

## Лекція 1

### ПОНЯТТЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ ТА КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У сучасному виробництві широке поширення одержали **системи автоматизованого проектування (САПР)**, які дозволяють проектувати технологічні процеси з меншими витратами часу та засобів, зі збільшенням точності спроектованих процесів і програм обробки, що скорочує витрати матеріалів та час обробки, завдяки тому, що режими обробки також розраховуються та оптимізуються за допомогою ЕОМ.

Технічне забезпечення САПР засновано на використанні обчислювальних мереж і телекомунікаційних технологій, персональних комп'ютерів та робочих станцій.

Математичне забезпечення САПР характеризується різноманітністю методів обчислювальної математики, статистики, математичного програмування, дискретної математики, штучного інтелекту. Програмні комплекси САПР відносяться до числа найбільш складних сучасних програмних систем, заснованих на операційних системах Unix, Windows, мовах програмування C, C++, Java і інших, сучасних CASE технологіях, реляційних і об'єктно-орієнтованих системах керування базами даних (СКБД), стандартах відкритих систем і обміну даними в комп'ютерних середовищах.

Проектування, при якому всі проектні рішення або їхня частина одержують шляхом взаємодії людини та ЕОМ, називають автоматизованими на відміну від ручного (без використання ЕОМ) або автоматичного (без участі людини на проміжних етапах).

CAD (Computer Aided Design) – система, що реалізує автоматизоване проектування.

CAE (Computer-Aided engineering) – загальна назва програм або програмних пакетів, призначених для інженерних розрахунків, аналізу і симуляції фізичних процесів. Розрахункова частина пакетів найчастіше базується на чисельних методах рішення диференційних рівнянь (див: метод скінченних елементів, метод скінченних об'ємів, метод скінченних різниць та ін.).

Сучасні системи автоматизації інженерних розрахунків (CAE) застосовуються спільно з CAD-системами (часто інтегруються в них, в цьому випадку виходять гібридні CAD/CAE-системи).

CAE-системи — це різноманітні програмні продукти, що дозволяють за допомогою розрахункових методів (метод кінцевих елементів, метод кінцевих різниць, метод кінцевих об'ємів) оцінити, як поведеться комп'ютерна модель виробу в реальних умовах експлуатації. Допомагають переконатися в працездатності виробу, без значних затрат часу і засобів..

CAM (Computer-Aided manufacturing) – автоматизоване виробництво. Термін використовується для позначення програмного забезпечення, основною метою якого є створення програм для керування верстатами зі ЧПК (числове програмне керування). Вхідними даними САМ- системи є геометрична модель виробу, розроблена в системі автоматизованого проектування. У процесі інтерактивної роботи із тривимірною моделлю в САМ системі інженер визначає траєкторії руху різального інструменту по заготівлі виробу, які потім автоматично верифікуються, візуалізуються (для візуальної перевірки коректності) і обробляються постпроцесором для одержання програми керування конкретним верстатом.

### **Комп'ютерна модель**

Ефективним способом вивчення явищ навколишньої дійсності є науковий експеримент, метою якого є відтворення досліджуваного об'єкта або явища природи в керованих і контрольованих умовах. Однак часто проведення експерименту неможливе або вимагає занадто великих економічних витрат і може призвести до небажаних наслідків. У цьому випадку досліджуваний об'єкт замінюють комп'ютерною моделлю і вивчають її поведінку при різних зовнішніх впливах.

Повсюдне поширення персональних комп'ютерів, інформаційних технологій, створення потужних суперЕОМ зробило комп'ютерне моделювання одним із результативних методів вивчення фізичних, технічних, біологічних, економічних та інших систем. Сучасний комп'ютер здатний працювати зі звуком, відеозображенням, анімацією, текстом, схемами, таблицями і т. д.

Зараз існує широке коло програм, які дозволяють створювати різні види комп'ютерних знакових моделей: текстові процесори, редактори формул, електронні таблиці, системи управління в базах даних, професійні системи проектування, а також різні середовища програмування.

Комп'ютерні моделі простіше й зручніше досліджувати, вони дозволяють проводити обчислювальні експерименти, реальна постановка яких утруднена або може дати непередбачуваний результат. Логічність і формалізованість комп'ютерних моделей дозволяє виявляти основні чинники, які визначають властивості досліджуваних об'єктів, досліджувати відгук фізичної системи на зміну її параметрів і початкових умов.

Комп'ютерна модель – це комп'ютерна програма, яка працює на окремому комп'ютері, суперкомп'ютері або множині взаємодіючих комп'ютерів (обчислювальних вузлів) та реалізує абстрактну, тобто інформаційну модель деякого об'єкта, процесу, явища чи системи.

