

РОЗДІЛ I

Ідентифікація і моделювання типових технологічних процесів

1.1 Поняття ідентифікації та фізичної постановки задачі

З давніх пір людство витрачає величезні зусилля на встановлення закономірностей явищ, що відбуваються в природі. Первинним в процесі пізнання завжди є результати спостережень. Вони є відправним пунктом до моделі, до абстрактного мислення, а вже від моделі здійснюється перехід до практичної діяльності. Очевидно, що ця схема пізнання застосовна незалежно від того, чи йде мова про природний або штучний об'єкт. Створення абстрактної моделі звичайно пов'язане з «стисненням» інформації, що міститься в результатах спостережень. Це пояснюється тим, що кожен окремий результат спостережень є випадковим, тому побудова адекватної моделі реального об'єкту може бути здійснене тільки на основі багатократних спостережень. Випадковість кожного результату спостережень пояснюється, з одного боку, принциповою неможливістю врахувати все різноманіття чинників, діючих на даний конкретний об'єкт, яким би простим він ні здавався на перший погляд, і складними взаємозв'язками цих чинників, а з другого боку, недосконалістю природних і штучних середовищ спостереження.

У другій половині ХХ століття значно зросла роль науки про управління у зв'язку зі встановленими аналогіями в процесах управління цілеспрямованою діяльністю людського суспільства, живими організмами і штучними, створеними людиною машинами і механізмами. Появі нових ідей і методів управління сприяли, з одного боку, узагальнення високоефективних принципів теорії автоматичного управління, а з другого боку, збільшені технічні можливості у зв'язку з широким розвитком обчислювальної техніки. У області управління виникла необхідність в нових принципах побудови моделей, формалізації результатів спостережень. У теорії автоматичного управління принципи побудови системи управління розроблялися на основі

заданої моделі. Надалі виявилось, що у багатьох випадках модель, прийнята при проектуванні, істотно відрізняється від реального об'єкту, що значно зменшувало або зводило нанівець ефективність розробленої системи управління. У зв'язку з цим виник один з нових і важливих напрямів в теорії управління, пов'язане з побудовою моделі на основі спостережень, одержаних в умовах функціонування об'єкту по його вхідних і вихідних змінних. Цей напрям відомий в даний час як *ідентифікація систем*. Теорії і методам ідентифікації присвячено велика кількість робіт у вітчизняній і зарубіжній літературі і в цьому напрямі розроблені свої принципи, підходи і методи. Ці підходи знайшли широке застосування в різних областях науки і техніки, і зокрема в біології, медицині, аеронавтиці, економіці.

Задача ідентифікації формулюється таким чином: за наслідками спостережень над вихідними і вхідними змінними системи повинна бути побудована оптимальна в деякому розумінні модель, тобто формалізоване представлення цієї системи. Звідси видно спадкоємність між задачею ідентифікації і вказаною загальною схемою встановлення закономірностей за наслідками спостережень. Задача ідентифікації базується на сучасній теорії управління. Для її вирішення використовуються сучасні ЕОМ. Останні, володіючи великою швидкістю і практично необмеженим об'ємом пам'яті, створюють передумови для отримання, передачі і обробки великих масивів спостережень, які необхідні для побудови адекватних моделей реальних об'єктів.

Залежно від апріорної інформації про об'єкт управління розрізняють задачі ідентифікації у вузькому і широкому значенні. Задача ідентифікації у вузькому значенні полягає в оцінюванні параметрів і стану системи за наслідками спостережень над вхідними і вихідними змінними, одержаними в умовах функціонування об'єкту. При цьому відома структура системи і заданий клас моделей, до якого даний об'єкт відноситься. Апріорна інформація про об'єкт достатньо велика.

Апріорна інформація про об'єкт при ідентифікації в широкому значенні відсутня або дуже незначна, тому доводиться заздалегідь вирішувати велике число додаткових задач. До цих задач відносяться: вибір структури системи і завдання класу моделей, оцінювання ступеня стаціонарності і лінійності об'єкту і діючих змінних, оцінювання ступеня і форми впливу вхідних змінних на вихідні, вибір інформативних змінних і ін. До теперішнього часу накопичений великий досвід рішення задач ідентифікації у вузькому значенні. Методи ж рішення задач ідентифікації в широкому значенні почали розроблятися в останні 15-20 років, і тут результати значно скромніше через трудність задачі.

