

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія (ДДМА)

П. Б. Абхарі

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ
Частина 1**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

**для студентів галузі знань 13 «Механічна інженерія»
денної та заочної форм навчання**

**Краматорськ-Тернопіль
ДДМА
2024**

Абхарі П.Б.

Математичне моделювання процесів і систем (Частина 1): конспект лекцій для студентів галузі знань 13 «Механічна інженерія» денної та заочної форм навчання / П.Б. Абхарі– Краматорськ-Тернопіль: ДДМА, 2024– 43 с.

У цьому конспекті лекцій представлено огляд сучасних методів і підходів до моделювання технологічних систем, з акцентом на ключових визначеннях та поняттях. Запропоновано інноваційні підходи до вирішення проблем, що виникають під час розробки, аналізу та дослідження математичних моделей механізмів, систем і процесів у машинобудівній галузі.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. Завдання математичного моделювання та розрахунків у процесі розробки й аналізу обладнання	6
2. Типи моделей і методи моделювання	9
3. Класифікація математичних моделей	Ошибка! Закладка не определена.
3.1. Категорії об'єктів, які описуються математичними моделями .	Ошибка! Закладка не определена.
3.2. Типи процесів та їх математичне представлення	15
3.3. Структура математичних моделей об'єктів	Ошибка! Закладка не определена.
4. Основні види математичного моделювання	Ошибка! Закладка не определена.
5. Ключові етапи побудови математичних моделей	18
6. Врахування допущень у моделюванні	Ошибка! Закладка не определена.
7. Розробка та впровадження алгоритмів моделювання роботи об'єктів	Ошибка! Закладка не определена.
8. Використання алгоритмічних мов програмування та математичних пакетів	27
9. Планування і проведення комп'ютерних експериментів	Ошибка! Закладка не определена.
10. Застосування систем автоматизованого проєктування	Ошибка! Закладка не определена.
11. Огляд найбільш поширених САПР світових виробників.....	36
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	42

Вступ

Останні десятиліття ознаменувалися стрімким впровадженням комп'ютерної техніки у виробничі процеси та повсякденне життя. У зв'язку з цим підготовка магістрів і аспірантів, які досконало володіють комп'ютерними технологіями для вирішення складних теоретичних і практичних завдань, є актуальним і необхідним завданням. Застосування комп'ютерної техніки відкриває можливості для глибшого розуміння та засвоєння фізичної сутності досліджуваних явищ, розв'язання завдань, які неможливо вирішити аналітичними методами, виконання швидких і точних розрахунків, а також пошуку оптимальних рішень у процесі розробки нових конструкцій обладнання.

У процесі використання комп'ютера для вирішення різноманітних задач важливо правильно визначити роль людини та функцію обчислювальної техніки. Завдання людини полягає у формулюванні мети дослідження, складанні вихідних рівнянь, початкових умов, алгоритмів і програм розрахунків, а також в аналізі отриманих результатів. Це складає основу математичного моделювання, яка докладно описана в першому розділі. Комп'ютер, своєю чергою, виконує обчислення і надає результати в аналітичному, числовому або графічному вигляді.

У контексті застосування комп'ютера для розрахунків і досліджень на основі математичного моделювання можна виділити два основні підходи. Перший — традиційний, який передбачає використання програм, написаних на алгоритмічних мовах високого рівня, таких як Basic, Pascal, C++ тощо. Цей метод вимагає від користувача не лише розуміння суті завдання, знання відповідних залежностей та принципів програмування, а й достатньої обізнаності з мовами

програмування. Однак поєднання цих навичок в одній людині є складним завданням для студентів, тому для вирішення складних дослідницьких задач зазвичай формуються команди, які включають як механіків, так і програмістів.

Другий підхід, що набув поширення лише останніми роками, базується на використанні сучасних математичних пакетів програм, таких як Mathematica, MATLAB, Derive, Mathcad тощо. Цей метод дозволяє простежити весь ланцюг дослідження від постановки задачі до аналізу результатів, демонструючи прийоми поступового ускладнення та розширення завдання.

Одним із ключових напрямів науково-технічного прогресу протягом останніх десятиріч стало вдосконалення методів і засобів інформатики та обчислювальної техніки. Використання математичного моделювання і комп'ютерних методів розв'язання інженерних і наукових задач значно підвищило ефективність процесів проектування та управління. Розвиток персональних комп'ютерів, інформаційних мереж, створення та розширення можливостей інтернету, а також активне використання методів математичного моделювання призвели до формування міцної теоретичної та практичної основи комп'ютерної математики. Математичне моделювання на основі обчислювальної техніки стало головним інструментом дослідження складних процесів і систем, що лежить в основі сучасних підходів до проектування, оптимізації та управління в різних галузях науки і техніки.

1. Завдання математичного моделювання та розрахунків у процесі розробки й аналізу обладнання

При розробці нового обладнання або при модернізації вже існуючого обов'язково виконуються ті або інші розрахунки: технологічні, міцнісні, економічні тощо. При цьому може бути доцільним виконання математичного моделювання роботи цього обладнання.

Під *розрахунками* розуміють дії по встановленню кількісної оцінки розглянутого параметра об'єкта або процесу та аналізу отриманого результату. Таке ж назва - розрахунки - має й документ, що містить результати цієї дії. Зміст розрахунків, виконуваних при розробці продукції (створенні обладнання) регламентується ГОСТ 2.106-68 «ЕСКД. Текстові документи». Згідно із цим стандартом розрахунки повинні містити: ескіз або схему виробу, що розраховується, завдання розрахунків (із вказівкою, що потрібно визначити), дані для розрахунків, умови розрахунків, розрахунки, висновок.

Завдання розрахунків полягає у визначенні числового значення, або параметра, якої-небудь характеристики або розміру об'єкта. Тобто завдання розрахунків - відповідь на запитання: яке значення параметра (діаметр вала, подачі...), яку витримає навантаження деталей тощо. При розрахунках шуканою величиною можуть бути й розміри об'єкта (товщина стінки, діаметр штанги, глибина підвіски насоса та ін.).

Математичне моделювання хоча й має багато загального із розрахунками, але відрізняється від них. У літературі приводяться кілька варіантів визначень математичного моделювання. Наприклад, професор М.В. Лур'є дає його в

наступному формулюванні: *Математичне моделювання - це наука про побудову математичних завдань, розв'язок яких дозволяє одержати відповідь про параметри досліджуваного явища без того, щоб ставити натурні й тим більше промислові експерименти.*

Більш повним, на наш погляд, є наступне визначення, засноване на підході професора П.І. Пластинина [1]:

Математичне моделювання - комплекс дій, спрямований на одержання інформації про об'єкт або про процеси, що протікають у ньому шляхом відтворення за допомогою математичної моделі явищ, що відбуваються, зі збереженням їх логічної структури, взаємозв'язків і розташування у часі.

Завданням математичного моделювання є дослідження особливостей модельованого реального об'єкта, у результаті чого можуть бути зроблені деякі висновки (наприклад, про границі області застосування цього об'єкта, про найбільш ефективне співвідношення його розмірів і т.п.). При цьому об'єкт повинен бути заданий (тобто його розміри попередньо задають).

При математичному моделюванні проводиться безліч обчислень параметрів робочого процесу, які можуть збігатися з окремими обчисленнями, виробленими при виконанні розрахунків.

До основних переваг методу математичного моделювання слід віднести наступні.

➤ Відповіді на багато питань при створенні машин, що виникають на ранніх етапах, (здуму, попереднього проектування), можна дати без застосування дорогого методу проб і помилок, тобто виключити з розробок дорогі пробні експерименти, варіанти нераціональних систем, схем і конструкцій. На стадії проектування можна, знов-таки без проведення додаткового експерименту, одержати необхідну інформацію про оптимальні розміри, співвідношення та конструктивні параметри машин та їх елементів.

➤ На ЕОМ можна моделювати поведінку об'єкта в будь-яких умовах, у тому числі й таких, які при практичному експерименті реалізувати не можна.

