

**МЕХАНІКО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра вагонів**

**В. С. Меркулов**

**СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО  
ПРОЕКТУВАННЯ РУХОМОГО СКЛАДУ**

*Конспект лекцій*

**Частина 2**

**Харків – 2018**

Меркулов В. С. Системи автоматизованого

проектування рухомого складу: Конспект лекцій. – Харків: УкрДУЗТ, 2018. – Ч. 2. – 108 с.

Конспект лекцій розроблено відповідно до робочої програми дисципліни «Системи автоматизованого проектування рухомого складу».

Розглянуто питання, пов'язані з геометричним моделюванням й організацією графічних даних, програмно-інформаційним забезпеченням САПР, 3D- моделюванням, особливостями автоматизованого проектування у вагонобудуванні.

Іл. 57, бібліогр.: 19 назв.

Конспект лекцій розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри вагонів 20 березня 2017 р., протокол № 7.

Рецензент:

проф. І. Е. Мартинов

В. С. Меркулов

СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ  
РУХОМОГО СКЛАДУ

*Конспект лекцій*

Частина 2

Відповідальний за випуск Меркулов В. С.

Редактор Третьякова К. А.

---

Підписано до друку 12.04.17 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк. арк. 5,75. Тираж 50. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,

61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

## ЗМІСТ

Розділ 5. ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ Й ОРГАНІЗАЦІЯ ГРАФІЧНИХ ДАНИХ.....	4
5.1 Класифікація завдань конструкторського проектування.	4
5.2 Інструментальні підсистеми геометричного моделювання технічних об'єктів.....	5
5.3 Підходи до конструювання на основі комп'ютерних технологій.....	10
5.4 Способи подання графічної інформації в ЕОМ.....	11
5.4.1 Машинна графіка.....	11
5.4.2 Подання графічної інформації в ЕОМ.....	13
5.4.3 Геометричний опис об'єкта. Види геометричних об'єктів.....	15
5.5 Побудова геометричних моделей.....	16
5.5.1 Методи обробки геометричних об'єктів. Параметризація.....	16
5.5.2 Етапи одержання креслення.....	25
5.5.3 Засоби двовимірного креслення.....	27
5.5.4 3D-моделювання. Складові частини 3D-моделі.....	29
5.5.5 Категорії методів 3D-моделювання.....	31
5.5.6 Стратегія побудови моделей.....	48
Розділ 6. ПРОГРАМНО-ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ САПР.....	55
6.1 Структура програмно-інформаційного забезпечення..	55
6.1.1 Універсальні САД/САЕ/САМ-системи.....	56
6.1.2 Інтегровані системи.....	60
6.1.3 Спеціалізовані системи.....	70
6.2 Інформаційне забезпечення САПР.....	79
Розділ 7. АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ У ВАГОНОБУДУВАННІ.....	84
7.1 Програмні комплекси для автоматизації конструкторсько-технологічної підготовки виробництва.....	84
7.2 Особливості використання САПР у вагонобудуванні..	90
7.3 Розвиток САПР.....	102
ВИСНОВКИ.....	105
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	107

## Розділ 5

# ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ Й ОРГАНІЗАЦІЯ ГРАФІЧНИХ ДАНИХ

### 5.1 Класифікація завдань конструкторського проектування

*Основне завдання конструкторського проектування* — реалізація принципів схем, отриманих на попередніх етапах проектування [9, 11].

При цьому виконується конструювання окремих деталей, компонування вузлів із деталей і конструктивних елементів, агрегатів із вузлів, після чого оформляється технічна документація на об'єкт проектування.

Одна група завдань конструкторського проектування визначає суто геометричні параметри конструкції (завдання *геометричного проектування*), а інша – призначена для синтезу структури (топології) конструкції з урахуванням її функціональних характеристик (завдання *топологічного проектування*).

*Геометричне проектування* містить у собі завдання *геометричного моделювання*, *геометричного синтезу* й *оформлення конструкторської і технологічної документації*.

*Геометричне моделювання* включає до себе вирішення *позиційних і метричних завдань* на основі перетворення геометричних моделей.

До типових *позиційних завдань* відносяться: визначення приналежності точки плоскій області, яка обмежена замкнутими контурами; визначення координат точки перетинання прямої із криволінійним контуром; установлення перетинання контурів та обчислення координат їх точок перетинання і т. ін. На основі типових *позиційних завдань* вирішуються такі конструкторські завдання: визначення факту дотику або стику деталей, що рухаються, перевірка умов сполучення деталей, перевірка гарантованих зазорів між деталями та ін.

До *метричних завдань* відносяться обчислення довжини, площі, периметра, центра мас, моментів інерції.

До геометричного синтезу входить вирішення завдань двох груп:

- формування (компонування) складних геометричних об'єктів із елементарних геометричних об'єктів;
- одержання оптимальної форми (образу) деталей, вузлів або агрегатів. Завдання формування образу виникають на ранніх стадіях проектування при визначенні конфігурації вагона, корабля, автомобіля, літака та ін.

Основними завданнями *топологічного проектування* є завдання *компонування, розміщення і трасування*.

*Завдання компонентування* складається з двох частин: ескізної і робочої. При вирішенні ескізної частини завдання компонентування за функціональною схемою розробляють загальну конструкцію вузла. На основі ескізного компонентування складають робоче компонентування з більш детальною проробкою конструкції.

*Завдання розміщення* полягає у визначенні оптимального просторового розташування елементів в обмеженій області (проектування генеральних планів підприємств, розміщення технологічного устаткування в цеху і т. п.). Критеріями оптимальності є компактність, термін обслуговування, довжина транспортних шляхів та ін.

*Завдання трасування* полягає у визначенні геометрії з'єднань окремих елементів (трасування транспортних потоків цеху, прокладання повітропроводів, мастилопроводів та інших комунікацій, доріг, проектування електричних і гідравлічних систем машин й ін.).

## **5.2 Інструментальні підсистеми геометричного моделювання технічних об'єктів**

Розроблення конструкції за попередніми розрахунками, реалізована в конструкторську документацію, здійснюється за допомогою *графічної підсистеми автоматизації розроблення і виконання конструкторської документації (АКД)* [1].

*АКД* виконує введення, зберігання, обробку й виведення графічної інформації у вигляді *конструкторських документів (КД)*.

Засоби реалізації *АКД* надає комп'ютерна графіка, що забезпечує створення, зберігання й обробку моделей *геометричних об'єктів (ГО)* та їхніх *графічних зображень (ГЗ)*.

Елементарними *геометричними об'єктами* є точка, пряма, коло, площина і т. п. Основами для геометричного опису виробів є: евклідова геометрія, нарисна геометрія і проекційне креслення, а також аналітична геометрія.

Використання ЕОМ дозволило об'єднати питання геометричного моделювання та обчислювальної геометрії з використанням векторного (аналітичного) опису геометричної інформації.

Виходячи з цих позицій будемо розуміти під *геометричним моделюванням* створення моделей *ГО*, що містять інформацію про *геометрію* об'єкта, а під *моделлю ГО* – сукупність відомостей, що однозначно визначають його форму.

Наприклад, точка може бути подана двома (двовимірною моделлю) або трьома (тривимірною моделлю) координатами; коло — координатами центра й радіусом і т. д.

Оскільки дані про фізичні об'єкти реального світу не можуть бути цілком введені в комп'ютер, необхідно апріорі обмежити обсяг інформації про об'єкт у рамках даного нам питання, наприклад:

- Які частини об'єкта видимі?
- Який колір повинен бути присвоєний кожному елементу об'єкта?
- Які площу поверхні, об'єм і масу має об'єкт?
- Чи не перетинає об'єкт інші об'єкти?
- Знаходиться об'єкт всередині або зовні іншого об'єкта?

Якщо буде вибрано відповідне подання геометричної моделі об'єкта для обумовленого кола завдань, вони будуть вирішені ефективно, і навпаки.

Геометричні моделі в САПР використовуються для вирішення багатьох завдань: візуалізації, побудови розрахункових сіток, генерації управляючих програм числового програмного управління (ЧПУ), для одержання двовимірної геометричної моделі, розрахунку різних характеристик об'єкта й технологічних параметрів його виготовлення і т. д.

У першу чергу вони призначені для зберігання інформації про форму об'єктів та їх взаємне розташування, і надання її для обробки в зручному для комп'ютерної програми вигляді. У цьому полягає ключова відмінність електронної геометричної моделі від креслення, яке являє собою умовне символічно-графічне зображення, призначене для читання людиною.

Геометричне моделювання є ядром автоматизованого конструювання і технологічної підготовки виробництва.

Для реалізації АКД необхідні:

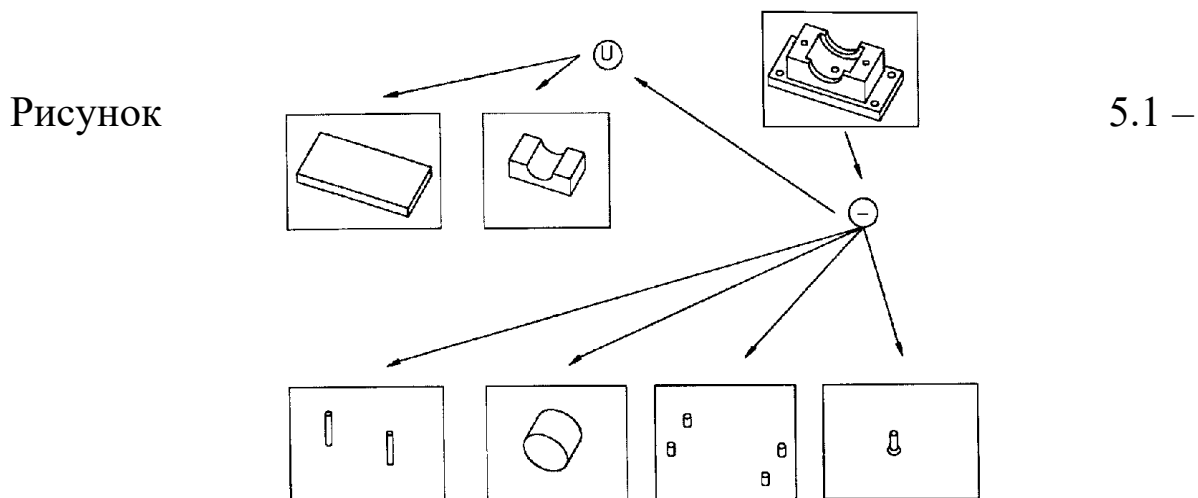
- документи, що регламентують її роботу;
- вихідна інформація для формування інформаційної бази;
- інформаційна база, що містить моделі ГО, ГЗ;
- елементи оформлення креслення за ДЕРЖСТАНДАРТОМ ЄСКД;
- технічні і програмні засоби створення моделей ГО, ГЗ та їх виведення;
- інтерфейс користувача у вигляді графічного діалогу з комп'ютером.

*Ефективність застосування АКД при розробленні КД* забезпечується такими її можливостями: наявністю засобів перетворень (повороту, перенесення, симетрування, масштабування, побудови дзеркального зображення й ін.); використанням готових фрагментів креслень (конструктивних і геометричних елементів, уніфікованих конструкцій, стандартних виробів); веденням діалогу з комп'ютером у звичних для конструктора термінах і зі звичними для нього об'єктами (графічними зображеннями); наявністю мовних засобів опису типових моделей-представників креслень об'єктів, коли процес створення конкретного креслення виробу зводиться до задання розмірів; одержанням креслень високої якості, оформлених за стандартами ЄСКД, шляхом виведення на графобудівники, принтери й інші пристрої.

Об'ємні тіла й ГЗ, утворені з простіших об'єктів з використанням логічних операцій об'єднання, перетинання, віднімання, називаються *складовими ГО*. Операція компонування складових ГО здійснюється з використанням їхнього подання у вигляді ієрархічної структури у формі «дерева побудови» (рисунок 5.1).

1 На першому етапі реальний об'єкт (у прикладі – деталь) піддається абстракції, у результаті якої створюється *інформаційна модель*.

2 На другому етапі в інформаційній моделі *виділяють рівні структуризації даних і їхнього взаємозв'язку*, найчастіше з урахуванням процесів обробки інформації у завданні проектування. У такий спосіб здійснюється уточнення і структурування інформації з логічної точки зору. Істотним моментом у цьому поданні є те, що воно повинне відбивати характеристики не однієї деталі, а цілого класу деталей на різних стадіях проектування, які фіксуються у технічній документації.



Побудова складового *ГО* з елементарних *ГО* із використанням логічних геометричних операцій

При формуванні інформаційної моделі передбачається використання безлічі *конструктивних елементів* для одержання деталей довільної форми, *геометричних елементів* (точок, контурів, поверхонь, елементарних і складних об'єктів), які забезпечують обробку геометричної інформації для всіх процесів автоматизованого проектування. У такий спосіб будується *модель даних*, що відбиває логічну структуру даних.

3 На третьому етапі здійснюється процес відображення моделі даних у машинне подання — формування *моделі доступу* (або розміщення), що орієнтована на фізичне розміщення даних у комп'ютері в *моделі зберігання*.



4 На четвертому етапі визначається *модель зберігання*, що задає відображення даних, які містяться у моделі доступу, на фізичну пам'ять і управління ними.

*Аналіз «великих складань»*. Групу деталей можна логічно об'єднати у вузол або складальну одиницю.

Під *логічним об'єднанням* розуміється можливість виконання операції над групою деталей («складанням») так само, як над однією деталлю, без об'єднання їх у єдине складене тіло. У свою чергу, кілька складальних одиниць можна логічно об'єднати в агрегат, а агрегати – у виріб.

*«Великі складання»* – об'ємні геометричні моделі складних виробів, у яких може поєднуватися до декількох десятків тисяч елементів (наприклад, верстата, вагона, автомобіля й ін.). Такі моделі потребують значних ресурсів комп'ютера.

*Підсистеми аналізу «великих складань»* передбачені в розвинених системах САПР верхнього рівня і являють собою спеціальні додатки візуалізації й аналізу складних виробів. Ці середовища дозволяють використовувати математично точні моделі виробу, спрощуючи їх подання у структурі даних. У результаті створюється новий геометричний об'єкт – *«велике складання»*, що може використовуватися для зміни його конструкції. Основне достоїнство підсистеми – автоматичне оптимальне розподілення ресурсів обчислювальної системи, витрачених на обробку проекту.

Заходи редагування складань:

- топологічні операції;
- просторове компонування виробу, подання «дерева» складання (послідовності);
- перевірка зв'язності складання;
- визначення параметрів і характеристик (об'єм, центр мас, щільність, моменти й тензори інерції та ін.);
- кінематичний, динамічний контроль складання.

У комплексних системах наскрізного проектування присутня *підсистема динамічного контролю компонування складних виробів* – спеціалізоване середовище, що дозволяє наочно представити просторове компонування всіх елементів «великого складання». У режимі анімації є можливість

простежити послідовність складання, оцінити колізії та переміщення всіх деталей механізмів.

### 5.3 Підходи до конструювання на основі комп'ютерних технологій

Можна виділити *два підходи до конструювання* на основі комп'ютерних технологій [7].

Перший підхід базується на *двовимірній геометричній моделі* – графічному зображенні і використанні комп'ютера як електронного кульмана, що дозволяє значно прискорити процес конструювання і покращити якість оформлення *КД*. Центральне місце в цьому підході займає *креслення*, яке служить засобом подання виробу та містить інформацію як для вирішення графічних завдань, так і для виготовлення виробу (рисунк 5.2).

При такому підході отримання графічного зображення на комп'ютері буде раціональним і досить ефективним, якщо створене ГЗ використовується багаторазово.

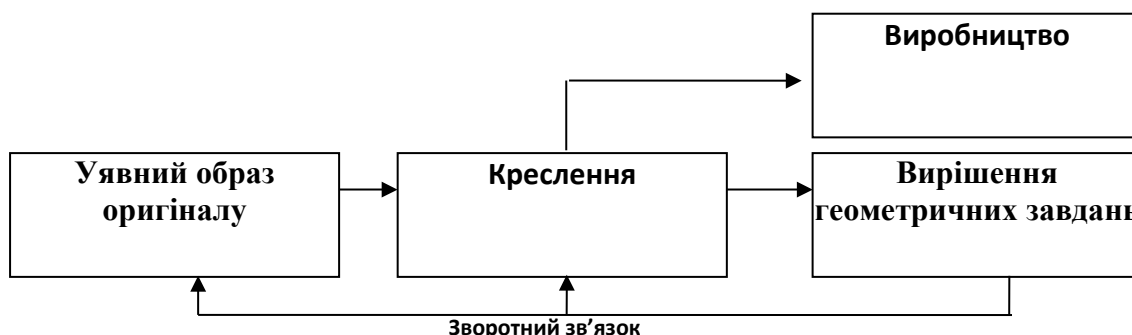


Рисунок 5.2 – Схема традиційної технології конструювання

В основі другого підходу лежить *просторова геометрична модель (ПГМ)* виробу (рисунк 5.3), що є більш наочним способом подання оригіналу та зручнішим інструментом для вирішення геометричних завдань. Креслення в цих умовах відіграє допоміжну роль, а способи його створення засновані на методах комп'ютерної графіки, методах відображення просторової моделі.