Технічні процеси в різних областях промисловості мають в своїй суті теплотехнічну основу, тобто якість продукції визначається протіканням теплових процесів. Прагнення до підвищення якості зумовлює необхідність управління і регулювання тепловими процесами. Термообробка виконує значну роль у виробництві будматеріалів. У металургії її тривалість складає 80 – 90 % тривалості всього технологічного циклу. При виробництві сталі, чавуну, прокату ці показники ще вищі, що, по суті, робить термообробку теплотехнічним процесом. Велике значення термообробці повинне приділятися як технологічної операції, яка удосконалює процес структурних перетворень і забезпечує споживацькі властивості нагрівальних виробів. Особливо це видно при випаленні керамічних матеріалів і сушки теплоізоляції.

Термообробка забезпечує додання матеріалу якісно нових властивостей. Тепломасообмінні процеси можуть стати причиною погіршення якості і появи браку, враховуючи важливість і складність процесів, є необхідність їх усестороннього вивчення, яке можливе на базі створених моделей, тобто характеристики тепломасообінних процесів можна вивчати за допомогою досліджень.

1.1 Поняття ідентифікації та фізичної постановки задачі

1.1.1 Ідентифікація технологічного об'єкту дослідження на основі теплової установки

Всі змінні або параметри, що характеризують теплову установку як систему (рис. 1), діляться на вхідні X , H , Z та вихідні Y .

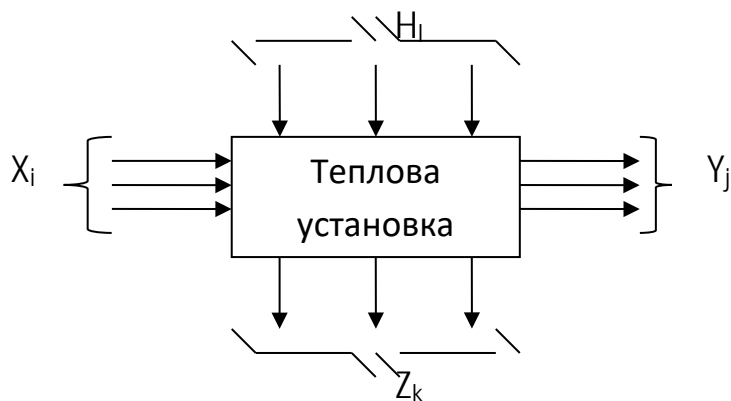


Рис. 1 – Інформаційна схема теплової установки.

На малюнку позначено:

X_i – це контрольовані незалежні властивості початкових матеріалів (густина, в'язкість, температура), тобто такі вхідні змінні, про чисельні значення яких у будь-який момент або дискретні проміжки часу може бути одержана інформація за допомогою приладів або за допомогою якого-небудь методу.

H_l – це контрольовані і регульовані параметри управління, які характеризують стан управляючих дій (витрата газу, співвідношення газ-повітря і т.д.), тобто те, чим можна управляти. Це змінні чисельні значення, які за допомогою системи регулювання можуть бути встановлені на заданому рівні.

Z_k – неконтрольовані і некеровані обурюючі параметри, які мають випадковий характер, змінні по величині, інтенсивності і точкам додатку. Вони не завжди мають явно виражений характер, тобто це змінні, чисельне значення яких не контролюється.

Y_j – це залежні вихідні змінні, які дають якісну характеристику одержуваного матеріалу (кількість вихідних матеріальних потоків і т.д.).

Вихідні змінні Y залежать як від всіх вхідних змінних X, H, Z , так і від режиму процесу, тобто можна виділити, окрім цього, *режимні змінні* (температура печі, кратність і циркуляція контурів і т.д.). Їх чисельні значення залежать від характеру процесу, тому і режимні і вихідні змінні об'єднують в одну групу Y_j .

Проте, часто, особливо в задачах математичного планування експерименту, вхідні і режимні змінні об'єднують в одну загальну *групу чинників*.

Чинникам пред'являють наступні вимоги:

1) *Будь-який чинник* повинен принципово допускати *кількісну оцінку*, його не обов'язково вимірювати. Передбачається лише принципова можливість такого вимірювання. Запах речовин, їх колір, ламкість проб – не можуть бути чинниками, хоча досвідчені технологи можуть по них достатньо точно вести процес.