Завдяки цьому розширюється діапазон умов, у яких перевіряється й досліджується який-небудь об'єкт.

- Скорочуються витрати на дороге обладнання, необхідне при експериментальному дослідженні. Так, дослідження роботи пневматичних систем у тропічних та арктичних умовах можна провести без кліматичної камери, у якій реальна пневматична система може бути поставлена у тропічні та арктичні умови.

- Для прогнозування поведінки технічних систем можна екстраполювати результати реальних експериментів за допомогою математичної моделі. У цьому випадку дані, що отримані на реальній машині, можуть бути перенесені на інші машини.

- Скорочується тривалість випробувань системи або установки.

- Математичне моделювання дає можливість одержати інформацію, у якій виключений вплив деяких побічних явищ; часто дослідити такий вплив на реальному експерименті не можна.

- Математичне моделювання є джерелом інформації в тих випадках, коли з деяких причин провести дослідження реального об'єкта неможливо.

Хоча моделювання за допомогою ЕОМ є потужним засобом дослідження, його слід застосовувати далеко не у всіх випадках.

На ухвалення рішення про використання методу математичного моделювання об'єкта на ЕОМ впливають особливості дослідницького завдання, матеріальні можливості використання машинного часу, наявність експериментальних даних, необхідних для побудови математичної моделі, достатнє уявлення про фізику основних процесів і явищ.

Можна назвати деякі критерії доцільності застосування методу моделювання об'єктів на ЕОМ, якими слід керуватися при виборі відповідного методу розв'язку завдання, що постає перед дослідником:

- неприйнятність або відсутність аналітичних методів розв'язку завдання; непридатність усіх інших методів розв'язку;

- упевненість в успішному створенні моделі розглянутої системи;
- наявність операції, машини або елемента, тобто наявність експериментальної інформації, необхідної для створення математичної моделі;
- можливість використання математичної моделі для процесу дослідження, для чисельного експерименту.

Для дослідження властивостей розроблюваного об'єкта можуть застосовуватися різні види моделювання, і математичне є лише одним з них [2].

2. Типи моделей і методи моделювання

Моделювати можна якийсь *об'єкт* у статиці або *процес* функціонування об'єкта.

Об'єкт (від латинського - предмет) - усе те, на що спрямована людська діяльність). Кожний об'єкт складається з безлічі більш дрібних об'єктів і в той же час входить у більший об'єкт.

Модель - це заміник *об'єкта-оригіналу*, що забезпечує вивчення деяких властивостей цього оригіналу. Іноді дається більш точне визначення моделі, наприклад:

«Під моделлю розуміється уявна або матеріально реалізована система, яка, відображаючи та відтворюючи об'єкт дослідження, здатна замінити його так, що її вивчення дає нам нову інформацію про цей об'єкт» [2].

Моделювання - дія по створенню та використанню моделі для одержання інформації про найважливіші властивості об'єкта-оригіналу. Моделювання є основним методом досліджень у всіх галузях знань і обґрунтованим методом оцінок характеристик складних об'єктів.

Усі моделі можуть бути розділені на кілька видів за різними ознаками, насамперед - на матеріальні та абстрактні (див. рис 1).

Матеріальні моделі являють собою речовинне відтворення досліджуваного об'єкта, є реально існуючими предметами й виконуються з деяких матеріалів.

Матеріальні моделі діляться на *геометрично подібні, фізично подібні та аналогові*.



Рисунок 1 – Види моделей

До геометрично подібних моделей ставляться натурні моделі, макети, креслення. Натурні моделі й макети служать для оцінки зручності користування реальним об'єктом, раціонального розміщення обладнання на деякій площі або в деякому просторі, аналізі ергономічності, естетичності та ін.

Фізично подібні моделі створюються для відтворення та дослідження досліджуваних процесів. Прикладом дослідження за допомогою фізично подібної моделі є вивчення поведінки фюзеляжу літака або окремого його елемента, виконаних у деякому масштабі, в аеродинамічній трубі.

Прикладами випадку, коли модель і фізично, і геометрично подібна, є діючий експериментальний зразок устаткування.

В аналогових моделях використовується електрогідравлічна та електроакустична аналогія. Відомо, що гідравлічним аналогом електричної напруги є тиск, струму - витрата, електричного опору - гідравлічний опір. Тому перехідні процеси та коливання робочої рідини або газу у трубопровідних системах можна вивчати на аналоговій моделі, що виконана з електричних елементів: конденсаторів, опорів, провідників тощо

Абстрактні моделі не є реально існуючими предметами. Вони існують в уяві дослідника у вигляді якихось образів, що подумки представляються, або у вигляді формул, знаків, схем, зображених на папері.

Можна виділити два основні види абстрактних моделей - *образні та знакові*, і похідні від них - *образно-знакові*.

Образні моделі не є реально існуючими предметами, а існують у розумі дослідника, побудовані із чуттєво-наочних елементів. (Модель ідеального газу - пружні кулі). Для образних моделей важливо певна подібність із реальним об'єктом.

Знакові моделі характеризуються досить малою подібністю з реальним об'єктом або його повною відсутністю. До знакових моделей відносяться *математичні моделі* (тому що вони складені за допомогою знаків математичної символіки), гідравлічні та електричні схеми. До них можна віднести і креслення. Аналізуючи креслення, можна оцінити ряд властивостей майбутнього реального об'єкта, і тільки при позитивній оцінці по них виготовляють виріб.

Математична модель об'єкта - сукупність замкнених систем рівнянь, кожне з яких установлює з певним ступенем наближення кількісні зв'язки між окремими елементами й параметрами об'єкта, здатна замінити цей об'єкт для вивчення та одержання інформації.

Виділимо основні *особливості математичних моделей*.

1. Наближеність опису.

Математична модель описує об'єкт завжди наближено. Наближеність математичної моделі пояснюється прийнятими при її складанні допущеннями та пропозиціями, мета яких - спростити модель, зробити її зручною для використання, полегшити обчислювальну роботу. Неточності вимірювання при одержанні дослідних даних, використаних у моделі, також є причиною наближеності математичної моделі. Тому математичні моделі фізичних процесів є наближеними навіть у тих випадках, коли припущення, прийняті при розробці, добре обґрунтовані.

2. Компроміс між простотою моделі та повнотою опису.

При розробці математичної моделі об'єкта або процесу прагнуть ураховувати тільки основні, найбільш істотні фактори, що виявляють найбільший вплив на дослідження. Несуттєві явища та фактори, що виявляють незначний вплив на роботу досліджуваного об'єкта або протікання досліджуваного процесу з погляду поставленого завдання, у математичній моделі до уваги не приймаються.

Професіоналізм розроблювача - створити просту модель, уміти виділити та врахувати головне.

Надмірне спрощення математичної моделі може привести до втрати точності, а іноді й взагалі зробити модель непридатною пошуку. Бажання одержати більш деталізовану модель, врахувати більше число факторів приводить до ускладнення математичної моделі та до подорожчання чисельного експерименту.

Таким чином, укладача моделі завжди підстерігають дві небезпеки: перша - занадто огрубити явища, друга – загубитися у подробицях. Тому необхідно знайти розумний компроміс між вимогами простоти моделі, повноти врахування основних факторів і точності моделі.

3. Обмеженість застосування.

Математична модель повинна використовуватись тільки для поставленого завдання, тому що при її розробці були прийняті допущення, обґрунтовані саме

для цього завдання. При цьому могли бути відкинуті другорядні для розглянутого завдання фактори. Тому можливість застосування наявної математичної моделі для інших завдань і умов треба доводити.

Наприклад, якщо досліджували рух тіла в газі, то застосування цієї моделі для рідини може бути некоректним внаслідок більш істотного впливу архімедової сили, гідродинамічного опору середовища.

4. Відмінність математичної моделі від закону.