Можна дати дещо простіше визначення комп'ютерної моделі. Комп'ютерна модель – це модель, реалізована засобами певного програмного середовища.

Комп'ютерна модель є подання об'єкта, системи чи явища у формі, відмінній від реальної, але наближеній до алгоритмічного опису, який включає набір даних, що характеризують властивості системи, динаміку їх зміни в часі і т. п.

Комп'ютерні моделі є звичайним інструментом числового математичного моделювання і застосовуються в фізиці, астрофізиці, механіці, хімії, біології, соціології, метеорології, інших науках, а також при розв'язанні прикладних задач в різних областях радіоелектроніки, машинобудування, автомобілебудування тощо. Комп'ютерні моделі використовуються для отримання нових знань про модельований об'єкт або для наближеної оцінки поведінки систем, занадто складних для логіко-аналітичного дослідження.

У разі коректної логіки і коректної формалізації на етапі створення комп'ютерних моделей є можливість виявити основні фактори, які визначають кількісні характеристики досліджуваного об'єкта-оригіналу (або цілого класу об'єктів), зокрема, досліджувати відгук змодельованої фізичної системи на зміни її параметрів і початкових умов.

Застосування обчислювальних машин дозволяє аналізувати та застосовувати на практиці багато математичних моделей, які раніше не піддавалися аналітичному дослідженню.

Комп'ютерна модель має задовольняти наступним вимогам:

1. Забезпечувати певну повноту опису об'єкта (процесу, явища), який вивчається, тобто надавати можливість обчислення всіх характеристик об'єкта з необхідною точністю й достовірністю.

2. Модель має бути гнучкою, що дозволить відтворювати і програвати різні ситуації і процеси, змінювати структуру, алгоритми та параметри досліджуваного об'єкта.

3. Тривалість розробки та реалізації, що характеризують витрати часу на створення моделі, мають бути якомога меншими.

4. Структура моделі має бути блочною, що надаватиме можливість додавати, вилучати й замінювати деякі частини (блоки) моделі.

Крім того, інформаційне забезпечення, програмні та технічні засоби повинні дозволяти моделі обмінюватися інформацією з відповідною базою даних та забезпечувати ефективну комп'ютерну реалізацію та зручну роботу користувача.

### **Види комп'ютерних моделей**

Треба мати на увазі, що гранична точність моделі визначається точністю її зовнішніх інформаційних потоків (зв'язків). Немає сенсу будувати детальну модель об'єкта, якщо висока невизначеність зовнішніх потоків інформації, або, інакше кажучи, точність моделі повинна бути порівняна з точністю зовнішніх потоків інформації. Це положення в рівній мірі стосується і підсистем, і в застосуванні до них виглядає як вимога взаємної співмірності їх точності.

Реалізована на комп'ютері математична модель називається комп'ютерною математичною моделлю, а проведення цілеспрямованих розрахунків за допомогою комп'ютерної моделі називається обчислювальним експериментом.

Зазвичай, розробка комп'ютерної моделі об'єкта є послідовністю ітерацій: спочатку на основі наявної інформації про систему  $S$  будується модель  $M_1$ , проводиться серія обчислювальних експериментів, результати аналізуються. При

отриманні нової інформації про об'єкт S враховуються додаткові чинники, розробляється уточнена модель M2, поведінка якої також досліджується на ЕОМ. Після цього створюються моделі M3, M4 і т. д. до тих пір, поки не буде отримана модель, яка з потрібною точністю відповідатиме системі S.

Під комп'ютерним моделюванням у самому широкому сенсі розуміють процес створення й дослідження моделей за допомогою комп'ютера. Виділяють такі види моделей:

**1. Фізична модель** – комп'ютер є частиною експериментальної установки або тренажера, який сприймає зовнішні сигнали, здійснює відповідні розрахунки і видає сигнали, які керують різними маніпуляторами. Наприклад, навчальна модель літака, що представляє собою кабінку, встановлену на відповідних маніпуляторах, з'єднаних з комп'ютером, який реагує на дії пілота і змінює нахил кабінки, показання приладів і т. д., імітуючи політ реального літака.

**2. Числова модель** – модель, яка припускає числове розв'язання системи алгебраїчних і диференціальних рівнянь методами обчислювальної математики та проведення обчислювального експерименту при різних параметрах системи, початкових умовах і зовнішніх впливах. Числова модель використовується для моделювання різних фізичних, технічних, біологічних, соціальних та інших явищ.