2) Для кожного чинника повинна бути вказана *область значень*, тобто повинна бути вказане та безліч можливих значень, які може приймати в чисельному виразі даний чинник X_i .

Ці множини звичайно обмежені двома способами:

а) *принципове або абсолютне обмеження* (температура випалення не може бути менше температури запалювання, інакше процес перестане виконувати свою технологічну задачу; концентрація речовин не може бути негативною);

б) *технологічне або відносне обмеження* (вхідний потік не може бути менше деякої величини, нижче за яку виробництво буде не рентабельне).

3) *Сумісність чинників* – це особливий випадок з пункту 2). Під *несумісністю* чинників розуміють явище, коли сукупність чинників утворюють аварійну ситуацію (певне співвідношення газів утворює вибухову

суміш; при певному складі розплав може застигнути при одній і тій же температурі).

4) Чинники не повинні бути лінійно залежні або корельованими у випадку, якщо вони є випадковими величинами, виходячи з таких причин:

а) лінійно залежні або взаємно корельовані чинники, принаймні, один з них, не несуть ніякої інформації, тобто достатньо знати один з чинників, щоб мати інформацію про інше.

б) чисельне значення таких чинників не може вибиратися довільно, що не зручне в багатьох задачах оптимізації і інших додатках математичних моделей; тому при математичному моделюванні пред'являють жорсткіші вимоги до незалежності чинників.

Коли стають відомі вхідні і вихідні параметри об'єкту дослідження, постає вибір при визначенні виду проведення експерименту для подальшої побудови моделі і ідентифікації процесу.

Часто найточнішу інформацію про досліджуваний процес можна одержати при натурному експерименті. Однак дослідження дорогі. Проте можна використовувати проведення експериментів на маломасштабних моделях, але одержану інформацію необхідно екстраполювати на натурний об'єкт, а загальні правила відсутні. Крім того, на маломасштабних моделях не завжди можна відтворити всі властивості об'єкту, що також знижує цінність одержаних результатів.

Потрібно пам'ятати, що у багатьох випадках вимірювання утруднені, а вимірювальне устаткування дає погрішність.

Приведені недоліки усуваються при теоретичних дослідженнях. Тут визначаються результати рішення задачі згідно використовуваної математичної моделі, а не характеристики дійсного технічного (фізичного) процесу. Для фізичних процесів математична модель складається з диференціального рівняння (системи диференціальних рівнянь) теплопровідності.

У приватних похідних воно має вигляд:

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} = -\operatorname{div}(q) + q_v \quad (1.1)$$

Закон Фур'є:

$$q = -\lambda \operatorname{grad} T \quad (1.2)$$

Підставляючи (1.2) в (1.1), одержуємо:

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q_v \quad (1.3)$$

У прямокутних координатах для постійних властивостей (*const*) рівняння приймає вигляд:

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \left(\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q_v \quad (1.4)$$

Позначивши $a = \lambda / c\rho$, одержуємо:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{\rho} \quad \text{або} \quad \frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + \frac{q_v}{\rho}$$

Диференціальне рівняння виведене на підставі загальних законів фізики і встановлює зв'язок між тимчасовою і просторовою зміною температури тіла. Щоб вибрати рішення, що характеризує конкретний даний процес, необхідно до цього диференціального рівняння додати додаткову умову, що включає геометричні, фізичні і краєві умови.

1.1.2 Способи завдання крайових умов

Геометричні умови полягають: із завдання форми і лінійних розмірів тіла.

Фізичні умови задають теплотехнічні властивості матеріалів (густина, теплопровідність, теплоємність, об'ємна густина теплового потоку).

Краєві умови складаються з початкових і граничних умов.

Початкові умови задаються для нестационарних задач, в яких відбувається зміна температури в часі, і полягають в завданні розподілу температури усередині тіла у момент часу, вибраний за початковий.

Граничні умови відображають взаємодію навколишнього середовища з поверхнею тіла.

Завдання початкових умов полягає у тому, що для деякого моменту часу $\tau = \tau_0$ (частіше $\tau_0 = 0$) задається функція просторових координат:

$$T(x, y, z) \Big|_{\tau = \tau_0} = f(x, y, z)$$

Простий вид початкових умов:

$$T(x, y, z) \Big|_{\tau = \tau_0} = const$$

Граничні умови можуть бути задані різними способами:

- 1) *Граничні умови I роду* – задається розподіл температури на поверхні тіла, як функція координат і часу.

$$T(x, y, z) \Big|_{\tau = \tau_0} = \varphi(x, y, z)$$

де $x, y, z \in S$.