Не можна говорити про погані або гарні закони. Закон має характер деякої абсолютної категорії на даному рівні знань. У той же час деякий об'єкт може бути досліджений за допомогою зовсім різних математичних моделей, що досить точно описують його поведінку. Причому ці моделі не завжди слід уважати конкуруючими. Так, для оперативної оцінки роботи деякого об'єкта іноді зручніше використовувати просту й менш точну модель, ніж більш досконалу, але потребує завдання безлічі вихідних даних і умов [3].

3. Класифікація математичних моделей

3.1 Категорії об'єктів, які описуються математичними моделями

Математичні моделі описують властивості або поведінку деякого об'єкта. За просторовою ознакою, а саме - чи є відмінності чи ні у значеннях параметрів об'єкта в різних його точках, усі об'єкти розділяються на два види: ➤ *об'єкти із зосередженими параметрами*; ➤ *об'єкти з розподіленими параметрами*.

Об'єктом із зосередженими параметрами називають об'єкт, значення параметрів якого однакові у всіх його точках. У випадку, якщо параметри змінюються у часі, тобто ми маємо справу із процесом, то в такого об'єкта зміна значень кожного параметра відбувається на ту саму величину у всіх точках. Наприклад, при моделюванні роботи поршневого насоса, пневмо-гідро акумулятора або поршневого компресора визначають тиск у робочій порожнині, причому, не конкретизуючи, у якій точці цієї порожнини, тому що це не має

ніякого значення. При моделюванні напруженого стану довгої тонкостінної труби, навантаженої внутрішнім тиском і розташованої горизонтально, або стрижня, до якого прикладено розтяжне зусилля, також неважливо, у якій точці визначається напруга. Тому й ці об'єкти, що є досить протяжними, можна розглядати як об'єкти із зосередженими параметрами, тобто точковими.

Об'єктом з розподіленими параметрами називають об'єкт, значення параметрів якого різні у різних його точках. Наприклад, коли розглядається плин рідини або газу в трубопроводі з урахуванням втрат тиску по довжині, описується напружений стан трійника, навантаженого внутрішнім тиском, то, говорячи про тиск або напруження, треба обов'язково конкретизувати, про яку точку або про який перетин йде мова.

Важливо відзначити, що залежно від поставленого завдання й прийнятих допущень той самий реальний об'єкт може розглядатися або як об'єкт із зосередженими параметрами, або як об'єкт із розподіленими параметрами. Так, ми часто зустрічаємося з такими параметрами, як «температура в кімнаті» або «температура на вулиці». Очевидно, що значення температури повітря, обмірюваної поблизу підлоги, у вікна і під стелею кімнати, будуть відрізнятися на деяку величину. У більшості випадків це не важливо, а становить інтерес деяке усереднене по точках розглянутого простору значення, для того, щоб зрівняти його зі значенням в інший момент часу. Але в якихось випадках може бути важливо забезпечити певний рівень температури в різних місцях розглянутого простору, а отже, необхідно визначати (розраховувати) значення в цих точках.

Прикладом з технічної області може служити робоча камера поршневого компресора або двигуна внутрішнього згоряння. Так, у деяких завданнях дослідників може бути важливо врахувати той факт, що температура робочого тіла поблизу усмоктувального (впускного) клапана менше, ніж поблизу нагнітального (випускного) через різну температуру поверхні цих елементів машини, тому у цьому випадку необхідно розглядати робочу камеру як об'єкт із

розподіленими параметрами. Хоча в більш простій постановці задачі цей об'єкт є класичним прикладом об'єкта із зосередженими параметрами.

3.2 Типи процесів та їх математичне представлення

Математичні моделі функціонування об'єктів, які розглядаються і як об'єкти із зосередженими параметрами, і як об'єкти з розподіленими параметрами, можна розділити на кілька видів за тимчасовою ознакою, однозначності параметрів і теоретичною основою моделі. Класифікацію моделей по цих ознаках наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. – Види процесів і їх математичних моделей

Класифікаційна ознака	Процес	Вид математичної моделі	Приклад об'єкта або процесу, описуваного моделлю
1	2	3	4
Зміна в часі	Стаціонарний (параметри в часі не змінюються)	Статична	Рух рідини у трубопроводі при постійній витраті
	Нестаціонарний (параметри в часі змінюються): - Усталений нестаціонарний - Несталий нестаціонарний	Динамічна	Робочий процес поршневого насоса, компресора; плин двофазного потоку при корковому режимі
Однозначність параметрів	Процеси з однозначно певними параметрами	Детермінована	Робочі процеси машин; динаміка механізмів
	Процеси з випадковими значеннями параметрів	Стохастична	Процес виходу з ладу обладнання; моделі керування
Теоретична основа		Фундаментальні фізичні залежності	Робочі процеси машин; динаміка механізмів

		Регресійна	Швидкість корозії трубопроводу; Залежність в'язкості робочої рідини гідравлічної системи від температури
--	--	------------	---

3.3 Структура математичних моделей об'єктів

Залежно від виду об'єкта та характеру процесу його роботи до складу математичного опису моделей цього об'єкта можуть входити як прості залежності та алгебраїчні рівняння, так і диференціальні рівняння: звичайні або в частинних похідних.

Склад математичного опису моделей об'єктів із зосередженими параметрами наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Склад математичного опису моделей об'єктів із зосередженими параметрами

Вид моделі	Склад математичного опису
Статична модель об'єкта із зосередженими параметрами	Алгебраїчні рівняння
Динамічна модель об'єкта із зосередженими параметрами	Звичайні диференціальні рівняння (похідна в часі)

Склад математичного опису моделей об'єктів з розподіленими параметрами наведено в таблиці 3. Слід мати на увазі, що крім зазначених у таблиці 3 рівнянь, до складу моделей звичайно входять і більш прості рівняння та залежності [4].

4. Основні види математичного моделювання

Можна виділити два види основних математичних моделей: *аналітичні* та *імітаційні*.

При *аналітичному* моделюванні процеси функціонування об'єкта записують у вигляді деяких функціональних співвідношень (алгебраїчних,

диференціальних, інтегральних) і одержують явні залежності для шуканих характеристик, або, застосовуючи чисельні методи, одержують числові значення розглянутих змінних при конкретних початкових даних, за якими можна проаналізувати залежність однієї змінної від іншої. Історично цей метод моделювання зложився першим. Більшість завдань за курсом теоретичної механіки вирішуються студентами саме цим методом.

Таблиця 3 – Склад математичного опису моделей об'єктів з розподіленими параметрами

Вид моделі	Вид об'єкта	Склад мат. опису
Статична модель об'єкта з розподіленими параметрами	Одномірний	Звичайні диференціальні рівняння (похідна по одній просторовій координаті)
	Двомірний	Диференціальні рівняння в частинних похідних (похідні по двом змінним - двом координатам)
	Тривимірний	Диференціальні рівняння в частинних похідних (похідні по трьом координатам)
Динамічна модель об'єкта з розподіленими параметрами	Одномірний	Диференціальні рівняння в частинних похідних (похідні за часом і однієї координаті)
	Двомірний	Диференціальні рівняння в частинних похідних (похідні за часом і двом координатам)
	Тривимірний	Диференціальні рівняння в частинних похідних (похідні за часом і по трьох координатах)

Дослідження процесу функціонування об'єкта можна ефективно зробити аналітичним методом, якщо відомі явні залежності (або їх можна одержати) шукані характеристики, що зв'язують, з початковими умовами, параметрами й змінними системи. Однак такі залежності вдається одержати тільки для порівняно простих систем. Тому, при аналітичному моделюванні часто йдуть на істотне спрощення первісної моделі, наприклад, ухвалюють, що ряд параметрів не змінюється в ході процесу.

При *імітаційному математичному моделюванні* об'єкт представляється як сукупність окремих елементів, елементарних явищ і зв'язків між елементами і явищами, а процес роботи об'єкта імітують (відслідковують), обчислюючи за допомогою певного алгоритму значення всіх параметрів його стану в обрані моменти часу. При цьому елементарні явища імітуються зі збереженням їх логічної структури, послідовності в реальному процесі.