**3. Імітаційна модель** – це модель, яка полягає у створенні комп'ютерної програми (або пакета програм), що імітує поведінку складної технічної, економічної чи іншої системи на ЕОМ з необхідною точністю. Вона передбачає формальний опис логіки функціонування досліджуваної системи з плином часу, враховує суттєві взаємодії її компонентів і забезпечує проведення статистичних експериментів.

**4. Статистична модель** – це модель, яка використовується для вивчення стохастичних систем і призначена для багаторазового проведення випробувань з подальшою статистичною обробкою отриманих результатів. Подібні моделі дозволяють досліджувати поведінку різних систем масового обслуговування, багатопроцесорних систем, інформаційно-обчислювальних мереж, різних динамічних систем, на які впливають випадкові чинники. Статистичні моделі застосовуються при вирішенні імовірнісних задач, а також при обробці великих масивів даних (інтерполяція, екстраполяція, регресія, кореляція, розрахунок параметрів розподілу і т. д.).

**5. Інформаційна модель** – це модель, яка полягає у створенні сукупності спеціальним чином організованих даних (знаків, сигналів), що відображають найбільш істотні сторони досліджуваного об'єкта.

**6. Модель знань** – це модель, яка передбачає побудову системи штучного інтелекту, в основі якої лежить база знань деякої предметної області (частини реального світу). До цього виду моделей відносять семантичні мережі, логічні моделі знань, експертні системи, логічні ігри і т. д. Логічні моделі використовуються для представлення знань в експертних системах, для створення систем штучного інтелекту, здійснення логічного висновку, доведення теорем, математичних перетворень, побудови роботів, використання природної мови для спілкування з ЕОМ, створення ефекту віртуальної реальності в комп'ютерних іграх тощо.

Виходячи з цілей моделювання, комп'ютерні моделі підрозділяють на **групи**:

**1) описові моделі**, які використовуються для розуміння природи досліджуваного об'єкта, виявлення найбільш істотних факторів, що впливають на його поведінку;

**2) оптимізаційні моделі**, які дозволяють вибрати оптимальний спосіб керування технічною, соціально-економічною чи іншою системою (наприклад, космічною станцією);

**3) прогностичні моделі**, які допомагають прогнозувати стан об'єкта в наступні моменти часу (модель земної атмосфери, яка дозволяє передбачити погоду);

**4) навчальні моделі**, що застосовуються для навчання, тренінгів і тестування учнів, студентів, майбутніх фахівців;

**5) ігрові моделі**, які дозволяють створювати ігрову ситуацію, яка імітує управління армією, державою, підприємством, людиною, літаком і т. д., або грати у шахи, шашки та інші логічні ігри.

### **Області застосування комп'ютерних моделей**

Успіхи комп'ютерного моделювання тісно пов'язані з розвитком числових методів, що почався з фундаментальних робіт Ісаака Ньютона, який ще в 17 столітті запропонував їх використовувати для наближеного рішення алгебраїчних рівнянь.

Зараз комп'ютерне моделювання застосовують для розв'язання широкого кола задач у різних областях людської діяльності:

– у промисловості (комп'ютерне моделювання різних технологічних процесів, моделювання роботів і автоматичних маніпуляторів, моделювання міцнісних, гідравлічних, теплових та інших показників деталей, вузлів і агрегатів тощо);

– в архітектурі та будівництві (дослідження поведінки будівель, конструкцій і деталей під впливом механічних, вітрових та інших видів навантажень, моделювання сценарних варіантів розвитку міст, розв'язання інших подібних задач);

– в енергетиці, в тому числі ядерній (моделювання роботи електричних мереж, електротехнічних пристроїв, рішення задач механіки суцільних середовищ, зокрема, гідродинаміки, розрахунок ядерних реакцій тощо);

– на транспорті (конструювання наземних, повітряних, водних транспортних засобів, дослідження поведінки гідравлічних систем нафто- та водопроводів, моделювання ситуацій, пов'язаних з аваріями на газопроводах та ін.);

– в управлінні бізнесом, економіці та фінансах (стратегічне управління підприємствами, моделювання ринків сировини та збитку готової продукції, моделювання виробничих процесів, прогнозування цін на фінансових ринках, економічні дослідження розвитку підприємства, галузі, країни);

– в екології та геофізиці (вивчення глобальних явищ на Землі, рішення задач небесної механіки, дослідження екологічних проблем, моделювання поширення забруднюючих речовин в атмосфері, боротьба з шумовим забрудненням,

прогнозування погоди, клімату, глобального потепління, наслідків ядерного конфлікту, землетрусів, повені тощо);

– в політиці та військовій справі (моделювання розвитку міждержавних відносин, моделювання поведінки людських мас у різних суспільно-політичних ситуаціях, моделювання театру військових дій);

– в соціології (моделювання загальнодержавних і місцевих виборів, голосування, зміни громадської думки тощо);

– в хімії та біології (розрахунок хімічних реакцій і біологічних процесів, розвиток хімічної та біологічної технології, прогнозування демографічної ситуації в країні та світі, моделювання пандемії та епідемій).

