text{ст}}$, що називається параметром невпорядкованості.

Розглянемо засіб управління (ЗУ), що виконує функціональне перетворення $Y = f(X)$. Нехай $P = \{p(x_j)\}$ – розподіл імовірностей величини X , а $Q = \{q(y_j)\}$ – розподіл імовірностей величини Y . В випадку ідеальної роботи ЗУ ці розподіли співпадають. Невпорядкованість реального ЗУ оцінюватимемо параметром $\Pi_{\bar{y}_j} = p(x_j)/q(y_j)$. Тоді (1) набере вигляду:

$$\bar{O} = \sum_{j=1}^m p(x_j) \log \frac{p(x_j)}{q(y_j)}. \quad (4.2)$$

Вираз (2) має певний інформаційний сенс. Він з точністю до знаку співпадає з формулою корисної інформації Бонгарда [10]:

$$I_n = \sum_j p_j \log(q_j/p_j) = -\bar{O}. \quad (4.3)$$

Враховуючи зміну знаку, слід говорити про дезінформацію, яку вносить ЗУ.

Якість управління може бути втрачена як внаслідок невизначеності вимірів параметрів об'єкту управління і(або) зовнішніх чинників (збурень), так і внаслідок недосконалості математичної моделі об'єкту. У останньому випадку слід враховувати невизначеність моделі.

Джерелами невизначеності моделі є:

- а) неповнота знань про фізичні і хімічні процеси, що протікають в об'єкті;
- б) допущення і спрощення, що приймаються при побудові моделі;
- в) шуми, завади і похибки вимірів, що мають місце при експериментальних дослідженнях об'єктів.

Докладно зупинимось на останньому пункті.

4.2 Інформаційний критерій адекватності математичної моделі технологічного процесу

В автоматизованих системах керування технологічними процесами (АСК ТП) як об'єкт керування розглядається технологічний процес. Часто математична модель ХТП будується методами регресійного аналізу з використанням даних пасивного експерименту. Вживані зазвичай в якості критеріїв адекватності F -відношення [11] та γ -критерій [12] не дають можливості оцінити, наскільки точно модель описує процес, що ідентифікується, вони лише показують, наскільки прогноз значень вихідної величини процесу за допомогою цього рівняння точніше прогнозу за середнім значенням вихідної величини. Отримувана за допомогою вказаних критеріїв оцінка адекватності залежить від дисперсії вихідної змінної відносно свого середнього значення, тобто одне і те ж рівняння може мати різні оцінки адекватності при різних значеннях дисперсії вихідної величини.

Точнішими є оцінки, що визначають обсяг інформації про досліджуваний процес, що міститься в математичній моделі процесу. Для випадку експериментів по пошуку найкращої моделі в роботі [13]

приведені формули підрахунку приросту інформації в кожному експерименті і методика планування дискримінуючих експериментів, т. е. експериментів, що дозволяють вибрати з декількох математичних моделей найбільш адекватну. Необхідність проведення дискримінуючих експериментів і відносно великий об'єм обчислень утруднюють застосування цього методу.

Більш зручним є застосування концепції невизначеності з використанням корисної інформації Бонгарда [10].

Згідно М.М. Бонгарду, повідомлення, що змінює для спостерігача невизначеність N_1 на невизначеність N_2 , несе корисну інформацію

$$I_k = N_1 - N_2. \quad (4.4)$$

Нехай є деякий об'єкт (процес), стан якого описується набором вихідних змінних $y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)$. Нехай також є математична модель цього об'єкту у вигляді системи рівнянь, згідно якої вихідними змінними є величини $\hat{y}_1(t), \hat{y}_2(t), \dots, \hat{y}_n(t)$. Вихідна величина $y_j(t)$ може набувати значень y_{ji} з імовірностями $p(y_{ji})$. Невизначеність величини $y_j(t)$ оцінюється за допомогою ентропії Шенона:

$$N_1 = H(y_j) = -\sum_i p(y_{ji}) \log p(y_{ji}). \quad (4.5)$$

Позначимо ймовірність прийняття вихідною величиною моделі $\hat{y}_j(t)$ значення y_{ji} через $q(y_{ji})$ і будемо вважати, що модель висуває гіпотезу про те, що j -та вихідна величина має розподіл імовірностей $Q = \{q(y_{ji})\}$, тоді як реальним розподілом є розподіл $P = \{p(y_{ji})\}$. Згідно [10], для спостерігача, що виходить з такої гіпотези, невизначеність j -тої вихідної величини є рівною

$$N_2 = -\sum_i p(y_{ji}) \log q(y_{ji}). \quad (4.5)$$

Оскільки модель неточно описує об'єкт, кількість корисної інформації у відповідності з (4.4) буде негативною, тобто j -те рівняння несе дослідникові дезінформацію в кількості

$$D = N_2 - N_1 = \sum_j p(y_{ji}) \log [p(y_{ji})/q(y_{ji})]. \quad (4.7)$$

Вираз (4.7) є інформаційним критерієм адекватності.

Процес ідентифікації можна розглядати як процес запасання в

моделі інформації про об'єкт, що ідентифікується. Чим точніше рівняння описує об'єкт, тим більше запас корисної інформації, що міститься в цьому рівнянні. За нульовий рівень можна прийняти запас інформації у рівнянні, яке висуває гіпотезу про те, що всі значення величини у рівноімовірні:

$$q(y_{ji}) = \frac{1}{m_j}, \quad (4.8)$$

де m_j - загальне число можливих значень змінної $y_j(t)$.

Невизначеність величини $y_j(t)$ для спостерігача, що керується гіпотезою (4.8), виходить рівною

$$N_0 = -\sum_{i=1}^m p(y_{ji}) \log \frac{1}{m}. \quad (4.9)$$

Тоді запас корисної інформації в j -му рівнянні, якому відповідає невизначеність N_2 , визначиться вираженням

$$\begin{aligned} I_j = N_0 - N_2 &= -\sum_{i=1}^m p(y_{ji}) \log \frac{1}{m} + \sum_i p(y_{ji}) \log q(y_{ji}) = \\ &= \sum_{i=1}^m p(y_{ji}) \log [mq(y_{ji})]. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Ентропія H є окремий випадок невизначеності, що має місце при повній адекватності рівняння. Отже, максимально можливий запас корисної інформації у j -му рівнянні обчислюється за формулою

$$I_{j\max} = N_0 - N_1 = \sum_{i=1}^m p(y_{ji}) \log [mp(y_{ji})]. \quad (4.11)$$

Відношення запасу корисної інформації, що міститься у рівнянні, до максимально можливого запасу дає числову оцінку адекватності рівняння :

$$\eta_j = \frac{I_j}{I_{j\max}} = \frac{\sum_{i=1}^m p(y_{ji}) \log [mq(y_{ji})]}{\sum_{i=1}^m p(y_{ji}) \log [mp(y_{ji})]}. \quad (4.12)$$

Для об'єктів, описуваних n вихідними величинами, загальна оцінка

адекватності підраховується таким чином:

$$\eta = \sum_{j=1}^n C_j \eta_j, \quad (4.13)$$

де C_j – коефіцієнт, що враховує важливість інформації про величину y_j , для цілей управління об'єктом ($\sum C_j = 1$).

Наведемо деякі приклади використання коефіцієнта η [14].

1. Відомо, що з ростом порядку поліноміального рівняння підвищується в загальному випадку міра адекватності рівняння. Послідовно оцінюючи з допомогою (4.12, 4.13) адекватність рівнянь першого порядку, неповного квадратичного, повного квадратичного і т. д., можна вибрати рівняння, що має разом з низьким порядком досить високу міру адекватності. При цьому виникає питання, яке значення коефіцієнта η можна вважати достатнім. Для відповіді на це питання треба на підставі вимог, що пред'являються до точності управління об'єктом, вичислити мінімальне допустиме значення η_{\min} .

2. Запропонована оцінка адекватності визначає не абсолютне значення запасу інформації в моделі, а то, наскільки цей запас близький до максимально можливого. Отже, з'являється можливість кількісного порівняння міри адекватності моделей, отриманих різними методами або на підставі різних початкових даних.

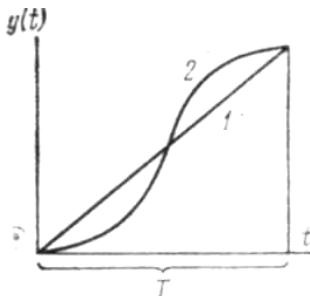
4.3 Інформаційна оцінка точності моделювання детермінованих процесів

Коли доводиться мати справу з детермінованими процесами, використання інформаційних критеріїв типу (4.7) і (4.12), що розраховуються через імовірності, є неможливим.

В цьому випадку треба використовувати підхід [15] для оцінки кількості інформації в детермінованому процесі.

З метою розробки критерію оцінки точності моделей, отриманих як статистичними, так і детермінованими методами, необхідно ввести кількісну міру інформації, що міститься в детермінованому процесі. Часто як інформаційна характеристика детермінованого процесу використовується різноманітність множини станів процесу, вимірювана

логарифмом числа елементів цієї множини [16]. Проте, як видно з рис. 4.1, різноманітності станів процесів 1 і 2 на інтервалі спостереження T однакові, тоді як процес 2 є інформативно складнішим, ніж процес 1, який характеризується постійністю швидкості зміни.



T – інтервал спостереження

Рис. 4.1 – Порівняння інформаційної насиченості різних детермінованих процесів

Запропонована в роботі [17] кількісна міра різноманітності розраховується відносно розмірів області існування детермінованого процесу, що утруднює використання такої міри для порівняння тих або інших характеристик об'єктів, які істотно відрізняються одна від одної. З цієї точки зору зручніше було б співвідносити міру інформації з деякою величиною, яку можна умовитися вважати загальноприйнятною.