У найпростіших випадках це може бути безперервне відтворення одногодвох параметрів. Імітаційне математичне моделювання як нова технологія дослідження складних процесів почала бурхливо розбудовуватись із впровадженням ЕОМ у інженерну та наукову діяльність. Даний спосіб теоретичного дослідження наукових проблем природничого спрямування, заснований на аналізі результатів розрахунків на комп'ютері по розроблених математичних моделях, називають ще обчислювальним експериментом.

Основною перевагою імітаційного моделювання у порівнянні з аналітичним моделюванням є можливість розв'язку більш складних завдань. При цьому для розгляду впливу одного параметра на інший необов'язково мати аналітичний зв'язок між ними (виражений деякою формулою), а досить установити залежності кожного з них з якимось третім параметром, наприклад, часом або координатою. Тому на сьогодні імітаційне моделювання є найбільш ефективним методом дослідження об'єктів, особливо на етапі їх проектування, а також удосконалювання вже створеного обладнання.

Надалі ми будемо знайомитися з методологією саме імітаційного математичного моделювання.

5. Ключові етапи побудови математичних моделей

Математичне моделювання містить у собі ряд етапів. Послідовність дій при типовому математичному моделюванні роботи обладнання наведена на блок-схемі, представленої на рис. 2. Прокоментуємо зміст цих основних етапів.

Етап 1. Збір інформації про об'єкт

На цьому етапі збирають інформацію та вивчають явища, на яких побудовано основний процес роботи об'єкта. Чим повніше інформація про реальний об'єкт, що підлягає заміні математичною моделлю, тим більше якісно може бути виконане математичне моделювання. Успішне моделювання передбачає ясне розуміння складових явищ процесів, їх взаємозв'язків і взаємодій, виділення головних факторів, що виявляють найбільш істотний вплив на досліджуваний об'єкт [5].



Рисунок 2. - Етапи комп'ютерного математичного моделювання об'єкта

Етап 2. Визначення мети й завдань моделювання

Як уже вказувалося раніше, кожна математична модель створюється під конкретне завдання, і той самий об'єкт може бути змодельований за допомогою різних математичних моделей залежно від поставлених завдань.

Етап 3. Розробка концептуальної моделі

На цьому етапі проводиться схематизація процесу роботи, тобто зображується схема, яка відображає роботу об'єкта; виділяється *контрольний об'єм* (або кілька контрольних об'ємів) - обмежена частина простору, у якій розглядаються параметри; виділяються «елементарні» явища, що становлять процес; проводиться розбивка об'єкта на системи та підсистеми, описуються їх взаємозв'язки; виділяються незалежні та залежні фактори; приймаються та обґрунтовуються *припущення*, визначається перелік необхідних експериментальних даних і вид їх положення у математичній моделі. Навіть із перерахування робіт цього етапу видна його значимість. Усі етапи мають велике значення для успішного математичного моделювання, однак найбільшу значимість мають роботи, що становлять зміст саме цього основного етапу.

Етап 4. Розробка математичної моделі

На цьому етапі роблять запис формул, що відбивають взаємозв'язки всіх параметрів; логічні відносини записуються у вигляді нерівностей; необхідні для наступних розрахунків експериментальні дані апроксимуються відповідними залежностями, зручними для обчислення на комп'ютері.

Іноді для повного математичного опису можуть знадобитися формули, що відбивають залежності деяких властивостей від якихось параметрів, наприклад в'язкості нафти від температури. Це може привести до необхідності одержання власних експериментальних даних або обробки масивів експериментальних даних, наявних у літературних джерелах.

Етап 5. Розробка алгоритму й програми розрахунків

Виконання цього етапу багато в чому залежить від навичок розроблювача, володіння ним тією або іншою мовою програмування й тих можливостей, якими характеризується ця мова (або математичний пакет). Для виконання даного й наступного етапу, як правило, доцільно залучати відповідного фахівця - програміста.

Етап 6. Відлагодження програми

Відлагоджені програми обов'язково повинен брати участь розроблювач моделі, що знає фізичну сутність модельованого об'єкта. Тоді на основі аналізу

результатів контрольних розрахунків він може підказати програмістові, у якому блоці слід шукати помилку.

Етап 7. Перевірка адекватності

Під адекватністю моделі розуміють відповідність її реальному об'єкту, тобто подібність параметрів і характеристик, одержуваних за допомогою моделі, відповідним до величин реального об'єкта. Модель повинна описувати реальний об'єкт: якісно - правильно, а кількісно - з необхідним ступенем точності.

Етап 8. Коригування моделі

Залежно від результатів контрольних розрахунків (прогонів) і перевірки адекватності можливо багаторазове повернення до етапу 3 - до концептуальної моделі, вносячи зміни в схематизацію процесів. При цьому можуть поступово відкидатися або коректуватися найбільш грубі допущення, уводитися якісь нові змінні на основі нової інформації про об'єкт.

Етап 9. Дослідження об'єкта на моделі

Перш ніж приступитися до цього етапу моделювання необхідно мати чіткий план проведення досліджень із вказівкою комбінацій змінних і параметрів, для яких повинне бути виконане моделювання об'єкта. Планування комп'ютерного експерименту покликано дати у підсумку максимальний об'єм необхідної інформації про об'єкт моделювання при мінімальних витратах часу. Після складання плану можна приступитися до робочих розрахунків на комп'ютері, які звичайно містять у собі: підготовку наборів вихідних даних для введення в програму; перевірку вихідних даних; проведення розрахунків; одержання вихідних даних, тобто результатів моделювання.

Етап 10. Інтерпретація результатів моделювання

Щоб ефективно використовувати отримані результати розрахунків, необхідно знати, як їх інтерпретувати. Необхідно, щоб на друк виводилися у вигляді таблиць або графіків тільки ті результати, які потрібні для подальшого аналізу. При цьому слід ураховувати, що графіки більш наочно ілюструють результати моделювання.

Одержавши та проаналізувавши результати моделювання, їх потрібно інтерпретувати стосовно модельованого об'єкта. На основі цього можуть робитися висновки щодо характеристик об'єкта, формулюватись рекомендації із практичного використання результатів моделювання. Наприклад, по зміні конструкції об'єкта, його геометричних розмірів або на вибір оптимального режиму роботи обладнання.

6. Врахування допущень у моделюванні

Математична модель описує реальний об'єкт завжди приблизно. У першу чергу це обумовлено тим, що при її розробці (на етапі схематизації процесу функціонування об'єкта) були прийняті різного роду допущення.

Допущення - навмисне спрощення, прийняте для розв'язку завдань; відхід від реального, але складного для математичного опису, до більш простого.

Допущення приймається розроблювачем математичної моделі та обґрунтовуються. Вибір допущень залежить від особливостей поставленого завдання. Приведемо деякі варіанти найбільше часто прийнятих допущень, згрупованих за декількома ознаками [6].