Різні сфери застосування комп'ютерних моделей висувають різні вимоги до надійності одержуваних з їх допомогою результатів. Для моделювання будівель і деталей літаків потрібні високі точність і ступінь достовірності, тоді як моделі еволюції міст і соціально-економічних систем використовуються для отримання наближених або якісних результатів.

### **Комп'ютерне моделювання**

Комп'ютерне моделювання – це область наукової та інженерної діяльності, яка пов'язана з теорією та практикою обчислювального експерименту. Обчислювальний експеримент в дійсності експериментом не є, оскільки інформація береться не з фізичного експерименту, фізичної реальності, а з модельного уявлення про неї. Поєднуючи обчислювальний експеримент з натурним, дослідник отримує можливість швидше й повніше вивчати навколишній світ і проектувати нові вироби. Це досягається за рахунок того, що більша частина експериментів проводиться з комп'ютерною моделлю, а на завершальному етапі гіпотези, які вселяють довіру, перевіряються на невеликому числі ретельно продуманих і економічно обґрунтованих натурних експериментах.

Обчислювальний експеримент фактично є експериментом над математичною моделлю досліджуваного об'єкта, що проводиться за допомогою ЕОМ. Часто він значно дешевше і доступніше натурального експерименту, його виконання вимагає меншого часу, він дає більш детальну інформацію про величини, які визначають стан системи.

Комп'ютерне моделювання характеризується тим, що математична модель системи (використовуючи основні співвідношення аналітичного моделювання) подається у вигляді деякого алгоритму та програми, придатної для її реалізації на комп'ютері, що дозволяє проводити з нею обчислювальні експерименти. Залежно від математичного інструментарію (апарату), що використовується в побудові моделі, та способу організації обчислювальних експериментів можна виокремити три взаємопов'язані види моделювання: числове, алгоритмічне (імітаційне) та статистичне.

При числовому моделюванні для побудови комп'ютерної моделі застосовуються методи обчислювальної математики, а обчислювальний экс-

перимент полягає в числовому розв'язанні деяких математичних рівнянь за заданих значень параметрів і початкових умов.

Якщо побудова комп'ютерної моделі базується на абстрагуванні від конкретної природи явищ або досліджуваного об'єкта-оригіналу і складається з двох етапів – спочатку створення якісно-логічної, а потім і кількісно-математичної моделі, то комп'ютерне моделювання полягає в проведенні серії обчислювальних експериментів на комп'ютері, метою яких є аналіз на внутрішню несуперечливість моделі та отримання кількісних даних про процес функціонування моделі.

Комп'ютерне моделювання є одним з ефективних методів вивчення складних систем, які є особливим видом математичних моделей. Воно є сучасною формою математичного моделювання, новим інструментом пізнання та новою технологією проектування.

Сутність комп'ютерного моделювання також полягає у створенні комп'ютерної програми (пакета програм), яка описує поведінку елементів досліджуваного об'єкта в процесі його функціонування, що враховує їх взаємодію між собою і зовнішнім середовищем, та проведенні на ЕОМ серії обчислювальних експериментів. Це робиться з метою вивчення природи і поведінки об'єкта, його оптимізації та структурного розвитку, прогнозування нових явищ.

Комп'ютерне моделювання є засобом пізнання. До середини 19-го століття математичні моделі досліджувалися вченими як і всі абстрактні об'єкти: писалися формули, які спрощувалися для полегшення ручних числових розрахунків. Обчислювальна техніка надала нові можливості будувати й досліджувати математичні моделі, однак практично відразу ж стало ясно, що механічне перенесення традиційних методів дослідження на комп'ютери неможливо. Так народилася нова дисципліна "комп'ютерне моделювання", яка вивчає новий тип моделей – математичних моделей, реалізованих на комп'ютерах. Це особливий тип моделей, які одночасно можна вважати й абстрактними (записані мовою моделювання) і фізичними. Вони можуть безпосередньо виконуватися на комп'ютерах. Зараз практично всі традиційні математичні моделі представлені у вигляді комп'ютерних моделей.

Комп'ютерне моделювання є засобом проектування. При традиційному проектуванні спочатку створюється "паперовий" прототип виробу: в досить вільній формі формулюються вимоги, описується технічне рішення, створюються креслення, і тільки потім задумане втілюється в діючий прототип. Створений виріб перевіряється на відповідність вимогам, визначаються його характеристики, проводяться випробування на надійність, до нього вносяться зміни, іноді кардинальні, і тоді прототип доводиться створювати заново. Після багаторазових натурних експериментів починається серійне виробництво.