Оскільки кількість значень, які може приймати неперервна величина, є нескінченно великим, то і кількість інформації, що міститься у неперервному процесі, нескінченно велика. Проте вимір значень змінних ОУ завжди супроводжується погрішностями. Результати вимірів, що розрізняються між собою на величину, меншу, ніж погрішність виміру, можна вважати такими, що відповідають одному і тому ж значенню вимірюваної змінної. Таким чином, в ході дослідження ОУ його вихідна неперервна змінна може розглядатися як дискретна з кроком квантування, залежним від погрішності виміру. У [18] введено поняття порогу розрізнюваності ϵ у як найбільшого значення модуля різниці двох значень змінної y , які неможливо розрізнити внаслідок погрішностей виміру або не має сенсу розрізнити з тієї або іншої точки зору.

Виходячи з цього, розрахунок кількості інформації в детермінованій змінній $y(t)$ будемо вести відносно значення порогу розрізнюваності ε_y . Інтуїтивно зрозуміло, що інформаційна насиченість детермінованого сигналу $y(t)$ залежить від інтенсивності його зміни, яку можна характеризувати виразом:

$$\pi_y(t) = \frac{\left| \frac{dy}{dt} \right|}{\varepsilon_y}, \quad (4.16)$$

де ε_y – поріг розрізнюваності значень $y(t)$.

Оскільки в системах управління застосовуються, як правило, цифрові пристрої, як поріг розрізнюваності доцільно використовувати крок квантування.

На відрізку часу $[t_1, t_2]$ число значень змінної $y(t)$, віддалених один від одного на величину ε_y , визначається таким чином:

$$M(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \pi_y(t) dt + 1. \quad (4.17)$$

Тому різноманітність значень $y(t)$ на відрізку $[t_1, t_2]$ є рівною

$$R(t_1, t_2) = \log \left[\int_{t_1}^{t_2} \pi_y(t) dt + 1 \right]. \quad (4.18)$$

На основі елементарних співвідношень математичного аналізу можна записати

$$\varepsilon_y = \left| \frac{dy}{dt} \right|_{t=t^*} \cdot \Delta t_\varepsilon, \quad (4.19)$$

де Δt_ε — інтервал часу, впродовж якого $y(t)$ змінюється на величину порогу розрізнюваності; t^* — деяке значення t з проміжку $t \leq t^* \leq t + \Delta t_\varepsilon$. Якщо $y(t)$ мало змінюється за час Δt_ε , можна прийняти

$$\varepsilon_y = \left| \frac{dy(t^*)}{dt} \right| \cdot \Delta t_\varepsilon, \quad \pi_y(t) = 1/\Delta t_\varepsilon. \quad (4.20)$$

Тоді різноманітність $y(t)$ на відрізку $[t, t + \Delta t_\varepsilon]$ у разі двійкового логарифма є рівною

$$R_1 = \log \left[\int_t^{t+\Delta t} \pi_y(t) dt + 1 \right] = \log[\pi_y(t)\Delta t_\varepsilon + 1] = \log 2 = 1 \text{ біт.} \quad (4.21)$$

За час t , що пройшов з моменту початку відліку, різноманітність $y(t)$ досягає величини

$$R_y(t) = \log \left[\int_0^t \pi_y(t) dt + 1 \right]. \quad (4.22)$$

При цьому швидкість створення різноманітності

$$V_y(t) = dR_y(t)/dt = \frac{\pi_y(t)}{\int_0^t \pi_y(t) dt + 1} \log \varepsilon. \quad (2.52)$$

Аналогічно використовуваному в теорії інформації поняттю ентропії Шенона вводиться інтегральна характеристика мінливості (IXM) змінної $y(t)$:

$$U_y = \frac{\int \pi_y(\theta) \log[\pi_y(\theta)\varepsilon_t] d\theta}{\int_T \pi_y(\theta) d\theta}, \quad (2.53)$$

де $\theta = t/T$ – відносний час;

T – інтервал часу спостереження змінної $y(t)$;

ε_t – поріг розрізнюваності часу. Як поріг розрізнюваності може бути використаний інтервал дискретизації сигналу $y(t)$.

IXM відповідає інтуїтивно передбачуваним вимогам, що пред'являються до міри кількості інформації. Вона має властивість аддитивності, не залежить від конкретних значень змінної $y(t)$, мінімальна при $dy/dt = \text{const}$.

Для доказу останньої властивості IXM використовуємо співвідношення, справедливості якого показана в [19] (стор. 173):

$$\log_a u = \frac{\ln u}{\ln a} \geq \frac{1}{\ln a} \left(1 - \frac{1}{u}\right). \quad (2.54)$$

Звідси слідує, що для будь-яких $p(\theta) \geq 0$ і $q(\theta) \geq 0$, що задовольняють умові

$$\int_T p(\theta)d\theta = \int_T q(\theta)d\theta,$$

мають місце наступні співвідношення:

$$\int_T p(\theta)\log\frac{p(\theta)}{q(\theta)}d\theta \geq \frac{1}{\ln a_T} \int_T p(\theta)\left(1 - \frac{q(\theta)}{p(\theta)}\right)d\theta = 0,$$

$$\int_T p(\theta)\log p(\theta)d\theta \geq \int_T p(\theta)\log q(\theta)d\theta. \quad (2.55)$$

Нехай

$$p(\theta) = \frac{\pi(\theta)}{\int_T \pi(\theta)d\theta}; \quad q(\theta) = \frac{\rho(\theta)}{\int_T \pi(\theta)d\theta}; \quad \rho(\theta) = C/\varepsilon_y; \quad C = \text{const.}$$

У цьому випадку нерівність (2.55) отримує наступного вигляду:

$$\frac{\int_T \pi_y(\theta)\log[\pi_y(\theta)\varepsilon_t]d\theta}{\int_T \pi_y(\theta)d\theta} \geq \frac{\int_T \pi_y(\theta)\log[\rho(\theta)\varepsilon_t]d\theta}{\int_T \pi_y(\theta)d\theta}, \quad (2.53)$$

отже

$$U_y \geq \log(C/\varepsilon_y). \quad (2.54)$$

Знак рівності в (2.54) має місце тільки в одному випадку, коли $\pi(\theta) = C/\varepsilon_y$, тобто при $|dy/dt| = C$. Таким чином, для будь-якої величини $y(t)$ ІХМ мінімальна у разі постійності швидкості зміни цієї величини.

Позначимо інтенсивність зміни вихідної змінної моделі через $\pi_y(t)$. Як аналог невизначеності Бонгарда [10] можна використовувати наступну формулу:

$$U_B = -T \frac{\int_T \pi_y(\theta)\log[\pi_y(\theta)\varepsilon_t]d\theta}{\int_T \pi_x(\theta)d\theta}. \quad (2.55)$$

Для оцінки дезінформації, що вноситься моделлю, використовуємо вираз:

$$D = U_B - U_y = T \frac{\int_T \pi_x(\theta)\log\frac{\pi_x(\theta)}{\pi_y(\theta)}d\theta}{\int_T \pi_x(\theta)d\theta}. \quad (4.27)$$

У разі ідеальної моделі її вихід $\hat{y}(t)$ точно відтворює усі зміни величини $y(t)$, тобто виконується умова $\pi_y(t) = \pi_{\hat{y}}(t)$. При цьому кількість дезінформації дорівнює нулю. Чим нижче адекватність моделі, тим більше значення дезінформації D .

Для практичних розрахунків зручно використовувати дискретну форму вираження (2.55):

$$D = \frac{\sum_i \pi_{y_i} \log \frac{\pi_{y_i}}{\pi_{\hat{y}_i}}}{\sum_i \pi_{y_i}}, \quad (4.28)$$

де π_{y_i} та $\pi_{\hat{y}_i}$ – значення інтенсивності зміни вихідних величин об'єкта і моделі, визначені для моменту часу θ_i .

4.4 Використання інформаційного підходу при ідентифікації стохастичних моделей

Якщо адекватна детермінована модель дає можливість більш-менш точно прогнозувати майбутню поведінку об'єкта управління при відомих вхідних впливах і збуреннях, то стохастична модель дозволяє обчислити лише ймовірність того чи іншого майбутнього стану об'єкта. При цьому виходи моделі розглядаються як випадкові величини.

З теорії ймовірностей відомо, що повний опис випадкової величини дає закон розподілу її ймовірностей. Тому важливим елементом побудови стохастичних моделей є ідентифікація закону розподілу ймовірностей.

Ідентифікація закону розподілу ймовірностей робиться шляхом апроксимації емпіричних розподілів типовими розподілами і їх комбінаціями. Перевірка гіпотез про закони розподілу робиться зазвичай відомими методами математичної статистики за критеріями згоди.

Відомі критерії згоди базуються на використанні деяких статистик, які являють собою функції від вибірових точок X_1, X_2, \dots, X_n та параметрів апроксимуючого закону розподілу

$$y = y(x_1, x_2, \dots, x_n, \Theta_1, \Theta_2, \dots) \quad (2.56)$$

Статистику u підбирають таким чином, щоб її значення вимірювали відхилення або відношення деяких параметрів вибірки та апроксимуючого розподілу. Вид функціональної залежності (2.56) визначає переваги та недоліки відповідного критерію.

