

Змістовий модуль 4

АВТОМАТИЗАЦІЯ КОНСТРУЮВАННЯ

Цілі створення і призначення САПР

В кінці 50-х років в Массачусетському технологічному інституті (США) вперше зародилося поняття CAD. У 70-і роки воно розповсюдилося як міжнародне позначення конструкторських робіт із застосуванням обчислювальної техніки. При цьому під CAD мається на увазі обробка даних засобами комп'ютерної графіки.

Абревіатура CAD інтерпретується Computer Aided Design (проектування конструкцій за допомогою ЕОМ). У колишньому СРСР це поняття ототожнюється з поняттям автоматизованого проекту САПР. Розвиток САПР, що проходить відносно рівномірно, здійснюється постійним вдосконаленням наступних характеристик:

- розвиненості програмного забезпечення;
- швидкодії, якості графічних матеріалів, що виводяться;
- ергономіки;
- коефіцієнта витрат (відношення ціни і продуктивності).

Системи автоматизованого проектування призначені для виконання проектних операцій (процедур) в автоматизованому режимі. САПР створюються в проектних, конструкторських, технологічних і інших організаціях і на підприємствах, з метою: підвищення якості і техніко-економічного рівня продукції, що випускається; підвищення ефективності об'єктів проектування, зменшення витрат на їх створення і експлуатацію; скорочення термінів, зменшення трудомісткості проектування і підвищення якості проектної документації.

Досягнення вказаної мети створення САПР можливо за умов:

- систематизації і вдосконаленні процесів проектування на основі застосування математичних методів і засобів обчислювальної техніки;
- комплексної автоматизації проектних робіт в проектній організації з необхідною перебудовою її структури і кадрового складу;
- підвищення якості управління проектуванням;
- застосування ефективних математичних моделей проєктованих об'єктів, комплектуючих виробів і матеріалів.

Загальна характеристика САПР

САПР є людино-машинним комплексом взаємозв'язаних програмних і технічних засобів, які об'єднані в єдиний технологічний процес проектування, що починається з вибору і обґрунтування елементарної бази проєктованого

виробу і закінчується створенням технічної документації на його виготовлення.

Використання єдиної інформаційної моделі об'єкту на всіх етапах процесу проектування складає головний принцип побудови САПР. При цьому відмінною рисою технології проектування з допомогою САПР є активне застосування процедур математичного моделювання, що складає суть другого принципу – принципу ухвалення проектних рішень на основі математичного експерименту з моделлю проектного об'єкту.

З призначених для користувача позицій САПР є складною апаратно-програмною системою, здібною до розширення за рахунок приєднання до неї нових методів і процедур рішення задач проектування в конкретній проблемній області, а також шляхом агрегування нових проблемних областей.

З позиції системного підходу проблеми автоматизації проектування можна умовно розділити на функціональні і інструментальні. До функціональних відносяться проблеми пошуку алгоритмів рішення окремих задач проектування і логічної ув'язки цих завдань в єдиний технологічний цикл проектування, тобто методичного (математичного і лінгвістичного) забезпечення САПР.

Інструментальні – проблеми створення інформаційного, програмного і технічного забезпечення САПР. Автоматизація проектування складних систем заснована на комплексному підході до дослідження, розробки і впровадження апаратних і програмних засобів, призначених для вирішення двох головних проблем: бездефектного проектування виробів і скорочення термінів їх розробки.

Теорія САПР включає наступні основні розділи:

- формалізація об'єкту, цілей і критеріїв проектування і системи, що проектує;
- алгоритмізація завдань проектування;
- технологія реалізації САПР.

САПР, і особливо інтегровані САПР, є складними об'єктами. Їх створення вимагає великих матеріальних і високо кваліфікованих людських ресурсів. Тому важливо при створенні САПР витримувати наступні принципи: включення, системної єдності, розвитку, комплектності, інформаційної єдності, сумісності, інваріантності.

Принцип *включення* передбачає узгодження параметрів і можливостей конкретної САПР з складнішою САПР.

Принцип *системної єдності* забезпечується взаємними зв'язками всіх підсистем САПР.

Принцип *розвитку* передбачає нарощування і вдосконалення компонентів САПР і зв'язків між ними.

Принцип *комплектності* забезпечує зв'язаність проектування окремих елементів і всього об'єкту в цілому на всіх стадіях проектування.

Принцип *інформаційної єдності* вимагає використання в підсистемах САПР встановлених відповідними нормативними документами мов програм, способів представлення інформації, термінів, символів.

Принцип *сумісності* забезпечує сумісне функціонування всіх підсистем САПР.

Принцип *інваріантності* вимагає, щоб всі підсистеми і компоненти САПР були по можливості універсальними або типовими, тобто інваріантними до проєктованих об'єктів.

Основним методом проєктування є *блоково-ієрархічний* метод, тобто метод декомпозиції складного об'єкту на підсистеми (блоки, вузли, деталі).

САПР повинна задовольняти основним вимогам:

1. Мати універсальну структуру, розроблену за блоково-ієрархічним принципом;

2. Мати інваріантну частину, в яку можна включити засоби організації діалогу і введення-виводу графічної інформації, систему управління базами даних, бібліотеки стандартних програм;

3. Створюватися як людино-машинна система, що розвивається. Повинна мати засоби генерації трансляторів з нових мов, опису класів об'єктів проєктування і процесу проєктування, засобу автоматизованого сполучення нових прикладних програм, а також модифікації тих, що існують і опис нових баз даних;

4. Забезпечувати весь цикл проєктування складного пристрою;

5. Передбачати адаптацію до змін технологічних процесів виробництва виробів;

6. Володіти універсальністю, що знімає ручну підготовку даних при переході від одного етапу проєктування до іншого;

7. Здійснювати проєктування в реальному масштабі часу (режим "ОН-ЛАЙН");

8. Базуватися на деякому типовому комплекті технічних засобів проєктування.