Комп'ютерні моделі, що використовуються в сучасних технологіях проектування, дозволяють переходити до виготовлення прототипу тільки після ретельного тестування моделі, швидко і майже безболісно виправляти знайдені помилки ще на стадії проектування. Комп'ютерні експерименти проводяться за допомогою спеціальних програмних засобів – засобів моделювання. Мови

моделювання, що включають і математичний опис досліджуваних об'єктів, служать суворому, однозначному розумінню всіма розробниками характеристик виробу, що проектується. У будь-який момент такий опис моделі можна перетворити у виконуваний код, і в буквальному сенсі побачити на екрані монітора поведінку виробу, що конструюється, оптимізувати параметри, досліджувати властивості.

Зараз практично повсюдно спостерігається перехід від традиційних технологій проектування до нових, в основі яких лежить комп'ютерне моделювання.

Комп'ютерне моделювання є засобом навчання. Зрозуміло, що ніщо не може замінити натурний експеримент, який дає об'єктивні уявлення про навколишній світ. Однак до натурних експериментів можна переходити, попередньо ознайомившись з результатами комп'ютерного моделювання реального об'єкта. Вивчати комп'ютерні моделі і ставити комп'ютерні експерименти можна і у випадку, коли ставити натурні експерименти не доцільно чи неможливо. Електронні підручники, віртуальні лабораторії, комп'ютерні тренажери вже увійшли в наше життя. Ті чи інші комп'ютерні засоби самостійного вивчення або навчання можна знайти практично у будь-якій галузі.

Слід зазначити, що в історії людства жодне технічне починання не розвивалося так швидко, як обчислювальна техніка за останні півстоліття. Поява ЕОМ наприкінці сорокових – початку п'ятдесятих років минулого століття спочатку не була сприйнята як якісно новий стрибок розвитку науки. Однак зараз уже очевидно, що обчислювальна техніка – провідна складова науково-технічної революції. Якщо в п'ятдесятих роках сферою її застосування були лабораторні наукові дослідження, то зараз вона невід'ємний атрибут у всіх областях техніки.

Електронні обчислювальні машини дозволили використовувати більш складні й універсальні математичні моделі, повніше відображати об'єкт дослідження, а отже, точніше, глибше описувати досліджуваний процес або явище. Зросла масштабність об'єктів математичного моделювання. Стало можливим комплексно оцінювати і властивості мікросвіту, і роботу цілих областей народного господарства з усім різноманіттям техніко-економічних зв'язків, включаючи рішення задач управління і прогнозування. Саме завдяки оперативному управлінню і прогнозуванню, математичне моделювання з використанням ЕОМ стало активним чинником роботи різних технічних пристроїв.



## **Характеристики комп'ютерних моделей**

Під комп'ютерною моделлю найчастіше розуміють:

- умовний образ об'єкта чи деякої системи об'єктів (або процесів), описаних за допомогою взаємозалежних комп'ютерних таблиць, схем, діаграм, графіків, малюнків, анімаційних фрагментів, гіпертекстів і т. ін., що відбивають структуру та взаємозв'язки між елементами об'єкта чи системи. Комп'ютерні моделі такого типу називають **структурно-функціональними**;

- окрему програму, сукупність програм чи програмний комплекс, що дає змогу виконанням послідовності обчислень з подальшим графічним відображенням їх результатів відтворювати (імітувати) процеси функціонування об'єкта (системи об'єктів), що функціонує під впливом різних, як правило випадкових, факторів. Такі моделі називають **імітаційними моделями**.

**Комп'ютерне моделювання** — метод розв'язування задачі аналізу або синтезу складної системи, що ґрунтується на використанні її комп'ютерної моделі. Сутність комп'ютерного моделювання полягає у відшуванні кількісних і якісних результатів із залученням наявної моделі. Якісні висновки, зроблені на підставі такого дослідження, дають змогу розкривати невідомі досі властивості складної системи: її структуру, динаміку розвитку, стійкість, цілісність тощо. Кількісні висновки мають переважно характер прогнозу майбутніх чи пояснення минулих значень змінних, що характеризують систему.

Імітаційні методи використовують, коли моделі являють собою опис об'єктів дослідження у формі алгоритмів. Вони адекватно відображають як структуру систем, що досягається ототожнюванням елементів системи з відповідними елементами алгоритмів, так і процеси функціонування системи, зображені в логіко-математичній формі. В імітаційних моделях часто знаходять відображення багато деталей структури та функцій складних систем, які вимушено втрачаються або нехтуються в математично суворих моделях.

