

# Тема 19. Принципи побудови моделей. Технологія моделювання

## 19.1. Основні принципи побудови моделей

Розглянемо коротко основні принципи моделювання, які відображають достатньо багатий досвід, накопичений на даний час в сфері розробки і використання моделей [12**Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

**Принцип інформаційної достатності.** При повній відсутності інформації про систему модель побудувати неможливо. За наявності повної інформації про систему її моделювання недоцільне. Існує деякий критичний рівень апріорних відомостей про систему (рівень інформаційної достатності), досягши якого можна побудувати її адекватну модель.

**Принцип доцільності.** Модель створюється для досягнення деяких цілей, які визначають на первинному етапі формулювання проблеми моделювання.

Так, цілями моделювання можуть бути:

- осмислення дійсності;
- постановка над моделлю експериментів з подальшою інтерпретацією їх результатів стосовно модельованої системи;
- прогнозування майбутньої поведінки системи;
- спілкування з іншими особами, громадськими організаціями, пристроями обробки інформації;
- навчання і тренування фахівців.

**Принцип здійсненності.** Створювана модель повинна забезпечувати досягнення мети дослідження з урахуванням граничних ресурсів з вірогідністю (ймовірністю), істотно відмінною від нуля, і за скінченний час. Зазвичай задають деяке граничне значення  $P$  (ступінь ризику) вірогідності (ймовірності) досягнення мети моделювання  $P(t)$ , а також сам граничний термін  $t$  досягнення мети. Модель вважають здійсненою, якщо  $P(t) > P$ .

**Принцип множинності моделей.** Модель, яка створюється, повинна відображати насамперед ті властивості реальної системи (або явища), які впливають на вибраний показник ефективності. Відповідно під час використання будь-якої конкретної моделі пізнаються лише деякі складові реальності. Для повного її дослідження необхідно мати ряд

моделей, які дали б можливість відобразити певний процес з різних боків і з різним ступенем детальності.

**Принцип агрегації.** У більшості випадків складну систему можна представити як таку, що складається з агрегатів (підсистем), для адекватного формального опису яких придатними є деякі стандартні математичні схеми. Принцип агрегації дає можливість досить гнучко перебудувувати модель залежно від завдань (задач) дослідження.

**Принцип параметризації.** У ряді випадків модельована система має у своєму складі деякі відносно ізольовані підсистеми, які характеризуються певними параметрами, зокрема векторними. Такі підсистеми можна замінювати в моделі відповідними числовими величинами, а не описувати процес їх функціонування. У разі потреби залежність значень цих величин від ситуації може задаватися у вигляді таблиць, графіків або аналітичних виразів (формул), наприклад за допомогою регресійного аналізу. Принцип параметризації дає можливість скоротити обсяг і тривалість моделювання, але слід мати на увазі, що параметризація знижує адекватність моделі.

Потреба в моделюванні виникає як на етапі проектування систем для оцінювання правильності прийнятих рішень, так і на етапі експлуатації – для оцінювання наслідків внесення змін У систему. У цьому випадку на різних етапах проектування (технічний або робочий проект) з уточненням вихідних даних і виявленням нових суттєвих факторів ступінь деталізації процесу в системі зростає, що повинне відобразитися в моделі. Таким чином, в моделі можуть одночасно перебувати блоки з різним ступенем деталізації, що моделюють одні і ті ж компоненти проекрованої системи. Іншими словами, під час побудови моделі потрібно застосовувати методологію **ітераційного багаторівневого** моделювання.

Розробку моделі доцільно починати зі створення простої початкової моделі, яку У процесі уточнення вхідних даних і характеристик системи ускладнюють і корегують, тобто **адаптують** до нових умов. Разом з тим модель повинна залишатися досить **наглядною**, тобто її структура повинна відповідати структурі модельованої системи, а рівень деталізації моделі повинен вибиратися з урахуванням цілей моделювання, ресурсних обмежень (наприклад, час, кваліфіковані людські ресурси і засоби, виділені на проектування) та можливості отримання початкових даних.

Таким чином, модель повинна бути багаторівневою, адаптивною, наглядною, цільовою, розвиватися ітераційним способом, ускладнюватися і коректуватися в процесі створення, що можливо тільки за умови побудови її блочним (модульним) способом. Програмування і

відладку моделі доцільно вести поетапно, з послідовним збільшенням програмних модулів.

Один із способів підвищення ефективності моделювання полягає в тому, щоб не будувати заново модель для кожної нової системи, а розрізняти окремі класи систем і створювати уніфіковані програмні моделі для класів в цілому. Узагальнені програмні моделі дають можливість моделювати будь-яку систему із заданого класу без додаткових витрат на програмування. Така методологія забезпечує єдиний системний підхід до розробки програмних реалізацій моделей і використовується при об'єктно-орієнтованому програмуванні у вигляді бібліотеки класів моделей.