Так, наявність у статистиці критерію χ^2 [20] квадратичної форми визначають суттєвий недолік критерію, який вимагає обережності у висновках щодо гіпотези. В [21] розглянуті випадки, коли перевірка за критерієм χ^2 призводить до відкидання завідомо вірної гіпотези. Критерій Колмогорова [22] не можна використати, якщо параметри гіпотетичного закону розподілу оцінюються по тій же вибірці, по якій розраховується статистика критерію. Крім того, цей критерій застосовується тільки для неперервних функцій розподілу. У роботі [23] показано, що при використанні критерію ω^2 Крамера-Мізеса-Смірнова гіпотеза нормальності приймається набагато частіше, ніж слід.

Крім того, класичні критерії згоди дозволяють лише встановити, чи є підстави відкинути гіпотезу, що перевіряється. Якщо підстав немає, то математична статистика рекомендує проводити додаткові дослідження.

Відомо, що рішення багатьох проблем статистичного аналізу можливо при використанні інформаційного підходу. Це відзначили багато дослідників, починаючи з Н. Вінера та К. Шенона.

Спроби використання інформаційних підходів при вирішенні завдань перевірки статистичних гіпотез робилися неодноразово. Так, Кульбак [24] запропонував розглядати логарифм відношення густини ймовірності $f_1(x)$ і $f_2(x)$, відповідних двом альтернативним гіпотезам H_1 і H_2 , як інформацію в точці спостереження x для розрізнення на користь H_1 проти H_2 . Тоді середня для усієї множини $X=\{x\}$ інформація від спостереження відносно імовірнісної міри μ_2 (відповідній гіпотезі H_2) для розрізнення в користь H_1 проти H_2 , визначається формулою

$$I(2:1) = \int f_2(x) \log \frac{f_2(x)}{f_1(x)} d\lambda(x), \quad (2.57)$$

де X може бути мірою μ_1 або μ_2 або ж $(\mu_1 + \mu_2)/2$.

У розвиток ідей Кульбака в роботі [25] запропоновано визначати на інтервалі U розбіжність між густиною ймовірності $f(x)$ і її оцінки $f^*(x)$, вчисленою по вибірці $\{X_i, i=1,2,\dots,N\}$, за допомогою умовної апостеріорної ентропії H_N , яка залишається після обробки вибірки і побудови оцінки $f^*(x)$:

$$H_N = \int_U f^*(x) \log \frac{f^*(x)}{f(x)} dx. \quad (2.58)$$

Аналогічно визначається умовна апіорна ентропія, що обчислюється з використанням апіорної густини $f_0(x)$:

$$H_0 = \int_U f_0(x) \log \frac{f_0(x)}{f(x)} dx. \quad (2.59)$$

Тоді різниця апіорної і апостеріорної ентропії дає величину умовної інформації, отриманої з вибірки шляхом обчислення оцінки $P(x)$.

У роботі [26] зроблена спроба виробити загальний формалізований підхід до вибору статистики, що дозволяє розробляти нові досконаліші критерії згоди на основі використання поняття неорганізованості Ю.М. Горського [8]. Неорганізованість – узагальнена міра відмінності якого-небудь елементу x_j , відносно еталону порядку $x_{ет}$ яка прагне до нуля при $x_j \rightarrow x_{ет}$. Її можна розглядати як зважену по ймовірностям p_j деяку функцію ψ параметра Π_j , що оцінює міру відмінності x_j від $x_{ет}$. Згідно Горському, для більшості задач функцію ψ достатньо представити однією з чотирьох залежностей: лінійною, степеневою, логарифмічною або експоненціальною. Відповідно пропонуються чотири основні вирази для оцінки неорганізованості:

а) лінійна

$$\bar{O}_l = k \sum_{j=1}^m p_j \Pi_j; \quad (2.60)$$

б) степенева

$$\bar{O}_c = k \sum_{j=1}^m p_j (\Pi_j)^k; \quad (2.61)$$

в) логарифмічна

$$\bar{O}_{\text{лог}} = k \sum_{j=1}^m p_j \log \Pi_j; \quad (2.62)$$

г) експоненціальна

$$\bar{O}_e = k \sum_{j=1}^m p_j [\exp(\Pi_j) - C], \quad (2.63)$$

де k, l, C – задані постійні величини. Очевидно, що $\sum_j p_j = 1$.

Неорганізованість може бути використана як критерій перевірки статистичних гіпотез. Приймавши у (2.60) за параметр невпорядкованості Π_j максимум абсолютної величини різниці реальної та гіпотетичної функцій розподілу випадкової величини ξ , отримаємо при $k = 1$ вираз критерія Колмогорова. Поклавши у (2.61) значення параметру невпорядкованості рівним відношенню квадрата різниці реальних та гіпотетичних частот попадання значення ξ в j -й інтервал діапазону вимірювання величини ξ до гіпотетичної частоти та прийнявши всі $p_j = 1/m$, будемо мати при $k = m, l = 2$ вираз для критерію χ^2 .

Приймаючи в (2.62) за параметр Π_j відношення реальних імовірностей p_j до гіпотетичних q_j , отримуємо формулу корисної інформації Бонгарда [10]:

$$I_{\text{н}} = \sum_j p_j \log \frac{p_j}{q_j}. \quad (2.64)$$

Оскільки ця величина негативна, слід говорити про дезінформацію, що міститься в гіпотезі, яка перевіряється. Порівнюючи кількість дезінформації, що вноситься різними гіпотезам, можна вибрати оптимальний закон розподілу, що якнайкраще апроксимує результати експериментальних досліджень.

Для практичного застосування такого інформаційного критерію перевірки гіпотез про закони розподілу в рекомендується використовувати наступну статистику:

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_j v_j \log \frac{v_j}{nq_j}, \quad (2.65)$$

Де v_j — число реалізацій вибірки, що потрапляють в j -тий інтервал.

Як показано в [25], при обчисленні значення інформаційного критерію виходить випадкове вибіркоче значення, по якому не можна зробити певного висновку відносно якості аналізу. Застосування інформаційних характеристик стикається з проблемою визначення розподілу випадкових значень самого критерію. Тому інформаційні критерії згоди досі не знайшли широкого практичного застосування в математичній статистиці.

Проте, обчислювальні потужності сучасних комп'ютерів дозволяють вирішувати багато завдань шляхом статистичного експерименту. Нормативний документ Р 50.1.037-2002 [27] рекомендує наступне: якщо для опису вибірки використовується закон розподілу ймовірностей $F(x, \theta)$ і знайдені оцінки його параметрів $\hat{\theta}$, а для перевірки складної гіпотези $H_0: F(x) \in \{F(x, \theta), \theta \in Q\}$ дослідникові невідомий розподіл статистики критерію згоди, доцільно скористатися методикою комп'ютерного аналізу статистичних закономірностей, що добре зарекомендувала себе при моделюванні розподілів статистик критеріїв.

Для цього слід відповідно до закону $F(x, \hat{\theta})$ змоделювати N вибірок того ж об'єму n , що і вибірка, для якої необхідно перевірити гіпотезу H_0 . Далі для кожної з N вибірок вичислити оцінки тих же параметрів закону, а потім значення статистики S відповідного критерію узгодження. У результаті буде отримана вибірка значень статистики S_1, S_2, \dots, S_N , із законом розподілу $G(S_n|H_0)$ для гіпотези H_0 , що перевіряється. По цій вибірці при досить великому N можна побудувати емпіричну функцію розподілу $G_N(S_n|H_0)$, якою можна безпосередньо скористатися для висновку про те, чи слід приймати гіпотезу H_0 . Відхилення смодельованого розподілу від теоретичного при $N=2000$ зазвичай мають порядок $\pm 0,015$.

Широкі можливості для статистичного моделювання забезпечує

програмний пакет Statistics Toolbox системи MATLAB, який і був використаний для дослідження інформаційного критерію згоди (2.65).

Спочатку вирішувалась задача визначення закону розподілу, який найкращим чином апроксимує емпіричний розподіл. Оброблялася вибірка з 100 значень похибок виміру цифровим вольтметром зразкової змінної напруги 10 В, яка генерувалась установкою перевірки вольтметрів В1-20.

Засобами мови технічних розрахунків MATLAB була створена програма, яка реалізує процес статистического моделювання з використанням наступних законів розподілу (в дужках вказаний префікс для імен функцій пакету Statistics Toolbox):

- а) нормальний розподіл (norm);
- б) розподіл Релея (rayl);
- в) експоненціальний розподіл (exp);
- г) розподіл Вейбула (wbl);
- д) узагальнений розподіл Парето (gp).

Далі префікс для імен функцій в загальному вигляді позначатимемо буквами pref.

За допомогою функції preffit(x) були определены параметри розподілу parmhat, за допомогою функції prefpdf(x, muhat) згенерована вибірка гіпотетичних значень помилки і будована теоретична крива розподілу. По вибірках експериментальних і теоретичних значень побудовані відповідні гістограми. Згідно формули (2.65) розраховано значення інформаційного критерію згоди.

