ЧАСТИНА 2. ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТІВ МОДЕЛЮВАННЯ

У попередніх розділах було розглянуто основні види моделей та особливості їх подання при комп'ютерному моделюванні. Різноманітність моделей висуває проблему вибору виду та побудови такої моделі, яка є адекватною конкретному об'єкту та системі і зручною з огляду на задачу, для розв'язання якої вона будується. Процес вибору та побудови моделі об'єкта називають його ідентифікацією.

5 ПОНЯТТЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ

На початку процесу побудови моделі необхідно відповісти на декілька питань, які визначають подальший процес моделювання:

1. Що є об'єктом моделювання?
2. Для чого буде використовуватись модель?
3. Які властивості об'єкта повинна відображати модель?
4. За допомогою яких засобів буде здійснюватися отримання результатів моделювання?
5. Які вимоги висуваються до основних характеристик моделі?

Побудова моделі складається з двох етапів: визначення узагальненої моделі всіх об'єктів заданого класу та визначення її характеристик для конкретного об'єкта на основі різноманітної інформації. Останній етап є *ідентифікацією*, тобто встановленням взаємно однозначної відповідності між об'єктом і його моделлю.

Задача ідентифікації формулюється таким чином: за результатами спостережень за вхідними впливами і вихідними величинами об'єкта побудувати оптимальну, в деякому сенсі, її модель.

Іншими словами, якщо об'єкт описується деяким оператором F_t, апріорі невідомим, то, маючи виміряні значення характеристик входу і виходу Θ_Y, Θ_X, необхідно побудувати оцінку F_t оператора об'єкта, оптимальну в сенсі деякого критерію. Отже, задачі ідентифікації і використання моделі є взаємно оберненими:

– задача використання моделі – визначити характеристики реакції об'єкта залежно від характеристик вхідних впливів

$$\Theta_Y = F[\Theta_X];$$

– задача ідентифікації – визначити вид та характеристики оператора перетворення на основі відомих Θ_Y, Θ_X

$$F = A(\Theta_X, \Theta_Y),$$

де A – алгоритм ідентифікації.

Може виникнути питання – навіщо здійснювати дві обернених операції, якщо X і Y відомі? Але при ідентифікації відома реакція Y лише на деякі впливи X, а отримана в результаті модель дає можливість визначити реакцію Y майже на будь-які впливи X (якщо модель адекватна!). Прикладом є побудова лінійної статичної характеристики. Для цього достатньо мати дві пари (x_1, y_1), (x_2, y_2) і побудувати пряму за двома точками. Отримана характеристика дасть можливість визначити y для будь-якого $x \in (x_{min}, x_{max})$.

Ідентифікація починається з вибору класу моделі і поступового його звуження на основі експериментальних даних, доки цей клас не буде містити одну модель, яка і буде шуканою моделлю конкретного об'єкта.

Існують два підходи до задачі визначення класу моделі. Перший підхід – аналітичний, складається з аналізу принципів, на яких основана робота досліджуваного об'єкта. В цьому випадку характеристики моделі отримують розрахунком. Другий підхід полягає в проведенні над досліджуваними об'єктами ряду експериментів з наступною математичною обробкою отриманої інформації. Обидва ці підходи не усувають, а взаємно доповнюють один одного. Тільки застосовуючи їх одночасно, вдається отримати прості, але достатньо адекватні математичні моделі.

5.1 Задачі ідентифікації

Успіх ідентифікації об'єкта суттєво залежить від співвідношення двох факторів: об'єму апріорної інформації про структуру об'єкта та об'єму вимірювальної інформації. Ці два види інформації необхідні при синтезі моделі, однак вони відіграють різні ролі. Апріорні відомості допомагають визначити структуру моделі, тобто її вигляд (число входів та виходів, характер зв'язку між ними тощо). Таку процедуру називають ідентифікацію в широкому розумінні, чи *структурною ідентифікацією.* Особливо важливе визначення структури для багатовимірних і багатозв'язних об'єктів. У той же час для локальних об'єктів визначення структури може бути зведене до визначення порядку диференціального рівняння, що описує об'єкт. Крім того, оцінюються вхідні сигнали і збурення, що діють на об'єкт (їхні принципові властивості – регулярність або стохастичність, точки прикладення тощо).