При першому підході обмін інформацією здійснюється на основі конструкторської, нормативно-довідкової й технологічної документації; при другому — на основі машинного подання *ГО*,

загальної бази даних, що сприяє ефективному функціонуванню програмного забезпечення САПР конкретного виробу.



Рисунок 5.3. – Схема технології конструювання на базі ПГМ

## 5.4 Способи подання графічної інформації в ЕОМ

### 5.4.1 Машинна графіка

Засоби і методи створення та перетворення графічних зображень об'єктів за допомогою ЕОМ називаються *машинною графікою*.

Машинна графіка використовується для введення інформації, яка має графічну форму в ЕОМ, і виведення її у графічній формі з ЕОМ. При цьому під *графічною формою подання інформації* розуміють креслення та ескізи деталей і складених одиниць, різноманітні схеми, діаграми, графіки, гістограми й т. п. Якщо введення і виведення графічної інформації відбувається у процесі діалогу людини з ЕОМ, машинну графіку називають *інтерактивною*.

До *основних технічних засобів машинної графіки* відносяться графічні дисплеї разом з пристроями управління маркером, графічні пристрої, координатографи, кодувальники графічної інформації.

*Математичне забезпечення машинної графіки* включає до себе геометричні моделі, методи й алгоритми їх перетворення.

Геометричні моделі можна подати у вигляді складених з окремих елементарних частин – графічних примітивів (суцільні і пунктирні відрізки прямих ліній, дуги кола й еліпса, прямокутники, багатокутники), а алгоритми перетворення геометричних моделей – елементарних операцій (масштабування

зображення – стиснення або розширення, поворот, зрушення, мультиплікація, дзеркальне відображення, виділення вікна).

Разом з автоматичним введенням інформації безпосередньо з графічних документів застосовують також *попереднє кодування* – подання інформації на графічних вхідних мовах.

*Програмне забезпечення машинної графіки* подане в САПР:

1) мовними процесорами, що перетворюють інформацію, введenu з кодувальника або подану на вхідній графічній мові;

2) програмами, що перетворюють результати виконання проектних процедур прикладними програмами в команди управління пристроями виведення.

Елементарною одиницею машинної графіки є графічний об'єкт, якому відповідає система рівнянь, що описують геометричні характеристики об'єкта проектування у тривимірному просторі. На пристроях відображення графічний об'єкт зображується у вигляді проєкцій (ортогональних, аксонометричних, перспективних і ін.), розрізів і перетинів.

Всі відомі формати подання зображень можна розділити на *растрові* й *векторні* (рисунок 5.4).



Рисунок 5.4 – Растрове та векторне зображення

*Растрові зображення* являють собою рисунки, що складаються з пікселів – точок на екрані комп'ютера, які формують зображення. Картинка створюється за принципом мозаїки. Це дозволяє отримувати рисунки високої якості. В основному вони використовуються для обробки зображень реального світу, отриманих за допомогою сканерів, цифрових фотоапаратів і т. д.

У векторному форматі зображення розділяється на примітиви – лінії, багатокутники, кола та ін. Кожний примітив описується своїми геометричними координатами. Векторні формати доцільні для подання креслень, діаграм, шрифтів (окремих символів шрифту) відформатованих текстів.

Такі зображення, або окремі його елементи, зручно редагувати, масштабувати, розбирати на складові, групувати, перегруповувати й ін.

Координати примітивів бувають як дво-, так і тривимірними. Для тривимірних зображень, природно, набір примітивів розширюється, до нього входять і різні поверхні – сфери, еліпсоїди, їх сегменти, параметричні різноманіття й ін.

Обидва види графіки використовуються спільно для створення складних монтажних 3D-моделей, коли поєднуються растровий і векторний способи формування зображень.

#### 5.4.2 Подання графічної інформації в ЕОМ

Графічна інформація може бути подана різними способами, що залежить від призначення даної інформації і типу пристроїв, для яких вона призначена [3].

*Координатний спосіб* заснований на поданні плоского (монохромного) зображення у вигляді координат прямокутних растр-елементів. При цьому фіксуються тільки растр-елементи, що належать зображенню, а фонові області не розглядаються. На рисунку 5.5. показано розбиття зображення на растр-елементи, що являють собою квадрат із стороною 0,01 мм.

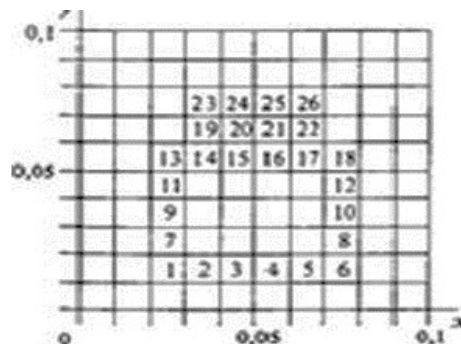


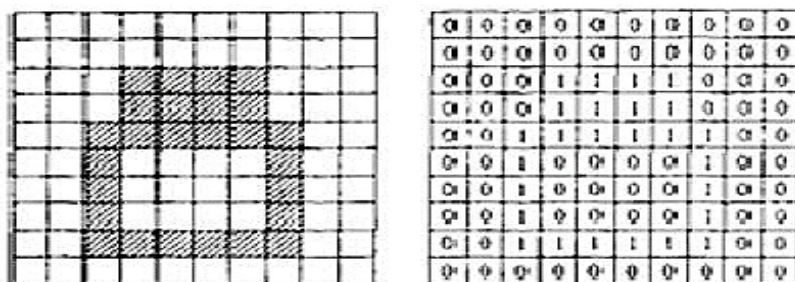
Рисунок 5.5 – Розбиття зображення на растр-елементи

Дані про координати растр-елементів заносяться до таблиці, приклад якої наведено на рисунку 5.6. Як видно з рисунка, для достатньо точного подання графічної інформації потрібен великий масив даних, що включає до себе порядкові номери і координати растр-елементів, унаслідок чого цей спосіб є незручним для зберігання графічної інформації. Область його застосування – сканувальні і растрові пристрої введення-виведення графічної інформації. Розмір растр-елемента визначається технічними характеристиками вказаних пристроїв.

Номера точок	x	y
1	0,03	0,02
2	0,04	0,02
3	0,05	0,02
23	0,04	0,05
24	0,05	0,05
25	0,06	0,05
26	0,07	0,05

Рисунок 5.6 – Таблиця координат растр елементів

Різновидом координатного способу є *рецепторний спосіб*, заснований на поданні всього поля зображення у вигляді прямокутних областей, які називаються рецепторами (рисунок 5.7). При цьому рецептор, що належить лініям зображення, кодується двійковою одиницею і називається «збудженим», а рецептор, що належить фоновій області зображення, кодується двійковим нулем і має назву «білий». При цьому кодування кожного окремого рецептора компактніше, ніж растр-елемента у координатному способі. Проте необхідність кодування фонові області, яка займає на кресленнях значний простір, призводить до того, що цей спосіб не дозволяє одержати компактний запис інформації.



### Рисунок 5.7 – Рецептори та їх кодування

Область застосування даного способу подання графічної інформації та ж сама, що й у координатного.

Економічнішим з точки зору об'єму збереженої інформації є *спосіб поелементного подання* графічної інформації, що базується на зображенні у вигляді сукупності графічних примітивів, якими можуть бути лінія, дуга, коло та ін. Для подання будь-якого з цих елементів досить записати код даного елемента, координати його опорних точок і (або) орієнтацію у просторі. Область застосування цього способу – пристрої кодування графічної інформації (диджитайзери).

Поелементне подання також застосовується для створення компактного зберігання графічної інформації, одержаної розглянутими вище способами. Для цього використовуються *програми векторизації растрових зображень*, що дозволяють визначати впорядковану сукупність рецепторів і растр-елементів, а потім подавати їх у вигляді графічних примітивів.

*Аналітичний спосіб* заснований на поданні графічної інформації у вигляді рівнянь поверхонь. При цьому будь-яке зображення можна подати сукупністю рівнянь, що відповідають сукупності поверхонь, які перетинаються з площиною зображення. Такий спосіб є математичною основою сучасного програмного забезпечення машинної графіки.

#### **5.4.3 Геометричний опис об'єкта. Види геометричних об'єктів**

Геометричний опис об'єкта – основа інформаційного, електронного супроводу виробу на всіх стадіях його життєвого циклу.

Носіями геометричної інформації є, наприклад, креслення деталі, операційний ескіз і т. п.

*Методи геометричного опису об'єкта:*

- 1) плоске геометричне моделювання.
- 2) об'ємне геометричне моделювання.
- 3) структурно-параметричне моделювання.

На кресленнях та ескізах геометрична інформація, яка надає конструктивні параметри деталі, є носієм і технологічної інформації. Фахівець-технолог, вивчаючи креслення деталі і асоціативно сприймаючи геометричну та технологічну інформацію, може змінювати положення деталі в просторі, додаючи або виключаючи із зображення деталі необхідні фрагменти поверхні.

Технологічні атрибути – це технологічні параметри об'єкта (точність розмірів, форми, взаємне розташування, шорсткість поверхонь і т. д.). Особливу складність викликає велика кількість і специфічність технологічних атрибутів, які можуть мати відношення до кожної з поверхонь або будь-якого комплексу поверхонь.

Можна виділити два основних види *ГО*:

- *постійний* – з постійними розмірами та геометричною формою, наприклад, *ГЗ* умовних графічних позначень деталей, стандартний виріб із постійними розмірами;

- *параметрично заданий* – зі змінними розмірами та геометричною формою, наприклад, виріб, що залежить від типорозміру; типові й уніфіковані конструкції; конструктивні елементи типових деталей та ін.

Постійні *ГО* можуть бути сформовані із використанням графічного редактора, наприклад, AutoCAD, КОМПАС.

## **5.5 Побудова геометричних моделей**

### **5.5.1 Методи обробки геометричних об'єктів. Параметризація**

Застосовують такі *підходи до побудови геометричних моделей* [8]:

1 *Задання граничних елементів* – граней, ребер, вершин. Наприклад, модель з плоскими поверхнями може бути задана списком граней разом з інцидентними їм ребрами і списком ребер з інцидентними їм вершинами. Поверхні складної форми додатково задаються або рівняннями поверхонь або результатами застосування функцій створення примітивів.



2 *Позиційний підхід*, відповідно до якого розглянутий простір розбивають на осередки (позиції), і деталь задають вказівкою осередків, що належать деталі. Осередки можуть мати форму паралелепіпедів однакових розмірів (воксельне подання), більш економну форму паралелепіпедів кратних розмірів (октантне подання) або вони можуть бути різної форми (осередкове подання). Очевидно, що із зростанням кількості осередків збільшується точність моделювання, але моделі стають дуже громіздкими.

3 *Метод конструктивної геометрії* – подання складної деталі у вигляді сукупності базових елементів форми та виконання над ними *теоретико-множинних (логічних) операцій*. Цей підхід називають також об'єктно-орієнтованим моделюванням або *feature-based modeling*. Це основний спосіб конструювання складальних вузлів у сучасних САПР.

Базові елементи форми (рисунок 5.8) – заздалегідь розроблені моделі простих тіл: це в першу чергу моделі паралелепіпеда, циліндра, сфери, призми.



Рисунок 5.8 – Базові елементи форми

Типовими теоретико-множинними операціями є *об'єднання, перетин, віднімання* (рисунок 5.9).



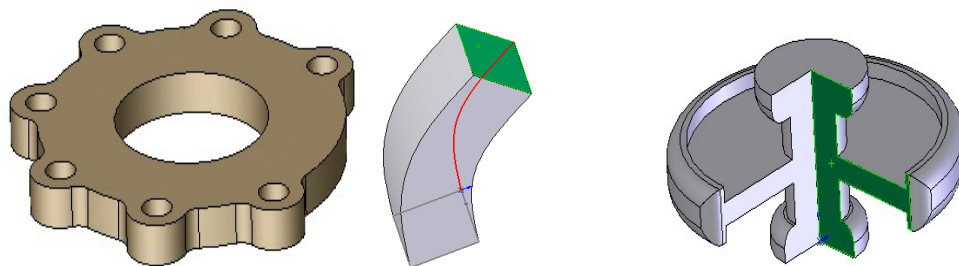
Рисунок 5.9 – Ілюстрація теоретико-множинних операцій

Наприклад, модель плити з отвором може бути отримана вирахуванням циліндра із паралелепіпеда.

*Метод конструктивної геометрії* породжує ще один спосіб побудови геометричних моделей, який називається *конструктивним поданням*. Конструктивне подання об'ємної геометрії — це опис послідовності застосування операцій при

створенні геометричної моделі. Зазвичай історія синтезу моделі з базових елементів форми відповідає послідовності операцій при виготовленні деталей, що зручно при проектуванні технологічних процесів у системах САМ.

4 *Кінематичний метод* – задання траєкторії переміщення двовимірних контурів (об'єктів). Слід переміщення контуру приймають як поверхню деталі. Різновиди методу наведено на рисунку 5.10.



а) видавлювання (екструзія)

б) обертання

Рисунок 5.10 – Різновиди використання кінематичного методу

Методи опису параметрично заданого *ГО* характеризуються великими витратами на формування машинного подання. Щоб скоротити ці витрати, при описі деяких груп технічних об'єктів можна користуватися одним із двох принципово різних методів обробки геометричних елементів: *варіантним* або *методом генерування*.

*Варіантний метод* заснований на тому, що для певного класу виробів визначається модель-представник, за допомогою якого можна одержати всі геометричні форми цього класу виробів. Представника класу виробів називають типовою моделлю (або комплексною), а отримані з неї форми – варіантами (виконаннями).

Варіантний метод припускає, як необхідну умову, опис *комплексної деталі*. Для цього із групи геометрично схожих деталей складається штучна комплексна деталь, якій притаманні геометричні ознаки деталей групи. Далі визначається, на базі яких параметрів можна створити окремі елементи групи.

Одним із вирішальних моментів конструкторської підготовки виробництва (*КПВ*) є вибір *базової конструкції об'єкта*, що виготовляється.

*Базова конструкція* – деталь (машина або прилад), що має найбільшу кількість загальних ознак, притаманних всім видам виробів того самого призначення. Вибір базової конструкції – основна ланка *КПВ*. Модифікаціями базової конструкції є всі інші конструкції даного виду.

*Комплексна деталь* (рисунок 5.11) є основою при розробленні групового технологічного процесу та інструментальних групових налагоджень. Вона створюється шляхом додавання до моделі найскладнішої деталі конструктивних елементів, поверхонь, наявних на інших деталях групи.

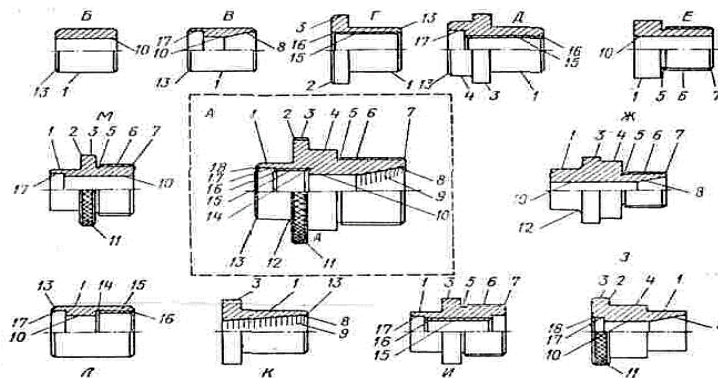


Рисунок 5.11 – Деталі групи та комплексна деталь

Виконання виробу визначається заданими параметрами, обнулення яких приводить до виключення певних елементів *ГО*. У найпростішому випадку змінюють тільки розміри, а конструкція окремих варіантів сімейства виробів залишається незмінною. Такий вид конструювання називають *принциповим* (тобто зі збереженням принципу конструкції).

У *принциповому конструюванні* дані технологічної документації не підготовляються щоразу заново, а закріплені за вже наявними принциповими кресленнями. Застосування такого методу припускає, що вже зроблено вибір геометрії для проєктованого виробу.