Структура і принципи побудови

Система автоматизованого проєктування – це сукупність засобів і методів для здійснення автоматизованого проєктування. Вона складається з декількох складових частин, званих технічним, математичним, програмним, лінгвістичним, інформаційним, методичним і організаційним забезпеченнями.

Технічне забезпечення включає технічні засоби (ЕОМ, периферійне обладнання), за допомогою яких розв'язуються завдання проєктування.

Математичне забезпечення – представляється математичними моделями, методами і алгоритмами для вирішення проектних завдань.

Програмне забезпечення – це сукупність програм для реалізації автоматизованого проектування. Програмне забезпечення може бути спеціальним і загальним.

Спеціальне програмне забезпечення включає пакети прикладних програм (ППП), призначених для вирішення конкретних проектних завдань. Загальне програмне забезпечення призначене для управління обчислювальним процесом в САПР і підготовки програм з ППП до виконання на ЕОМ. У загальне програмне забезпечення входять операційні системи ЕОМ, що функціонують в САПР, а також програми що не входять до складу операційних систем, але що виконують схожі функції (управління завданнями, даними, редагування, трансляція і т.п.) в конкретній САПР.

Лінгвістичне забезпечення виражається сукупністю мовних засобів, використовуваних в САПР. У лінгвістичне забезпечення входять загальновідомі алгоритмічні мови, використовувані для запису програм САПР, і вхідні мови, що служать для опису об'єктів проектування і завдань на виконання проектних процедур. Вхідні мови представляють для користувача САПР найбільший інтерес, визначаючи зручність спілкування інженера з ЕОМ в процесі проектування.

Інформаційне забезпечення – сукупність відомостей, необхідних для виконання проектування. Основну частину інформаційного забезпечення складає база даних – інформаційні масиви, використовувані в більш ніж одній програмі проектування. Іноді до бази даних відносять масиви даних тільки довідкового характеру, а також масиви результатів виконання етапів проектування, використовуваних на інших етапах як початкові дані. Такі бази даних в деяких системах називають *архівами*. База даних в процесі проектування повинна поповнюватися, в ній можливі коректування вмісту, стирання застарілих і непотрібних відомостей і т.п. повинен бути забезпечен також захист даних від неправильних змін. Доступ до вмісту бази даних потрібно забезпечити тільки певному колу осіб. Всі перераховані функції по роботі з базою даних забезпечуються *системою управління базою даних* (СУБД). База даних разом з СУБД називається *банком даних*.

Методичне і організаційне забезпечення є сукупністю документів, що встановлюють склад і правила функціонування засобів САПР і підрозділів проектного підприємства.

Підсистеми САПР. Спеціалізація деякої частини САПР на обслуговуванні проектних завдань одного етапу проектування приводить до виділення цієї частини як *підсистеми САПР*. Така спеціалізація зачіпає програмне, математичне і лінгвістичне забезпечення і іноді торкається технічного забезпечення.

Як правило, в САПР ЕОМ є підсистеми функціонально-логічного проектування і конструкторського проектування. У деяких САПР ЕОМ є також підсистема структурного (системного) проектування і окрема підсистема виготовлення конструкторської документації.

Для кожної підсистеми звичайно розробляється своя вхідна мова і пакет прикладних програм; часто в підсистемах є автономні бази даних.

Відмінності технічних засобів в підсистемах пов'язані з складом пристроїв автоматизованих робочих місць проектувальника.

Принципи побудови САПР. Сучасні САПР створюються відповідно до наступних принципів.

Колектив розробників є складовою частиною системи проектування, виконуючи проектні роботи у взаємодії з ЕОМ. Разом з процедурами, що виконуються в автоматичному режимі роботи з ЕОМ, є процедури, частково або повністю не формалізовані і тому виконувані при визначальній участі людини. Про автоматичне проектування можна говорити лише відносно окремих нескладних операцій.

Комплексна автоматизація всіх рівнів проектування. Введення автоматизованого проектування на декількох рівнях при збереженні старих ручних форм проектування на інших рівнях менш ефективно, чим комплексна (крізна) автоматизація на всіх рівнях. Комплексна автоматизація дозволяє внести такі зміни в структуру проектних підприємств, форми документів, які відповідають цілям автоматизації – скороченню матеріальних тимчасових витрат, підвищенню якості проектування, збереженню чисельності інженерно-технічних працівників на колишньому рівні, не дивлячись на ускладнення проєктованих об'єктів.

Інформаційна узгодженість підсистем і програм проектування. Програми, що входять в пакет прикладних програм деякої підсистеми САПР, повинні бути інформаційно узгодженими, тобто що допускають можливість сумісного виконання при реалізації заданої проектної процедури без втручання людини в процес сполучення програм. Інформаційна узгодженість програм має місце за наступних умов: програми створені для роботи з однією і тією ж базою даних і не вимагають ручної перекомпоновки числових масивів, що є вхідними для однієї і вихідними для іншої з програм, що сполучаються; завдання початкової інформації про об'єкт або про необхідні проектні операції проводиться на єдиній вхідній мові. Звичайно до складу одного пакету об'єднуються тільки узгоджені програми. Звичайно, при цьому забезпечується сполучення не будь-яких двох програм пакету, а тільки тих, які утворюють послідовності, корисні для проектування. Для комплексної автоматизації всіх рівнів потрібна інформаційна узгодженість як програм усередині підсистем, так і самих підсистем між собою. Ця узгодженість також забезпечується єдністю елементів інформаційного і лінгвістичного забезпечень, що мають відношення до обох підсистем, що сполучаються.