Достоїнствами імітаційного моделювання є висока адекватність між фізичною суттю описуваного процесу і його моделлю, можливість описати складну систему на досить високому рівні деталізації, значно більше областей дослідження, ніж аналітичне моделювання, відсутність обмежень відображення в моделі залежностей між параметрами моделі, можливість оцінки функціонування системи не тільки в стаціонарних станах, але і в перехідних режимах (процесах), одержання значної кількості даних про досліджуваний об'єкт (закон розподілу випадкових величин, числові значення абсолютні та відносні, і багато іншого).

Недоліками імітаційного моделювання є вища вартість і довший час розробки моделі в порівнянні з аналітичною, складність оцінювання ступеню точності моделі, її адекватності досліджуваному процесу, відносно високі вимоги до кваліфікації розробника для написання програмної реалізації моделі.

## Алгоритм створення і використання комп'ютерної моделі

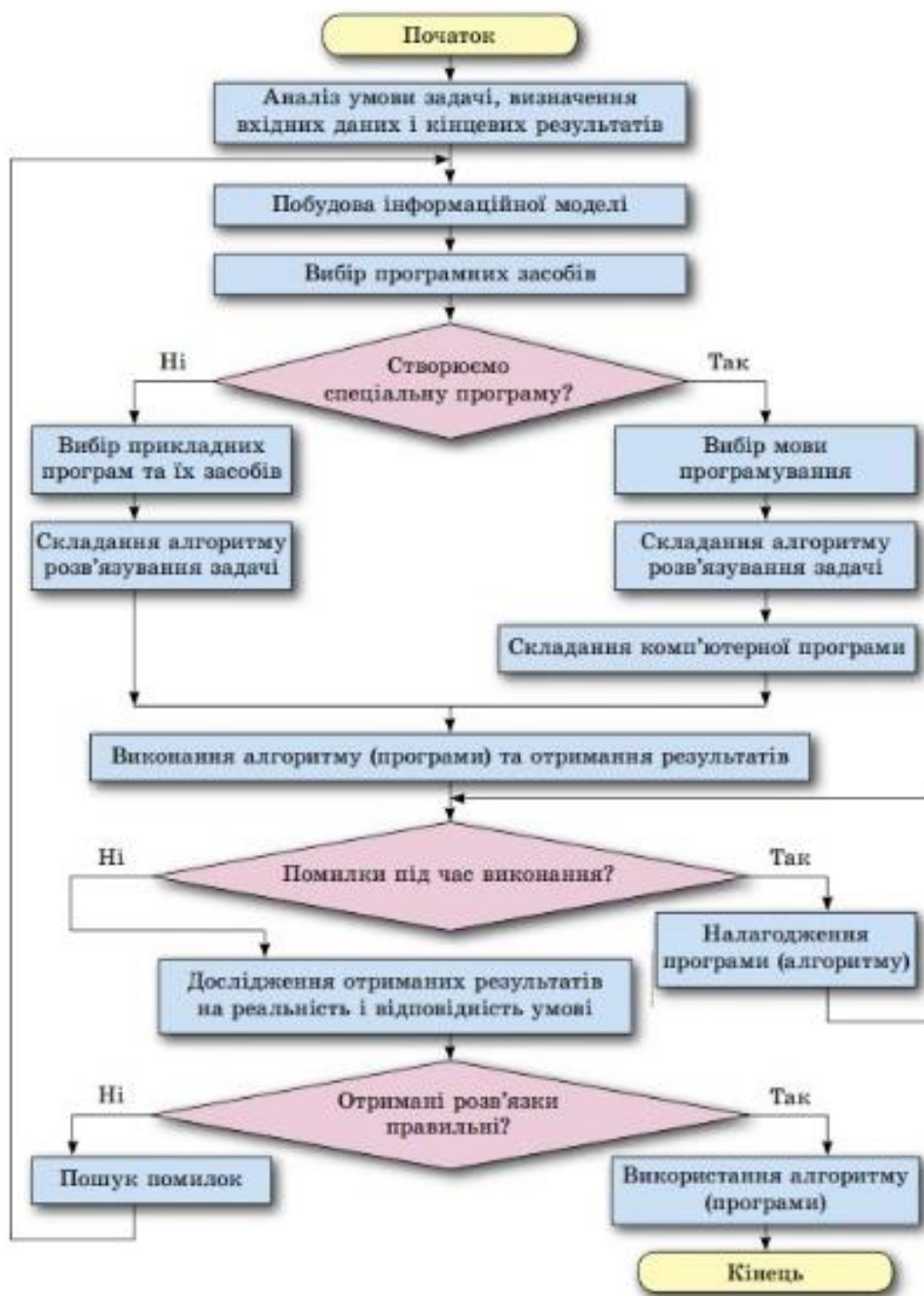


Рисунок 1 – Алгоритм створення і використання комп'ютерної моделі

### Комп'ютерний експеримент

Створивши комп'ютерну модель, можна змінювати вхідні дані й залежно від них отримувати різні кінцеві результати. Таким чином можна досліджувати змінення значень властивостей моделі, використовуючи для цього комп'ютер.