До граничних умов I роду можна віднести задачі розігрівання і охолодження системи при заданій зміні температури на межі або при дуже інтенсивному теплообміні на поверхні, коли температура поверхні близька до температури середовища.

Проста умова

$\varphi(x, y, z, \tau) = 0$ – функція однорідна щодо температури.

- 2) *Граничні умови II роду* – задається розподіл густини теплового потоку на поверхню тіла як функція координат і часу:

$$q = \varphi(x, y, z, \tau) \text{ где } x, y, z, \tau \in S.$$

За законом Фур'є:

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_S = \varphi(x, y, z, \tau)$$

де n – внутрішня нормаль до поверхні тіла.

У окремому випадку, коли $q = const$ для будь-якого моменту часу і будь-якої точки поверхні, можна записати:

$$q = q_{const}$$

У разі теплоізолюваної поверхні

$$q_s = 0$$

3) *Граничні умови III роду* – на поверхню тіла задається залежність q_s у слідстві теплопровідності з боку тіла від температур поверхні тіла T_s і навколишнього середовища $T_{o.c.}$:

$$q = \alpha(T_s - T_{o.c.})$$

Знак « \pm » показує, що гарячіше: тіло або середовище.

Або, враховуючи закон Фур'є, одержуємо:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T_s - T_{o.c.})$$

4) *Граничні умови IV роду* – відповідає теплообміну поверхні тіла з навколишнім середовищем, конвективному теплообміну тіла з рідиною, або теплообміну між дотичними тілами, коли температура дотичних поверхонь однакова:

$$T_{1s} = T_{2s}, \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n}$$

Існують і інші види граничних умов. Наприклад, якщо тіло піддається нагріву випромінюванням з боку зовнішнього середовища, то граничні умови на поверхню тіла в цьому випадку задаються у вигляді:

$$-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_s = \epsilon \sigma \left[\left(\frac{T_s}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{o.c.}}{100} \right)^4 \right]$$

1.1.3 Класифікація крайових задач

Якщо математична модель процесу відома, то потрібно знати які величини, що входять в неї, задані, а які необхідно визначити. Залежно від цього виникаючі задачі можна розділити на 2 види:

- *пряма задача*: необхідно визначити температурне поле, якщо відоме диференціальне рівняння і задані додаткові умови, що повністю визначають крайову задачу;

- *зворотна задача*: необхідно визначити граничні умови або коефіцієнти, що входять в основне диференціальне рівняння, якщо відомі математичний опис процесу і температурне поле.

Крім того, краєві задачі можна розділити на *лінійні* і *нелінійні*.

Рівняння називається *лінійним*, якщо воно лінійне щодо шуканої функції і її похідних. Якщо хоча б одне з складових рівняння нелінійне, то і вся задача *нелінійна*.

Залежно від того, в якому рівнянні і в якому складовому рівнянні зосереджена нелінійність, краєві задачі можна класифікувати таким чином:

1) *крайова задача з нелінійністю I роду*: від температури залежать лінійно або нелінійно теплопровідність, густина, теплоємність.

2) *крайова задача з нелінійністю II роду*: від температури нелінійно залежить тепловий потік на поверхню тіла q_s .

3) *крайова задача з нелінійністю III роду*: від температури нелінійно залежить об'ємна густина теплового потоку q_v .

Математичне моделювання засноване на використуванні систем рівнянь математичного опису, що відображають суть процесів, що протікають в об'єкті.

Математичне формулювання задачі в цьому випадку представляється як задача знаходження функцій декількох змінних.

$$Y_j = f(X_i, H, Z_k)$$

При математичному моделюванні процесів термообробки можливе рішення наступних *видів задач*:

1) Розрахунок вихідних параметрів Y , що відображають реакцію виробу на обурення X та H – це *пряма задача імітації*;

- 2) Розрахунок вхідних параметрів X при фіксованих значеннях Y та H – це *зворотна задача імітації*;
- 3) Розрахунок параметрів управління H при відомих X та Y – це *задача адаптації*;
- 4) Розрахунок екстремальних значень (мінімум, максимум) параметрів X , Y , H з урахуванням фізичних, ресурсних і інших обмежень – це *задача оптимізації*.