Відкритість САПР. Властивість відкритості системи означає можливість внесення змін в систему під час її експлуатації. Зміни можуть полягати в додаванні нових або заміні старих елементів в програмному, а, можливо, також в технічному і лінгвістичному забезпеченнях. Внесення змін повинно бути максимально спрощено і доступне користувачам САПР. Відкрита САПР є системою, що розвивається, оскільки більш довершені методи, програми, технічні засоби у міру їх появи можуть бути реалізовані в ній; вона також легко адаптується до умов проектування, що змінюються.

Отже, властивість відвертості приводить до збільшення терміну служби системи, підвищує її універсальність.

Сумісність традиційного і автоматизованого проектування. Цей принцип має значення у випадках, коли автоматизоване проектування упроваджується вже на діючому підприємстві із структурою, що склалася, взаємовідношеннями підрозділів, формами і способами використання проектної документації. Саме в цих умовах доцільний еволюційний шлях впровадження САПР, при якому зміни, що диктуються особливостями автоматизованого проектування, не порушуватимуть на тривалий термін нормального функціонування підприємства.

Режими проектування в САПР

По характеру і ступені участі людини і використання ЕОМ при виконанні деякого маршруту розрізняють декілька режимів проектування.

Автоматичний режим має місце при виконанні маршруту проектування по формальних алгоритмах на ЕОМ без втручання людини в хід рішення.

Ручний (неавтоматизований) режим характеризується виконанням маршруту без допомоги ЕОМ.

Автоматизоване проектування є частково автоматизованим, якщо частина проектних процедур в маршруті виконується людиною уручну, а частина з використанням ЕОМ.

Діалоговий (інтерактивний) режим є більш довершеним режимом, при ньому всі процедури в маршруті виконуються за допомогою ЕОМ, а участь людини виявляється в оперативній оцінці результатів проектних процедур або операцій, у виборі продовжень або коректуванні ходу проектування. Якщо ініціатором діалогу є людина, якій надана можливість у будь-який момент часу переривати автоматичні обчислення на ЕОМ, то діалог називається *активним*. Якщо переривання обчислень відбуваються по командах виконуваної на ЕОМ програми у визначені, наперед передбачені моменти, тобто проектувальник не може виступати як ініціатор діалогу, то такий діалог називається *пасивним*.

Частота звернень до людини в процесі діалогу залежить від того, в які моменти можливі переривання. Якщо в маршруті переважають проектні процедури, для яких досягнутий високий ступінь формалізації і розроблені достатньо ефективні алгоритми, то переривання передбачаються між проектними процедурами. Людина дістає можливість оцінити синтезоване проектне рішення і вибрати те або інше продовження проектування. Якщо повна формалізація процедури не досягнута або неефективна, то доцільний діалог з перериваннями обчислень усередині процедури. Такий всередині процедурний діалоговий режим характерний для багатьох процедур конструкторського проектування в машинобудуванні.

У багатьох випадках користувач САПР в режимі діалогу тільки вводить і редагує початкові дані для виконання певного маршруту.

Автоматизовані робочі місця проектувальника

Традиційна форма використання ЕОМ, сконцентрованих в обчислювальному центрі і працюючих в пакетному режимі, не годиться для САПР. ЕОМ лише тоді стане регулярно використовуваним інструментом проектування, коли інженер зможе оперативно звертатися до машини і також оперативно одержувати результати рішення. Тому в комплексі технічних засобів (ТЗ) повинна бути розвинена група зовнішніх пристроїв введення – виведення інформації. При цьому ефективна взаємодія інженера з ЕОМ буде забезпечена тільки в тому випадку, якщо форма інформації, що вводиться і виводиться, зручна для людини; і не приводить до необхідності уручну виконувати обтяжливі і чреваті помилками операції по кодуванню або розшифровці повідомлень. Залежно від характеру вирішуваних задач зручними формами представлення інформації можуть бути таблиці, креслення, графіки, текстові повідомлення і т.п.

Таким чином, вимоги до технічних засобів САПР обумовлює включення в комплекс ТЗ як стандартного комплексу зовнішніх пристроїв ЕОМ, так і додаткових пристроїв введення-виводу інформації, зокрема в графічній формі. Цей комплект зовнішніх пристроїв встановлюється в приміщенні проектного підрозділу і називається автоматизованим робочим місцем (АРМ) проектувальника.

Склад АРМ залежить від характеру завдань, що вирішуються в проектному підрозділі. Так, для інженерів, зайнятих функціонально-логічним проектуванням, і інженерів-конструкторів оптимальний склад зовнішніх пристроїв неоднаковий. Дійсно, конструктори в істотно більшій мірі зв'язані з обробкою інформації у вигляді креслень, для них важливо наявність розвинених засобів машинної графіки.

В даний час розроблено декілька типів АРМ, що серійно випускаються, для різних галузей промисловості.