Задачу визначення параметрів моделі на основі спостережень роботи об'єкта при заданій структурі моделі називають ідентифікацією у вузькому розумінні чи *параметричною ідентифікацією*. Наприклад, є деякий об'єкт і відома система рівнянь, яка описує його. Необхідно визначити тільки коефіцієнти рівнянь.

Зв'язок між параметричною і структурною ідентифікаціями для деяких типів моделей показаний у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Характеристики, що підлягають ідентифікації

Тип моделі	Вид моделі	Структурні характеристики	Параметричні характеристики
Функціональні моделі	Модель статики	Вид залежності, кількість аргументів, степінь полінома, область визначення, база знань	Коефіцієнти функціональної залежності, ваги правил, функції належності
	Модель логіки	Логічне рівняння	-
	Модель динаміки (передатна функція)	Степінь чисельника і знаменника	Коефіцієнти при степенях p
	Модель обслуговування	Тип СМО, кількість каналів і фаз, наявність черг	Параметри потоків і обслуговування
	Алгоритмічна модель	Вид алгоритму, структури і типи вхідних і вихідних даних	Значення даних і параметрів алгоритму
Структурні моделі	Зважений граф	Кількість вершин і ребер, матриця суміжності	Ваги ребер
Інформаційні моделі	База даних	Перелік відношень, атрибутів, ключів	Кількість даних, Значення даних
	Інформаційний потік	Структура даних (формат пакета і т. п.)	Кількість даних, швидкість передавання, величина потоку тощо

З поширенням комп'ютеризованих систем і об'єктів все актуальнішою стає задача алгоритмічної ідентифікації. Вона полягає у знаходженні алгоритму функціонування об'єкта на основі аналізу його поведінки. Задача алгоритмічної ідентифікації близька до задачі структурної ідентифікації, оскільки, відповідно до теорії алгоритмів, будь-який алгоритм може бути реалізований у вигляді дискретного автомата.

5.1.1 Структурна ідентифікація

Задача структурної ідентифікації є значно складнішою за задачу параметричної ідентифікації. Передусім це зумовлено математичною некоректністю (тобто неоднозначністю розв'язку) цієї задачі у більшості випадків. Тому при розв'язанні задачі структурної ідентифікації крім об'єктивної експериментальної інформації користуються також суб'єктивними загальнонауковими принципами:

− принцип мінімалізму, відповідно до якого з усіх можливих варіантів структури моделі, які відповідають експериментальним даним, обирають найпростішу (цей принцип ще називають «лезо Оккама»: *«Не слід залучати нові сутності без крайньої на те необхідності»*);

− принцип адекватної складності, за яким складність моделі системи повинна відповідати складності самої системи;

− принцип симетрії і математичної красоти, за яким перевагу віддають моделям, що мають властивості симетрії, формулам, що добре запам'ятовуються, тощо;

− принцип подібності, за яким структуру моделі обирають за аналогією з моделями інших подібних об'єктів.

На першому етапі звичайно з'ясовують, до якого класу належить модель – до класу структурних, функціональних або інформаційних моделей.

На другому етапі уточнюють клас моделі відповідно до видів моделей, розглянутих у підрозділах 2, 3 і 4 цього посібника. Зокрема, для структурних моделей визначають вигляд графу: зважений чи незважений, орієнтований чи неорієнтований тощо. Якщо об'єкти моделювання з однаковою структурою можуть мати різні властивості, то як структурну модель доцільно використовувати зважений граф, якщо однакові – то незважений. Якщо об'єкт моделювання є таким, що може працювати як у прямому, так і у оберненому режимах (впливи подаються на виходи, а стани змінюються на входах), то структурну модель доцільно подавати неорієнтованим графом.