Дослідження моделі об'єкта з використанням комп'ютерного моделювання називається комп'ютерним експериментом.

**Метою** комп'ютерного експерименту є отримання даних, на основі яких можна приймати рішення, робити висновки про властивості об'єкта моделювання або прогнозувати його поведінку в тій чи іншій ситуації.

Проведення комп'ютерного експерименту складається з таких **етапів**:

- ✓ Аналіз умови задачі.
- ✓ Створення комп'ютерної моделі.
- ✓ Розробка плану проведення комп'ютерного експерименту.
- ✓ Проведення комп'ютерного експерименту.
- ✓ Аналіз отриманих результатів.

Сутність проведення комп'ютерного експерименту полягає в багаторазових запусках програми й отриманні кінцевих результатів для різних наборів вхідних даних. Такі набори розробляються в ході розробки плану експерименту, щоб виявити певні залежності чи отримати потрібні результати. Аналіз результатів експерименту може дати підставу для його завершення, якщо всі поставлені цілі досягнуто, або для продовження експерименту, корекції плану його проведення, якщо виявилася потреба доповнення даних чи намітився новий напрям дослідження.

Іноді за результатами експерименту виникає потреба в уточненні моделі або навіть у внесенні змін в умову задачі, і тоді весь процес починається знову.

### **Характеристики моделей**

Під **адекватністю** як правило розуміють правильний кількісний опис об'єкта за вибраними характеристиками з необхідною точністю, відображення заданих властивостей моделі із заданою точністю, коли результати моделювання можуть бути використані для прогнозування поведінки або властивостей досліджуваного об'єкта чи процесу. При цьому адекватність моделі залежить від цілей моделювання та прийнятих критеріїв. Враховуючи закладену при створенні неповноту моделі, можна стверджувати, що повністю адекватна модель принципово неможлива.

Слід підкреслити відносний характер поняття адекватності. Наприклад, якщо вивчається реакція об'єкта на зовнішні збурення того чи іншого класу, то модель, яка є адекватною відносно одного класу збурень, може виявитися неадекватною відносно іншого класу збурень.

Адекватність (відповідність) об'єкту-оригіналу з боку обраної системи його характеристик є найважливішою характеристикою моделі. Одним з критеріїв адекватності є характеристика точності моделі.

**Точність** моделі визначається як ступінь співпадіння вихідних параметрів моделі та об'єкта-оригіналу. Оберненою величиною до точності моделі є її похибка.

**Похибка** моделі не може бути меншою за найбільше значення похибки одного з вихідних параметрів математичної моделі.

Точність моделі залежить від умов функціонування об'єкта-оригіналу в просторі зміни вхідних параметрів. Область адекватності моделі (рис. 2) визначає

область в просторі зміни вихідних параметрів, всередині якої наявна похибка моделі не перевищує наперед задане граничне значення похибки.

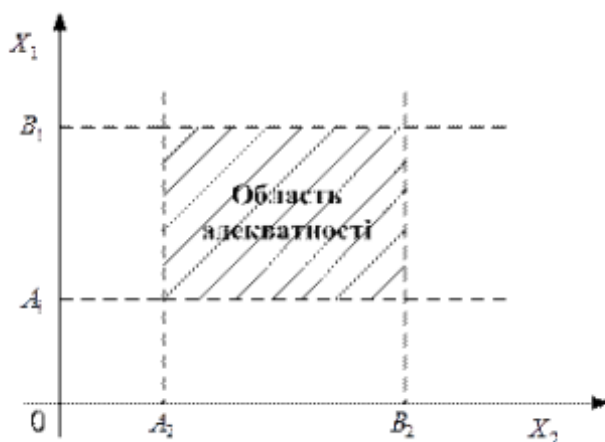


Рисунок 2 – Приклад області адекватності моделі

Похибки, які виникають при математичному моделюванні, мають різний характер і величину. Для їх визначення та врахування здійснюється аналіз причин і місця виникнення помилок (рис. 3).