Наявність в одній САПР багатьох АРМ, можливості одночасної роботи на апаратурі АРМ декількох користувачів розміщення АРМ на територіях проектних підрозділів, достатньо віддалених один від одного, диктує необхідність ієрархічної побудови комплексу ТЗ з виділенням в ньому, принаймні, двох рівнів ЕОМ. На вищому рівні знаходиться одна або декілька ЕОМ великої продуктивності. Ці ЕОМ складають *центральный обчислювальний комплекс* (ЦК), призначений для вирішення складних завдань проектування, що вимагають великих витрат машинних часу і пам'яті. Наявність високо продуктивних ЕОМ у складі ЦК забезпечує виконання другого з перерахованих на початку глави вимог до технічних засобів САПР. На нижчому рівні знаходяться вхідні в АРМ МІНІ-ЕОМ (термінальні ЕОМ). МІНІ-ЕОМ в АРМ управляє роботою комплексу зовнішніх пристроїв, обміном інформацією між АРМ і ЦК; вирішує порівняно нескладні за витратами машинного часу і пам'яті проектні завдання.

Витоки геометричного моделювання

Як вже наголошувалося, теоретичні основи САПР сформувалися в 60-х — початку 70-х років минулого сторіччя. У ідеології покладені різноманітні математичні моделі абстрактного виробу. Об'єкти розглядаються з погляду різних спеціальностей, застосовуються різні методи отримання параметрів: геометричні, технологічні, теплові, аеродинамічні, ергономічні і т.п. Саме різноманітність моделей привела згодом до класифікації CAD/CAM/CAE... і до глибшої спеціалізації усередині кожного розділу. Специфікатор CAD (Computer Aided Design) визначає область геометричного моделювання. Важливість геометричної моделі важко переоцінити, оскільки будь-які предмети описуються в першу чергу геометричними параметрами.

Можливо, в майбутньому з'являться технології виготовлення предметів, що не вимагають попереднього точного геометричного опису створюваного об'єкту, але сьогодні можна сміливо стверджувати, що виробництво неможливе без однозначного представлення геометрії виробу.

Першою основою для опису предметів можна вважати Евклідову геометрію, що допускає однозначне представлення матеріальних об'єктів на площині. Евклідова побудова припускає певний набір інструментів (лінійка, циркуль) і безліч допустимих операцій, які можна виконати з їх допомогою. Подальший розвиток ідей Евклідових побудов сформував методи накреслювальної геометрії і проекційного креслення.

Введення систем координат Декартом дозволило з'єднати геометрію з аналітичною математикою. Так, відкрилася можливість одержувати нові геометричні об'єкти шляхом рішення рівнянь, алгебри.

Плоске моделювання

Традиційний спосіб плоского геометричного моделювання полягав в застосуванні лінійки, циркуля і транспортира на креслярській дошці. На конструкторській мові це називається пров'язкою, коли відома інформація, що знов з'являється, наноситься на кальку або пергамент. Для підвищення точності, побудови витримують в максимально можливому масштабі. При цьому погрішність побудов складає не менше 1 мм, а при завданні кутовими значеннями — не менше 1 мм на одному метрі. Такі межі точності при геометричному моделюванні на кульмані. Але саме цей спосіб забезпечив технічну революцію на рубежі XIX-XX століть.

Поява ЕОМ стала сприятливою передумовою для розвитку машинної графіки, яка включила дисципліни геометричного моделювання і обчислювальної геометрії. Основне їх завдання полягає в рішенні геометричних задач в аналітичній і обчислювальній (алгоритмічній) формі.

Паралельно з векторним описом геометричної інформації розвивалися і дискретні (BitMap) представлення об'єктів, спочатку призначені для візуалізації на піксельних масках.

До початку 80-х математичний апарат плоского геометричного моделювання був вже достатньо добре сформований для того, щоб

забезпечити бурхливий розвиток плоских CAD-систем. З появою персональних комп'ютерів впровадження «електронних кульманів» прийняло масовий характер. AutoCAD із США, Dragon з Англії, Cherry CAD з Росії — за цими першими ластівками послідував цілий потік плоских «рисувалок», які досить жваво працювали на PC 18086 і 180286, забезпечуючи при цьому точність геометрії до 0,001 мм в метрових діапазонах, оскільки базувалися на 16-бітовій математиці. Поява ж 32-розрядних процесорів, а тим більше перших Pentium з лишком забезпечило потреби плоских CAD-систем. Інженери відразу ж оцінили такі переваги, як автоматизація побудови геометричних елементів, копіювання фрагментів, простота редагування геометричної і текстової інформації, автоматичне штрихування і нанесення розмірів, точність і якість документації, компактність зберігання і ін. Більш того, впровадження комп'ютерного креслення практично не вимагало зміни традиційного підходу до проектування, що спочатку було сприйнято як найважливіша перевага плоских систем в порівнянні з системами об'ємного моделювання.

Відзначимо два підходи до плоского моделювання, які одержали розвиток в CAD-системах. Перший умовно можна назвати креслярським, другий — твердотільним.

У креслярському способі (яскравий представник AutoCAD) основними інструментами є відрізки, дуги, полілінії і криві. Базовими операціями моделювання на їх основі є продовження, обрізання і з'єднання.

У твердотільному способі (Cherry CAD) основними інструментами є замкнуті контури; решта елементів грає допоміжну або оформлювальну роль. При цьому головними операціями є булеві об'єднання, доповнення, перетин. Сучасні системи, як правило, експлуатують ці способи одночасно.