Для функціональних моделей обирають, чи належатиме вона до класу моделей статики, динаміки, обслуговування або алгоритмічних моделей. Очевидно, якщо після зміни вхідних впливів стан системи ще деякий час продовжує змінюватись, то обирають модель динаміки, якщо ні – модель статики. Якщо для запуску певних процесів у системі важливий лише факт появи впливу на її вході і не важлива величина цього впливу, то обирають модель обслуговування. Якщо система працює дискретно, вхідні дані і результати мають складну структуру і зв'язок між ними охоплює складні логічні умови, то обирають алгоритмічну модель.

Для інформаційних моделей на другому етапі структурної ідентифікації на основі аналізу логічних зв'язків між даними обирають тип моделі – реляційна, ієрархічна чи мережна.

В процесі подальшої структурної ідентифікації складних систем може бути здійснена декомпозиція моделі (наприклад, на статичну і динамічну частини, або на лінійну динамічну і цифрову частини), а окремі її частини подані моделями інших типів.

5.1.2 Параметрична ідентифікація

Під параметричною ідентифікацією моделі мається на увазі процес визначення її параметрів $C = (c_1, c_2, \ldots, c_k)$ у процесі нормальної експлуатації об'єкта чи спеціальних експериментів з ним.

Параметрична ідентифікація структурної моделі полягає у визначенні ваг ребер графу. У більшості випадків значення ваг ребер графу є незалежними і для їх отримання необхідно робити вимірювання та/або розрахунки для кожного ребра окремо. Сутність цих вимірювань і розрахунків залежить від змісту, який вкладається у поняття ваги ребра для конкретної моделі. Це може бути вимірювання часу руху від одного пункту (вершини графу) до іншого; відстань між пунктами (вершинами); струм, що тече між вузлами електричного кола, тощо.

Проте необхідно обов'язково перевіряти відповідність отриманих значень ваг ребер певним інтегральним умовам.

Якщо шлях між вершинами характеризується вагою, яка функціонально пов'язана з вагами ребер, і вага шляху відома, то необхідно перевіряти виконання цієї залежності. Наприклад, якщо вагою ребра є відстань між пунктами, то повинна виконуватися умова

$$D_i = \sum_{j=1}^{n_i} d_{ij}\,, \tag{5.1}$$

де d_{ij} – вага j-го ребра на i-му шляху; n_i – кількість ребер на i-му шляху; D_i – загальна довжина i-го шляху.

Для потокових графів повинен виконуватися 1-й закон Кірхгофа для кожного вузла (вершини):

$$\sum_{j=1}^{m_i} v_{ij} = 0\,, \tag{5.2}$$

де v_{ij} – вага j-го ребра (потік) в i-му ребрі; m_i – кількість ребер, інцидентних i-му вузлу.

На жаль, через похибки вимірювань умови (5.1) і (5.2) майже ніколи не виконуються і виникає нев'язка

$$D_i = \sum_{j=1}^{n_i} d_{ij} + \Delta_i \,, \tag{5.3}$$

$$\sum_{j=1}^{m_i} v_{ij} = \Delta_i \,. \tag{5.4}$$

Цю нев'язку слід розподілити по вагах ребер:

$$d_{ij}^* = d_{ij} + \delta_{ij}, \qquad j = 1 \dots n_i \,, \tag{5.5}$$

$$\sum_{j=1}^{n_i} \delta_{ij} = \Delta_i \,. \tag{5.6}$$

Аналогічно для потокових графів:

$$v_{ij}^* = v_{ij} + \delta_{ij}, \qquad j = 1 \dots n_i \,, \tag{5.7}$$

$$\sum_{j=1}^{n_i} \delta_{ij} = \Delta_i \,. \tag{5.8}$$

Задачі (5.5), (5.6) і (5.7), (5.8) мають багато розв'язків, проте у графі звичайно існує багато шляхів (для потокових графів – вузлів), і для кожного повинні виконуватися ці співвідношення. Оскільки одне й те ж ребро може належати різним шляхам (бути інцидентним до різних вузлів) то для розподілу нев'язок необхідно розв'язувати систему рівнянь

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^{n_k} \delta_{1j} = \Delta_1, \\ \dots \\ \sum_{j=1}^{n_k} \delta_{kj} = \Delta_k, \end{cases} \tag{5.9}$$

де k – кількість шляхів у графі.