Дослідження розподілу ймовірностей значень інформаційного критерію проводилось методом Монте-Карло. Генерувалася вибірка випадкових значень v_j ; для яких розраховувалось значення критерію δ , і так повторювалося 3000 разів. Це зі запасом перевищує рекомендованне в [27] число $N=2000$. Для отриманої таким чином вибірки значень критерію за допомогою засобів Statistics Toolbox була побудована гістограма з накладеною на неї кривою функції густини розподілу нормального закону (функція histfit), розраховані перші чотири моменту розподілу (математичне очікування mean, середньоквадратичне відхилення std, незміщена асиметрія skewness і незміщений аксцес kurtosis. Критичне

значення було визначено як квантиль рівня 0,01 за допомогою функції `pgtile`. Приклад результатів розрахунків для узагальненого розподілу Парето (Generalized Pareto) показаний на рис. 4.2, значення критерію згоди приведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Значення інформаційного критерію згоди

Закон розподілу	Значення критерію згоди	Критичне значення
Релея	1,25	0,72
Нормальний	0,49	0,45
Експоненціальний	0,17	0,57
Вейбула	0,16	0,55
Generalized Pareto	0,14	0,64

Аналіз результатів розрахунків показує, що гіпотези про розподіл Релея і нормальний розподіл мають бути відкинута. Найменшу дезінформацію вносить прийняття гіпотези про узагальнене розподілення Парето. І це можна було чекати, оскільки форма гістограми експериментальних даних характерна для розподілів з "важкими хвостами" (heavy tails) – цей розподіл, хвіст якого не можна "відрізувати", оскільки не можна нехтувати істотною частиною помилок вимірів.

Про характер розподілу інформаційного критерію згоди (правий графік на рис. 4.2) можна зробити наступні висновки. Розподіл має виражену асиметрію і невеликий позитивний ексцес. Таку картину можуть дати логнормальний розподіл, гама-розподіл, розподіл Вейбула, узагальнений розподіл екстремального значення (Generalized extreme value). Усі ці гіпотези були перевірені за допомогою інформаційного критерію. Результати розрахунків наведені в табл. 4.2. Як бачимо, найкращу апроксимацію розподілу інформаційного критерію забезпечують гама-розподіл і узагальнений розподіл екстремального значення.

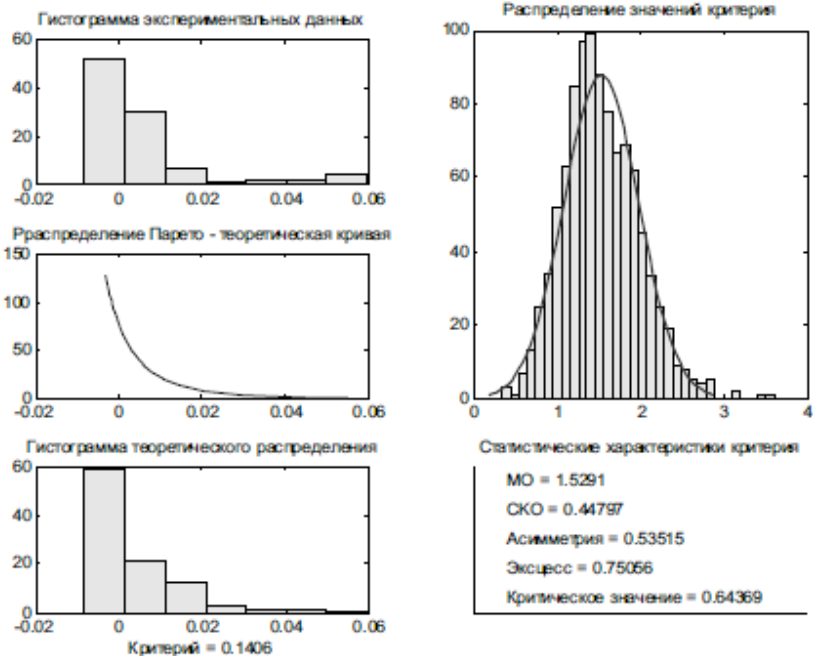


Рисунок 4.2 – Результати дослідження інформаційного критерію згоди

Таблиця 4.2 - Результати перевірки гіпотез про розподіл критерію

Закон розподілу	Значення критерію згоди	Квантиль рівня 0,05
Вейбула	0,0222	0,1331
Логнормальний	0,0196	0,1298
Нормальний	0,0117	0,1302
Гама-розподіл	0,0056	0,1331
Generalized extreme value	0,0033	0,1374

Проте, як показали додаткові дослідження, в області малих значень криві густини цих розподілів мало відрізняються від кривих нормального розподілу, а квантили рівня 0,05 практично однакові для цих розподілів

(див. останню колонку таблиці. 4.2). Це дає можливість використати таблиці значень функції нормального розподілу для визначення критичних значень інформаційного критерію згоди при рівні значущості менше 0,05.

Для використання варіанту гама-розподілу методом статистичного експерименту отримані значення процентилей інформаційного критерія згоди (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Процентилі розподілу статистики інформаційного критерію згоди

%	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
0.	0	0.1533	0.1937	0.2217	0.2371	0.2507	0.2683	0.2756	0.2848	0.2926
1.	0.3004	0.3076	0.3154	0.3247	0.3303	0.3368	0.3404	0.3480	0.3544	0.3628
2.	0.3674	0.3717	0.3768	0.3796	0.3829	0.3874	0.3928	0.3948	0.4008	0.4038
3.	0.4054	0.4114	0.4136	0.4183	0.4220	0.4249	0.4272	0.4304	0.4336	0.4351
4.	0.4367	0.4389	0.4416	0.4444	0.4473	0.4493	0.4508	0.4525	0.4549	0.4576

4.5 Література до розділу 4

1. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement [Text]. – Geneva: ISO, 1993. – 101 p.
2. ДСТУ-Н РМГ 43:2006. Застосування «Руководства по выражению неопределенности измерений» (РМГ 43-2001, IDT) [Текст]. – Надано чинності 2007-01-01. – К. : Держстандарт України, 2005. – 27 с.
3. International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM) [Text]. – JCGM, 2012. – 91 p.
4. Манко, Г. И. Использование информационных характеристик для оценки неопределенности измерений [Текст] / Г. И. Манко, Н. С. Шевчук // Системы обработки информации. – Харьков. – 2008. – № 8. – С. 82–84.
5. Манко, Г. И. Методы оценки информационной неопределенности средств измерений [Текст] / Г. И. Манко, Н. С. Шевчук, Н. . Минакова, Е. В. Лещенко // Системы обработки информации. –

Харьков. – 2009. – № 3. – С. 46–49.

6. Алтунин, А. Е. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях : Монография [Текст] / А. Е. Алтунин, М. В. Семухин – Тюмень : Издательство Тюменского государственного университета, 2000. – 352 с.

7. Электрические системы. Кибернетика электрических систем [Текст] : учеб. пос. для электроэнерг. вузов / Под ред. В. А. Веникова. – М. : Высш. школа, 1974. – 328 с.

8. Горский, Ю. М. Информационные аспекты управления и моделирования [Текст] / Ю. М. Горский. – М. : Наука, 1978. – 223 с.

9. Манко, Г. И. Использование концепции неопределенности в задачах анализа и синтеза АСУ ТП / Г. И. Манко, А. И. Карнин [Текст] // Системы обработки информации. – Харьков. – 2013. – № 2 (109). – С. 67–71

10. Бонгард, М. М. Проблемы узнавания [Текст] / М. М. Бонгард. – М. : Наука, 1967. – 320 с.

11. Рузинов, Л. П. Статистические методы оптимизации химических процессов [Текст] / Л. П. Рузинов. – М. : Химия, 1972. – 200 с.

12. Бородюк, В. П. Статистическое описание промышленных объектов [Текст] / В. П. Бородюк, Э. К. Лецкий. – М. : Энергия, 1971. – 112 с.

13. Федоров, В. В. Теория оптимального эксперимента [Текст] / В. В. Федоров. М. : Наука, 1971. – 312 с.

14. Мальцев, Н. Н. Информационная оценка адекватности математических описаний технологических процессов [Текст] / Н. Н. Мальцев, Г. И. Манко // Вопросы химии и химической технологии. – Харьков : Вища школа, 1977. – Вып. 47. – С. 140–143.

15. Кафаров, В. В., Информационная оценка точности моделирования химико-технологических процессов [Текст] / В. В. Кафаров, Г. И. Манко, В. П. Мешалкин, В. И. Пинский // Автоматика и телемеханика. – 1980. – № 1. – С. 170–182.

16. Эшби, У. Р. Введение в кибернетику [Текст] / У. Р. Эшби. – М. : Изд-во иностр. лит., 1959. – 432 с.

17. Кочубиевский, И. Д. Введение меры разнообразия процессов

управления [Текст] / И. Д. Кочубиевский, Е. В. Король, Е. К. Попова // Информационные методы в системах управления, измерения и контроля : сб. трудов. – Владивосток : Изд-во Дальневосточного центр, бюро техн. информ., 1968. – С. 59–71.

18. Петров, Б. П. Информационные аспекты управления технологическими процессами [Текст] / Б. П. Петров, И. Д. Кочубиевский, Г. М. Уланов // Техническая кибернетика. – 1967. – № 4. – С. 3–5,

19. Пугачев, В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического контроля [Текст] / В. С. Пугачев. – М.: Физматгиз, 1960. – 883 с.

20. Habib, M. G. Chi-squared goodness-of-fit tests for randomly censored data [Text] / M. G. Habib, D. R. Thomas // The Annals of Statistics. – 1986. – Vol. 14. – Pp. 759–765.

21. Юл, Дж. Э. Теория статистики [Текст] / Дж. Э. Юл, М. Кендэл. – М. : Госстатиздат, 1960. – 780 с.

22. Kolmogoroff, A. N. Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione [Text] / A. N. Kolmogoroff // Giornale dell' Istituto Italiano degli Attuari. – 1933. – Vol. 4. – № 1. – Pp. 83–91.

23. Лемешко, Б. Ю. Критерии согласия типа хи-квадрат при проверке нормальности [Текст] / Б. Ю. Лемешко // Измерительная техника. – 2015. – № 6. – С. 3–9.