Типові допущення: *а)*

кінематики:

- обертання колінчатого вала кривошипно-шатунного механізму або валу електродвигуна відбувається з постійною кутовою швидкістю;
- траєкторія руху рухливих частин устаткування прямолінійна; - зазори в зчленуваннях механізму відсутні; *б) динаміки:*

- приймається спрощена схема діючих сил і точок їх прикладання;
- сили тертя відсутні;
- пружні деформації робочих органів відсутні;
- інерція не враховується (клапани відкриваються миттєво та

повністю);

- пульсації тиску відсутні;
- зміна тиску підкоряється синусоїдальному закону; - маса

рухливого тіла зосереджена в одній точці;

в) масообміну:

- витікання та перетікання через різні зазори, клапани відсутні; - конденсації пар і випару краплинної рідини не відбувається; *г) теплових процесів:*

- підводу та відводу тепла немає;
- теплом, що виділяються при терті, зневажаємо;
- усі стінки мають однакову температуру (або по групах поверхонь); - температура поверхні (стінок) не міняється; *д) характеру об'єкта:*

- реальний об'єкт із розподіленими параметрами розглядається як об'єкт із зосередженими параметрами, тобто значення параметрів об'єкта не залежать від просторових координат;

- робоче тіло, середовище - однорідне (пісок і інші механічні домішки відсутні);

- склад робочого тіла - постійний;

- газове середовище підкоряється законам ідеального газу; - рідина нестислива; *е) характеру процесів*

- процеси оборотні (не відбувається пластичних деформацій,

розривів, випару, тертя тощо);

- процеси рівновісні (наприклад, випаровування відбувається при постійній температурі рідини);

- нестационарний процес розглядається як квазістационарний (тобто приймається, що параметри процесу на невеликому відрізку часу не змінюються);

- зміна параметрів відбувається одночасно у всьому контрольному обсязі (наприклад, тепло - передалося всій масі газу, тиск - змінився у повному об'ємі одночасно)

ж) *застосовуваного математичного опису:*

- фізичні властивості розглядаються як константи, тоді легше робити перетворення;

- можливість застосування наближених залежностей (наприклад, широко застосовувана залежність для швидкості поршня кривошипного насоса є наближеною);

- поведінка об'єкта підкоряється певному закону (наприклад, стиск газу в поршневому компресорі описується рівнянням політропи з постійним показником);

- можливість застосування в математичній моделі експериментальних даних (у вигляді констант, коефіцієнтів або рівнянь регресії).

Звичайно при моделюванні спочатку ухвалюється багато допущень, і якщо результати обчислень по спрощеній моделі показують, що вона якісно вірно описує об'єкт і комп'ютерна програма працездатна, то частина з них поступово знімається або грубе допущення замінюється менш грубим.

7. Розробка та впровадження алгоритмів моделювання роботи об'єктів

При математичному моделюванні після опису концептуальної моделі розробляють моделюючий алгоритм, для чого становлять укрупнені і детальні

схеми алгоритмів і схеми програм (ще їх називають блок-схеми), необхідні для наступного дослідження об'єкта на комп'ютерній моделі.

Схема алгоритму показує впорядковану в часі послідовність операцій, пов'язаних із розв'язком завдання моделювання.

Схема програми - відбиває порядок програмної реалізації моделюючого алгоритму, тобто вона являє собою інтерпретацію схеми алгоритму на базі конкретної алгоритмічної мови.

При цьому схема алгоритму може бути виконана як в *укрупненій*, так і в *детальній формі*.

Укрупнена схема алгоритму (інша назва - *узагальнена*) задає загальний порядок дій при моделюванні процесу роботи об'єкта без будь-яких або уточнюючих деталей, тобто показує, **що** необхідно визначити або виконати на черговому кроці моделювання.

Детальна схема алгоритму містить уточнення, відсутні в укрупненій схемі та показує не тільки, **що** треба виконувати на черговому кроці моделювання, але і **як** це виконати.

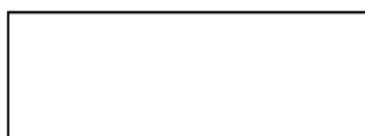
Для зображення цих блок-схем використовується набір символів, обумовлених ГОСТ 19.701-90 «Єдина система програмної документації. Умовні позначки й правила виконання».

Деякі найбільш уживані символи:

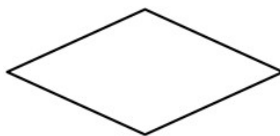
- *вхід і вихід у зовнішнє середовище* - (початок і кінець алгоритму):



- *процес* - виконання однієї або групи операцій:



- *розв'язок* - має один вхід і ряд виходів, тільки один з яких може бути активізований при виконанні умови або умов, певних усередині цього символу:



- *підготовка* - відображає команду, що впливає на деяку наступну змінну або функцію (наприклад, установка перемикача, індексного регістру: $i=1...N$):



- *визначений процес* - відображає процес, операції якого визначені в іншому місці - підпрограмі, модулі:



- *ручна операція* - відображає будь-який процес, виконуваний людиною:



Розрізняють наступні основні види алгоритмів: лінійний, циклічний, алгоритм із розгалуженням.

Побудова схеми програми являє собою один з важливих моментів моделювання, при цьому повинна бути приділена увага особливостям мови програмування, обраної для реалізації моделі [7].

8. Використання алгоритмічних мов програмування та математичних пакетів

Мови програмування мають, як правило, певну орієнтацію. Для моделювання об'єктів і процесів існує кілька сотень різних алгоритмічних мов. Їх можна розбити на 2 групи:

- спеціалізовані мови імітаційного моделювання (MIMIC, DYNAMO, GASP, GPSS, SIMULA, SIMSCRIPT, Borland Delphi і ін.)
- мови загального призначення, або мови високого рівня (PL/1, C++, Basic, FORTRAN, PASCAL, COBOL і ін.)

Звичайно мови мають певну орієнтацію. Так, мови імітаційного моделювання залежно від спрямованості (орієнтації) можна розділити на підгрупи, представлені в таблиці 4.

GPSS (*General Purpose Simulation System* - загальноцільова система моделювання) – мова програмування, використовувана для імітаційного моделювання різних систем, в основному - систем масового обслуговування.

Система GPSS була розроблена співробітником фірми IBM Д. Гордоном в 1961 году. У нашій країні ця мова завоювала популярність після видання в СРСР в 1980 году монографії Т.Д. Шрайбера. У ній була розглянута одна з ранніх версій мови - GPSS/360, а також основні особливості могутнішої версії - GPSS V, підтримуваною компанією IBM. В 1984 году з'явилася перша версія GPSS для персональних комп'ютерів з операційною системою DOS - GPSS/PC. Вона була розроблена компанією Minuteman Software під керівництвом С. Кокса. Кінець XX століття ознаменувався розробкою компанією Minuteman Software програмного продукту **GPSS World**, що побачив світло в 1993 году. За порівняно невеликий період часу було випущено кілька його версій, причому в кожній наступній можливості системи моделювання нарощувалися.

Таблиця 4 – Підгрупи мов по їхній орієнтації

Група мов	Спрямованість (орієнтація) мови	Приклади мов

Мови імітаційного моделювання	На пряме використання диференціальних рівнянь	<i>MIMIC</i>
	На блокову імітацію диференціальних рівнянь	<i>DYNAMO</i>
	На стани й час	<i>GASP</i>
	На дії	<i>FORSIM, CSL</i>
	На процеси	<i>GPSS, SIMULA, SOL</i>
	На події	<i>SIMSCRIPT, GASP</i>
	На об'єкти	<i>Visual Basic, Borland Delphi, C#, Java</i>
Мови загального призначення	На обробку даних	<i>COBOL</i>
	На розрахунки	<i>FORTRAN, PASCAL</i>
	Багатоцільові	<i>PL/I, C++, Basic</i>

Паскаль (англ. Pascal) – мова програмування загального призначення. Одна з найбільш відомих мов програмування, широко застосовувалася в промисловому програмуванні [4], навчанні програмуванню у вищій школі, є базою для ряду інших мов.

Особливостями мови є строга типізація і наявність засобів структурного (процедурного) програмування. Паскаль була однією із перших таких мов. На думку Н. Вирта, мова повинна сприяти дисциплінуванню програмування, тому, поряд зі строгою типізацією, у Паскалі зведені до мінімуму можливі синтаксичні неоднозначності, а сам синтаксис автор постарався зробити інтуїтивно зрозумілим навіть при першому знайомстві з мовою.

Відомо кілька діалектів цієї мови (Free Pascal, GNU Pascal, Object Pascal, Turbo Pascal). Найбільш відомою реалізацією Паскаля, що забезпечила широке поширення та розвиток мови, є Turbo Pascal фірми Borland, яка виросла потім в об'єктний Паскаль для DOS (починаючи з версії 5.5) і Windows і далі в Delphi, у якій були впроваджені значні розширення мови.