При всіх своїх неоцінних достоїнствах плоске уявлення, а найголовніше — система креслярських розмірів однозначні лише до певного рівня складності конфігурації виробу. З розвитком суднобудування, автомобільної і авіаційної промисловості було введено поняття неаналітичних кривих — сплайнів. Сплайни неможливо точно описати системою лінійних, кутових і дугових розмірів. Навіть компактніший спосіб опису — табличний — застосовний лише до контрольних точок кривої, але ніяк не до повного і однозначного опису. У докомп'ютерну епоху необхідність роботи з неаналітичними кривими і поверхнями привела до виникнення плазово-шаблонного методу підготовки виробництва, де основою є майстер-модель. Моделі, як правило, виготовляли з матеріалів, що мають мінімальні коефіцієнти температурного розширення і велику зносостійкість. На додаток до креслень плази і шаблони були єдиним і однозначним представленням частини геометрії виробу на всьому етапі проектування-виробництва. Тиражування технології виготовлення на інші підприємства також супроводжувалося копіюванням і передачею плазов і шаблонів.

Слід зазначити, що заміна об'ємного завдання на сімейство плоских довгий час залишалася єдиним способом рішення і у багатьох випадках приводить до прийнятних результатів і сьогодні.

Об'ємне моделювання

Ідеологія систем об'ємного моделювання базується на об'ємній майстер-моделі. Тут йдеться вже не просто про фрагментарно точну модель поверхні, яку забезпечує плазово-шаблонний метод для ексклюзивних перетинів, але і про кожну точку поверхні.

Однозначність моделі в порівнянні з кресленням несе в собі заставу безпомилкової взаємодії всіх учасників процесу проектування і підготовки виробництва. Крім того, обмін даними на базі цієї моделі дозволяє уникнути повторного введення інформації, яким так страждають традиційні виробництва, нехай навіть і оснащені «електронними кульманами».

Отже, об'ємна модель, на відміну від креслярського і плазово-шаблонного методу, покликана однозначно визначати геометрію всієї спроектованої поверхні. А не означає це, що і конструктор повинен докласти незрівняно великі зусилля для її створення?

Очевидно, що робота в просторі вимагає декілька інших навиків, ніж традиційне креслення, але це зовсім не означає, що для отримання поверхні потрібно розрахувати і вивести в комп'ютер координати кожної її точки. Якби це було так, то сама ідея об'ємного моделювання виявилася б неріальною.

Системи об'ємного моделювання базуються на методах побудови поверхонь на основі плоских і неплоских профілів. У загальному випадку профіль — це об'єкт, що описується відрізками, дугами і кривими. Для конструктора профілі — це перетини, види, осьові лінії. Іншими словами, сучасні методи проектування поверхонь дозволяють будувати об'єкти, ґрунтуючись на мінімальній кількості початкових даних. Наприклад, одним з найбільш поширених методів, яким можна описати широкий клас об'єктів, є рух профілю тієї уподовж направляючої.

Математичний апарат об'ємного моделювання сьогодні знаходиться приблизно на тій же стадії розвитку, що і плоский на початку 80-х. Тобто наукова база достатня для створення ефективних інструментів інженера. Та і масові технічні засоби сьогодні досягли рівня, необхідного для підтримки тривимірної математики. Як і у разі плоских CAD-систем, об'ємне моделювання розвивалося в двох напрямках. Перше — поверхневе моделювання, друге — твердотільне.

У поверхневому моделюванні (яскравий представник — Cimatron) основними інструментами є поверхні, а базовими операціями моделювання на їх основі — продовження, обрізання і з'єднання. Таким чином, конструктору пропонується описати виріб сімейством поверхонь.

При твердотільному способі (наприклад, SolidWorks) основними інструментами є тіла, обмежені поверхнями, а головними операціями — булеві об'єднання, доповнення, перетин. В цьому випадку конструктор повинен представити виріб сімейством простих (куля, тор, циліндр, піраміда і т.п.) і складніших тіл. Кожен з цих методів має свої достоїнства і недоліки.

Поверхнєве моделювання популярно в першу чергу в інструментальному виробництві, а твердотільне — в машинобудуванні.

Сучасні системи, як правило, містять і той і інший інструментарій. Наприклад, CAD/CAM ADEM дозволяє працювати як з тілами, так і з окремими поверхнями, використовуючи булеві і поверхнєві процедури.

З моделі може бути одержана не тільки інформація про координати будь-якої точки на поверхні, але і інші локальні характеристики (нормалі, кривизни і т.д.) і інтегральні характеристики (об'єм, площа поверхні, моменти інерції і т.д.). На її основі завжди можна одержати плоскі моделі: види, перетини і розрізи, не вдаючись до послуг розробника або плазового відділу.

На відміну від креслення модель є однозначним представленням геометрії і кількісного складу об'єкту. Якщо в складальному кресленні болт представляється декількома видами, то в об'ємній збірці — одним об'єктом, моделлю болта.

Поява методів математичного моделювання породила природне бажання мати якомога більш загальні моделі. Це торкається і завдань геометричного опису виробів.

Дійсно, якщо ми будуємо модель, наприклад, поршневого двигуна, то чом би не розповсюдити її на весь ряд можливих моторів даного класу? Адже структура їх однакова: циліндр, поршень, шатун, коленвал і ін.

Більш того, є методики розрахунків деталей двигуна за такими початковими даними, як потужність, число оборотів. Давайте побудуємо модель, де всі вхідні деталі зв'язані параметрами. А далі все дуже просто. Змінили параметри — одержали модель нового двигуна. Май узагальнену модель виробу, і не потрібне ніяких конструкторських бюро!

Ідея створення узагальненої параметричної моделі виробу не нова, та і подібних спроб було немало, і подекуди навіть були успішні рішення.

В першу чергу узагальнені моделі виходять там, де є методики чисельного розрахунку всіх геометричних параметрів виробу.