Області застосування: проєктування окремих деталей (пружин), комплексних функціональних вузлів (підшипників), готових виробів (трансформаторів, інструменту).

Витрати на опис типової моделі великі у порівнянні із витратами на одержання варіантів, тому багато систем використовують *принцип вкладеності моделей*: один раз описані типові моделі використовуються для опису інших типових моделей як макрокоманди.

Стосовно технології обробки в цьому випадку можна говорити про типовий технологічний процес. При необхідності відновлення комплексної інформації про типовий технологічний процес або креслення на групу виробів у систему вводяться нові варіанти сполучень різних вихідних параметрів.

У *методі генерування* на противагу варіантному визначаються різні сполучення конструктивних (інакше конструкційних) і технологічних елементів, потім вибирається найкраще рішення. Принцип роботи системи, що використовує метод генерування, заснований на поділі *ГО* на елементи і створенні нових *ГО* із наявних елементів.

Розрізняють такі групи елементів: *основні* (функціональні), *допоміжні* (конструктивні геометричні елементи й елементи форми), *технологічні*.

В основі методу генерування лежить використання певних геометричних елементів, введених у систему проектування та таких, що піддаються переробці. Такими елементами можуть бути відрізки, кола, дуги, площини. Опис деталі виконується розкладанням реальних об'єктів на елементи, які можуть бути оброблені тією або іншою системою. Ці елементи (за назвою) викликаються із БД, позиціонуються, тоді одержують розміри.

За допомогою основних елементів створюється геометрична форма деталі (зовнішні та внутрішні поверхні), проточування (внутрішні і зовнішні). Це дає насамперед загальний опис деталі.

Із використанням допоміжних елементів, які безпосередньо пов'язані з основними, здійснюється докладніший опис деталі, що дозволяє повністю передати її геометричну форму.

Технологічні елементи або характеристики відносяться і до основних, і до допоміжних елементів.

САПР, що працюють на принципі генерування, мають високу гнучкість і придатні для вирішення різних завдань. Використання цього методу ефективно, бо досвід показує, що більшість нових конструкторських розробок створюється шляхом

раніше не використовуваних сполучень елементів, давно відомих як за принципом функціонування, так і за виконанням.

Сьогодні використовуються системи, побудовані на базі комбінації обох принципів.

Розглянуті моделі зберігаються й обробляються у векторній формі. Однак для візуалізації у сучасних робочих станціях у зв'язку з використанням у них растрових дисплеїв необхідне растеризування — перетворення моделі в растрову форму. Зворотну операцію переходу до векторної форми називають векторизацією. Зокрема векторизація повинна виконуватися по відношенню до даних, отриманих скануванням зображень у пристроях автоматичного введення.

Конвертація між двома вказаними видами подання графічної інформації тривіальна лише при переході від векторної до растрової графіки (метод Брезенхама), зворотний перехід вимагає певних зусиль, при цьому особлива складність полягає у розпізнаванні ділянок растра в районі “стикування” векторів, що зазвичай вимагає втручання оператора.

Серед існуючих програм для конвертування растрових зображень (у тому числі і відсканованих) у векторні формати (DXF, EMF, WMF, EPS та ін.) відзначимо RasterVect, що має зручний інтерфейс, а конвертування проходить швидко і досить коректно (рисунок 5.12).

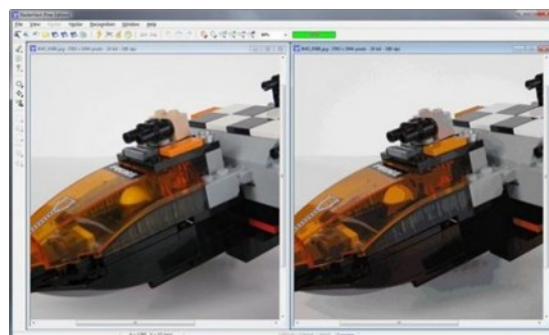


Рисунок 5.12 – Результат роботи програми RasterVect

**Параметризація.** За даними International Data Corporation і журналу Document Management, у світі в електронній формі є близько 1,5 млрд креслень, та їх кількість повинна істотно збільшитися за рахунок сканування і векторизації вже наявних 6,5 млрд креслень, що зберігаються на паперових носіях [17]. У

зв'язку з цим одним з найважливіших функціональних засобів сучасних конструкторських САПР є інструментарій, що забезпечує ефективне внесення змін у файли описів існуючих креслень, тобто їх редагування і модифікацію.

Під *редагуванням* ми розуміємо можливість зміни параметрів одного або декількох однотипних графічних примітивів, а під *модифікацією* – зміну ряду різних або навіть всіх наявних примітивів, складових зображення або креслення.

Нагальна необхідність введення у САПР функцій модифікації креслень визначається насамперед тим, що, за експертними оцінками, 80 % вузлів і деталей розроблених нових виробів не зазнають істотних змін у конфігурації [17].

Можливість автоматизованого редагування і модифікації креслень найбільш ефективно вирішується з використанням *параметричних моделей*, тобто описів, що базуються на сукупності варійованих параметрів. За умови існування такого опису модифікація зводиться до задання нового набору параметрів, а всі рутинні операції зі зміни окремих примітивів і побудови нового креслення виконуються автоматично.

Процес створення параметричної моделі ми будемо називати *параметризацією*. Креслення по суті є не тільки графічними моделями реальних об'єктів, але й містять про них додаткову параметричну і технологічну інформацію. Коли конструктор використовує для побудови креслення інтерактивні графічні засоби, то одночасно із створенням зображення система формує внутрішній опис елементів креслення. Цей опис можна розглядати як модель креслення. Зображення, побудоване за цією моделлю, являє собою зображення креслення.

Виділення у кресленні або в моделі конкретного елемента або підмножини елементів здійснюється за допомогою незалежних величин або геометричних параметрів елементів. На кресленнях як такі незалежні величини – параметри використовуються *значення різних розмірних позначень* (лінійних, радіальних, діаметральних або кутових).

Ідея створення параметричної моделі конструкторського креслення полягає у визначенні абсолютно всіх елементів зображення креслення через безліч розмірних позначень, проставлених на кресленні.

Тоді, маючи таку параметричну модель, легко отримати креслення видозміненого об'єкта шляхом його перерисовування відповідно до заданих наборів нових значень розмірів.

*Параметричне моделювання* – відпрацьований метод, заснований на обчислювальній математиці. При цьому задаються варіантні значення параметрів структурних елементів об'єкта і співвідношення між ними.

За допомогою параметризації можна за короткий час випробувати різні комбінації геометричного співвідношення і зміни параметрів моделі, внести необхідні корегування та уникнути подальших помилок.

У випадку з параметричним моделюванням створюється математична модель з параметрами, зміна яких тягне за собою зміну всієї конфігурації деталі, переміщення деталей у складанні й інші схожі трансформації.

Формування і впровадження залежностей та маніпуляції з ними по суті є процесом проектування, до того ж, найпростішим і найзручнішим.

*Основні функції параметричного моделювання* – визначення значень параметрів та їх оптимізація.

*Адаптивна параметризація* – створення моделі без первісних позиційних обмежень на її конструктивні елементи. Потім можна швидко й оперативно вносити зміни до моделі, активізуючи параметри. Можна переглянути різні варіанти. На будь-якому етапі можна модифікувати модель та обрати остаточний варіант.

*Примусова параметризація* припускає опис характеристик математичними співвідношеннями або співвідношеннями сукупності пов'язаних між собою геометричних елементів конструкції.

*Наявність параметризації забезпечує:*

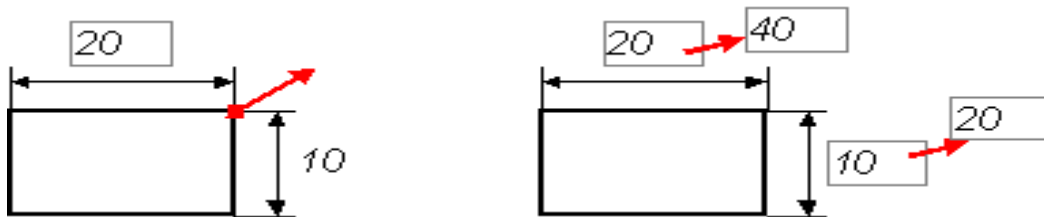
1 Можливість ескізного проектування без задання точних остаточних розмірів під час первісної побудови ескізу. Вказівка точних необхідних розмірів та інших параметрів пізніше дозволяє одержати точну деталь із будь-якими бажаними варіантами розмірів.

2 Одержання у будь-який час нової модифікації виробу з новими параметрами. Використовується та сама концепт-модель

(від лат. conceptus — уявлення — вміст поняття, те ж саме, що і смисл).

3 Двонапрямний асоціативний зв'язок між геометричною моделлю і розмірами (рисунок 5.13).

**Асоціативність** – здатність системи запам'ятовувати логічні зв'язки між операціями побудови та геометричними об'єктами, які використовувалися як опорні у даній операції (тобто на які роблять посилання при побудові). Асоціативність відіграє величезну роль у модифікації параметричних моделей і пов'язана з історією створення моделі.



а) зсув вузла приводить до зміни оброзмірення;

б) зміна числового значення розміру приводить до зсуву вузла геометрії

Рисунок 5.13 – Двонапрямний асоціативний зв'язок між геометричною моделлю й розмірами

4 Можливість задання розмірів у вигляді іменованих параметрів (літерно-цифрових) і задання для них числових значень або у вигляді рівняння зв'язку з якими-небудь іншими параметрами (рисунок 5.14, 5.15).

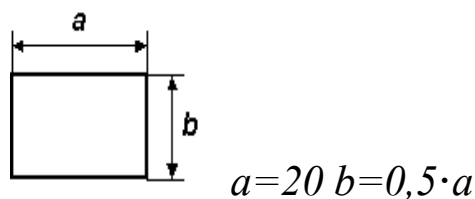
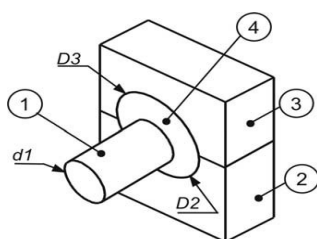


Рисунок 5.14 – Якщо зміниться «a», то відразу ж зміниться «b»



$$d1=30 \ D2=60 \ D3=D2 \ d_{vnutr}=d1; \ D_{nar}=D2$$



### Рисунок 5.15 – Примусова параметризація

Яку б комбінацію вала і корпусу не задали, втулка набуде примусово потрібної форми.

5 Можливість одержувати одразу багато конфігурацій деталі, маючи одну концепт-модель і таблицю (базу даних) параметрів (рисунок 5.16).

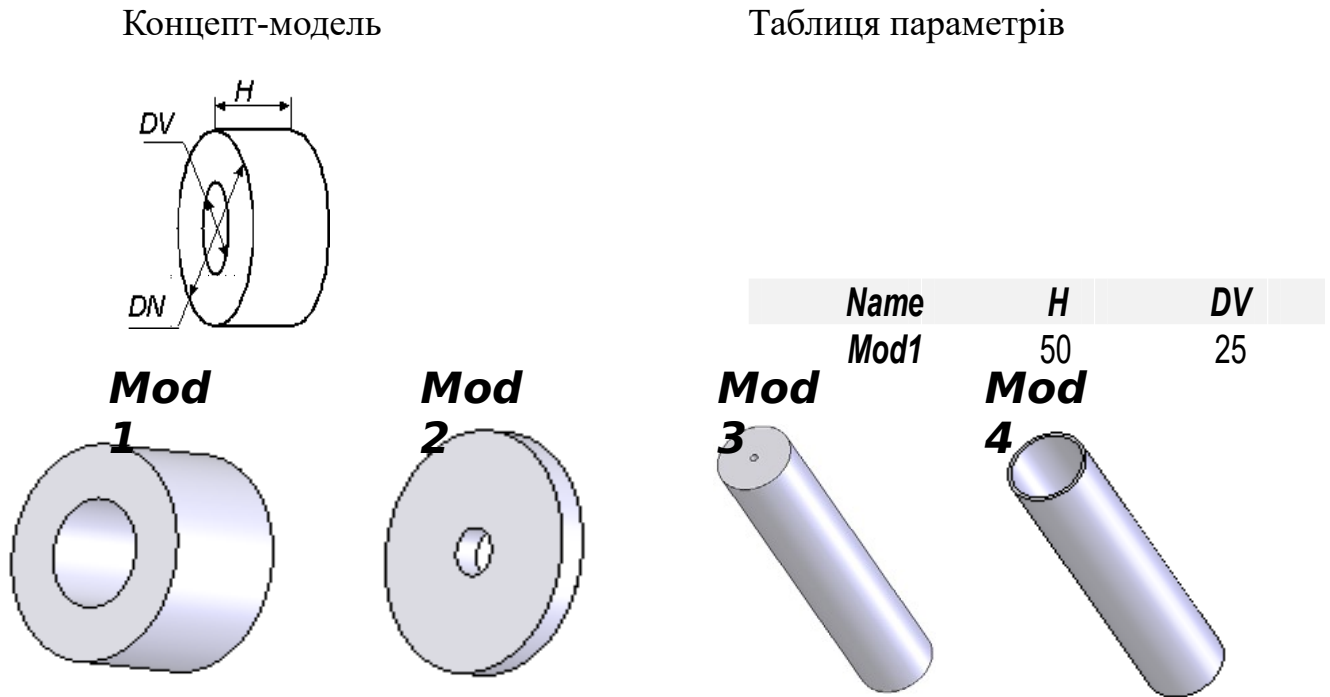


Рисунок 5.16 – Варіанти конфігурацій деталі за концепт-моделлю і таблицею параметрів

#### 5.5.2 Етапи одержання креслення

Для автоматичного одержання креслення необхідна тривимірна модель (деталі або складання), що містить всю інформацію про геометрію майбутнього креслення. Принципових відмінностей у методиці створення креслень однієї деталі або великого складання немає. Просто на одному кресленні будуть посилення одразу на декілька моделей деталей або вузлів.

1 Підготовчий етап – оціночний – варто погодити систему координат креслення із системами координат всіх деталей, які будуть відображені на кресленні. Це дозволить

оцінити компоновання креслення, габарити і масштаб зображень деталей, їх взаємне розташування відносно один одного. Необхідні тривимірні розрізи або перетини, як самостійні елементи, теж можуть відображатися на кресленні.

2 Вибір структури креслення, *що містить опис формату і виглядів* креслення. *Вигляди*, у яких будуть розташовуватися спроектовані лінії тривимірного об'єкта, розміри й умовні позначки, можуть бути *стандартними* (зверху, ліворуч, аксонометричні і т. д.) або *нестандартними*, створеними раніше користувачем. *Формат креслення* забезпечується потрібним стандартом (ISO або ЄСКД) або може створюватися самим користувачем.

До створених виглядів можна, якщо необхідно, додавати інші вигляди, а також редагувати існуючі, змінювати їх положення на кресленні (переміщення, поворот), кількість, властивості (масштаб, розміри).

3 *Одержання необхідних проекцій виробу*. На цьому етапі приймається рішення про зв'язок креслення із вихідною моделлю (наявність або відсутність асоціативного зв'язку, спрямованість асоціативного зв'язку).

Якщо асоціативний зв'язок зберігається, після модифікації моделі креслення може бути автоматично відредаговано. У ньому обновляться всі проекції, пов'язані із моделлю.

Якщо зв'язку немає, всі лінії креслення стануть самостійними об'єктами та перебудуються вручну за допомогою функцій редагування плоскої геометрії.

Інструментальними засобами САПР організуються:

- *зв'язок документа креслення і документа геометричної моделі* (впровадження, імпорт, посилання). Бажано виключити дублювання інформації про 3D-моделі;
- *одержання проекцій основних виглядів об'єкта* із класифікацією видимих і невидимих ліній;
- *створення виносних і допоміжних виглядів*;
- *в останню чергу – оформлення місцевих розрізів*.

4 *Оформлення креслення* починається із створення осьових ліній. Далі виконується оброзмірювання (оформлювальне). Оформлення позначень допусків, шорсткостей і т. ін. На завершення створюються написи.

*5 Редагування існуючого креслення.* Якщо між кресленням і вихідними тривимірними моделями існує асоціативний зв'язок через базу даних, тобто проєкції креслення зберігають посилання на відповідні моделі, то у випадку зміни однієї або одразу декількох моделей редагування креслення може бути виконане у такий спосіб:

- з бази даних завантажуються як креслення, так і модель. Необхідні зміни здійснюються у моделі з обов'язковим перерахуванням результатів. У тому ж робочому сеансі відкривається потрібне креслення, тоді старі проєкції моделі змінюються на нові, наприклад, з використанням функції редагування параметрів проєкцій або функції заміни об'єкта, що проєктується. Потім нова модель і її відредаговане креслення зберігаються у базі даних;

- тривимірна модель деталі модифікується і зберігається у базі даних. Можна зберегти колишню версію креслення, обірвавши зв'язки, і створити нову версію документа креслення. Надалі, викликаючи з бази дані креслення, що мають посилання на цю модель, система запропонує вибір між старими версіями креслення і новою версією. У новій редакції креслення автоматично будуть оновлені всі посилання на змінені моделі.