24. Кульбак, С. Теория информации и статистика : пер. с англ. [Текст] / С. Кульбак. – М. : Наука, 1967. – 408 с.

25. Гаскаров, Д. В. Малая выборка [Текст] / Д. В. Гаскаров, В. И. Шаповалов. – М. : Статистика, 1968. – 248 с.

26. Кафаров, В. В. Информационный критерий проверки гипотез о законах распределения характеристик надежности [Текст] / В. В. Кафаров, В. П. Мешалкин, Г. И. Манко // Доклады АН СССР. – 1979. – Т. 9. – № 4. – С. 923–927.

27. Р 50.1.037-2002 Рекомендации по стандартизации. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим : методические рекомендации [Текст]. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2002. – 153 с.

РОЗДІЛ 5. ВИКОРИСТАННЯ КОМП'ЮТЕРНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ УПРАВЛІННЯ

5.1 Імітаційне середовище моделювання об'єктів управління

Імітаційне моделювання припускає створення імітаційних моделей у вигляді комп'ютерних алгоритмів і програм. Алгоритм імітації повинен містити три основні підсистеми: перша імітує дію випадкових процесів на керований об'єкт, друга описує поведінку системи залежно від цих дій, в третій, після або в процесі розрахунку, накопичена інформація піддається статистичній обробці для оцінки шуканих параметрів системи.

Обчислення, пов'язані з реалізацією імітаційних моделей мають специфічні особливості, стимулюючи створення спеціальних мов програмування, що дозволяє виконувати ці обчислення ефективнішим способом. Мови моделювання надають в розпорядження розробників засобу запису моделей систем в зручній і лаконічній формі. Перевагою імітаційних мовних моделей є опис у рамках єдиної моделі самої системи (і окремо кожного елементу) і моделюючого алгоритму, що відбиває процес функціонування системи. В той же час вхідна мова може бути максимально наближена до мови розробника системи управління, що полегшує підготовку даних і користування програмами [1].

Іншим засобом підготовки імітаційних моделей є використання деякої універсальної автоматизованої імітаційної моделі, яка може бути оформлена у вигляді пакету застосовних програм з місцевою операційною системою, що управляє усім процесом моделювання об'єкту на комп'ютері [2].

Комплексне рішення проблеми створення якісних імітаційних моделей забезпечує створення автоматизованої системи імітаційного моделювання. Прикладом подібної системи є автоматизована система дослідження алгоритмів управління АСДАУ [3].

На сьогоднішній день ринок програмного забезпечення надає широкий вибір мов моделювання, які мають широкий набір операторів, призначених для опису обчислювальних операцій, процедур ухвалення рішень, дій і взаємодій компонент системи, вони містять ряд спеціальних операторів для планування подій, генерування зовнішніх сигналів,

обробки даних тощо. Проте використання існуючих мов моделювання дозволяє здолати лише частину виникаючих труднощів в області імітації складних систем. Запис моделюючого алгоритму за допомогою будь-якого з операторів спирається на представлення процесу функціонування системи в деякому спеціальному виді, наприклад, у вигляді послідовності подій, впорядкованих відповідно до характерних для цієї системи закономірностей змін станів в часі. Для порівняно простих систем таке представлення можна побудувати вручну. Коли ж модельований об'єкт формалізується як ієрархічна багаторівнева структура з елементів, які самі є досить складними системами, таке представлення при збільшенні складності системи усе менш доступно і, кінець кінцем, виходить за межі можливостей людини. Навіть для системи середньої складності підготовка імітаційних моделей за допомогою існуючих мов моделювання вимагає немало часу і сил, особливо на відладку отримуваних таким чином програм, які можуть виявитися далеко не оптимальними з точки зору реалізації їх на обчислювальному пристрої.

У рамках існуючих мов моделювання формалізація об'єктів спирається на математичні схеми певного класу. Коли йдеться про об'єкти великої складності, до яких відносяться технологічні системи, вимагається охопити системи, математичні частини яких описуються різними математичними схемами. В цьому випадку використання якої-небудь однієї мови моделювання може привести до втрати точності опису різних об'єктів або ускладнення програм. До того ж, застосування мов вимагає від користувачів спеціальних знань і практичних навичок.

Модульний принцип побудови автоматизованої імітаційної моделі знімає обмеження по складності, які неминуче виникають при спробі представити процес функціонування системи в цілому як послідовність взаємозв'язаних систем подій для запису його на мові імітаційного моделювання. Кількість і об'єм програмних модулів визначається лише числом операцій, необхідних для реалізації моделі на обчислювальному пристрої. Такий підхід дозволяє створювати імітаційні моделі на мовах високого рівня, таких як C або Java, що дає можливість програмувати складні математичні операції, які неможливо або важко здійснити звичайними засобами мов імітаційного

моделювання. Проте, для створення автоматизованої імітаційної моделі потрібні програмісти високої кваліфікації, зазвичай не працюючі в проектних організаціях, тому переваги автоматизованої імітаційної моделі можуть використати ті, для кого вона створена, тобто для дослідження конкретної проекрованої системи. Інші користувачі повинні створювати свої пакети застосовних програм, які мають бути сумісними з початковою імітаційною системою.

Загалом, можна сказати, що переваги будь-якої системи імітаційного моделювання можуть бути оцінені по множині критеріїв, і якій системі віддати перевагу, залежить від користувача, що вирішує в кожному випадку окрему конкретну задачу.

У основу проекрованої АСДАУ авторами закладений принцип компонентно-орієнтованої технології, використовуваної в сучасній інженерії програмного забезпечення.

Компонентно-орієнтований підхід до проектування і реалізації складних програмних систем є розвитком об'єктно-орієнтованого підходу.

Якщо об'єкт є конструкцією мови програмування, наприклад екземпляр деякого класу, який може скільки завгодно раз бути створений і знищений програмою, що управляє, то компонент є незалежним модулем програмного коду, призначеним для повторного використання. Окрім цього, компоненти можуть містити свої класи і можуть бути написані на різних, найбільш відповідних характеру завдання мовах програмування, наприклад, символну обробку інформації зручно реалізувати на мовах функціонального програмування (LISP), обчислення раціонально реалізувати за допомогою імперативних мов програмування (C), а формалізацію структури предметної області природно реалізувати на об'єктно-орієнтованих мовах (C++).

Компонентом є довільний і абстрактний елемент структури системи, певним чином виділений серед оточення, вирішальний деякі підзадачі у рамках загальних завдань системи і взаємодіючий з оточенням через певний інтерфейс. Такий компонент може бути незалежно доданий або видалений з системи незалежним користувачем.

Компонентно-орієнтований підхід до створення складних програмних продуктів істотно полегшує створення і взаємодію

програмних компонент в розподіленому середовищі проектування і реалізації. Стандартизується зберігання і повторне використання компонент програмного проекту в умовах розподіленого мережевого середовища обчислень, де користувачі взаємодіють у рамках дослідницького проекту.

Компонентно-орієнтована декомпозиція системи імітаційного моделювання (СІМ) визначає підсистеми, які можна по-різному комбінувати і організувати.

Однією з цілей декомпозиції програми на компоненти є можливість незалежної розробки і тестування, а також можливість для дослідника проєктованих АСК ТП розробляти і підключати до АСДАУ об'єкти дослідження.

В результаті компонентно-орієнтованої декомпозиції СІМ виділені чотири компонентні моделі:

- а) модель імітації випадкових процесів;
- б) модель імітації поведінки системи управління;
- в) підсистема збирання і обробки статистичних даних;
- г) інформаційне поле.

Тут центральною ідеєю проектування СІМ являється створення незалежного в програмному відношенні керованого інформаційного поля, статичні і динамічні властивості якого визначаються відповідно до вимог до системи дослідження і досліджуваного процесу управління.

Кожна точка інформаційного поля є посиланням на область оперативної пам'яті обчислювального пристрою, в якій міститься запис властивостей певного компонента проєктованої системи. Наприклад, точка інформаційного поля у момент формування подій може бути сумою корисного сигналу і сигналу перешкоди деякого вимірювального каналу. Корисний сигнал формується алгоритмами імітації поведінки системи управління, на підставі моделі алгоритму управління, і може характеризувати вхідні, внутрішні і вихідні змінні елементів проєктованої системи управління. Алгоритми імітації випадкових процесів формують сигнали завади.

Компонентна модель інформаційного поля є системою управління базами даних.

Організація СІМ віддзеркалює модель реального процесу. Така модель включає три компоненти, які називаються модельним станом, функцією модифікації станів і функцією прогнозу.

Модельний стан забезпечується компонентною моделлю інформаційного поля. Воно містить члени-дані, що представляють повний опис реального процесу в кожен момент часів, тобто простір станів реального процесу. Формування випадкових складових для певних членів-даних здійснюється компонентною моделлю імітації випадкових процесів.

Функції модифікації станів і прогнозу забезпечуються компонентною моделлю імітації поведінки системи. Функція модифікації станів здійснює збір і первинну обробку інформації, що надходить по вимірювальних каналах, а також інформації, що надходить від оператора. Функція модифікації станів здійснює перехід від одного модельного стану до іншого. Функція прогнозу, за умови, що вона має справу з точно заданим модельним станом, формує дії, що управляють, по математичних залежностях.

Самостійну, не пов'язану з імітаційною моделлю, але в той же час важливу для функціонування СІМ роль грає узагальнений план. Він визначає послідовність станів, через які повинен проходити досліджуваний процес. Узагальнений план може автоматично генеруватися програмними засобами на основі комплексу абстрактних цілей, які ставлять розробники системи управління.