Проте не все можна розрахувати, частина параметрів виходить в результаті геометричних побудов. Введемо асоціативні геометричні зв'язки. Наприклад, довжина валу дорівнює довжині черв'яка плюс місця під підшипники, плюс зазори, плюс контрення.

Багато сучасних систем дозволяють вводити зв'язки між геометричними параметрами. Зв'язки можуть бути задані умовно (паралельність, перпендикулярність, касательність і т.п.), розмірами, функціонально, таблично. Обмеження на довжину ланцюга зв'язків, як правило, не накладаються. Важливіше інше — зв'язок повинен бути однозначним.

Що ж одержує користувач, встановивши відповідні зв'язки в моделі? Із статичної конструкції виходить багатоланковий механізм з безліччю мір свободи. Пам'ятаєте довідник Артобольовського і ця безліч типів базових механізмів? А тут зв'язки можуть бути і поскладніше: дискретними, диференціальними.

Чим складніший механізм, тим більше вірогідність його відмови! Тим більше часу йде на його відладку, навіть при всіх сучасних досягненнях параметризації! Саме тому параметричні моделі застосовуються в основному для каталогів стандартних виробів і в лінійному дереві історії створення моделі для її подальшого редагування.

Але повернемося до нашого валу з черв'яком. Геометрична асоціація тут проста — складання. І ось при збільшенні довжини черв'яка подовжився і вал. Все чітко, якщо не мати на увазі міцностні аспекти. А з умов міцності тепер потрібно збільшити діаметр валу, а отже, і габарити підшипника. Підшипник інший — треба знову подовжити вал. Тобто наш простий зв'язок вже зовсім не простий!

Конструктор, створюючи виріб, враховує безліч критеріїв: міцність, жорсткість, стійкість, технологічність, ремонтпридатність і т.д. Складність формалізації подібних зв'язків сильно обмежує можливість створення узагальнених моделей.

Розробникам параметричних моделей слід пам'ятати неписаний інженерний закон — повної спадкоємності в конструкції не буває. Одне тільки це свідчить про неможливість заміни роботи конструктора узагальненою моделлю. А тим, хто зайнявся створенням такої, необхідно встигнути завершити цей процес до морального застарівання модельованого об'єкту.

Асоціативність згадують також і у зв'язку з іншим завданням. Якщо ми одержуємо креслення по об'ємній моделі, то чом би не організувати зміну моделі по зміненому кресленню? Як принадно простий цей спосіб редагування моделі! Більш того, він цілком природний з погляду конструктора, адже виправлення в документації зрештою приводять до зміни реального виробу. Те ж саме повинне відбуватися і з моделлю.

Чудеса зміни моделі при редагуванні її креслення часто демонструються на презентаціях різних CAD-систем. Як же це робиться?

Зовсім нескладно встановити зв'язок між параметром моделі і його проекцією на площину. Наприклад, указуючи на проекцію розмірної лінії в кресленні, визначати відповідний розмір на моделі. Якщо цей розмір параметричний, то створюється повне враження, що, змінюючи креслення, ми міняємо модель.

Іншими словами, редагувати за допомогою креслення можна тільки те, що можливо відредагувати на самій моделі, і не більше. Тобто даний механізм нічого принципово нового, розширюючого можливості редагування об'ємної моделі в собі не несе.

Пригадаємо у зв'язку з цим, що реальне креслення — це, як правило, не просто проекції, види і перетини, які можна одержати з моделі. Креслярські стандарти не тільки допускають, але і наказують умовності. Так, наприклад, неприпустимо зображення лінійних розмірів з міжстрілочною відстанню менше 1 мм; у перетині тонкої оболонки товщина стінок також повинна бути зображена умовно і т.п. Більш того, креслення містить багато додаткової інформації, не пов'язаної безпосередньо з моделлю.

Як у разі узагальненої параметричної моделі, так і в асоціативному зв'язку «модель — креслення — модель» багато підводних каменів, які здатні перетворити переваги методу на серйозні недоліки.

Тепер декілька слів про зборку виробів. Об'ємні моделі чудово працюють в цій області на макрорівні. Практично всі питання компоновки можуть бути вирішені з їх допомогою.

Але не так просто застосувати об'ємне моделювання до рішення задачі зборки виробу з урахуванням допусків. Так, звичайно, можна вести моделювання по середині або межах полів допусків, що дозволить вирішити деякі приватні завдання. Проте загального способу автоматизації стохастичного об'ємного моделювання поки не існує.

Область найвищого ефекту застосування САПР

Багато підприємств, що пройшли перший етап автоматизації, із здивуванням помічають, що прискорення креслення за рахунок комп'ютеризації не приносить скільки-небудь помітного скорочення термінів випуску виробу. Та і збільшена якість креслень і ефектні картини об'ємних зборок мало впливають на якість вироблюваних виробів.

Нерідко за цим слідують висновки про неефективність систем автоматизованого проектування для вирішення головних виробничих завдань. При цьому САПР потрапляє під визначення красивих іграшок, здатних лише привернути молодь на підприємство, і не більше того. Цінність програмного забезпечення в очах керівників падає до рівня 20 грн. за неліцензійний диск.

У чому ж причина таких невеселих висновків і ще сумніших наслідків? Чи не є ці висновки поспішними і чи не ґрунтуються вони на неправильному уявленні про цілі автоматизації? А чи не трапилося так, що за тріскотом рекламних статей і гонитвою за дешевизною відбулася підміна головного завдання на простоту і доступність, але іншу?

Розглянемо приклад, коли в основу процесу проектування-виробництва закладено не просто комп'ютерне креслення, а геометричне моделювання. Будучи стрижнем, майстер-модель пронизує всі етапи підготовки. При цьому не відбувається втрат даних, відбувається лише їх поповнення і уточнення.