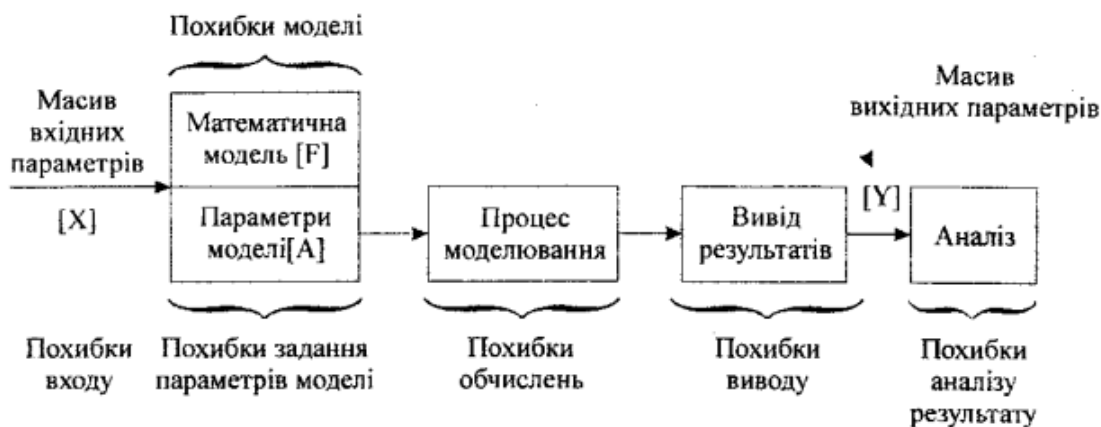


Рисунок 3 – Похибки моделювання

Математична модель вважається точною, якщо абсолютні або відносні похибки не перевищують встановлених граничних значень.

Похибки моделі спричинені, як правило, неточностями, допущеними при виборі стратегії моделювання, а також особливостями алгоритму і обчислювальної процедури.

Похибки введення вхідних та проміжних параметрів поділяються на грубі (зі значенням граничної відносної похибки 10 % і більше), та на несуттєві похибки. Грубі похибки виникають від недостатньої інформації про дійсні вхідні параметри моделі, несуттєві похибки пов'язані із особливостями математичного аналізу вхідних параметрів.

Похибки методу пов'язані з тим, що будь-яка математична модель відтворює об'єкт оригінал наближено. Наприклад, використання нульових, дійсних променів теорії оптичних систем та диференційних хвильових рівнянь. Додаткові методичні похибки обумовлені застосуванням в математичній моделі чисельного методу. Наприклад, використання методу трапецій при чисельному інтегруванні вводить похибку обчислень, що відповідає кроку інтегрування в 4-му степені.

Похибки обчислень виникають при виконанні арифметичних операцій, зокрема, це є похибки обмеження та похибки округлення комп'ютерних обчислювальних операцій.

Комп'ютерні моделі є дискретними, результати моделювання представляються в матричному та векторному вигляді, тобто у вигляді масивів-таблиць. Методи обробки табличних значень призводять до похибок виведення значень вихідного параметра між двома елементами масиву (інтерполяція, апроксимація) або за межами масиву (екстраполяція).

Похибки виведення результатів моделювання можуть бути досить грубими і привести до помилкових висновків при аналізі результатів моделювання.

Похибки внаслідок високочастотних осциляцій значень результатів моделювання можуть суттєвим чином вплинути висновки моделювання.

Необхідність їх врахування часто призводить до необхідності зміни стратегії моделювання, використання спеціальних алгоритмів і програмного забезпечення. Це має місце, наприклад, при чисельному інтегруванні «жорстких» диференціальних рівнянь.

Серед інших **властивостей** моделей слід відмітити:

– складність (або простота), яку оцінюють по загальній кількості елементів та зв'язків між ними;

– економічність, яка визначається затратами часу, матеріальних та фінансових коштів на розробку та використання моделі;

– цілісність, яка вказує на те, що модель відповідає цілісній системі;

– адаптивність, яка дозволяє пристосовувати модель до різних умов. Адаптивність визначається кількістю та складом врахованих в моделі зовнішніх і вихідних параметрів;

– універсальність характеризується областю застосування. Тобто, чим більша множина задач, які можна розв'язувати з використанням моделі, тим модель є більш універсальною;

– керованість моделі, яка витікає з необхідності забезпечити керування з боку експериментатора;

– можливість розвитку моделі для передбачення розширення спектра досліджуваних функцій, кількості підсистем.

Вимоги простоти (економічності) моделі є протилежними до вимоги адекватності математичної моделі.

**Література:**

Борисенко В. Д. Основи комп'ютерного моделювання в інженерній діяльності: навчальний посібник / В. Д. Борисенко, С. А. Устенко, І. В. Устенко. – Миколаїв: МНУ, 2016. – 276 с.