АСДАУ об'єднує в інформаційну підсистему компонентні моделі імітації випадкових процесів і інформаційного поля. Вона є середовищем впровадження компонентів-об'єктів дослідження: об'єктів управління, об'єктів, що управляють, систем управління по математичних залежностях, типових об'єктно-орієнтованих модулів (що реалізують функції, спрямовані на досягнення однієї з часткових цілей управління).

Компоненти, що розробляються, повинні задовольняти трьом основним вимогам.

Перше з них – це вимога до структури об'єкту дослідження, зв'язок компонентів бази даних за допомогою ключового механізму BDE (Borland Database Engine), що є програмним прошарком між застосовною

програмою і базою даних.

Друга вимога до об'єкту дослідження – забезпечення структури бази даних, що описує інформаційне поле по формату LDSource DBFields. Розроблений авторами формат LDSource DBFields описи інформаційного поля спільно з механізмом BDE забезпечує і визначає інтерфейс між АСДАУ і досліджуваним компонентом, що дозволяє контролювати інформаційні потоки і управляти ними.

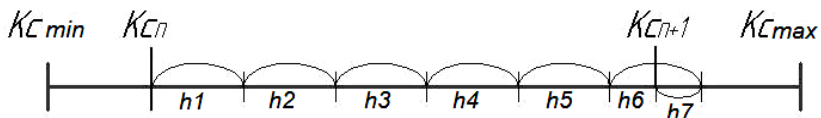
Третя основна вимога до компонента – його ергономічні властивості: відсутність надмірності; простота користування; наочність; наявність допомоги і документації на об'єкт дослідження.

АСДАУ може бути використана там, де вимагається підвищити якість проектів, досліджуючи компоненти систем в реальному режимі часу і користуючись усіма перевагами імітаційного середовища моделювання інформаційних потоків, побудованого за компонентним принципом.

5.2 Комбінований ітераційно-нейромережевий алгоритм ідентифікації об'єктів управління

Математичні моделі (ММ), які використовуються в системах управління, можна розділити на дві групи [4]. Перша – аналітичні моделі, засновані на теоретичному аналізі фізичних і хімічних процесів, що протікають в досліджуваному об'єкт. Друга – емпіричні моделі, що розглядають ХТП у вигляді «чорного ящика» і побудовані на основі аналізу вхідної і вихідної інформації конкретних об'єктів управління.

Моделі першої групи через свою складність вимагають значних часових витрат на етапі ідентифікації. Уточнення усіх коефіцієнтів налаштування моделі займає тривалий час, адже в процесі пошуку з використанням класичних ітераційних методів при пошуку кожного коефіцієнта доводиться багаторазово, на кожному кроці пошукового алгоритму прораховувати математичну модель процесу, щоб з'ясувати, чи досягнуте шукане значення (рис. 5.1).



$K_{сmin}$, $K_{сmax}$ – діапазон можливих значень коефіцієнта налаштування;

$K_{сn}$ – відоме значення коефіцієнта налаштування;

$K_{сn+1}$ – шукане значення коефіцієнта налаштування;

$h1...h7$ – кроки ітераційного алгоритму пошуку коефіцієнта налаштування, величина кроку $h7 = h6/2$

Рисунок 5.1 – Ідентифікація ММ методом послідовних наближень зі зміною кроку і напрямку пошуку

У результаті час, що витрачається на процедуру ідентифікації, погано піддається прогнозуванню, що не дозволяє ефективно використовувати подібні моделі в сучасних АСК ТП, що реалізують режими реального і квазіреального часу на різних рівнях системи і висувають високі вимоги до оперативності і якості управління.

Моделі другої групи відрізняються низькою з'ясовністю отриманих результатів і не враховують тонкощів реакцій, що протікають в модельованому об'єкті, а тому швидко втрачають адекватність при значній зміні вхідних координат процесу і вимагають постійної поточної ідентифікації для їх адаптації.

Застосування штучних нейронних мереж (НМ) на етапі ідентифікації частково вирішує цю проблему і дозволяє визначати коефіцієнти налаштування практично миттєво за рахунок апроксимації інформації про раніше знайдені коефіцієнти моделі, проте також має ряд істотних недоліків.

НМ, що враховує усі параметри, що впливають на адекватність математичної моделі, виявляється надмірно складною і вимагає значних часових витрат на формування і коригування адекватної повчальної вибірки. При значній зміні параметрів модельованого процесу, таких, як зміна характеристик початкової сировини, регенерація або заміна каталізатора, чищення апаратів, фільтрів і так далі, вибірка значень, по якій проводилося навчання НМ, перестає бути актуальною і розрахунок

коефіцієнтів налаштування по НМ стає неможливим, або здійснюється зі значною погрішністю. Підготовка нової повчальної вибірки і перенавчання нейронної мережі знову жє займає тривалий час. Спрощення структури НМ, використовуваної для ідентифікації, також веде до зниження точності визначення коефіцієнтів налаштування і, як наслідок, до зниження адекватності моделі, що ідентифікується [5].

Виникає задача розробки комбінованого інтелектуального алгоритму ідентифікації математичних моделей ХТП, що поєднує класичний ітераційний алгоритм і нейронну мережу для мінімізації часу пошуку коефіцієнтів налаштування. При цьому НМ, що має спрощену структуру і досить проста в навчанні, використовується для визначення наближеного значення коефіцієнта налаштування математичної моделі, а ітераційний алгоритм – для подальшого пошуку коефіцієнта налаштування із заданою точністю і значно меншою кількістю кроків (рис. 5.2).

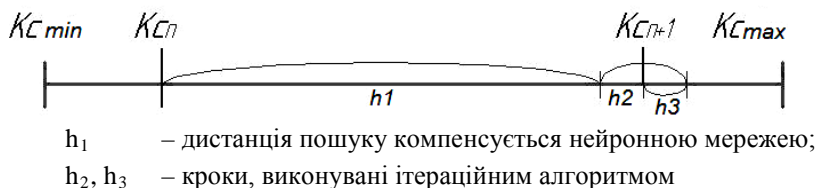


Рисунок 5.2 – Ітераційно-нейромережева ідентифікація математичної моделі

В процесі роботи алгоритму ідентифікації база даних, що містить інформацію про знайдені у минулому коефіцієнти налаштування, безперервно росте. Відповідно безперервно збільшується кількість прикладів для навчання нейронної мережі, а значить і точність визначення коефіцієнтів налаштування. Якщо погрішність визначення нейронною мережею коефіцієнтів налаштування сумірна з погрішністю використовуваних ітераційних алгоритмів, розрахунок коефіцієнтів налаштування математичної моделі може здійснюватися тільки за допомогою нейронної мережі і практично миттєво.

Узагальнений алгоритм ітераційно-нейромережевої ідентифікації математичних моделей ХТП представлений на рис. 5.3.

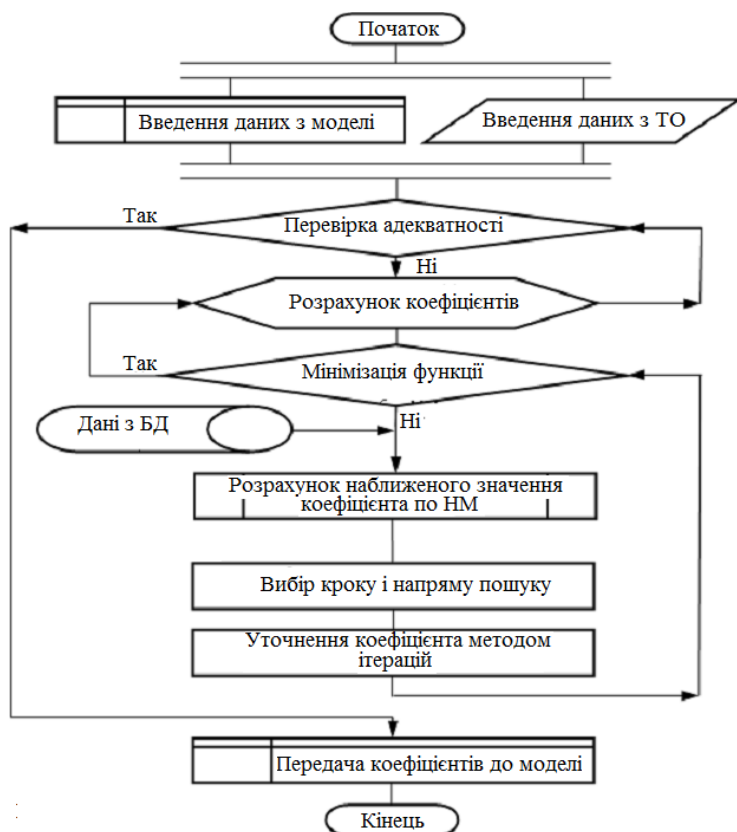


Рисунок 5.3 – Узагальнений алгоритм ітераційно-нейромережевої ідентифікації математичних моделей ХТП

На вхід алгоритму ідентифікації надходять експериментальні дані з технологічного об'єкту і ці ж дані, розраховані по математичній моделі. Перевірка адекватності моделі здійснюється шляхом аналізу функції помилок моделі. Якщо ідентифікація потрібна, починається циклічне уточнення коефіцієнтів налаштування K_1, \dots, K_n , починаючи з останнього, до тих пір, поки не виконається умова мінімуму функції помилок. Для мінімізації кількості кроків пошукового алгоритму, стартове наближене значення коефіцієнтів налаштування розраховується по НМ.

Подальше уточнення значення коефіцієнтів налаштування здійснюється ітераційним методом, зі зміною кроку і напрямку пошуку.