Cі (англ. **C**) – стандартизована процедурна мова програмування, розроблена на початку 1970-х років співробітниками Bell Labs Кеном Томпсоном і Денисом Ритчи як розвиток мови Би. Сі був створений для використання в операційній системі UNIX. З тих пір вона була портована на багато інших операційних систем і стала однією із самих використовуваних мов програмування. Сі цінують за її ефективність. Вона є самою популярною мовою для створення системного програмного забезпечення. Її також часто використовують для створення прикладних програм. Незважаючи на те, що Сі не розроблялася для новачків, вона активно використовується для навчання програмуванню. Надалі синтаксис мови Сі став основою для багатьох інших мов.

Для мови Сі характерні лаконічність, стандартний набір конструкцій керування потоком виконання, структур даних і великий набір операцій.

C++ - компільована статично типізована мова програмування загального призначення. Підтримуючи різні методології програмування, поєднує властивості як мов високого так і низького рівнів. У порівнянні з попередницею - мовою **C**, - найбільша увага приділена підтримці об'єктно – орієнтованого та узагальненого програмування.

Будучи однією із самих популярних мов програмування, **C++** широко використовується для розробки програмного забезпечення. Область її застосування включає створення операційних систем, різноманітних прикладних програм, драйверів обладнання, додатків для систем, високопродуктивних серверів, а також розважальних додатків. Існує кілька реалізацій мови **C++** як безкоштовних, так і комерційних. **C++** вплинула на інші мови програмування, у першу чергу на Java і C#.

При створенні **C++** Бьєрн Страуструп прагнув зберегти сумісність із мовою **C**. Безліч програм, які можуть однаково успішно транслюватися як компіляторами **C**, так і компіляторами **C++**, завдяки тому, що синтаксис **C++** був заснований на синтаксисі **C**.

C# (вимовляється *си-шарп*) – об'єктно – орієнтована мова програмування. Розроблена в 1998-2001 годах групою інженерів під керівництвом Андерса Хейлсберга у компанії Microsoft як мова розробки додатків для платформи

Microsoft.NET Framework і згодом була стандартизована як ECMA-334 і ISO/IEC 23270.

Мова **C#** відноситься до родини мов з C- подібним синтаксисом, з них її синтаксис найбільш близький до **C++** і **Java**. Мова має статичну типізацію, підтримує поліморфізм, перезавантаження операторів (у тому числі операторів явного та неявного приведення типу), делегування, атрибути, події, властивості, узагальнені типи та методи, ітератори, анонімні функції із підтримкою замикань, LINQ, виключення, коментарі у форматі XML.

Як і більшість мов, **C#** має версії. Останні версії - **C#7.0** випущена та змінена в грудні 2017 року.

Java - об'єктно-орієнтована мова програмування, розроблена компанією Sun Microsystems. Додатки Java звичайно компілюються в спеціальний байткод, тому вони можуть працювати на будь-якій віртуальній Java-Машині (JVM) незалежно від комп'ютерної архітектури. Дата офіційного випуску - 23 травня 1995 року.

Перевага подібного способу виконання програм - у повній незалежності байт-коду від операційної системи та обладнання, що дозволяє виконувати Java-Додатки на будь-якому обладнанні, для якого існує відповідна віртуальна машина. Іншою важливою особливістю технології Java є гнучка система безпеки завдяки тому, що виконання програми повністю контролюється віртуальною машиною. Будь-які операції, які перевищують установлені повноваження програми (наприклад, спроба несанкціонованого доступу до даних або з'єднання з іншим комп'ютером) викликають негайне переривання.

Часто до недоліків концепції віртуальної машини відносять те, що виконання байт-коду віртуальною машиною може знижувати продуктивність програм і алгоритмів, реалізованих мовою Java. Останнім часом був внесений ряд удосконалень, які трохи збільшили швидкість виконання програм на Java.

За деякими даними, для семи різних завдань час виконання на Java становить у середньому в півтора-два рази більше, чим для C/C++, у деяких випадках Java швидше, а в окремих випадках в 7 раз повільніше. З іншого боку, для більшості з них споживання пам'яті Java - Машиною було в 10-30 раз більше,

ніж програмою на C/C++. Також примітне дослідження, проведене компанією Google, згідно з яким відзначається суттєво більша низька продуктивність і більше споживання пам'яті в тестових прикладах на Java у порівнянні з аналогічними програмами на C++. Реліз останньої версії мови Java - Java 7 - відбувся 28 липня 2017 року.

При аналізі ефективності застосування тієї або іншої мови для моделювання конкретного об'єкта оцінюють такі властивості:

- можливість опису алгоритмів поведінки об'єкта в термінах мови;
- поширеність мови;
- наявність стандартних підпрограм;
- зручність обробки й подання результатів розрахунків;
- зручність застосування для комп'ютерної реалізації математичної моделі;
- перевага користувача (більш знайомій мові).

Користувач звичайно віддає перевагу мовам, що володіють більшою гнучкістю при мінімальній кількості команд.

Останнім часом широко стали застосовуватися проблемно-орієнтовані комплекси - пакети прикладних програм, трансформовані надалі у своєрідні комп'ютерні системи. Однією з таких систем є Mathcad, називаний різними авторами як математичний пакет, математичний редактор, універсальна система комп'ютерної математики, універсальне середовище [8].

9. Планування і проведення комп'ютерних експериментів

Завдання планування комп'ютерних експериментів з моделлю формулюється в такий спосіб: необхідно одержати вичерпну інформацію про об'єкт моделювання, заданого у вигляді моделюючого алгоритму та реалізованого за допомогою програми, при мінімальних або обмежених витратах комп'ютерних ресурсів і часу на реалізацію процесу моделювання.

Таким чином, при комп'ютерному моделюванні слід планувати технологію використання математичної моделі, тобто порядок проведення на її основі

експериментів (різних варіантів розрахунків) з використанням комп'ютера.

До теперішнього часу у фізиці, біології тощо склалася теорія планування експериментів, у якій розроблені досить потужні математичні методи, що дозволяють підвищити ефективність таких експериментів. Але перенос цих результатів на область комп'ютерних експериментів з моделями може мати місце тільки з урахуванням специфіки моделювання систем на персональному комп'ютері.

Незважаючи на те, що цілі моделювання на комп'ютері та проведення натурних експериментів збігаються, між цими двома видами існують відмінності. Особливості експерименту на комп'ютері за допомогою моделі:

- простота повторення умов комп'ютерного експерименту;
- можливість керування експериментом з моделлю, включаючи його переривання й поновлення;
- легкість варіювання умов проведення експерименту (впливів зовнішнього середовища, режимів);
- можливість варіювання значень тільки одного параметра при фіксованих значеннях інших.

Розглянемо далі основні поняття теорії планування експериментів.

Розрізняють вхідні та вихідні *змінні*. Залежно від того, яку роль відіграє кожна змінна в проведеному експерименті, вона може бути або *фактором*, або *відгуком (реакцією)*.

Фіксований набір рівнів усіх факторів визначає одне з можливих станів розглянутої системи. Одночасно цей набір являє собою умови проведення одного із можливих режимів роботи об'єкта.

Кожному фіксованому набору рівнів факторів відповідає певна точка в багатомірному просторі, називаному *факторним простором*. Експеримент, у якому реалізуються всі можливі комбінації рівнів факторів (тобто перебираються всі можливі варіанти), називається *повним факторним експериментом*.

При плануванні експериментів необхідно визначити основні *властивості факторів*.

Фактори при проведенні експериментів можуть бути керованими та некерованими, спостережуваними та неспостережуваними, досліджуваними та недосліджуваними, кількісними і якісними, фіксованими й випадковими.

Фактор називається *керованим*, якщо його рівні цілеспрямовано вибираються дослідником у процесі експерименту. При комп'ютерній реалізації моделі дослідник ухвалює рішення, управляючи зміною в припустимих межах різних факторів.