На рівні інженерних розрахунків найчастіше стикаються з прямою задачею імітації.

Один з способів класифікації: форма, в якій представлені результати рішення крайових задач.

Рішення повинне бути у вигляді формули, яка дозволяє по заданому значенню аргументу набути значення шуканої функції, таке рішення називають *рішенням в аналітичному вигляді*.

Другий: за допомогою чисельних методів рішення може бути одержане у вигляді числових значень функції в деяких заданих значеннях аргументу. Аналітичне рішення є наглядним в порівнянні з чисельними методами і по ньому можна проаналізувати вплив всіх чинників на результат рішення.

Чисельні методи дають можливість вирішувати складні краєві задачі, недоступні для вирішення аналітичними методами.

Аналітичні методи:

I Класичні методи:

- 1) Метод розділення змінних (метод Фур'є);
- 2) Метод джерел (метод Гріна).

II Методи інтегральних перетворень:

- 1) У кінцевих межах;
- 2) У нескінченних межах.

III Наближені методи рішення нелінійних задач:

- 1) *Варіаційні методи (метод Конторовіча, Біо-Рітца);*

- 2) *Методи лінеаризації (дозволяють зводити нелінійну задачу до лінійної задачі);*
- 3) *Проекційні методи (оригінал Лапласа);*
- 4) *Методи зведення крайової задачі до рівняння іншого типу.*

Чисельні методи:

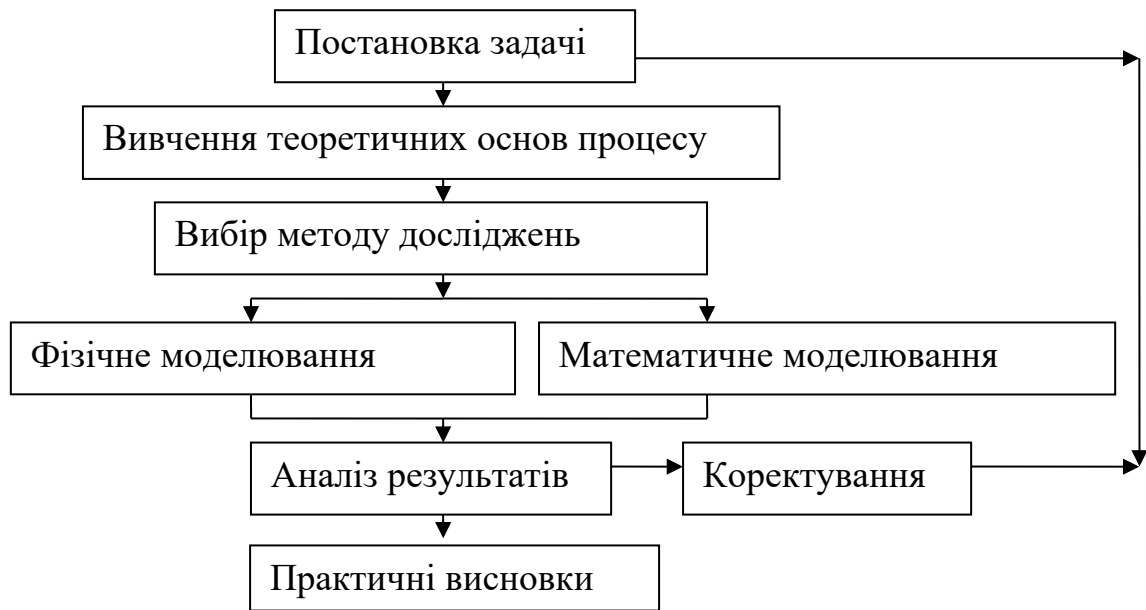
- 1) Методи кінцевих різниць;
- 2) Варіаційно-різницеві методи;
- 3) Методи статистично-вірогідні.

1.1.4 Послідовність проведення дослідження

Послідовність проведення дослідження включає наступні етапи:

- 1) Постановка задачі. Вивчення теоретичних основ процесу.
- 2) Вибір методу досліджень (нестатичні методи, математичне і фізичне моделювання).
- 3) Математичне моделювання (планування експерименту, його проведення і обробка одержаних результатів).
- 4) Фізичне моделювання.
- 5) Аналіз аналітичних моделей і критерійних рівнянь, а також рекомендації по оптимізації.
- 6) Практичні висновки і при необхідності коректування постановки задачі.