Перевірка ефективності ітераційно-нейромережевої ідентифікації математичних моделей була виконана за допомогою модифікованої кінетичної моделі трьохреакторного блоку установки каталітичного риформінгу Л35-11/300. Модель є системою з трьох послідовно сполучених моделей окремих реакторів з трьома індивідуальними коефіцієнтами налаштування [6].

Нейромережева частина алгоритму ідентифікації була реалізована на базі нейронної мережі, що навчалась за принципом зворотного поширення помилки у вигляді тришарового перцептрона з одним прихованим шаром (рис. 5.4).

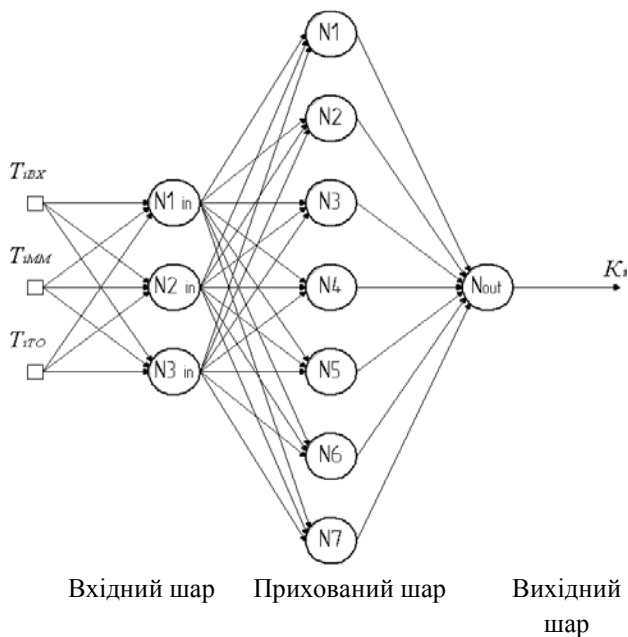
Оптимальна кількість нейронів в прихованому шарі визначалася експериментально і є рівною семи. Збільшення кількості нейронів не давало помітного підвищення точності, але значно збільшувало обсяг даних, необхідних для навчання мережі. Як активаційна функція використовувався сигмоїд:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}}.$$

Параметр сигмоїда також підбирався експериментально і є рівний 0,92. Ітераційна складова алгоритму реалізована на базі методу порозрядного наближення із зміною кроку і напрямку пошуку.

Час роботи алгоритму ідентифікації значною мірою залежить від апаратних і програмних особливостей комп'ютера, на якому проводяться дослідження. Тому для кількісної оцінки ефективності застосування нейронної мережі використовувався такий параметр, як сумарна кількість ітерацій, здійснена пошуковим алгоритмом при ідентифікації математичної моделі окремого реактора каталітичного риформінгу. Це дозволило визначити, що кількість кроків пошукового ітераційного алгоритму практично лінійно співвідноситься з часом, що витрачається на ідентифікацію математичної моделі.

Для ідентифікації першої моделі використовувався класичний ітераційний алгоритм без НМ. Для другої моделі – розроблений алгоритм ітераційно-нейромережевої ідентифікації.



K_i – коефіцієнт налаштування моделі окремого реактора;
 T_i – чинник моделі, що коригує – перепад температур на вході-виході реактора

Рисунок 5.4 – Структура нейронної мережі, тришаровий перцептрон

Порівняльний аналіз показав, що при використанні НМ сумарна кількість ітерацій, необхідних для пошуку нового значення коефіцієнта налаштування математичної моделі зменшується на 17,34% при 300 повчальних прикладах і на 34,76% при 800 повчальних прикладах для НМ.

Проведена експериментальна перевірка запропонованого комбінованого алгоритму ітераційно-нейромережевої ідентифікації математичних моделей ХТП показала, що застосування нейронної мережі для компенсації кроків пошукового ітераційного алгоритму дозволяє понизити час ідентифікації на 30-70%, зі зростанням повчальної вибірки для НМ ця тенденція зберігається.

5.3 Автоматизація процесів ідентифікації динамічних об'єктів управління

Для ідентифікації динаміки об'єктів управління використовуються як засоби моделювання, що вбудовані у САПР систем управління, наприклад, в системах Factory-Link (U.S.DATA-Co., США), InTouch (Wonderware, США), Genesis (Iconics, США), RealFlex (BJ.Software.Systems, США), Sitex (Jade.Software, Англія), FIX (Intellution, США), Traca-Mode (AdAstra, Росія), IGSS (Seven.Technologie, Данія), Image (Технолінк, Росія), так і математичні пакети загального призначення.

Системи класу MathCAD [7] дозволяють виконувати як обчислення, так і аналітичні (символьні) перетворення, мають зручний математико-орієнтований інтерфейс і засоби графіки.

У більшому степені можливості автоматизації процесів створення моделей реалізовані у системі технічних розрахунків MATLAB. Ця система включає численну групу пакетів програм (toolboxes), які реалізують спеціалізовані методи різноманітних обчислень.

Пакет System Identification [8] містить засоби для створення математичних моделей динамічних систем на основі спостережуваних вхідних і вихідних даних. Методи ідентифікації, що входять в пакет, застосовуються для вирішення широкого класу задач, від проектування систем управління та обробки сигналів до аналізу часових рядів і вібрації.

Пакет підтримує всі традиційні структури моделей, включаючи авторегресії, структуру Бокса-Дженкінса та ін. Він підтримує лінійні моделі простору станів, які можуть бути визначені як у дискретній, так і в безперервній формі.

Система COMSOL [9] – потужне інтерактивне середовище для моделювання і вирішення наукових і технічних проблем, заснованих на диференціальних рівняннях в частинних похідних (PDE).

Основна математична структура, з якою працює COMSOL – система диференціальних рівнянь в приватних похідних. У COMSOL Ви можете представляти системи PDE трьома способами: в коефіцієнтній формі (для лінійних або майже лінійних задач), в генеральній формі, придатної для нелінійних моделей або в ослабленій проекційній формі –

для моделей з PDE на границях, ребрах, точках або для моделей, які використовують члени зі змішаними похідними за часом і по просторовим координатам. Можливе створення стаціонарних (не залежних від часу) або нестаціонарних (залежних від часу), а також лінійних або нелінійних моделей.

Maple – програмний пакет, система комп'ютерної алгебри. Створено в компанії Waterloo Maple Inc., яка заснована в 1984 році і випустила ряд програмних продуктів, орієнтованих на складні математичні обчислення, візуалізацію даних та моделювання [10]. Система Maple призначена для символічних обчислень, хоча має ряд засобів і для чисельного розв'язування диференціальних рівнянь і знаходження інтегралів. Має розвинені графічні засоби, власну мову програмування, частково подібну до Паскаля.

Засоби, що надаються цими і рядом інших математичних пакетів, зручні, для виконання математичних перетворень та обчислень в цих пакетах існують готові стандартні функції та графічні інтерфейси. Проте різноманітність задач, які виникають при дослідженні і застосуванні моделей, значно ширше за можливості будь-якого пакета.

У практиці проектування систем автоматичного регулювання часто виникає задача побудови достатньо простої і в той же час адекватної математичної моделі динаміки об'єкта управління. Для рішення такої задачі звичайно виконується експериментальне дослідження динаміки об'єкта управління з побудовою розгінної характеристики. При цьому вхід об'єкта піддають ступінчастому впливу. Визначають чинник, який впливає на регульовану величину, наприклад, температуру можна регулювати зміною подачі граючої пари. Стрибком змінюють вхідну дію на 10–20 відсотків ходу виконавчого механізму і спостерігають за зміною регульованої величини. Далі треба створити математичну модель, перехідний процес у якій при ступінчастій зміні вхідної величини якнайкраще співпадає з експериментальною кривою розгону. Найчастіше використовується модель у вигляді передатної функції n -го порядку

$$W(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$$

або матрична модель у просторі станів наступного вигляду:

$$\dot{\mathbf{X}}=\mathbf{A}\mathbf{X}+\mathbf{B}\mathbf{U};$$

$$\mathbf{Y}=\mathbf{C}\mathbf{X}+\mathbf{D}\mathbf{U},$$

де \mathbf{X} – вектор змінних стану об'єкта;

\mathbf{U} – вектор входів;

\mathbf{Y} – вектор виходів;

\mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} – матриці коефіцієнтів.

Процес ідентифікації складається у виборі порядку моделі, а також у визначенні значень коефіцієнтів a_i та b_j або матриць коефіцієнтів \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} та \mathbf{D} .

Виникає задача, по-перше, максимально автоматизувати цей процес, по-друге, надати можливість корекції коефіцієнтів для отримання перехідного процесу моделі, найбільш близького до даних експерименту, по-третє, забезпечити порівняльну оцінку адекватності моделей для вибору кращої з них. Метою є створення програмного додатку, що дозволяє в інтерактивному режимі з максимальним ступенем автоматизації виконувати ідентифікацію динамічних об'єктів. При цьому процеси створення моделі та оцінка її адекватності мають проводитись з використанням різних підходів.

У середовищі MATLAB нами створений Graphical User Interface (GUI), який реалізує поставлену задачу. Вигляд GUI показаний на рис. 4.3.

Для підвищення точності моделювання проводяться кілька експериментальних досліджень динамічного об'єкта. Результати досліджень заносяться у текстовий файл. Кожен рядок файлу містить відлік часу і ряд значень регульованої величини, отриманих при різних значеннях вхідних тестових сигналів. Всі числа у рядку розділяються комами. У першому рядку додатково указуються значення вхідних сигналів.