Фактор називається *спостережуваним*, якщо його значення спостерігаються й реєструються. Звичайно в комп'ютерному експерименті з моделлю спостережувані фактори збігаються з керованими. Але некерований фактор також можна спостерігати. *Спостережувані некеровані фактори* одержали назву *супутніх*. Звичайно при комп'ютерному експерименті з моделлю число супутніх факторів велике, тому раціонально враховувати вплив лише тих з них, які найбільше суттєво впливають на реакцію, що цікавить дослідника.

Фактор відноситься до *досліджуваних*, якщо він включений у модель для вивчення властивостей об'єкта, а не для допоміжних цілей, наприклад для збільшення точності експерименту.

Фактор є *кількісним*, якщо його значення - числові величини, що впливають на реакцію, а якщо ні, то *фактор* називається *якісним* (наприклад: розтягання, стиск, усмоктування й ін.).

Фактор називається *фіксованим*, якщо в експерименті можуть бути досліджені будь-які значення фактору, що цікавлять експериментатора, а якщо експериментатор досліджує тільки деяку випадкову вибірку із сукупності значень факторів, що цікавлять, *то фактор називається випадковим*. На підставі випадкових факторів можуть бути зроблені імовірнісні висновки і про ті значення факторів, які в експерименті не досліджувалися.

Основними вимогами до факторів для успішного проведення обчислювального експерименту, є:

- керованість фактору;
- безпосередній вплив на об'єкт;
- сумісності факторів;

- незалежності факторів.

Під керованістю фактору розуміється можливість установки та підтримки обраного потрібного рівня фактору постійним протягом усього випробування або мінливим відповідно до заданої програми;

Вимога безпосереднього впливу на об'єкт має велике значення у зв'язку з тим, що важко керувати фактором, якщо він є функцією інших факторів.

При плануванні експерименту звичайно одночасно змінюється декілька факторів. Сумісність факторів означає, що всі їх комбінації здійсненні.

Незалежність означає можливість установа фактору на будь-якому рівні незалежно від рівнів інших.

План комп'ютерного експерименту за допомогою математичної моделі - це сукупність варіантів розрахунків, кожний з яких характеризується набором фіксованих значень керованих незалежних факторів.

Кількість варіантів і набір керованих факторів та досліджуваних відгуків визначає експериментатор виходячи із завдання [9].

10 Застосування систем автоматизованого проектування

У сучасному виробництві широке поширення одержали **системи автоматизованого проектування (САПР, computer aided design)**, 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 відносять 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 їхню частину одержують шляхом взаємодії людини та ЕОМ, називають *автоматизованим* на відміну від ручного (без використання ЕОМ) або *автоматичного* (без участі людини на проміжних етапах). Система, що реалізує автоматизоване проектування, являє собою систему автоматизованого проектування (в англomовному написанні **CAD System** – Computer Aided Design System). САПР (або CAD) звичайно використовується разом із системами автоматизації інженерних розрахунків і аналізу **CAE** (Computer-Aided engineering). Дані із CADсистем передаються в **CAM** (Computer-Aided manufacturing) – систему автоматизованої розробки програм обробки деталей для верстатів.

CAE – автоматизоване конструювання, використання спеціального програмного забезпечення для проведення інженерного аналізу міцності та інших технічних характеристик компонентів, виконаних у системах автоматизованого проектування. Програми автоматизованого конструювання дозволяють здійснювати динамічне моделювання, перевірку та оптимізацію виробів і засобів їхнього виробництва.

CAM – автоматизоване виробництво. Термін використовується для позначення програмного забезпечення, основною метою якого є створення програм для керування верстатами з 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 заготовці виробу, які потім автоматично верифікуються, візуалізуються (для візуальної перевірки коректності) і обробляються постпроцесором для одержання програми керування конкретним верстатом.

Структура САПР. САПР складається з проєктувальної і обслуговувальної підсистем. Проєктувальні підсистеми безпосередньо виконують проєктні процедури. Прикладами проєктувальних підсистем можуть слугувати підсистеми геометричного тривимірного моделювання механічних об'єктів, виготовлення конструкторської документації, схемотехнічного аналізу, трасування з'єднань у друкованих платах.

Обслуговувальні підсистеми забезпечують функціонування проєктувальних підсистем, їхню сукупність часто називають системним середовищем (або оболонкою) САПР. Типовими обслуговувальними підсистемами є підсистеми керування проєктними даними (PDM – Product Data Management), керування процесом проєктування (DesPM – Design Process Management), користувацького інтерфейсу для зв'язку розробників з EOM, CASE (Computer Aided Software Engineering) для розробки та супроводу програмного забезпечення САПР, навчальні підсистеми для освоєння користувачами технологій, реалізованих у САПР. На сьогодні створено велику кількість програмно-методичних комплексів для САПР із різними ступенем спеціалізації й прикладною орієнтацією. У результаті автоматизація проєктування стала необхідною складовою частиною підготовки інженерів різних спеціальностей; інженер, що не має знань та не вміє працювати в САПР, не може вважатися повноцінним фахівцем.

11. Огляд найбільш поширених САПР світових виробників

AutoCAD – найвідоміший із продуктів компанії Autodesk, універсальна система автоматизованого проєктування, що поєднує у собі функції двовимірного креслення й тривимірного моделювання. З'явилася в 1982 році і була однією з перших САПР, розроблених для РС. Швидко завоювала популярність серед проєктувальників, інженерів і конструкторів різних галузей промисловості завдяки демократичним цінам.

AutoCAD прискорює щоденну роботу зі створення креслень, підвищує швидкість і точність їхнього виконання. Середовище концептуального

проектування забезпечує легке й інтуїтивне створення та редагування твердих тіл і поверхонь. AutoCAD дозволяє легко й швидко створювати на основі моделі розрізи й проекції, ефективно формувати комплекти креслень і керувати ними: групувати їх за розділами проекту та іншими логічними категоріями, створювати переліки аркушів, керувати видами креслень, архівувати комплекти проектної документації та організовувати спільну роботу фахівців. Наявні в AutoCAD засоби візуалізації, такі як анімація й реалістичне тонування, допомагають виявити будь-які вади на ранніх етапах проектування.

Формат DWG, що використовується в AutoCAD, є стандартом серед проектувальників різних галузей промисловості, крім того, є можливості експорту й імпорту інших розповсюджених файлових форматів, таких як pdf, що дозволяє ефективно організувати обмін даними між фахівцями.

Програма постійно розвивається, серед можливостей, що з'явилися нещодавно, можна назвати параметричні взаємозв'язки між об'єктами, створення та редагування об'єктів довільної форми тощо. Існують спеціалізовані галузеві різновиди AutoCAD для архітектури, дорожнього будівництва та землевпорядження, електротехніки, машинобудування тощо. Для фахівців, яким не потрібні функції роботи з 3D-графікою, існує полегшена версія AutoCAD, призначена для створення двовимірних креслень – AutoCAD LT.

Рішення Autodesk для промислового виробництва й машинобудування засновані на технології цифрових прототипів, тобто надають конструкторам, інженерам, дизайнерам і технологам можливість повністю досліджувати виріб ще на етапі проектування. За допомогою даної технології виробники створюють цифрові моделі та проекти, конструюють, перевіряють, оптимізують і керують ними на всіх етапах – від ідеї до реального втілення.

AutoCAD Mechanical – продукт на платформі AutoCAD для промислового виробництва, що є частиною технології цифрових прототипів Autodesk. Він допомагає прискорити процес проектування, дозволяючи в той же час використовувати досвід і проекти, накопичені

при роботі в AutoCAD. Маючи у своєму складі бібліотеки ДСТУ, стандартних деталей і функції автоматизації типових завдань, він забезпечує значний вииграш у продуктивності при проектуванні.

AutoCAD Electrical – це AutoCAD для проектування електричних систем керування, що є важливою частиною технології цифрових прототипів Autodesk і що дозволяє працювати швидко, якісно й зі значно меншими витратами в знайомому середовищу проектування. Спеціалізовані функції й великі бібліотеки умовних позначень дозволяють підвищити продуктивність, усунути ризик виникнення помилок і забезпечити точність інформації, переданої у виробництво.