Варто враховувати, що, крім проєкцій, на кресленні можуть бути присутні інші елементи, які ніяк не будуть пов'язані з вихідними моделями. Тому при редагуванні креслення необхідне узгодження між новими проєкціями та всіма доданими вручну геометричними елементами і розмірними лініями.

3D-системи призначені для створення як моделей окремих деталей, так і складальних одиниць. Тривимірне складання є повністю параметричним – воно містить окремі параметричні деталі, пов'язані між собою. Це означає, що при зміні розміру або положення якої-небудь деталі буде автоматично скоректоване і складання в цілому.

### **5.5.3 Засоби двовимірного креслення**

За допомогою 2D-пакетів створюється більшість конструкторських креслень виробів в ортогональних проєкціях.

Відносні обмеження на 2D-системи САПР такі:

- системи 2D-моделювання розпізнають геометричні форми, визначені точками, кривими або прямими *тільки на площині*;

- не вмiючи обробляти 3D-форми, 2D-інструменти не можуть автоматично генерувати додаткові вигляди. Довільний вид компонента можна виконати лише як окрему форму, що розглядається системою поза зв'язком з іншими зображеннями виглядів.

Програмні продукти, розроблені для двовимірного креслення, засновані на використанні:

- стандартних форматів, штампів та основних написів;
- процедур формування технічних вимог і текстових документів, що застосовуються у текстових редакторах;
- графічних примітивів;
- різноманітних способів і режимів побудови графічних примітивів, які позбавляють користувача необхідності виконання складних допоміжних побудов, наприклад, при створенні фасок, заокруглень, еквідистантів, кіл, дотичних і т. д.;
- стандартних типів ліній (основних, тонких, штрихових, штрих-пунктирних і подвійних з різною товщиною і кольором);
- стандартних видів штриховок;
- всіх типів лінійних, кутових, радіальних і діаметральних розмірів;
- автоматичного проставлення граничних відхилень розміру та підборі квалітету за заданими відхиленнями;
- всіх способів задання шорсткості, допусків форми і розташування поверхонь;
- операцій, необхідних для редагування креслення (зсуву, копіювання, повороту, масштабування, симетричного відображення, видалення, вирівнювання, перенесення).

При роботі з цими системами практично повністю змінюється ідеологія проектування. Спочатку креслення будується у тонких лініях, а потім обводиться основними лініями. При виконанні побудов за допомогою допоміжних ліній автоматично задаються відношення між лініями (паралельність, перпендикулярність, торкання і т. д.) і фіксуються параметри цих відношень (відстань, радіус, кут і т. д.). Всі елементи побудови креслення автоматично прив'язуються до допоміжних побудов.

Тому при переміщенні ліній або зміні їх параметрів вихідне креслення автоматично трансформується у нове креслення.

Серед систем 2D-моделювання можна виділити: Graphics CAD Professional 3.0 (можливе створення враження рельєфності 2D-об'єктів); Microsoft Design (для архітекторів, художників, що ілюструють технічні документи).

#### **5.5.4 3D-моделювання. Складові частини 3D-моделі**

Однією з визначальних тенденцій на ринку програмних продуктів є перехід від двовимірних систем проектування креслень CAD-2D до систем тривимірного моделювання виробів CAD-3D, які в теперішній час є основним засобом комп'ютерної графіки [13].

Основні причини такого переходу:

- складність аналізу складальних конструкцій – 2D-креслення не дають повноцінного уявлення про тривимірні взаємозв'язки і функціонування компонент складання;
- проектування у 2D ускладнює перевірку взаємопов'язаних розмірів, допусків і посадок – ітераційний процес «добробка – перевірка – повернення – доопрацювання» є складним і трудомістким;
- неможливість передачі 2D-даних у прикладні програми – інформація про деталі, що задається двовимірним кресленням, не відповідає вимогам до вихідних даних для програм інженерного аналізу, технологічного проектування та програмування обладнання з ЧПУ.

**3D-модель** – це об'ємна фігура у просторі, створювана в спеціальній програмі. За основу, як правило, беруть креслення, фотографії, малюнки і докладні описи, спираючись на які, фахівці і створюють віртуальну модель.

**Складові частини 3D-моделі.** Тривимірна модель складається із безлічі точок, які з'єднуються між собою гранями й утворюють *полігони*.

*Вершина* – точка, яка має свої координати в тривимірній системі. Свою назву вона отримала через те, що є крайньою точкою плоского багатокутника, або полігону.

*Грань* або *ребро* – відрізок, який з'єднує дві вершини. У тривимірній графіці гранню називають обмежувач полігонів.

*Основною складовою у тривимірній графіці* вважається *полігон* – плоский багатокутник, безліч яких і утворює тривимірну фігуру. Абсолютно будь-яка фігура буде будуватися з численних простих фігур (причому більшість редакторів використовує трикутники і чотирикутники). Чим більше буде простих фігур у складній, тим більш гладкою буде здаватися поверхня 3D-моделі (так зване *високополігональне моделювання*).

Сукупність полігонів несе інформацію про розмір і форму 3D-моделі, а обрана текстура дозволяє передати достовірну інформацію про зовнішній вигляд об'єкта і являє собою зображення на поверхні фігури.

При формуванні 3D-моделі використовуються:

- двовимірні елементи (точки, прямі, відрізки прямих, кола та їх дуги, різні плоскі криві і контури);
- поверхні (площини, поверхні, представлені сімейством кривих, що їх утворюють, поверхні обертання, криволінійні поверхні);
- об'ємні елементи (паралелепіпеди, призми, піраміди, конуси, довільні багатогранники і т. п.).

Форма подання моделі істотно залежить від області застосування, тому в сучасних системах використовують різноманітність моделей, використовуючи при цьому засоби переходу.

3D-моделювання передбачає збір інформації: ескізи, креслення, фотографії та відеоролики, рисунки, часто навіть використовують готовий зразок виробу – загалом, все, що допоможе зрозуміти зовнішній вигляд і структуру об'єкта.

На підставі отриманої інформації 3D-моделлер або 3D-дизайнер створює тривимірну модель і вносить необхідні корегування, після чого модель готова для подальшого використання – друку на 3D-принтері, 3D-фрезерування на верстатах з ЧПУ або будь-якого іншого методу прототипування.

Якщо ж необхідно надати зображення для наочності клієнтам для рекламних роликів або для презентації, слід виконати *візуалізацію* – створення віртуальної комп'ютерної моделі в кінцевому вигляді. Візуалізація передбачає вибір

матеріалів, текстури, освітлення, тіні, зовнішніх умов навколишнього середовища. Після всіх налаштувань здійснюється фінальне перерахування – *рендеринг*.

### 5.5.5 Категорії методів 3D-моделювання

Через те що 3D-моделі використовуються практично у всіх сферах нашого життя, можна виділити *чотири рівні складності об'ємних зображень*:

1 *Перший*, найпростіший, – не містить інформації про структуру і дрібні деталі об'єкта, наприклад, келихи, прості рамки та ін.

2 *Другий*, дещо складніший рівень, – містить більш детальну інформацію про модель, наприклад, тумби, столи та інші нескладні предмети.

3 До *третього* рівня можна віднести гарнітуру меблів, техніку для дому через численні дрібні деталі і складну неоднорідну структуру.

4 *Четвертий*, найчастіше використовується інженерами, – наприклад, моделі верстатів, автомобілів та іншої складної техніки.

Всі рівні складності моделі співвідносяться із *трьома категоріями методів 3D-моделювання* (рисунок 5.17).

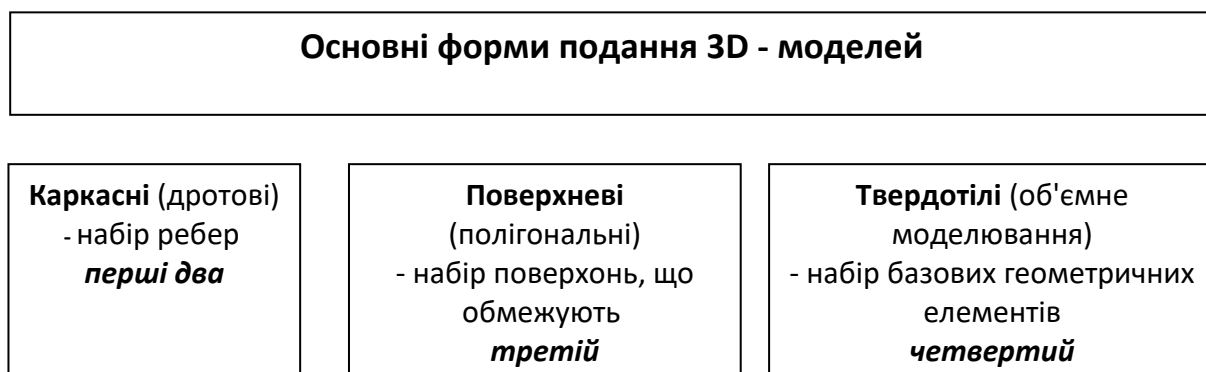


Рисунок 5.17 – Методи 3D-моделювання

*Каркасні моделі* – історично перша технологія подання об'ємної геометрії, яка природним чином розвинулася із систем 2D-креслення. Це найпростіший спосіб подання тривимірних моделей – так звані *дротяні каркаси* або просто *каркаси*, які

дають незаперечні переваги порівняно з моделюванням на площині. Вони допомагають ясніше уявляти модель і надійно контролювати взаємне розташування складових її елементів. Крім того, каркаси можна використовувати і для створення проєкційних виглядів.

*Каркасна модель* являє собою форму деталі у вигляді кінцевої безлічі ліній, що лежать на поверхні деталі (рисунок 5.18). Досить прості структури даних та алгоритми роботи з каркасами дозволили реалізувати їх на малопотужному обладнанні кінця 70-х років двадцятого століття.

Недолік каркасного подання моделей полягає у тому, що зображення такого типу не передають повну інформацію про об'єкт. Ні про об'єм, ні про структуру поверхні з такої моделі дізнатися неможливо, і це унеможлиблює побудову, наприклад, точних перетинів, але визначає його будову і функціональність.

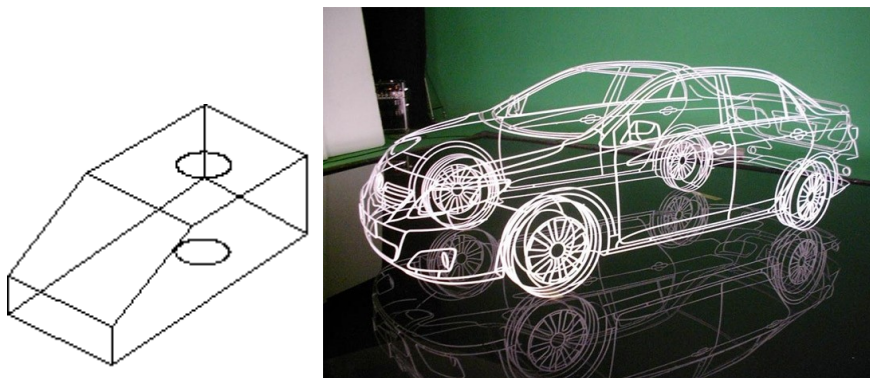


Рисунок 5.18 – Каркасна модель

Існує можливість неоднозначно інтерпретувати орієнтацію і видимість граней каркасного зображення (рисунок 5.19, б, в). Ця властивість каркасних моделей може призвести до непередбачуваних результатів. У каркасних моделях не можна відрізнити «видимі» грані від «невидимих». Тому на об'ємному зображенні або ортогональних проєкціях каркасної моделі майже завжди присутнє «сміття» – зайві лінії (рисунок 5.19, а). Операція з видалення прихованих ліній рівносильна руйнуванню всієї створеної каркасної конструкції, оскільки видалення лінії на будь-якому вигляді потягне за собою видалення її на інших виглядах.



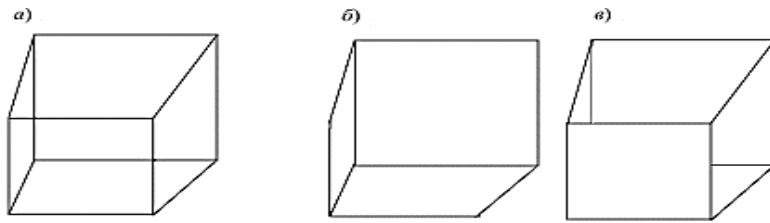


Рисунок 5.19 – Приклади неоднозначності каркасної моделі

Відзначимо ще кілька недоліків каркасних моделей – неможливість розпізнавання криволінійних граней, наприклад, у циліндричних і сферичних поверхнях, відсутність засобів тонування зображень (наприклад, при плавних переходах) та ін.

У даний час побудова каркасів використовується у геометричному моделюванні САПР, але лише як допоміжна система проміжних побудов, як один із методів візуалізації, зокрема в спеціалізованих програмах для побудови передбачуваної траєкторії руху пристрою або інструменту.

**Поверхнева модель об'єкта** – це оболонка об'єкта, порожня всередині

(рисунок 5.20). Поверхнєве моделювання здатне проектувати поверхні об'єкта, всередині ж виробу – порожнина, яка складається з *патчів*. Патч і топологічні поверхні є основними поняттями, які використовуються при поверхневому моделюванні.

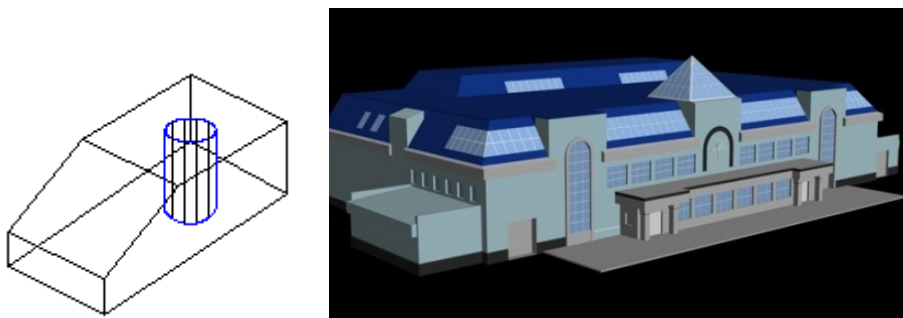


Рисунок 5.20 – Поверхнева модель

Поверхня – межа, яка ділить робочий простір на два півпростори. До речі, необов'язково, щоб оболонка моделі була замкнутою.

Така інформаційна модель містить дані тільки про зовнішні геометричні параметри об'єкта. Вона реалізується шляхом

апроксимації поверхонь багатогранником. Чим більша кількість граней, тим менше відхилення від дійсної форми об'єкта. Точки об'єктів — вершини, які можуть бути задані перетинанням трьох поверхонь. При моделюванні поверхонь у першу чергу створюються і видозмінюються поверхні всіх елементів і деталей модельованого об'єкта. Поверхні елементів з'єднують між собою шляхом закруглення або переходу у місцях їх перетину, зайве обрізають. Таким чином, з усіх поверхонь збирають зовнішню оболонку модельованого об'єкта. Над поверхневими моделями можна виконувати логічні операції.

Розрізняють такі *види поверхонь*:

- базові геометричні;
- обертання;
- сполучень і перерізів;
- аналітичні.

До *базових геометричних поверхонь* відносяться плоскі поверхні, утворені розгортанням відрізка прямої у тривимірному просторі на задану відстань (рисунок 5.21).

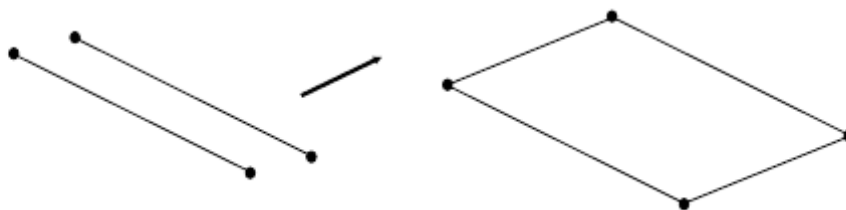


Рисунок 5.21 – Формування базової поверхні

Області поверхонь (рисунок 5.22, а) можуть бути розгорнуті у тривимірні об'єкти (рисунок 5.22, б). Системи поверхневого моделювання не розпізнають об'ємні тіла. Вони зображують їх просто як поверхні, з'єднані між собою і такі, що обмежують порожній об'єм (рисунок 5.22, в).