По натисненні кнопки «Ввести» з текстового файлу, ім'я якого вказане у відповідному полі, вводяться дані досліджень об'єкта. У поле для графіку «Крива розгону» виводяться стільки кривих, скільки досліджень проведено. Натисненням кнопки «Усереднення» здійснюється усереднення даних усіх досліджень.

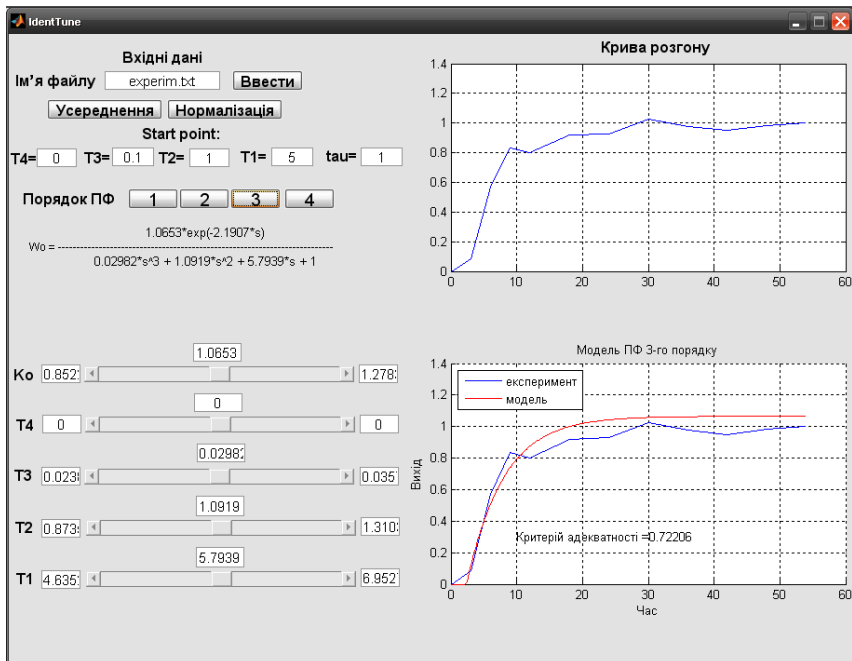


Рисунок 5.5 – Вигляд вікна GUI

За допомогою кнопки «Нормалізація» усереднений графік переноситься у початок координат і нормується діленням на коефіцієнт передачі об'єкта. Далі можна виконати апроксимацію кривої розгону передатною функцією (ПФ) першого, другого, третього або четвертого порядку натисненням на відповідну кнопку, позначену цифрою 1, 2, 3 або 4. Модель будується у вигляді передатної функції наступного вигляду:

$$W(s) = \frac{K_o}{T_4 s^4 + T_3 s^3 + T_2 s^2 + T_1 s + 1} e^{-\tau s},$$

де K_o – коефіцієнт передачі;
 T_4, T_3, T_2, T_1 – сталі часу;
 τ – час чистого запізнення.

Апроксимація здійснюється використанням функції мінімізації з обмеженнями `fmincon`. Для прикладу, апроксимація ПФ третього порядку здійснюється командами:

```

fmincon('err3',[T3,T2,T1,tau],[],[],[],[],[lb,ub],[],options)
% Мінімізується цільова функція err3:
function error = err3(x)
% Помилка апроксимації для ПФ 3-го порядку
global t temp K Wo t1 temp1
Wo = tf(K, [x(1),x(2),x(3),1]); Wo.InputDelay = x(4);
temp1=temp;
for i=2:length(t)
    y= step(Wo,t(i));
    temp1(i)= y(length(y));
end
error = sum((temp-temp1).^2);
end

```

Успіх розв'язання задачі мінімізації залежить від вдалого вибору початкових значень шуканих параметрів. Ці значення треба попередньо ввести у відповідні поля під заголовком «Start point».

Розрахунок інформаційного критерію адекватності (11) виконується за допомогою наступних команд:

```

pio=abs(diff(temp));% інтенсивність зміни об'єкта
temp3=temp;
temp3(1)=0;
for i=2:length(t)
    y= step(Wo,t(i));
    temp3(i)= y(length(y));
end
pim=abs(diff(temp3)); % інтенсивність зміни моделі
% Обчислюється інформаційний критерій
A = sum(pio.*log2(pio./pim)); % чисельник
B = sum(pio) ; % знаменник
adeq = A/B

```

Результатами розрахунку є параметри передатної функції K_0 , T_4 , T_3 , T_2 , T_1 , τ . Пересуванням повзунків слайдерів можна змінювати значення параметрів, тобто коректувати модель, домагаючись бажаного виду кривої відгуку і контролюючи значення критерію адекватності.

Розроблений інструментальний комп'ютерний засіб автоматизації розв'язування задач ідентифікації динамічних об'єктів управління з використанням інформаційного критерію адекватності забезпечує побудову валідних моделей з мінімальними витратами часу.

5.4 Література до розділу 5

1. Таха Х.А. Введение в исследование операций. 7-е издание. Пер. с англ. [Текст] / Х.А. Таха. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2007. – 912 с.
2. Бусленко В.Н. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем [Текст] / В. Н. Бусленко. – М. : Наука, 1977. – 240 с.
3. Тришкин, В.Я. Автоматизированная система исследования алгоритмов управления [Текст] / В.Я. Тришкин, О.П. Мысов, Д.А. Лосихин // Электротехнические и компьютерные системы. – 2012. – № 06 (82). – С. 255–260.
4. Быков, В. И. Моделирование и оптимизация химико-технологических процессов [Текст] / В. И. Быков, В. М. Журавлев. – Красноярск : ИПЦ КГТУ, 2002. – 298 с.
5. Левчук, И. Л. Идентификация математической модели процесса каталитического риформинга на базе нейросетевых технологий [Текст] / И. Л. Левчук // Математичне моделювання. – 2012. – № 2. – С. 77–80.
6. Левчук, И. Л. Разработка математической модели процесса каталитического риформинга в каскаде реакторов [Текст] / И. Л. Левчук // Збірник наукових праць НГУ. – 2012. – № 39. – С. 122–127.
7. Дубовой, В. М. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів і систем керування [Текст] : навч. посіб / В. М. Дубовой. – Вінниця : ВНТУ, 2012 – 308 с.
8. Дьяконов, В.П. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник [Текст] / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. – СПб. : Питер, 2001. – 221 с.
9. Огородников, А. С. Моделирование в среде MATLAB – COMSOL 3.5a [Текст] : учеб. пособие / А. С. Огородников. – Томск : ИТПУ, 2012. – 104 с.
10. Резник, В. Г. Современные компьютерные технологии : учеб. пособие [Текст] / В. Г. Резник. – Томск, ТУСУР, 2012. – 64 с.

ВИСНОВКИ

В результаті досліджень проблем ідентифікації об'єктів управління отримані наступні результати.

1. Виконаний аналіз наукових публікацій, присвячених теорії і практиці ідентифікації об'єктів управління. Досліджені питання класифікації методів ідентифікації, розглянуті задачі структурної, параметричної і непараметричної ідентифікації. Окрема увага приділена питанням оцінки якості математичного моделювання взагалі і адекватності математичних моделей зокрема.

2. Розроблені методи і алгоритми адаптивної ідентифікації багатовимірних стаціонарних і квазістаціонарних об'єктів АСК ТП, що спираються на різні аспекти концепції симетрії. Застосування принципів симетрії до паралельного простору дало можливість сконструювати цільові функції, що відносяться до принципово нового класу цільових функцій -- симетричних координатно-параметричних. Це дозволило з'єднати розроблені симетричні алгоритми налаштування параметрів адаптивних моделей з організацією структур цих моделей, що реалізовується відповідно до принципу узагальненого входу.

3. Досліджені особливості ідентифікації особливого класу об'єктів управління – процесів хімічної технології. Розроблені математичні співвідношення і алгоритми для моделювання ряду процесів і апаратів хімічних виробництв. Практичне використання результатів моделювання дає можливість побудови вискоелективних АСК ТП.

4. Розглянуті питання використання інформаційного підходу в задачах ідентифікації. Обґрунтована доцільність впровадження концепції невизначеності (Uncertainty Approach – UA) у практику оцінювання якості моделювання і управління. Запропоновані інформаційні критерії адекватності детермінованих і стохастичних моделей об'єктів управління.

5. Наведені приклади алгоритмів і програмних засобів, призначених для автоматизації процесів ідентифікації об'єктів управління.

Слід зазначити, що досліджені нами питання складають лише частину неозорого простору проблем ідентифікації об'єктів управління. У подальших дослідженнях повинні бути розглянуті такі актуальні теми, як ідентифікація одиничних подій або таких, що рідко повторюються, моделювання динаміки людинно-технічних комплексів, прогнозна ідентифікація об'єктів, що розвиваються, методи інтелектуалізації процесів ідентифікації та інші.

Наукове видання

Левчук Ігор Леонідович
Манко Геннадій Іванович
Тришкін Владислав Якович
Корсун Валерій Іванович

ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ УПРАВЛІННЯ

Монографія

Авторська редакція

Оригінал-макет виготовлений кафедрою комп'ютерно-інтегрованих технологій та автоматизації ДВНЗ УДХТУ

Підписано до друку 16.10.2019. Формат 60×84/16. Папір ксерокс.

Умов. друк. арк. 9,45. Тираж 300 прим. Зам. № 75

Друк різнограф. Гарнітура Times New Roman

Редакційно-видавничий відділ ДВНЗ УДХТУ

пр. Гагаріна 8, м. Дніпро, 49005

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5026 від 16.12.2015 р.