При даній побудові проектування починають ефективно функціонувати крізні процеси, що спираються на геометрію. В першу чергу це підготовка обробки різанням, яка складає основу сучасного виробництва. Навіть ті види виробництв, які безпосередньо не займаються подібною обробкою, як правило, використовують оснащення і інструмент, виготовлені даним способом.

Ми вже відзначали збільшену складність геометрії сучасних виробів. Виготовлення їх без геометричної моделі практично неможливо. Спробуйте уручну відфрезерувати дві однакові прес-форми

автомобільного крила або бампера. Або запрограмувати їх обробку на стійці верстата з ЧПУ — адже це десятки тисяч кадрів!

Найвища ефективність від впровадження геометричного моделювання досягається тоді, коли система включає не тільки конструкторське, але і технологічне моделювання.

Таким чином, тепер нас цікавить не стільки специфікатор CAD, скільки інтегровані CAD/CAM-системи, що дозволяють не просто створювати моделі, але і програмувати верстати ЧПУ. Аббревіатура CAM означає автоматизацію рішення геометричних задач технології. В основному це розрахунок траєкторії руху ріжучого інструменту.

Від траєкторії руху інструменту залежить не тільки одержувана форма деталі, але і якість її поверхні, час обробки, знос інструменту і обладнання і ще багато що інше, що має свою вартість.

Застосування інтегрованих систем для конструкторсько-технологічної підготовки виробництва показало свою дійсну ефективність у всіх сучасних виробництвах. Реальна ціна, яку готові платити за CAD/CAM сьогодні, сопоставима з ціною верстата і лежить в межах 10-100 тис. дол. за одне робоче місце користувача, які йдуть в основному на наукові дослідження і розробку нових продуктів.

Коли йдеться про сучасних інтегрованих CAD/CAM-системах слід знати, що витрати на їх розробку складають 400-2000 человеко-років, і розробники, як правило, фахівці високої кваліфікації.

Інтегровані CAD/CAM — це максимально наукоємкі продукти, що постійно розвиваються і включають новітні знання у області моделювання і обробки. Придбання подібних систем рівнозначно придбання нової технології. Вони вимагають серйозного підходу при впровадженні і приносять відчутний економічний ефект. Дуже часто без них просто неможливо проводити сучасні вироби.

Слід врахувати, що далеко не все, що називається сьогодні CAD/CAM-системами, є такими. Під цим поняттям часто ховаються спроби видати бажане за дійсне.

Підвищення попиту на інтегровані технології примушує багато фірм в терміновому порядку розробляти САМ-ЧАСТИНУ до своїх «рисувалок» або моделювальникам. Але суть в тому, що створення технологічних модулів вимагає в першу чергу великого виробничого досвіду і не може бути вирішено з наскоку. Загалом, академічний підхід до створення САМ-ЧАСТИНИ не працює, які б сучасні методи і засоби програмування не застосовувалися.

Помилки системи при кресленні у гіршому разі коштуватимуть рулон папери і флакон туші для плоттера. Помилки ж CAD/CAM-системи обходяться значно дорожче, оскільки чреваті зламаним обладнанням і інструментом, зіпсованими деталями і відчутною втратою засобів.

Дуже часто можна зустріти комерційний альянс конструкторської і технологічної систем, інтегрованих лише на рівні сумісних продажів. Чи

можлива заміна інтегрованого CAD/CAM на комбінацію конструкторської і технологічної системи?

Практика показує, що CAD для інтегрованої системи значне відрізняється від чисто конструкторського програмного продукту. Окрім конструкторських завдань він повинен відповідати специфіці, необхідній для модифікації геометричної моделі з урахуванням технології виготовлення. А це досить складний апарат геометричного моделювання.

Отже, ми відзначили деякі сильні і проблемні сторони геометричного моделювання.

Майстер-модель виробу однозначно описує його геометрію і представляє могутній інструмент для вирішення конструкторських і технологічних завдань. Для того, щоб одержати максимальний ефект від геометричного моделювання, слід застосовувати інтегровані CAD/CAM-технології.

Що ж до витрат на першому етапі автоматизації, то вони напевно зіграли свою позитивну роль хоч би для того, щоб підійти до наступного етапу, коли геометричне моделювання стає економічно дуже вигідним.

Математичне ядро САПР

Математичне ядро — це набір функцій, виконання яких забезпечує побудову тривимірних моделей. Ядро не самоцenne, воно створюється для використання в прикладних програмах. Доступ до функцій ядра кінцевому користувачу відкриває CAD-система (як правило, через графічний призначений для користувача інтерфейс). Крім того, ядро іноді називають «движком» системи геометричного моделювання. Подібно тому, як двигун автомобіля визначає «стелю» його швидкості, математичне ядро визначає межу функціональних можливостей САПР, що його використовує. При використанні безліччю продуктів одного і того ж ядра в межі всі вони мають однакові можливості і обмеження, а розрізняються тільки інтерфейсом. У цих умовах поява конкуруючого ядра вносить «свіжий струмінь», що запобігає своєрідному «застою» на ринку.

Сьогодні в світі існує декілька десятків порівняно відомих математичних ядер. Крім трійки визнаних лідерів-«важковаговиків» (Parasolid від EDS, ACIS від Spatial Corp і Open CASCADE від Matra Datavision) успішно розвиваються і менш відомі або молодші геометричні ядра, наприклад такі, як Thinkdesign kernel (Thinks, Inc.), VX Overdrive (Varimetrix Corp), КОМПАС-3D kernel (АТ АСКОН, Росія).