Розглянутий підхід можна реалізувати також у вигляді спеціалізованої мови або пакета моделювання, який дає можливість створювати узагальнені моделі шляхом введення засобів розмноження підмоделей, реорганізації зв'язків між ними і їх параметричної настройки. Цей спосіб орієнтований на фахівців, добре знайомих з мовою моделювання. Інший спосіб реалізації цього підходу полягає в розробці діалогових, інтелектуальних систем моделювання з використанням банку моделей і бази знань, які користувач може настроювати на конкретну реалізацію [12]. У цьому випадку етап програмування можна цілком виключити під час програмної реалізації імітаційної моделі завдяки використанню ефективних методів взаємодії з базами даних і застосуванню засобів генерації моделей.

## **19.2. Технологія моделювання: основні етапи, їх взаємозв'язок та характеристики**

Основою моделювання є методологія системного аналізу. Це дає можливість досліджувати систему, яка проектується або аналізується, за технологією операційного дослідження. Комп'ютерне моделювання (а зазвичай застосовується саме комп'ютерна модель) включає наступні взаємопов'язані етапи [12]:

1. Формулювання проблеми і змістовна постановка задачі.
2. Розробка концептуальної моделі.
3. Розробка програмної реалізації моделі, яка включає:
  - а) вибір засобів програмування, за допомогою яких буде реалізована модель;
  - б) розробка структурної схеми моделі і складання опису її функціонування;
  - в) програмна реалізація моделі.

Перевірка адекватності моделі.

4. Організація і планування проведення експериментів, що включає оцінювання точності результатів моделювання.

5. Інтерпретація результатів моделювання і прийняття рішень.

6. Оформлення результатів дослідження.

На першому етапі замовник формулює проблему. Організуються зустрічі керівника проекту з замовником, аналітиками з моделювання і експертами з проблеми, що вивчається. Визначаються цілі дослідження і спеціальні питання, відповіді на які будуть отримані в результаті дослідження; встановлюються критерії оцінювання роботи, які використовуватимуться для вивчення ефективності різних конфігурацій системи. Розглядаються такі показники, як масштаб моделі, період дослідження і необхідні ресурси; визначаються конфігурації модельованої системи, а також необхідне програмне забезпечення.

На цьому ж етапі ведеться цілеспрямоване дослідження модельованої системи, притягуються експерти з вирішуваної проблеми, які володіють достовірною інформацією. Збирається інформація про конфігурацію системи і способи її експлуатації для визначення параметрів моделі і вхідних розподілів ймовірностей.

На другому етапі розробляється **концептуальна модель** – абстрактна модель, яка дає можливість виявити причинно-наслідкові зв'язки, властиві досліджуваному об'єкту в межах, визначених цілями дослідження. По суті, це формальний опис об'єкта моделювання, яке відображає концепцію (погляд дослідника на проблему). Вона включає в явному вигляді логіку, алгоритми, припущення й обмеження.

Згідно з цілями моделювання визначаються вихідні показники, які потрібно збирати під час моделювання, ступінь деталізації, необхідні початкові дані для моделювання.

Рівень деталізації моделі залежить від таких факторів: мети проекту; критеріїв оцінювання показників роботи; доступності даних; достовірності результатів; комп'ютерних можливостей; думки експертів з вирішуваної проблеми; обмежень, пов'язаних з часом і фінансуванням. Ведеться структурний аналіз концептуальної моделі, пропонується опис допущень, які обговорюються з замовником, керівником проекту, аналітиками й експертами з вирішуваної проблеми.

Розробляються моделі початкових даних, ведеться їх статистичний аналіз, за результатами якого визначають розподіли ймовірності, регресійні, кореляційні й інші залежності. На цьому етапі для

попереднього аналізу даних широко застосовують різні статистичні пакети (наприклад, STATISTICA).

Для динамічних систем ведеться післяопераційний аналіз функціонування модельованої системи з детальним описом роботи елементів системи. За результатами такого аналізу можна з'ясувати, чи можна вирішити проблему без застосування засобів моделювання. Детально оброблена концептуальна модель дає можливість замовникові з іншого боку поглянути на роботу системи і, наприклад, визначити її вузькі місця, які сприяють зниженню її пропускнуої спроможності.

Одна зі складних проблем, з якою має справу аналітик моделювання, полягає у визначенні, адекватності моделі системі. Якщо імітаційна модель "адекватна", її можна використовувати для прийняття рішень щодо системи, яку вона представляє, тобто нібито вони приймалися на основі результатів проведення експериментів з реальною системою. Модель складної системи може тільки приблизно відповідати оригіналу, незалежно від того, скільки зусиль було витрачено на її розробку, оскільки абсолютно адекватних моделей не існує.

Оскільки модель завжди повинна розроблятися для певного набору цілей, то модель, яка є адекватною для однієї мети, може не бути такою для дослідження іншої мети. Слід зазначити, що адекватна модель не обов'язково є достовірною, і навпаки. Модель може бути достовірною, але, в цьому випадку, не використовуватися для прийняття рішень. Наприклад, достовірна модель може не бути адекватною з політичних або економічних причин.