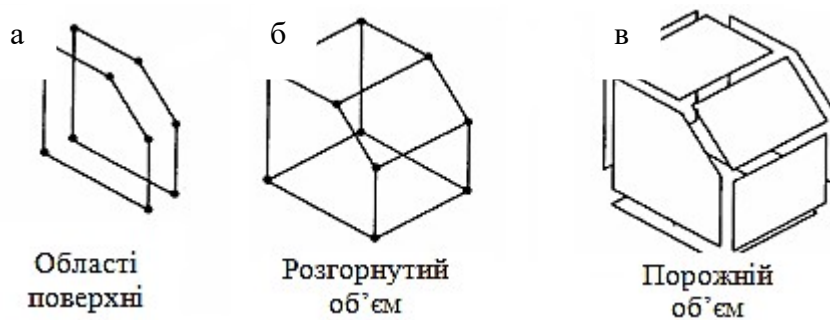


Рисунок 5.22 – Побудова тривимірного тіла розгортанням плоскої області

*Поверхні обертання* можуть бути отримані обертанням плоскої грані навколо деякої осі (рисунок 5.23). При цьому створюється не об'ємне тіло, а генерується тільки поверхня.

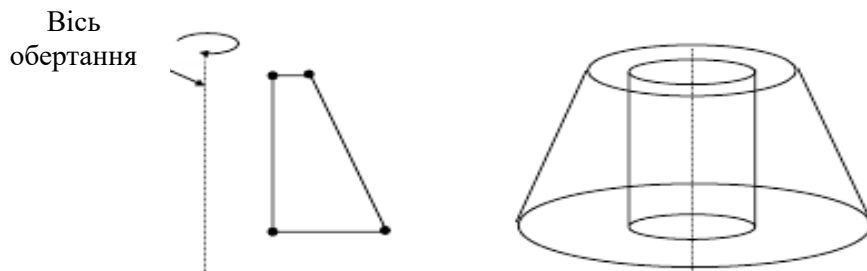


Рисунок 5.23 – Створення поверхні обертання

*Поверхні сполучень і перерізів.* Можливість побудови плавного сполучення однієї поверхні з іншою є найбільш потужним і часто використовуваним засобом поверхневого моделювання.

*Аналітичні поверхні* визначаються математичним рівнянням із невідомими  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  (шукані координати поверхні). Таким чином, щоб отримати аналітичну поверхню, треба знати математичне рівняння, яким вона описується.

Традиційно в САПР використовується декілька типових контекстів створення поверхонь:

- плоска поверхня – створюється заповненням плоского контуру (2D-ескіз або набір замкнутих кромek, що лежать в одній площині);
- поверхня витягування – у результаті плоскопаралельного витягування замкнутого або розімкнутого 2D/3D-ескізу в

напрямку, перпендикулярному площині ескізу або під довільним кутом;

- поверхня обертання – обертанням довільного профілю (2D-ескіз) навколо осі;

- поверхня по траєкторії – рухом 2D/3D-ескізу вздовж криволінійної твірної (2D/3D-ескіз, 3D-крива) і довільної кількості напрямних кривих (2D/3D-ескіз, 3D-крива), що деформують вихідний контур;

- поверхня по перетинах (аналог поверхні по траєкторії) – відрізняється тим, що будується не по одному, а по декількох поперечних перетинах з напрямними кривими;

- гранична поверхня (аналог поверхні по перетинах) – відрізняється тим, що будується по декількох довільно зорієнтованих у просторі 3D-кромках інших поверхонь із збереженням дотичності до них та дотриманням безперервності по другій похідній (гладке стикування); при побудові можуть використовуватися напрямні криві;

- поверхня вільної форми – відрізняється від канонічних (площини, сфери, циліндра, конуса, тора), одержується шляхом протягування профілю уздовж тривимірної кривої. Будується розбиттям сітки з контрольними точками на поверхні грані 3D-моделі та побудови сплайнової поверхні по контрольних точках. Зміна форми поверхні досягається перетягуванням контрольних точок;

- еквідистантна поверхня – виходить зсувом на певну відстань від існуючих граней або поверхонь;

- поверхня рознімання – використовується при проектуванні ливарних форм як допоміжна геометрія для розділення матриці і пуансона;

- серединна поверхня – створюється на середині (або заданому відсотку) товщини тонкостінної деталі;

- лінійчата поверхня – будується під кутом до обраної кромки і призначена для побудови граней з ухилом.

*Серед систем поверхневого моделювання слід виділити DUCT [12]. У цій системі поверхні формуються за допомогою створення декількох поперечних перерізів, що визначаються набором точок перерізу. Потім перерізи розміщуються щодо*

побудованої раніше кривої, яка називається спіном. Спін виконує роль «хребта», уздовж якого витягнуто поверхню (рисунок 5.24).

Для побудови поперечних перерізів можуть бути використані плоскі багатокутники (трикутник, чотирикутник і т. д.), а також поверхні другого порядку і поверхні, що аналітично не описуються, форма яких визначається різними методами інтерполяції та апроксимації. У системі DUCT для інтерполяції поперечних використовуються кубічні сплайни.

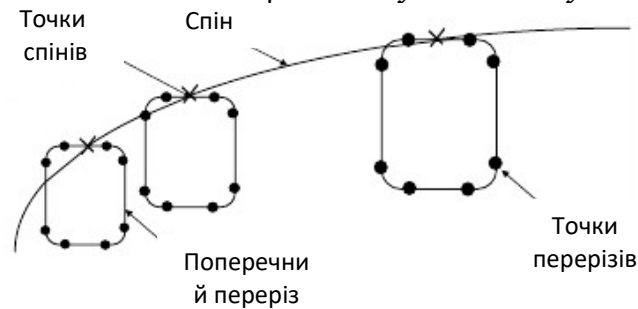


Рисунок 5.24 – Принцип поверхневого моделювання

На відміну від каркасного подання, моделювання за допомогою поверхонь має істотно менше обмежень, оскільки дозволяє визначити своєрідну «оболонку» тривимірного об'єкта. Тут є не тільки сегменти, лінії та дуги, але і поверхні у вигляді сукупності даних про грані, ребра та вершини, що утворюють форму (контур) відображуваного об'єкта.

Поверхневі моделі розрізняються за *способом апроксимації поверхні* (рисунок 5.25):

- 1) полігональна модель;
- 2) NURBS поверхні.

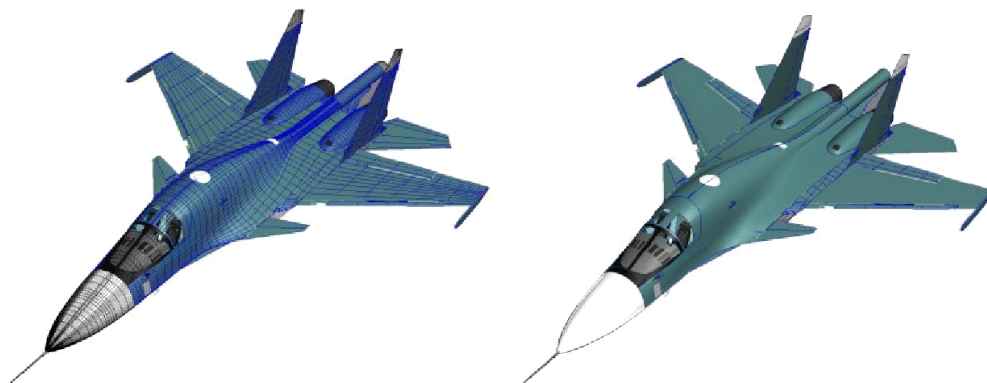


Рисунок 5.25 – Полігональна (а) NURBS-апроксимація (б)  
теоретичних обводів літака

Більш простою у частині структури даних і використовуваних для роботи з ними алгоритмів є **полігональна апроксимація**, коли поверхня зображується набором взаємопов'язаних плоских граней, на практиці найчастіше трикутних. Така апроксимація легко будується, для неї розроблені ефективні алгоритми реалістичної візуалізації, вона не вимагає значних обчислювальних ресурсів, хоча може бути витратною щодо пам'яті.

Головне обмеження у тому, що вона має фіксовану точність, тобто відхилення положення модельної поверхні від «ідеальної» модельованої. Для досягнення високої точності потрібне створення сіток з малим кроком, що веде до зростання вимог до обчислювальних можливостей системи. Тому використання полігональної апроксимації у САПР на поточний момент обмежене підсистемами візуалізації та найпростішого 3D-ескізування.

Цих недоліків позбавлена **технологія NURBS** (Non-Uniform Rational B-Spline, неоднорідний B-сплайн), сьогодні найбільш часто використовувана на практиці САПР. Такий опис поверхні забезпечує визначення координат будь-якої її точки, радіуса кривизни в ній, напрямку нормалі до поверхні з високою, у загальному випадку (без урахування обчислювальних витрат) будь-якою наперед заданою точністю. Певним недоліком такого підходу є складність алгоритмів роботи з NURBS, однак ця обставина історично подолана дослідниками і розробниками.

NURBS-подання є розвитком полігонального, але на відміну від нього дозволяє описувати не тільки плоскі, а й криволінійні грані і ребра (кромки). Сукупність таких граней за традицією називають сіткою. Технологія NURBS забезпечує реалізацію низки функціональних можливостей, недоступних або суттєво обмежених при використанні каркасного або полігонального подання: обчислення радіуса кривизни поверхонь, їх гладке сполучення, побудова траєкторій на поверхні, що важливо для підготовки ЧПУ-програм, отримання точних зображень,

спроєктованих на площину, наприклад, для отримання креслярських виглядів і т. д.

*У розвинених системах поверхневого моделювання складену поверхню можна повністю визначити, покривши її сіткою чотирикутних осередків, тобто ділянками, обмеженими поздовжніми й поперечними лініями на поверхні. Кожен осередок має геометричну форму топологічного прямокутника, що відрізняється від звичайного тим, що його сторони не обов'язково прямі й попарно перпендикулярні. Границі осередків являють собою безперервні криві, що забезпечує гладкість поверхні, натягнутої на сітку. Внутрішня область кожного осередка визначається методом інтерполяції. Зображення складеної поверхні, реалізоване зазначеним способом, може бути отримано на екрані дисплея або за допомогою побудови за точками сплайнових кривих, або шляхом створення багатогранного каркаса, на який система буде автоматично апроксимувати натяг гладкої криволінійної поверхні (рисунок 5.26).*

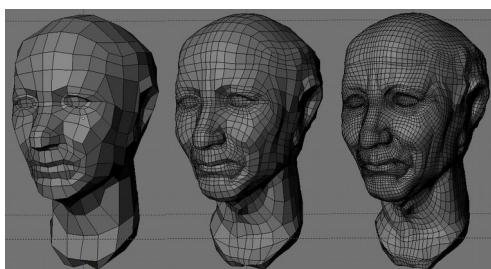


Рисунок 5.26 – Різні способи одержання поверхневих моделей

Методи поверхневого моделювання застосовуються в областях, де проектуються динамічні поверхні, тобто поверхні, які взаємодіють із зовнішнім середовищем. Ця технологія також часто використовується для проектування об'єктів, виготовлених штампувальними або ливарними способами. За її допомогою створюються деталі зі складною формою поверхонь – машини, літаки, побутова та промислова техніка.

Незважаючи на цілий ряд переваг поверхневого моделювання, його застосування обмежене насамперед через складність процедури видалення невидимих ліній і відображення внутрішніх областей, неможливість обчислення об'ємів, мас і

моментів інерції об'єктів, обмеженість застосування до них булевих операцій.

**Твердотільне моделювання (ТМ, моделювання твердих тіл)** – найточніший і найдостовірніший тип 3D-моделювання, у результаті якого можна отримати справжній зразок готового об'єкта зі всіма характеристиками – лініями, гранями, текстурою, даними про об'єм і масу тіла (рисунк 5.27). Хоча зображення і займає більший об'єм пам'яті в порівнянні з іншими, але воно повністю описує готовий об'єкт.

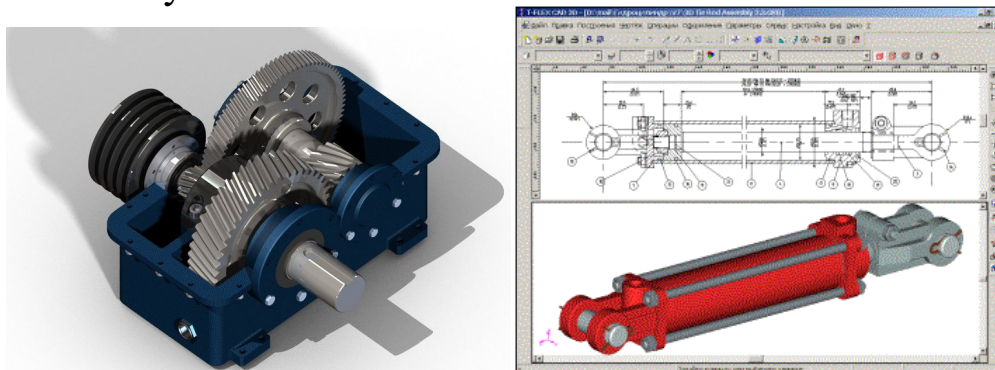


Рисунок 5.27 – Твердотіла модель

У ТМ процес побудови оболонки об'єкта аналогічний процесу виготовлення самого модельованого об'єкта. Працюючи за твердотільною технологією, фахівець спочатку має справу з оболонкою, а потім з окремими поверхнями. Принцип роботи простий – створення простої оболонки, що повністю описує об'єкт. За допомогою різних операцій – булевих, округлення, побудови ребер та інших, оболонці надається потрібна форма. Потім поверхня обрізується по лініях перетину і з'єднується з іншими поверхнями. Такий спосіб моделювання дозволяє створювати складні форми й об'єкти.

*Переваги твердотільного моделювання:*

- повне визначення об'ємної форми з можливістю розмежовувати внутрішні й зовнішні області об'єкта, що необхідно для виявлення небажаного взаємовпливу компонентів;
- забезпечення автоматичного видалення прихованих ліній;
- автоматична побудова 3D-розрізів компонентів, що особливо важливо при аналізі складних складальних виробів;



- застосування методів аналізу з автоматичним одержанням зображення точних вагових характеристик методом скінчених елементів (*MSE*);
- одержання тонових ефектів, маніпуляції із джерелами світла;
- краща візуалізація і сприйняття створеної моделі – тривимірна модель із застосуванням сучасних технологій виглядає більш реалістично;
- автоматичне формування креслень – одне з найголовніших переваг даної технології. Побудова моделі і формування креслень за нею з використанням ТМ – справа кількох секунд;
- швидкість і легкість процесу внесення змін і коригувань у модель – використання шаблонів значно скорочує час виконання роботи;
- об'єднання з різними додатками – інтеграція дозволяє скоротити час, використавши одразу отримані результати на наступних стадіях роботи;
- швидкість при проектуванні – ТМ скорочує термін виконання проектування об'єкта. Швидкість моделювання позитивно впливає на швидкість повернення вкладених інвестицій;
- об'ємні моделі подають об'єкти із забезпеченням логічного зв'язку інформації, зокрема, завдяки введенню поняття про матеріал і його фізичні властивості (щільність, теплопровідність та ін.). За такими моделями можна побудувати не тільки графічні зображення моделі (вигляди, розрізи, перетини), необхідні для креслення виробу, але й розрахувати такі характеристики виробу, як маса, об'єм, центр та моменти інерції й ін.

*Послідовність твердотілого моделювання.* Залежно від складності об'єкт моделювання може включати до себе побудову одного або декількох тіл.

Створення одиночного тіла починається із побудови одного тіла простої форми або побудови тіла на базі поверхонь, або на базі ліній.

*Прості тіла* – прямокутна призма, сферичне, циліндричне, конічне, тороїдальне тіла.

*Тіла на базі ліній* – тіло видавлювання, обертання, зсуву, тіло на основі плоских перетинів.

*Тіло на базі поверхонь* – тіло у формі аркуша.

*Дії (операції), які можна проводити над усіма тілами:*

- булеві об'єднання, перетинання та віднімання тіл;
- різання тіла поверхнями;
- побудова симетричного тіла;
- побудова еквідистантних тіл;
- побудова тонкостінного тіла;
- скруглення ребер тіла;
- фаски ребер тіла;
- побудова ребер жорсткості;
- побудова тіла з порожнинами.

За допомогою інших операцій можна скруглити ребра тіла, зняти з них фаски (прибрати скругленість), побудувати тонкостінне тіло.