Блок-схема має вигляд:



І *Постановка задачі* – є найважливішим етапом вивчення процесів і установок. Правильно сформульована задача досліджень значною мірою полегшує її рішення. При вивченні процесів і установок можна виділити 2 етапи постановки задачі:

- 1) Встановлення залежності зміни окремих показників процесу від початкових параметрів матеріалу або технологічного процесу.
- 2) Оптимізація окремого параметра.

II *Вибір методу дослідження.*

Цей вибір визначається формулюванням задачі, завглибшки вивчення модельованого процесу, необхідність обхвату окремого або груп параметрів, а також кінцевої мети роботи.

Практиці досліджень найбільш відомі наступні методи:

- 1) Нестатичні методи.
- 2) Методи, засновані на математичному і фізичному моделюванні.

Нестатичні методи зводяться до постановки серії дослідів на зразку в такому порядку, щоб при переході від одного досвіду до іншого змінювалося значення тільки однієї незалежної змінної. А всі інші залишаються на деякому фіксованому значенні.

Недоліки методу:

- 1) Значні витрати часу на виконання великої кількості випробувань.

2) Обмежений обхват параметрів.

Неможливість перевести одержані залежності на інші аналогічні системи.

III *Математичне моделювання.*

Сучасний технологічний процес металургійного або хімічного виробництва – це складна фізико-хімічна система, змінна в просторі і в часі з участю багатофазних і багатокомпонентних потоків речовини. По ходу процесу в кожній точці фази і на межах розділу відбувається перенесення імпульсу, маси, енергії. Крім того, на характер процесу роблять впливи конкретні геометричні характеристики апарату.

Складна взаємодія фаз компонентів і геометрії агрегату робить неможливим вивчення процесу на базі класичних законів перенесення і збереження.

У таких випадках правильним є використовувати методи математичного моделювання, засновані на стратегії системного аналізу – це представлення процесу, як складної взаємодіючої ієрархічної системи з подальшим якісним аналізом її структури, розробкою математичного опису і оцінкою невідомих параметрів.

Моделювання – це дослідження об'єктів усвідомлення на їх моделях. Існує безліч методів моделювання: наочна, знакова, аналогова і інші.

Математичне моделювання – це вивчення властивостей об'єкту на математичній моделі.

Математичною моделлю називається наближений опис якого-небудь явища або процесу зовнішнього світу, вираженого за допомогою математичної символіки.

Моделювання, яке забезпечує наближений опис явища або процесу за допомогою математичної символіки. Метод математичного моделювання особливо актуальний у зв'язку із застосуванням ЕОМ і математичні моделі є найважливішим елементом АСУ.

Математична модель для ЕОМ є програмою, тобто закодовану на машинній мові систему правил, слідуючи яким машина може відтворити хід модельованого процесу, обчислити ряд параметрів і їх вплив на кінцевий результат, а також виконати оптимізацію.

Математична модель включає 3 взаємодіючі етапи:

1. Складання математичного опису об'єкту, що вивчається;
2. Вибір методу рішення системи рівнянь математичного опису, і реалізація його у вигляді моделюючої програми;
3. Встановлення відповідності (адекватності) моделі об'єкту.

Математичне моделювання – це один з видів знакового моделювання окремих параметрів.

IV *Фізичне моделювання* відноситься до наочного моделювання і засноване на використуванні моделей, відтворюючих основні геометричні, динамічні, фізичні і функціональні характеристики оригіналу.

У основі фізичного моделювання лежить теорія подібності і метод аналізу розмірності. Експериментальні дані переносять на оригінал шляхом множення кожен з певних змінних даної розмірності на коефіцієнт подібності.

Виходячи із законів і рівнянь фізики відомо, що основні показники, що характеризують процес, строго зв'язані певним чином, якщо на їх основі можливо одержати комбінацію безрозмірних величин, то вони повинні мати одне і те ж значення, як для моделі, так і для оригіналу. Ця безрозмірна комбінація називається *критерієм подібності*.

Їх рівність для моделі і оригіналу є необхідною умовою фізичного моделювання.