При програмній реалізації моделі визначаються засоби програмування, тобто мови програмування або пакети. Наприклад, можуть використовуватися мови програмування загального призначення, такі, як C або Pascal, чи спеціалізовані засоби для моделювання (наприклад, Agena, Automod, Extend, GPSS, iThink). Перевага використання мов програмування полягає в тому, що, як відомо, вони мають невисоку закупівельну вартість, і на розробку моделі з їх допомогою витрачається менше часу. Разом з тим використання спеціалізованого програмного забезпечення для моделювання призводить до зменшення тривалості процесу програмування і вартості всього проекту.

Серед спеціалізованих пакетів для моделювання слід зазначити пакет MATLAB з інтерактивним модулем Simulink. Пакет MATLAB є всесвітньо визнаним універсальним відкритим середовищем, і мовою програмування одночасно, в якому інтегровані засоби обчислень, візуалізації, програмування і моделювання.

Здійснюється програмування моделі та її відлагоджування, виконуються тестові прогони моделі на основі контрольних даних, ведеться аналіз чутливості, щоб визначити, які фактори в моделі суттєво впливають на робочі характеристики системи і повинні моделюватися точніше.

Після кожного з вищезазначених етапів перевіряється достовірність моделі. Перевірку умовно можна розділити на два етапи: перевірка правильності створення концептуальної моделі, тобто задуму – **валідація**; перевірка правильності її реалізації – **верифікація**. Під час перевірки достовірності потрібно відповісти на питання про відповідність моделі модельованій системі, тобто визначити, наскільки ізоморфні система і модель. Як правило, в разі моделювання вимога ізоморфізму об'єкта і моделі надмірна, оскільки в цьому випадку складність моделі повинна відповідати складності об'єкта. Тому будують гомоморфні моделі, в яких виконується вимога однозначної відповідності моделі об'єкту.

На етапі **верифікації** розглядають, чи правильно реалізована концептуальна модель (модельні припущення) в комп'ютерну програму, тобто виконують налагоджування програми моделювання. Це складне завдання, оскільки може існувати багато логічних шляхів.

Етап перевірки правильності реалізації моделі включає перевірку еквівалентності перетворення моделі на кожному з етапів її реалізації і порівняння станів. У цьому випадку модель зазнає таких змін: концептуальна модель – математична модель – алгоритм моделювання – програмна реалізація моделі.

**Валідація** – це процес, що дає можливість встановити, чи є модель (а не комп'ютерна програма) достатньо точним відображенням системи **для конкретних цілей дослідження**.

Розробляється план проведення експериментів з моделлю для досягнення поставлених цілей. Основна мета планування експериментів – вивчення поведінки модельованої системи при найменших витратах під час експериментів. Зазвичай проводять такі експерименти:

- порівнюють середні значення і дисперсії різних альтернатив;
- визначають важливість врахування впливу змінних і обмежень, які накладаються на ці змінні;
- визначають оптимальні значення з деякої множини можливих значень змінних.

Проведення експериментів планують для пошуку незначущих факторів. У разі оптимізації якого-небудь числового критерію

формулюють гіпотези щодо вибору якнайкращих варіантів структур модельованої системи або режимів її функціонування, визначають діапазон значень параметрів (режимів функціонування) моделі, в межах якого знаходиться оптимальне рішення. Визначають кількість реалізацій і час прогону моделі кожної реалізації. Проводять екстремальний експеримент, за результатами якого знаходять оптимальне значення критерію і відповідні значення параметрів. Для оцінювання точності стохастичних моделей будують довірчі інтервали для отримуваних вихідних змінних.

Далі аналізують і оцінюють результати. Представляють результати комп'ютерних експериментів у вигляді графіків, таблиць, роздруківок, а також визначають якісні і кількісні оцінки результатів моделювання. Для візуалізації моделі використовують анімацію. Обговорюють процес створення моделі і її достовірність, щоб підвищити рівень довіри до неї.

За отриманими результатами формулюють висновки з проведених досліджень і визначають рекомендації щодо використання моделі прийняття рішень.

Вищенаведені етапи моделювання взаємозв'язані, а сама процедура створення моделі є ітераційною. Це пояснюється тим, що після виконання кожного етапу перевіряється правильність і достовірність моделі і в разі невідповідності моделі об'єкту здійснюється повернення до попередніх етапів з метою корегування і настройки моделі. Залежно від характеру внесених змін повертаються безпосередньо до попереднього етапу або до попередніх етапів. Детальніше технологія моделювання розглядається в наступних розділах.

На останньому етапі моделювання документально оформляють всі результати дослідження і готують програмну документацію для використання їх під час розробки поточних і майбутніх проектів.

## **Висновки**

1. При створенні моделі потрібно: дотримуватися принципів інформаційної достатності, доцільності, здійсненості, множинності моделей, агрегації, параметризації; застосовувати методологію ітераційного багаторівневого моделювання.

2. Комп'ютерне моделювання розбивається на декілька взаємопов'язаних етапів, а сама процедура створення моделі є ітераційною.

## **Контрольні запитання та завдання**

1. Відсортуйте етапи створення комп'ютерної моделі за їх ступенем важливості.
2. Чим відрізняються поняття адекватності і достовірності моделі?