Для симетричних тіл достатньо буде побудувати тільки одну половину тіла, а потім застосувати операцію побудови симетричного тіла.

При створенні декількох тіл можна отримати їх складання. Тоді всі тіла рівноправні.

Існують різні алгоритмічні методи подання ТМ – воксельні, використання октарних, бінарних «дерев» і т. д.

Проте в практиці САПР найбільш широке застосування має технологія, що базується на *граничному поданні* елементарних однозв'язних тіл (*B-REP* – *Boundary Representation*), яка в сукупності з *конструктивною геометрією* (*C-REP* – *Constructive Representation* або *CSG* – *Constructive Solid Geometry*) описує операції над тілами. Вони близькі, але відрізняються способами зберігання даних у пам'яті машини.

***C-REP***. Цей метод передбачає побудову ТМ з базових складових елементів, що називаються твердотільними примітивами, та обумовлених формою, розмірами, точкою прив'язки й орієнтацією. Типові приклади: паралелепіпеди, сфери.

Булеві операції є інструментарієм для побудови моделі.

Для опису складних тіл, що моделюють об'єкти реального світу, одержувані обробкою матеріалу або нероз'ємним

складанням, використовується ієрархічна структура, яка описує тіла як послідовність застосування булевих операцій над набором елементарних твердих тіл – так зване *CSG-дерево* (*Constructive Solid Geometry tree*).

У рамках *CSG-подання* складених твердих тіл використовуються вже згадувані раніше теоретико-множинні або булеві операції над вихідними (рисунок 5.28, а) елементарними тілами – віднімання; об'єднання; перетин (рисунок 5.28, б-г відповідно).

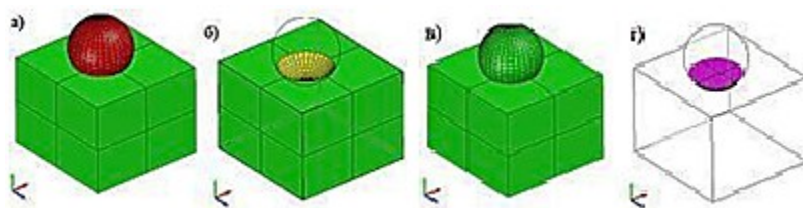


Рисунок 5.28 – Булеві операції над простими твердими тілами

Розглянемо приклад побудови ТМ з використанням булевих операцій.

На рисунку 5.29 показана схема формування найпростішої ТМ. Побудова її (рисунок 5.29, а) починається із створення елементарних об'ємів – прямокутних паралелепіпедів і циліндра (рисунок 5.29, б-г відповідно).

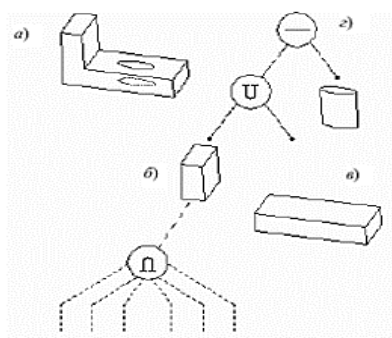


Рисунок 5.29 – Побудова твердотільної моделі із застосуванням булевих операцій

Прямокутні паралелепіпеди можна отримати:

- перетинанням шести лінійних напівпросторів;
- побудовою основ і подальшим витягуванням на висоту паралелепіпедів.

Циліндр також можна побудувати двома способами:

- як тіло обертання (круговим розгортанням плоскої грані навколо осі циліндра);
- побудовою основи та подальшим витягуванням на висоту циліндра.

Основна форма моделі створюється у результаті застосування операції булевого об'єднання до примітивів (рисунок 5.29, б, в). Перед тим як виконати цю операцію, потрібно примітиви розташувати в необхідному місці тривимірного простору (відносно один одного) і тільки після цього використати об'єднання. Для вирізання отвору в паралелепіпеді (рисунок 5.29, в) примітив (рисунок 5.29, г) необхідно розмістити в потрібній позиції зверху зображення (рисунок 5.29, в) і застосувати операцію булевого віднімання.

Відзначимо, що булеві операції можуть бути використані для визначення об'ємних і вагових характеристик виробу. Після кожного перетворення моделі автоматично перераховується її об'єм і вагові характеристики. Іншим важливим застосуванням булевих операцій є імітація операцій механічної обробки. Операції різання металу (точіння, фрезерування, свердління) можуть бути природно зіставлені із булевою операцією віднімання.

***B-REP*** – опис тіла за допомогою подання границь або точного аналітичного задання граней, що обмежують тіло, а також задання ескізів різних видів об'єкта із вказівкою лінії зв'язку між ними для встановлення взаємно однозначної відповідності. Цей метод дозволяє створювати точно, а не наближене подання геометричного твердого тіла.

Суть *B-REP-подання* (рисунок 5.30) полягає у тому, що тверде тіло описує замкнута просторова область, обмежена набором елементарних тонких поверхонь (граней), із загальними утворюючими контурами (ребрами) на границі поверхонь та ознакою зовнішньої або внутрішньої сторони поверхні, а також забезпечує такий ряд операцій, визначених над тілами:

- об'ємна модель геометричного об'єкта, отримана будь-яким способом, повинна бути коректною, тобто в даній моделі не може бути протиріч між геометричними елементами, наприклад, відрізок не може складатися з однієї точки. Перевірка правильності задання для однозв'язних тіл здійснюється за

формулою Ейлера, яка в найбільш загальному вигляді записується як  $V - E + F = 2$ , де  $V$  – кількість вершин,  $E$  – кількість ребер,  $F$  – кількість граней;

- обчислення габаритного об'єму;
- обчислення нормалі в точці;
- обчислення кривизни поверхні;
- знаходження точки перетину з контуром або іншою поверхнею;
- визначення положення точки відносно поверхні.

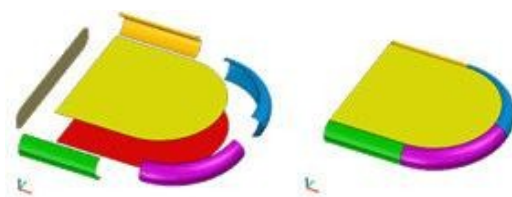


Рисунок 5.30 – *B-REP*-подання простих твердих тіл

На рисунку 5.31 показані етапи створення ТМ даним способом побудови.

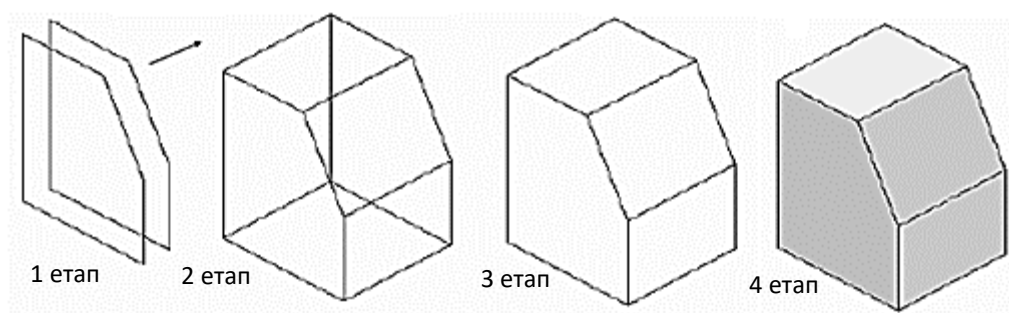


Рисунок 5.31 – Технологія створення твердотільної моделі

На першому етапі створюється базова поверхня (у вигляді зрізаного прямокутника).

Потім поверхня розгортається у тривимірному просторі. У цьому випадку утворюється «твердий» об'єм, а не «порожній простір», обмежений поверхнями. На «твердій» моделі видно приховані лінії.

На третьому етапі видаляються невидимі лінії (вручну або автоматично). Заключний етап – тонування.

Надалі побудовану модель можна розглядати як твердотільний примітив і використовувати для створення складних ТМ іншими способами.

На рисунку 5.32 показано тривимірне зображення п'ятника вагона із використанням пакета SolidWorks. Після видалення невидимих ліній і рендерингу отримано якісну ТМ п'ятника вагона з тоновими зображеннями граней.

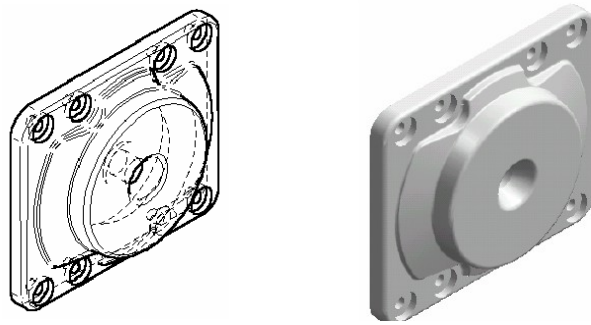


Рисунок 5.32 – Тривимірна модель п'ятника вагона та його тонове зображення

Як і для елементарного тіла, правильність побудови для багатозв'язних тіл визначається формулою Ейлера, що має такий вигляд (рисунок 5.33):  $V - E + F - H = 2 * (C - G)$ , де  $V$  – кількість вершин,  $E$  – кількість ребер,  $F$  – кількість граней,  $H$  – кількість некрізних отворів,  $C$  – кількість компонент,  $G$  – кількість наскрізних отворів.

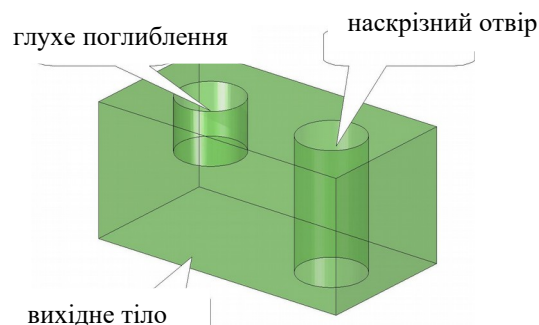


Рисунок 5.33 – *B-REP*-подання складних твердих тіл

Таким чином, складене тіло може бути описано у вигляді традиційного рівняння з булевих функцій, в якому аргументами є або елементарні тіла, або інші складові тіла. Це подання називають «деревом побудов» (рисунок 5.34), і крім зручності

модифікації геометрії результуючого тіла, воно дозволяє істотно знизити вимоги до обчислювальних ресурсів за рахунок застосування оптимізуючих процедур.

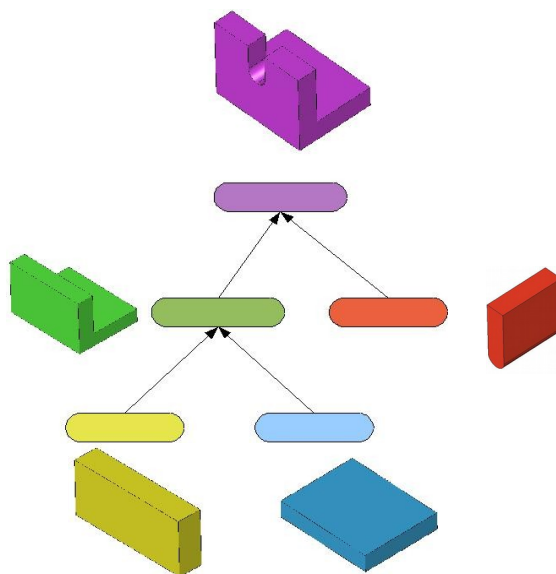


Рисунок 5.34 – Дерево побудови складання твердих тіл

Подання твердих тіл у вигляді «дерева побудов» зручне також і з точки зору організації користувальницького інтерфейсу, що забезпечує наочний і швидкий доступ до будь-якого елемента, який входить до опису геометрії тіла, його модифікацію і отримання звітної інформації.

З урахуванням відносного характеру переваг і недоліків *C-REP* і *B-REP* були розроблені гібридні системи, які об'єднують у собі обидва методи (CADD5, UnitGraph/Solid Modeling, Euclid, CATIA). Ці системи дозволяють об'єднати каркасну, поверхневу й твердотільну геометрії та використовувати комбінації жорстко розмірного моделювання, тобто гібридне моделювання.

*Кожен із двох названих методів має свої переваги і недоліки у порівнянні з іншими. Системи з C-REP-поданням мають значні процедурні переваги при початковому формуванні моделей, оскільки побудувати точну об'ємну модель із об'ємних примітивів правильної форми за допомогою булевих операцій порівняно не складно. Даний метод забезпечує також більш компактний опис моделі в БД.*

*У той же час системи з B-REP-поданням мають свої переваги. Одна з них стає очевидною, коли зустрічаються незвичайні форми, які не перекриваються наявним набором*

*примітивів методу C-REP. Прикладом ситуації такого роду може служити форма фюзеляжу та крил літака.*

*Друга відмінність – у C-REP-методі модель зберігається у вигляді комбінації даних і логічних процедур. При цьому зменшується об'єм пам'яті, але збільшується час обчислень при відтворенні моделі та її зображенні.*

*Система з B-REP-поданням зберігає точний опис границь моделі. Потрібно більше пам'яті, але не треба майже жодних обчислень для створення зображення.*

*Відносною перевагою систем з B-REP є порівняльна простота перетворення граничного подання у відповідну каркасну модель і назад. Причина такої простоти в тім, що опис границь подібний опису каркасної моделі, а це полегшує перетворення моделі з однієї форми в іншій, що робить системи в B-REP-поданні сумісними із уже наявними системами.*

### **5.5.6 Стратегія побудови моделей**

*Побудова моделі за принципом «знизу вгору». Ключові точки, тобто точки, які визначають кути моделі, є геометричними об'єктами нижчого порядку. Якщо при побудові ТМ насамперед створюються ключові точки, а потім вони використовуються для задання об'єктів вищого порядку (ліній, поверхонь і об'ємів), то модель будується за принципом «знизу вгору».*

*Побудова моделі за принципом «зверху вниз». Існує можливість скласти модель, використовуючи геометричні примітиви. Коли задається геометричний примітив, програма автоматично створює пов'язані з ним об'єкти «нижчого» рівня. Якщо моделювання починається з побудови примітивів вищого порядку, то говорять, що модель будується за принципом «зверху вниз». При моделюванні можна довільно об'єднувати обидва розглянутих способи.*

*Ключові точки. Будь-яка ТМ, незалежно від способу її побудови, складається із ключових точок, ліній, поверхонь і об'ємів. Ключові точки являють собою вершини ТМ, лінії – ребра, поверхні – грані, а об'єми – її внутрішні частини.*



Нижче приводиться ієрархія об'єктів моделювання (за спаданням):

- елементи (і навантаження елементів);
- вузли (і вузлові навантаження);
- об'єми (і навантаження, прикладені до моделі);
- поверхні (і поверхневі навантаження);
- лінії (і навантаження, прикладені по лінії);
- ключові точки (і зосереджені навантаження).

Побудова моделі починається із задання об'єктів найнижчого порядку – ключових точок. Потім можна задати лінії, поверхні й об'єми, що з'єднують ці ключові точки. При створенні об'єктів вищого порядку не завжди доводиться явно задавати їх у порядку зростання складності: можна безпосередньо побудувати поверхні й об'єми, використовуючи ключові точки при їхніх вершинах. При цьому проміжні об'єкти будуть створені автоматично.

*Використання булевих операцій.* Булеві операції дозволяють працювати безпосередньо з геометричними об'єктами високого порядку (рисунок 5.35). Обидва методи моделювання допускають їх використання.

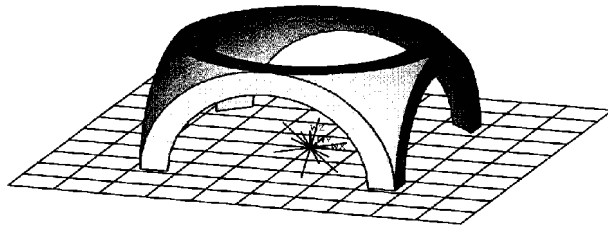


Рисунок 5.35 – Створення складних форм за допомогою булевих операцій

*Повороти зображення і буксирування мишею.* Булеві операції, незважаючи на зручність в їхньому використанні, іноді вимагають значних ресурсів комп'ютера. У ряді випадків ефективнішим може виявитися побудова моделі за допомогою процедур буксирування або повороту (рисунок 5.36).