AutoCAD Inventor Suite являє собою збалансований набір рішень Autodesk для проектування та конструювання в промисловому виробництві. Рішення поєднують у собі інтуїтивне середовище 3D моделювання деталей і виробів з інструментами, дозволяють конструкторам зосередитися на функціональних вимогах до проекту.

CATIA – система автоматизованого проектування французької фірми Dassault Systems. CATIA V1 була анонсована в 1981 році. У даний момент у світі використовуються дві версії – V4 і V5, які значно відрізняються між собою. CATIA V4 була анонсована в 1993 році й створювалася для Unixподібних операційних систем, CATIA V5 була анонсована в 1998 році, і це перша з версій, що може працювати під керуванням Microsoft Windows. За запевненнями Dassault Systems, CATIA V5 була написана «з нуля» і втілила в собі передові технології САПР. Спочатку CATIA V5 не користувалася особливою популярністю на ринку, і щоб стимулювати її використання Dassault Systems висунула концепцію PLM (Product Lifecycle Management). Ідея PLM виявилася вдалою і її підхопила майже вся індустрія САПР. У лютому 2008 року Dassault Systems анонсувала нову версію системи – CATIA V6. V6 буде підтримувати програми моделювання для всіх інженерних дисциплін і колективні бізнес-процеси протягом життєвого циклу виробу. Нова концепція фірми одержала назву «PLM 2.0 на платформі V6». Суть концепції – тривимірне моделювання і колективна робота в реальному часі. Для зв'язку між людьми, що перебувають у

різних точках світу, передбачені засоби простого підключення до Web. PLM 2.0 – це новий підхід, що відкриває можливість використовувати інтелектуальні результати онлайнового взаємозв'язку. Кожний користувач може придумувати, розробляти продукти та обмінюватися інформацією на універсальній 3D-мові. Користувачі зможуть у наочній формі оперувати одночасно віртуальними та реальними об'єктами.

Pro/Engineer – CAD система високого рівня. Містить у собі всі необхідні модулі для твердотілого моделювання деталей і створення креслярської документації. Має вбудовані можливості для проектування зварних конструкцій.

SolidWorks – продукт компанії SolidWorks Corporation, система автоматизованого проектування у трьох вимірах, працює під керуванням Microsoft Windows. Розроблена як альтернатива для двовимірних програм САПР. Набула популярності завдяки простому інтерфейсу. Основний продукт SolidWorks містить інструменти для тривимірного моделювання, створення креслень, роботи з листовим металом, зварними конструкціями і поверхнями довільної форми. Є можливість імпортування великої кількості файлів 2D і 3D CAD-програм. Є API для програмування в середовищі Visual Basic і C. Також є програма для аналізу методом кінцевих елементів початкового рівня CosmosXpress.

ADEM (Automated Design Engineering Manufacturing) – російська інтегрована CAD/CAM/CAPP-система, призначена для автоматизації конструкторсько-технологічної підготовки виробництва (КТПВ). ADEM була створена як єдиний продукт, що містить в собі інструментарій для проєктантів і конструкторів (CAD), технологів (CAPP – Computer-Aided Process Planning) і програмістів ЧПК. Тому вона містить декілька різних предметно-орієнтованих САПР під єдиною логікою керування і на єдиній інформаційній базі. ADEM дозволяє автоматизувати такі види робіт: 3D і 2D моделювання та проектування; оформлення проєктно-конструкторської й технологічної документації; проектування технологічних процесів; аналіз технологічності й нормування проєкту; програмування устаткування. ADEM застосовується у різних галузях:

авіаційній, атомній, аерокосмічній, машинобудівній, металургійній, верстатобудівній та інших.

T-FLEX CAD – система автоматизованого проектування, розроблена компанією «Топ Системи» з можливостями параметричного моделювання і наявністю засобів оформлення конструкторської документації відповідно до стандартів серії ЕСКД (Єдина система конструкторської документації). T-FLEX CAD є ядром комплексу T-FLEX CAD/CAM/CAE/CAPP/PDM – набору засобів для вирішення завдань технічної підготовки виробництва в різних галузях промисловості. Комплекс поєднує системи для конструкторського і технологічного проектування, модулі підготовки програм керування для верстатів та інженерних розрахунків. Всі програми комплексу функціонують на єдиній інформаційній платформі системи технічного документообігу і ведення складу виробів.

bCAD – двох- і тривимірна система автоматизованого проектування, розроблена російською компанією «ПРОПРО Група». bCAD являє собою інтегрований пакет для двовимірного креслення, об'ємного моделювання й реалістичної візуалізації (рис. 1.17). Система одержала широке поширення в меблевому виробництві та дизайні інтер'єрів. Незважаючи на досить розвинені засоби проектування, у промисловості практично не застосовується.

КОМПАС – система автоматизованого проектування, розроблена російською компанією «АСКОН» з можливостями оформлення проектної й конструкторської документації відповідно до стандартів серії ЕСКД і СПДБ (Система проектної документації для будівництва). Існує у двох версіях: Компас-Графік і КОМПАС-3D, відповідно призначених для плоского креслення і тривимірного проектування.

MechaniCS – додаток до AutoCAD або Autodesk Inventor, призначений для оформлення креслень відповідно до ЕСКД, проектування систем гідропневмоелементів, зубчастих зачеплень, валів, інженерного аналізу, розрахунку розмірних ланцюгів, створення користувацьких бібліотек. MechaniCS забезпечує фахівця всім необхідним для проектування машинобудівних об'єктів: більш ніж 1500 стандартами (включаючи ДСТУ, ОСТ,

DI і ISO) і уніфікованими компонентами, можливістю створювати власні інтелектуальні об'єкти, виконувати інженерні розрахунки з відображенням результатів на моделі, оформляти проекції креслень за ЕСКД і багато іншого. MechaniCS дає конструкторові можливість застосовувати не тільки геометричні параметри стандартних елементів, але й їхні механічні властивості. На об'єкти в складальних кресленнях (при використанні AutoCAD) можна накладати геометричні і параметричні залежності, використовувати попередньо встановлені залежності при їхньому розміщенні на кресленні [10].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методи комп'ютерного опрацювання зображень / Під ред. Сойфера В. А. - 2 изд. испр. - М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. - 784 с.
2. Абрамовіц М. Довідник зі спеціальних функцій / М. Абрамовіц, І. Стіган. - М. : Наука, 1979. - 486 с.
- 3 Амосов А. А. Обчислювальні методи для інженерів: навчальний посібник. / Амосов А. А. , Дубинський Ю. А., Копченова Н. В. - М.: Вища школа, 1994. - 554 с.
4. Анісімов Б. В. Розпізнавання та цифрове опрацювання зображень / Анісімов Б. В., Курганов В. Д., Злобін В. К. - М. : Вища школа, 1983. - 468 с.
5. Васильков Ю. В. Комп'ютерні технології обчислень у математичному моделюванні : навчальний посібник / Ю. В. Васильков, Н. Н. Василькова. - М.: Фінанси і статистика, 2002. - 256 с.
6. Вержбицький В. М. Чисельні методи (математичний аналіз і звичайні диференціальні рівняння): навчальний посібник для вузів / Вержбицький В. М. - М. : Вищ.шк., 2001. - 382 с.
7. Дубовой В. М. Основи застосування ЕОМ у інженерній діяльності Дубовой В. М. , Кветний Р. Н. – К. : ІСДО України, 1994. – 285 с.
8. Gonzales R. C. Digital Image Processing Using MATLAB / R. C.Gonzales, R. E. Woods, S. Eddins. – Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2004 – 492 p.
- 9 . Кветний Р. Н. Інтервальні моделі перетворень сигналів в інформаційно-вимірювальних системах / Кветний Р. Н., Бойко О. Р. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 88с.
10. Greenspan D. Introduction to Numerical Analysis and Applications / D. Greenspan. – Markham, Chicago, 1971. – 176 p.