Аналогічно для потокових графів.

У системі (5.9) кількість рівнянь дуже рідко дорівнює кількості невідомих δ_{ij}, оскільки кількість ребер майже ніколи не дорівнює кількості шляхів (вузлів). Тому для її розв'язання доцільно використовувати метод оцінювання (див. п.12.3), при якому ця задача зводиться до мінімізації критерію

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{n_i} (\delta_{ij})^2} \,. \tag{5.10}$$

Параметрична ідентифікація функціональної моделі полягає у визначенні параметрів функціональних залежностей. Структура моделі при цьому відома (визначена на стадії структурного синтезу – аналітичного чи експериментального): $Y = A(X,U,C)$, оператор A припускається заданим.

Вектор $X = (x_1, x_2, \ldots, x_n)$ вхідних параметрів об'єкта і його математичної моделі може бути розбитий на три підмножини

$$X^{(1)} = (x_1, x_2, \ldots, x_k),$$

$$X^{(2)} = (x_{k+1}, x_{k+2}, \ldots, x_{k+l}),$$

$$X^{(3)} = (x_{k+n+1}, x_{k+n+2}, \ldots, x_{k+n+p}),$$

де $X = X^{(1)} \bigcup X^{(2)} \bigcup X^{(3)}$ і $X^{(1)} \bigcap X^{(2)} = \varnothing$, $X^{(1)} \bigcap X^{(3)} = \varnothing$, $X^{(2)} \bigcap X^{(3)} = \varnothing$.

Підмножина $X^{(1)} = (x_1, x_2, \ldots, x_k)$ утворює сукупність нерегульованих, але виміряних параметрів об'єкта, ця підмножина є вхідним вектором об'єкта (рис. 5.1).

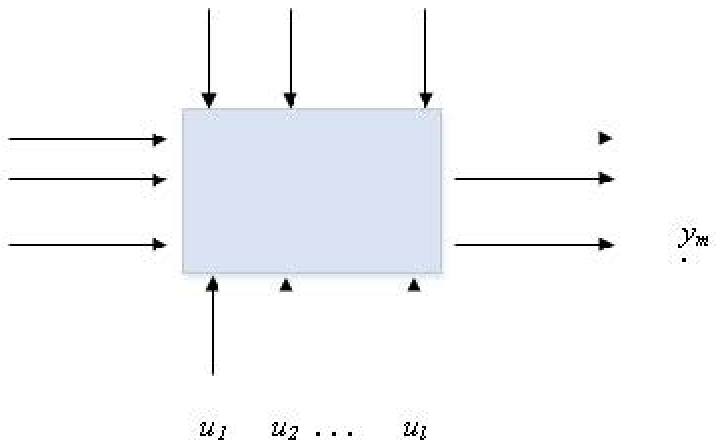

Рисунок 5.1 – Узагальнена модель об'єкта

Підмножина $X^{(2)} = (x_{k+1}, x_{k+2}, \ldots, x_{k+l})$ – сукупність параметрів, які не тільки вимірюються, але й можуть бути змінені певним чином. Позначимо ці параметри $u_1 = x_{k+1}, u_2 = x_{k+2}, \ldots, u_l = x_{k+l}$, а вектор $U = (u_1, u_2, \ldots, u_l)$ назвемо вектором керування.

На будь-який реальний об’єкт діє також група неконтрольованих і некерованих випадкових параметрів $X^{(3)} = (x_{k+l+1}, x_{k+l+2}, \ldots, x_{k+l+p})$, поява яких зумовлена сукупністю випадкових змін в навколишньому середовищі (температура навколишнього середовища, неконтрольований знос апаратури тощо). Цю групу параметрів позначимо через $\Omega = (\omega_1, \omega_2, \ldots, \omega_p)$ і назвемо її вектором збурення.

В деяких випадках неможливо безпосередньо виміряти найбільш інформативні параметри об’єкта. Тоді необхідно вибрати такі вимірювані опосередковані параметри, які б давали можливість з необхідною точністю визначати стан об’єкта.