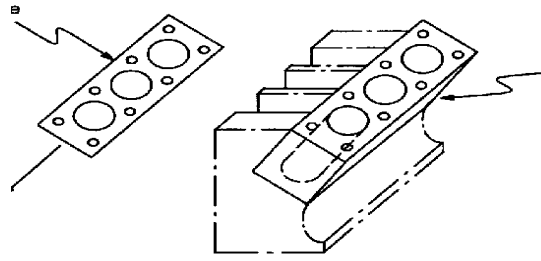


Рисунок 5.36 – «Буксирування» поверхні для створення об'єму

*Переміщення і копіювання об'єктів твердотільних моделей.* Повторюваний фрагмент поверхні або об'єму складного вигляду потрібно будувати тільки один раз; потім його можна переміщати, повертати та копіювати для створення повної моделі. Також може виявитися більш зручним перенесення геометричних примітивів за рахунок їхнього переміщення (рисунок 5.37), а не зміни робочої площини.

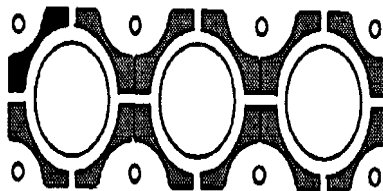


Рисунок 5.37 – Копіювання поверхні

*Переміщення і копіювання вузлів та елементів.* Автоматична побудова сітки має величезну перевагу перед способом прямої генерації вузлів та елементів, але іноді вимагає надмірно багато комп'ютерного часу. Якщо модель містить повторювані особливості геометрії, то найбільш ефективним підходом може бути моделювання і побудова сітки для області моделі, а потім створення копій цієї області (рисунок 5.38). Копіювання сітки потребує набагато менше часу, ніж окрема її побудова для кожної повторюваної ділянки.

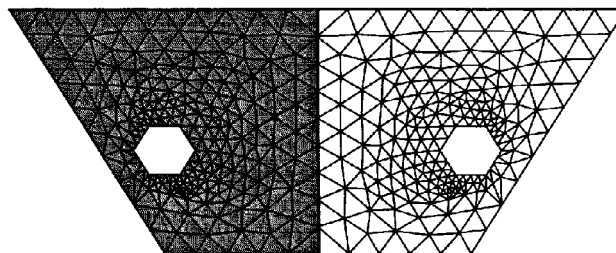


Рисунок 5.38 – Сітка області моделі: *оригінал* – ліворуч,

*Побудова сітки.* Кінцева мета при створенні ТМ – побудова сітки моделі разом із вузлами й елементами. Як тільки побудова моделі завершена, задані атрибути елемента й установлені засоби управління якістю сітки, можна надати програмі можливість побудувати сітку скінченних елементів. Виконуючи певні вимоги, можна задати побудову так званої впорядкованої сітки, що складається із чотирикутних елементів або паралелепіпедів – "цегл" (рисунок 5.39).

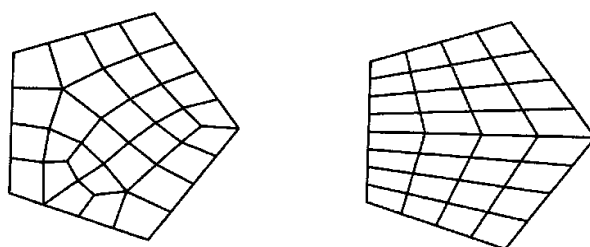


Рисунок 5.39 – Довільна й упорядкована сітки

*Навантаження твердотільної моделі.* Навантаження звичайно прикладаються до вузлів та елементів. Але при використанні ТМ це часто виявляється незручним. Існує однак можливість прикладати навантаження безпосередньо до ТМ – при ініціалізації рішення програма автоматично перенесе ці навантаження на скінченно-елементну модель.

*Виправлення моделі (очищення і видалення).* Починаючи виправлення моделі, варто керуватися ієрархією об'єктів моделі. Об'єкт нижчого порядку не може бути вилучений, якщо він є частиною об'єкта вищого порядку. Отже, об'єм не може бути вилучений, якщо він має сітку скінченних елементів, а лінію не можна видалити, якщо вона є частиною поверхні, і т. д. Якщо до об'єкта прикладені навантаження, то видалення або перевизначення цього об'єкта видаляє прикладені навантаження з бази даних.

Якщо необхідно виправити розбиту на сітку ТМ, потрібно спочатку видалити всі вузли й елементи тієї частини моделі, що буде виправлятися. Як тільки ТМ буде очищена, можна вносити зміни, видаляючи (зверху вниз) і задаючи геометричні об'єкти знову. Як альтернативу процедурам очищення, видалення і

перевизначення можна іноді використовувати безпосередню модифікацію ключових точок.

Використання систем тривимірного моделювання повністю змінює ідеологію при проектуванні виробів, дозволяючи конструктору реалізувати процес проектування за двома варіантами: *від складання до деталі* або *від деталі до складання*.

За першим варіантом конструктор спочатку створює складання, проектуючи деталі у спрощеному вигляді. У будь-який момент інформація про деталі може бути вивантажена в окремий файл і допрацьована за допомогою операцій моделювання. При зміні параметрів деталі у складанні вона буде модифікована не тільки у складальній моделі, але й у файлі, до якого була вивантажена.

Взаємне положення елементів складання задається шляхом зазначення типів сполучень між ними (збіг, паралельність або перпендикулярність граней, розташування об'єктів на відстані або під кутом один до одного і т. д.). Можливе виконання таких операцій, як об'єднання двох деталей або віднімання однієї деталі від іншої. Крім команд, що відносяться до побудов тривимірної моделі, передбачені також сервісні можливості, які дозволяють керувати відображенням моделі, робити вимірювання і розрахунки.

Крім розроблених користувачем унікальних моделей, компонентами складання можуть бути стандартні вироби (кріплення, опори валів і т. д.). Параметричні бібліотеки таких виробів (рисунок 5.40) зазвичай входять до комплекту поставки програмних продуктів.

У кресленні можуть бути автоматично створені асоціативні зображення тривимірної моделі деталі або складання – стандартний вигляд, проєкційний, за стрілкою, розріз, розтин, місцевий вигляд, внесений елемент. Всі зазначені зображення пов'язані із моделлю: зміни моделі призводять до зміни зображення в асоціативному вигляді. Структура складання відображається «деревом» моделі, за яким можна швидко отримати доступ до деталі будь-якого рівня.

*Система створення специфікації автоматично генерує специфікацію виробу, рядки якої зазвичай пов'язані з графічними об'єктами в складальному кресленні і компонентами*

тривимірної моделі складання. Зазвичай передбачаються режими виділення у кресленні або моделі об'єктів, що відносяться до виділеного рядка специфікації, а також режими автоматичного сортування розділів і рядків усередині специфікацій у стандартній або заданій послідовності.

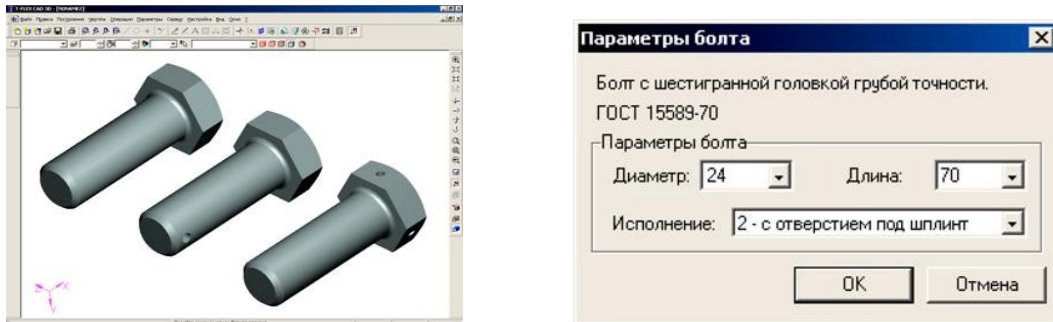


Рисунок 5.40 – Параметрична модель болта (різні виконання ліворуч) та вікно діалогу для вибору параметрів болта (праворуч)

*Анімація.* Необхідною умовою для її створення є наявність змінних, що впливають на змінювані параметри моделі. У процесі анімації система відображає стан моделі при послідовній зміні її параметрів.

*Наприклад, якщо необхідно, щоб у процесі анімації деталь оберталася щодо точки прив'язки, то призначається змінна, значення якої дорівнює куту повороту. Використання змінних забезпечує більш просте і швидке управління значеннями параметрів, дозволяє встановлювати внутрішні зв'язки між елементами моделі і вибирати значення параметрів з баз даних.*

*Введення текстової інформації.* У САД-системах передбачена можливість введення текстової інформації безпосередньо на полі креслення у реальному режимі відображення.

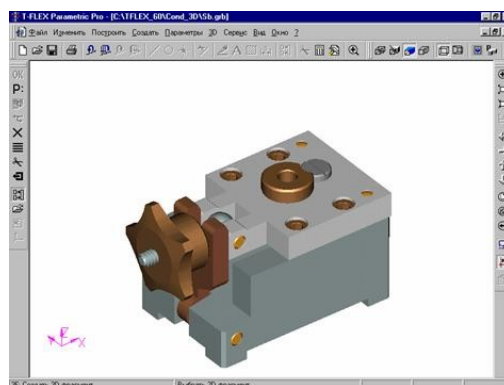
*У текст можна вставляти індекси, дроби, елементи оформлення креслення, фрагменти. Текстовий редактор підтримує також форматування абзаців тексту (вирівнювання, відступи, інтервали), виділення слів, використання шрифтів, різних розмірів, стилів і кольорів для фрагментів одного тексту.*

*Виведення результатів на друк.* Результати автоматизованого проектування виробів заносяться до «Архіву тривимірних моделей виробів». З каталогу архіву можна вибрати для роботи, а

також переглянути, скопіювати або видалити модель виробу. Друк документів може виконуватися на будь-яких пристроях (принтерах або плоттерах), підтримуваних Windows, причому забезпечується гнучке налаштування параметрів друку.

*Застосування CAD-систем забезпечує:*

- створення єдиного інформаційного середовища для ефективного управління проектами при конструюванні виробів у масштабах підприємства;
- автоматичне отримання специфікації і відомості покупних деталей за розробленою моделлю складання виробу;
- створення всіх видів документів на всіх етапах проектування виробу, починаючи з отримання технічного завдання і закінчуючи затвердженням результатів проектування;
- оперативне внесення та документування змін при модернізації виробу;
- автоматичний розрахунок інерційних характеристик – об'єму, маси, координат центра ваги, осьових і відцентрових моментів інерції виробу або деталі;
- створення ізометричних зображень виробів для каталогів або ілюстрацій технічної документації (рисунок 5.41);
- централізоване зберігання електронних документів, їх оперативне документування та захист від несанкціонованого доступу;
- створення анімації зображень;
- використання інформації, отриманої при конструюванні виробів, на подальших етапах технічної підготовки виробництва;
- підвищення якості проектування виробів, а також багаторазове скорочення термінів і вартості конструкторської підготовки виробництва.



## Рисунок 5.41 – Тривимірна модель виробу

Необхідно особливо відзначити, що всі системи автоматизованого проектування виробів орієнтовані на роботу користувача в діалоговому режимі, що зумовлює високий рівень вимог до його професійної підготовки.

3D-системи забезпечують таку дисципліну роботи з трьома координатами, при якій будь-яка зміна одного вигляду автоматично приводить до відповідних змін на всіх інших виглядах.

Послідовність побудов може бути такою: спочатку будується 3D-вигляд, а потім автоматично генеруються 2D-вигляди.

Деякі системи здатні перетворювати ортогональну проекцію складального креслення у 3D-вигляд цього виробу в розібраному стані.

*Поширені програми для 3D-моделювання.* Твердотільне моделювання використовується всюди: при створенні техніки, промислових деталей, меблів, ювелірних виробів, кіно і комп'ютерних ігор. Програмне забезпечення, що дозволяє займатися тривимірним моделюванням, дуже різноманітне. Тут є і комерційні, і відкриті (безкоштовні) продукти. До першого можна віднести 3DS MAX, «Модо», Lightwave 3D, саме їх на сьогодні можна назвати лідерами в галузі 3D-моделювання. Серед вільно розповсюджуваних програмних продуктів варто відзначити «Блендер» і Wings3D.

Список програм для 3D-моделювання поповнюється дуже швидко. Компанії, щоб завоювати більше споживачів, створюють програми, які відповідають різним специфікаціям і підійдуть для будь-яких вимог. Так, наприклад, компанія Autodesk випустила у світ вже чотири програмних продукти з 3D-моделювання: 3D MAX, Maya, Softimage, Mudbox.

Для промислового 3D-моделювання інженери найчастіше використовують 3DMAX, SolidWork і ProEngineering.

Інші популярні продукти для 3D-моделювання: «Носорог», 3Delight, Sculptris, ZBrush, «Гудини», Cinema 4D, LuxRender та інші.

## Розділ 6 ПРОГРАМНО-ІНФОРМАЦІЙНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ САПР

### 6.1 Структура програмно-інформаційного забезпечення

У структурі інформаційного забезпечення сучасного промислового підприємства або проектної організації системи CAD/CAM/CAE займають особливе місце, будучи інструментальною базою для всіх інших засобів інформатизації [19]. І особливу роль у процесі інформатизації відіграють системи CAD/CAM/CAE/PDM масштабу підприємства (або повномасштабні), що включають до себе останні досягнення в галузі автоматизації інженерної праці й організації діяльності підприємства [17].

Вже зазначалося, що всі програмні системи, наявні в цей час на ринку CAD/CAE/CAM/PDM-систем і які знаходяться в експлуатації, залежно від вирішуваних ними завдань можна розділити на три групи:

- універсальні;
- інтегровані;
- спеціалізовані.

Розглянемо детальніше цю градацію.

#### 6.1.1 Універсальні CAD/CAE/CAM-системи

Дані системи призначені для комплексної автоматизації процесів проектування і виробництва продукції машинобудування. Їх можна розділити на три групи залежно від функціональних можливостей (функціональної повноти), набору модулів і структурної організації системи:

- низького рівня;
- середнього рівня;
- повномасштабні.

*Така класифікація склалася історично, і хоча вже давно йдуть розмови про те, що межі між класами ось-ось зітруться, вони залишаються, бо системи, як і раніше, розрізняються і за ціною, і за функціональними можливостями. В результаті зараз*



у цій області є кілька потужних систем, свого роду «олігархів» світу САПР, продукти середнього класу, що стабільно розвиваються, і недорогі «легкі» програми, що отримали масове поширення. Є і так звані «позакласовий прошарок суспільства», роль якого виконують різні спеціалізовані рішення.

*Системи низького рівня (легкі системи).* Програми легкої категорії служать для простого двовимірного креслення, тому їх зазвичай називають електронною креслярською дошкою. І хоча до теперішнього часу «легковаговики» здобули і деякі тривимірні можливості, у них немає засобів параметричного моделювання, наявних у більш потужних системах.

*Перші системи двовимірного моделювання з'явилися ще в 1970-х, коли були розроблені засоби для зображення ліній, кіл і кривих на екрані монітора за допомогою макрокоманд та інтерфейсів прикладного програмування.*

*Однак справжнього розквіту дана область набула лише в 1980-х, коли з'явився персональний комп'ютер.*

*Події розвивалися швидко: в 1982 р. була заснована компанія Autodesk, яка рзпочала розроблення САПР для ПК під назвою AutoCAD, а вже до 1987 р. було продано 100 тис. копій AutoCAD (у 2010 р. ця кількість перевищила 4 млн). За прикладом Autodesk пішли й інші гравці, і зараз існує безліч різноманітних «легких» САПР, включаючи DataCAD однойменної компанії, фірми IntelliCAD CADopia, SURFCAM 2D від Surfware та ін.*

Це перший у сформованому історичному розвитку клас систем. Як правило, системи низького рівня експлуатуються на недорогих ПК або дешевих робочих станціях.

Системи низького рівня звичайно мають обмежений набір модулів, що включає до себе геометричний моделлер (графічне ядро) з 3D-поверхневою графікою (іноді з 3D-твердотільною), модуль візуалізації тривимірних тіл і деякі інші.

Подібні системи звичайно не мають модулів управління даними проекту, функціонального аналізу проекту й управління механоскладаннями.

*Ці продукти простіші у використанні і дешевші (100-3000 дол.) за своїх більш потужних побратимів, тому попит на них зростає навіть при нинішньому економічному спаді. У*

результаті «легкі» системи стали найпоширенішим продуктом автоматизації проектування.

До цього рівня відносяться програми, що реалізують 2D-моделі у вигляді креслень та ескізів, наприклад: пакети БАЗИС-Конструктор 4.5 (Базис), Графика-81 (Інститут проблем управління), SprutCAD (СПРУТ-Технологии), графічний редактор АРМ График (НДЦ АПМ), САДМЕСН і САДМЕСН LT на базі AutoCAD і AutoCAD LT2000 (Інтермех), T-FLEX CAD LT (Топ Системы), КОМПАС-ГРАФИК (Аскон), АДЕМ (Омега-Технологии) та ін.