З одного боку, потужність математичного ядра, використовуваного САПР, визначає потенціал системи, з іншою — сам факт використання системою відомого ядра зовсім не гарантує її якості. Іноді доводиться стикатися з такою ситуацією: виробник оголошує, що його САПР базується, наприклад, на ядрі Parasolid (що відповідає дійсності), і на цій підставі ставить її в один ряд з широко відомими могутніми системами. А на

перевірку виявляється, що в даному продукті не «відкриті» для користувача багато базових функцій.

Політика ліцензування ядер ACIS і Parasolid орієнтована на виробників і споживачів ПО в країнах з розвиненою економікою і не сприяє їх широкому розповсюдженню в наших економічних умовах (зрозуміло, йдеться про легальне використання САПР на базі цих ядер).

При використанні купувального ядра його вартість «закладається» в ціну продукту. Навіть за написання модулів імпорту-експорту у формати купувальних ядер потрібно платити чималі гроші.

Ядро власної розробки гнучкіше і керовано, зміни вносяться в нього настільки оперативно, наскільки це потрібно самому розробнику САПР. При використанні власного ядра частка його вартості в ціні готового продукту, як правило, мінімальна. Вона не залежить від змін ліцензійної політики стороннього розробника.

Parasolid спочатку створювався як ядро САПР, це ядро «обкатувалося» і «шліфувалося» на величезній кількості робочих місць на конкретних завданнях. Ядро ACIS створювалося як якась загальна математична модель — воно дуже універсальне, вирішує безліч загальних завдань. Компанія АСКОН розробила власне ядро КОМПАС.

АСКОН вже успішно вирішив значну частину цього завдання.

Якщо принципово поставити мету реалізувати той же набір функцій, що і Parasolid, то її можна досягти в короткі терміни. Проте набагато більшу проблему складає не власне кількість функцій, а надійність їх роботи, «відщлифованість» ядра. А цього неможливо добитися тільки зусиллями тестерів компанії-виробника. Доказом конкурентоздатного функціонала і високої надійності ядра може бути виключно його успішне практичне застосування в САПР на реальних робочих місцях.

Але навіть якщо закривати в математичному ядрі 90% функціонала Parasolid і на базі цього ядра побудувати продукт, що закриває 80-90% завдань клієнта — це теж хороше досягнення. Адже є ще і такий параметр, як ціна продукту, і якщо вона в 2 рази нижче, а завдання переважної частини клієнтів успішно розв'язуються, система займатиме величезну нішу на ринку. Адже є завдання різної складності, для них були, є і будуть рішення різної вагової категорії. А з часом дистанція між ними скорочуватиметься.

Треба розуміти, що при виборі ліцензійного ПО (як і при покупці будь-якого фірмового товару) вирішальним чинником є співвідношення «ціна/якість».

Є безліч прикладів, коли підприємство купує декілька робочих місць САПР «важкого» класу (Unigraphics) для виконання найбільш складних завдань моделювання і десятки ліцензій на систему КОМПАС-3D для вирішення 80-90% завдань, що залишилися, на робочих місцях всіх конструкторів. І така зв'язка завжди працює успішно. А ось випадки, коли всі робочі місця на підприємстві оснащені виключно Unigraphics і в цій системі проектуються всі вироби, аж до втулок і манжет, невідомі.

Метод кінцевих елементів для просторових конструкцій

Завдання об'ємного моделювання і просторового конструювання, що описуються рівняннями в приватних похідних, ефективно розв'язуються за допомогою методу кінцевих елементів (МКЕ), діапазон застосування якого надзвичайно широкий: машинобудування і будівельна справа, гідро - і аеродинаміка, гірська справа і нова техніка, завдання стійкості і розповсюдження, моделювання і математична фізика.

За допомогою методу кінцевих елементів розв'язуються завдання прогнозування статичної, динамічної і температурної поведінки машин і механізмів; оцінки напруг і деформацій балок і стрижньових систем, пластин і оболонок; розробки на міцність конструкцій сучасних суден і літальних апаратів.

Не дивлячись на ряд модифікацій методу кінцевих елементів, відомих як методи Рітца, Галеркіна, найменших квадратів і колакацій, суть цього методу зводиться до наступного. Область визначення початкових рівнянь в приватних похідних, покривається деяким кінцевим числом не пересічних один з одним елементів і шукається дискретна апроксимація рішення рівнянь у вигляді лінійної комбінації $\sum a_i j_i$ деяких базисних функцій $j_i(x)$. Останні пов'язані з окремими введеними елементами і можуть бути шматково-поліноміальними, раціональними і ін. Параметри цих базисних функцій підбираються так, щоб забезпечити необхідний ступінь безперервності функцій, що описують сусідні елементи. Апроксимація рішення по всій області визначення рівнянь може бути виражена через значення базисних функцій і їх похідних у вузлових точках, при цьому кожна функція j_i рівна нулю на більшій частині області визначення і відмінна від нуля тільки в околиці одного вузла. У загальному вигляді апроксимуюча рішення функція має вигляд :

$$U(x) = \sum_{i=1}^N \left[a_i(x) j_i + b_i(x) \left(\frac{\partial U}{\partial x_1} \right)_i + g_i(x) \left(\frac{\partial U}{\partial x_2} \right)_i + \dots \right],$$

де N — число вузлів мережі елементів, що покривають область визначення функції.

У більшості практичних модифікацій методу кінцевого елемента функція спрощується до вигляду:

$$U(x) = \sum_{i=1}^N a_i(x) j_i$$