Фірми постійно нарощують можливості систем низького рівня, наближаючи їх до систем середнього рівня і повномасштабних.

Системи середнього рівня. Вважається, що стабільність і процвітання будь-якого суспільства залежить від середнього класу, що відрізняється працьовитістю і надійністю. Це твердження справедливо і для світу САПР. Середній клас з'явився відносно недавно — в середині 1990-х. До цього існувало тільки два полюси: на одному потужні системи, що працюють на Unix (втім, тоді їх було набагато більше, ніж зараз), а на іншому прості програми двовимірного креслення для ПК. Але з 1995 р. обчислювальна потужність ПК виросла, а для Windows стала більш стабільною і почала підтримувати багатозадачність. Це дозволило розробникам створити САПР, які зайняли проміжну ланку між важким і легким класами. Від перших вони успадкували можливості тривимірного твердотільного моделювання, а від других — невисоку ціну й орієнтацію на платформу Windows. Вони зробили справжній переворот у світі САПР, дозволивши багатьом конструкторським і проектним організаціям перейти з двовимірного на тривимірне моделювання.

Системи середнього рівня мають більш широкий набір модулів, що розробляються значною мірою фірмою-власником системи. Системи цього класу забезпечують більш високу функціональність при проектуванні машинобудівних виробів, однак не мають розвинених модулів управління проектними даними й механічними складаннями.

Вони дозволяють проектувати більшість деталей загального машинобудування, складальні одиниці середнього рівня складності, виконувати спільну роботу групам конструкторів. На середньому рівні розташовуються програмні комплекси, які дозволяють створювати тривимірну геометричну модель порівняно нескладного виробу в основному методом твердотільного моделювання.

*Лідерами цього сегмента є такі системи: SolidEdge (розроблено фірмою Intergraph, а тепер належить UGS PLM Solutions (EDS)), SolidWorks однойменної компанії (нині — підрозділ Dassault Systemes), а також Inventor Mechanical Desktop корпорації Autodesk. Це далеко не повний перелік середніх САПР. У даному сегменті працює безліч компаній, що пропонують відносно недорогі системи вартістю приблизно 5-8 тис. дол. на одне робоче місце. У результаті за функціональними можливостями середній клас поступово наздоганяє своїх більш дорогих конкурентів.*

*Повномасштабні системи (важкого класу) – це навіть не програми, а цілі комплекси програм для великого підприємства. В одній ви виконуєте 3D-модель деталі (CAD-програма), у другій – розраховуєте її на міцність (CAE-програма), у третій – проектуєте інструмент для її виготовлення, у четвертій – розробляєте управляючу програму для верстатів з ЧПУ (CAM-програма). Вартість у них відповідає кількості функцій.*

Такі системи надають повний набір інтегрованих засобів проектування, виробництва, аналізу виробів. Вони використовують потужні апаратні засоби, як правило, робочі станції з операційною системою UNIX. Звичайно це багатофункціональні системи, до складу яких входить великий набір модулів (до 40 ... 50) різного функціонального призначення.

Типовий набір модулів повномасштабних систем включає до себе:

- графічне ядро (геометричний моделлер);
- широкий набір модулів для різних видів аналізу із використанням МСЕ і моделювання кінематики та динаміки механізмів;
- набір модулів для генерації управляючих програм для різних видів механообробки;

- модулі обміну даними в різних графічних форматах (ICES, STEP, DXF, VDAFS та ін.);
- модулі управління даними проекту в гетерогенній мережі (PDM);
- власну або комерційну СУБД.

*Через недавні зміни, пов'язані зі злиттями й поглинаннями, важких систем залишилося всього три: Unigraphics NX компанії UGS PLM Solutions (EDS), CATIA французької фірми Dassault Systemes (яка просуває її разом з IBM) і Pro/Engineer від PTC (Parametric Technology Corp.). Ці компанії – лідери в галузі САПР, а на їх продукти припадає «левова» частка обсягу ринку в грошовому еквіваленті.*

*Головна особливість «важковаговиків» полягає у тому, що їх великі функціональні можливості, висока продуктивність і стабільність досягнуті в результаті тривалого розвитку. Всі вони далеко не молоді: CATIA з'явилася у 1981 р., Pro/Engineer — у 1988-му, а Unigraphics NX, хоча і вийшла відносно недавно, є результатом злиття двох систем — Unigraphics і I-DEAS, придбаних разом з компаніями Unigraphics і SDRC.*

*Незважаючи на те що важкі системи значно дорожчі за своїх «легких» побратимів (понад 10 тис. дол. на одне робоче місце), витрати на їх придбання окупаються, особливо коли мова йде про складне виробництво, наприклад, в машинобудуванні, авіаційній та аерокосмічній промисловостях. На думку аналітиків, цей сегмент ринку вже практично насичений. Зараз виробники засобів автоматизації проектування покладають основні надії на підприємства середнього та малого бізнесу, яких набагато більше, ніж промислових гігантів. Для них призначені системи середнього та легкого класів.*

### **6.1.2 Інтегровані системи**

*Відомо, що часткова автоматизація не завжди дає очікуване підвищення ефективності функціонування підприємств. Тому кращим є впровадження інтегрованих САПР, що автоматизують всі основні етапи проектування виробів. Подальше підвищення ефективності виробництва та конкурентоспроможності продукції, що виробляється, можливе*

за рахунок інтеграції систем проектування, управління та документообігу.

Така інтеграція лежить в основі створення комплексних систем автоматизації, в яких, крім функцій власне САПР, реалізуються засоби для автоматизації функцій управління проектуванням, документообігу, планування виробництва, обліку і т. п. Багато систем автоматизованого проектування поєднують у собі вирішення завдань, що відносяться до різних аспектів проектування CAD/CAM, CAD/CAE, CAD/CAE/CAM. Такі системи називають комплексними або інтегрованими.

Вимоги до сучасних систем, обумовлені інтеграцією, такі:

- повсюдний перехід до твердотільного моделювання із використанням варіаційної геометрії з асоціативними зв'язками, як розвиток параметричного геометричного моделювання;
- поширення асоціативних зв'язків на всі рівні проекту, включаючи складальні одиниці, розрахункові модулі системи, технологічну підготовку виробництва;
- забезпечення горизонтальної та вертикальної інтеграції і збалансованості модулів у рамках єдиної системи;
- наявність засобів підтримки паралельного проектування і методів колективної роботи.

Традиційні CAD-CAM-системи здатні допомогти інженерові лише одержати управляючу програму для верстатів із ЧПУ. Для вирішення завдань конструювання і технологічного проектування необхідні нові інструментальні середовища та методи, здатні ефективно вирішувати як геометричні, так і технологічні завдання.

При виготовленні транспортних виробів використовуються технології, в основі яких лежать різні фізичні процеси: механообробка, електроерозійна обробка, лиття металів і пластмас та ін. САМ-системи виконують синтез технологічних процесів і програм для устаткування із ЧПУ, вибір технологічного устаткування, інструменту, оснащення, розрахунок норм часу і т. п.

Модулі системи САМ звичайно входять до складу розвинутих САПР, і тому інтегровані САПР часто називають системами CAE/CAD/CAM/PDM.

Розглянемо, що саме інтегрується у таких системах.

*Інтеграція моделей у САПР.* Важливі проблеми, які потребують вирішення при створенні комплексних САПР, — управління складністю проектів та інтеграція ПЗ.

Підсистема інтеграції ПЗ САПР призначена для організації взаємодії програм і модулів у маршрутах проектування. Вона складається з ядра, відповідального за інтерфейс на рівні підсистем, та оболонок – процедур, що погоджують конкретні програмні модулі, програми й/або програмно-методичні комплекси із середовищем проектування.

Сутність інтеграції полягає у здатності створювати дані для одного додатка та при малих змінах використовувати їх для іншого. Виходячи з цього треба вирішувати питання декомпозиції проектів, розпаралелювання проектних робіт, цілісності даних, міжпрограмних інтерфейсів та ін.

*Використання геометричної моделі для інженерних розрахунків. Інтеграція геометричних і скінченно-елементних моделей.* Інтеграція CAD і CAE-систем полягає у тому, що скінченно-елементна модель, необхідна для інженерного розрахунку в CAE-системі, будується за геометричною моделлю у CAD-системі.

Для такої побудови в CAD-системах використовується додаток FEM (Finit Element Modeling) – скінченно-елементне моделювання [4, 14, 15].

Головна сфера використання МСЕ — аналіз на міцність і розрахунок деформації. Однак цей метод швидко завоював популярність і для вирішення інженерних завдань, пов'язаних з гідро-, аеродинамікою, електронікою, радіоаналізом. З його допомогою можна вирішити такі завдання, як механіка рідини, суцільних середовищ, статика, розрахунок реакції ракети на імпульс тяжкості, аналіз навігаційної системи в умовах вібрації і т. ін.

Зараз МСЕ є одним з найбільш популярних інструментів дослідження характеристик інженерних конструкцій, що піддаються різним навантаженням.

Традиційні методи, що припускають однозначне чітке теоретичне обґрунтування, можуть використовуватися тільки для обмеженого класу завдань і особливих умов навантаження. Вони часто потребують модифікації, причому доводиться

контролювати їх застосовність до вирішення поставленого завдання.

Невпевненість конструкторів у достовірності отриманих результатів змушує їх підвищувати граничні навантаження, що призводить до включення у конструкцію додаткових кріпильних секцій, перевитрати матеріалів і підвищення загальної вартості виробу.

МСЕ дозволяє конструктору вирішувати завдання розрахунку складних деталей шляхом розбиття їх на дрібніші частини — кінцеві елементи. Ці елементи іноді називають дискретними, а процес їх виділення — дискретизацією форми деталі. Після розбиття подальші розрахунки проводяться для окремих скінченних елементів, кожен з них робить свій внесок у характеристику міцності деталі. Точки, що обмежують елемент, називаються вузлами, і разом з лініями, які проходять через них, утворюють кінцеву елементну сітку (рисунок 6.1).

Для 2D-областей найбільш часто використовуються елементи у формі трикутника і чотирикутника. При цьому елементи можуть мати як прямо-, так і криволінійні границі, що дозволяє з достатнім ступенем точності апроксимувати границю будь-якої форми. Для 3D-областей найбільш вживані елементи у формі тетраедра і паралелепіпеда, які також можуть мати прямо- і криволінійні границі.

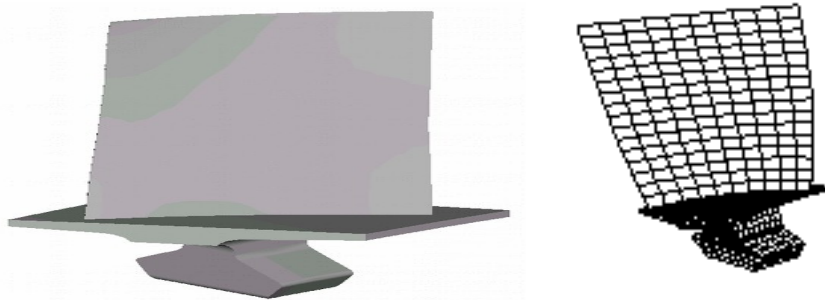


Рисунок 6.1 – Перетворення геометричної моделі в модель скінченних елементів

У загальному випадку МСЕ складається з п'яти етапів:

*Перший етап* – виділення скінченних елементів – один з найбільш важливих етапів МСЕ, тому що від якості розбиття багато в чому залежить точність отриманих результатів. Наприклад, розбиття на двовимірні елементи, близькі за формою

до рівностороннього трикутника, забезпечує кращі результати в порівнянні з розбиттям на витягнуті трикутники.

Можливість легко змінювати розміри елементів дозволяє легко враховувати концентрацію напруги, температурні градієнти, властивості матеріалів і т. д.

Розбиття області на елементи зазвичай починають від її границі з метою найбільш точної апроксимації форми границі, потім виконують розбиття внутрішніх областей. Часто розбиття області на елементи виконують у кілька етапів. Спочатку область ділиться на досить великі підобласті, границі між якими проходять там, де змінюються властивості матеріалів, геометрія, прикладене навантаження та ін. Потім кожна підобласть ділиться на елементи, причому різкої зміни розмірів кінцевих елементів на границях підобластей намагаються уникати.

*Другий етап* – нумерація вузлів елементів. Порядок нумерації має у даному випадку істотне значення, оскільки впливає на ефективність послідовних обчислень. Справа в тому, що матриця коефіцієнтів системи безлічі алгебраїчних рівнянь, до яких призводить МСЕ, – сильно розряджена матриця стрічкової структури. Ненульові елементи матриці розташовуються паралельно головній діагоналі. Ціле число, що є максимальною різницею між номерами ненульових елементів у рядку, називається шириною смуги. Чим менша ширина смуги, тим менший обсяг пам'яті потрібен для зберігання матриці при реалізації МСЕ і тим менші витрати машинного часу на розв'язання результуючої системи рівнянь. Ширина смуги залежить від кількості ступенів свободи вузлів і способу нумерації останніх. При нумерації вузлів переважним є спосіб, що забезпечує мінімальну різницю між номерами вузлів у кожному окремому елементі. Якщо максимальну різницю між номерами вузлів для окремого елемента позначити через  $N$ , а кількість ступенів свободи через  $M$ , то

$$L = (N + 1) * M.$$

У деяких випадках зменшення числа  $N$  може бути досягнуто послідовною нумерацією вузлів при русі у напрямку



мінімального розміру у розглянутій області. Раціональна нумерація зменшує необхідний об'єм пам'яті майже в три рази.

Інформація про спосіб розбиття області на скінченні елементи і нумерація вузлів є вихідною для всіх наступних етапів алгоритмів МСЕ при реалізації методів САПР. При цьому потрібно вказувати не тільки номер, а й координати кожного вузла і приналежність його до певних кінцевих елементів. Такого роду інформація називається *топологічною*.

При описанні області, розбитої на скінченні елементи, необхідно задавати тип кінцевого елемента, його порядковий номер, номери вузлів елемента, координати вузлів, інформацію про з'єднання елементів, значення фізичних параметрів об'єкта в межах скінченного елемента. Ця особливість є важливим аспектом МСЕ. Завдяки їй елементи з визначеними з першого разу функціями легко включаються до бібліотеки елементів відповідного програмного комплексу і далі використовуються для розв'язування різноманітних крайових задач.

*Третій етап* – визначення апроксимуючої функції для кожного елемента. Це кусково-неперервна функція, визначена на множині скінченних елементів. Процедура потрібно виконати один раз для типового елемента області безвідносно до його топологічного положення у ній. Отримана функція використовується для всіх інших елементів області того ж виду.

Як апроксимуюча функція найчастіше використовуються поліноми, які обираються так, щоб забезпечити неперервність шуканої функції у вузлах і на границях елементів.

*Четвертий етап* – об'єднання скінченних елементів в ансамбль –рівняння, що відносяться до окремих елементів, об'єднуються у систему алгебраїчних рівнянь, при цьому виконується перенумерація вузлів.

*П'ятий етап* – розв'язування отриманої системи алгебраїчних рівнянь. Реальна конструкція апроксимується сотнями скінченних елементів, а отже, з'являються системи рівнянь із сотнями і тисячами невідомих, які потрібно розв'язати. Розв'язування таких систем — головна проблема реалізації МСЕ. Методи розв'язування залежать від розмірів роздільної системи рівнянь.

У зв'язку з великою розмірністю і сильною розрідженістю матриці коефіцієнтів для реалізації МСЕ розроблені спеціальні способи зберігання матриці жорсткості, що дозволяє зменшити необхідний для цього об'єм пам'яті. Матриці жорсткості застосовуються в кожному методі міцностного розрахунку, використовуючи скінченну елементну сітку. Назва матриці жорсткості прийшла з будівельної механіки, де МСЕ почав використовуватися раніше, ніж в інших галузях техніки.

*Використання геометричної моделі для технологічної підготовки виробництва.* Інтеграція CAD і САМ-систем полягає у тому, що геометрична модель об'єкта використовується для розроблення технологічних процесів виготовлення і контролю реальної деталі, проектування заготовок шляхом додавання до неї технологічних припусків і розрахунку розмірних технологічних ланцюгів, для проектування технологічного оснащення.

Наприклад, при проектуванні ливарного і штампового технологічного оснащення:

1) здійснюється доробка геометричної моделі деталі з урахуванням термодинамічних властивостей матеріалу деталі, тобто конструктор визначає усадку матеріалу, відповідно до якої вводяться різні коефіцієнти масштабу по осях координат;

2) визначаються ливарні або штампувальні припуски на механічну обробку та знову коректується геометрична модель. У такий спосіб виробляється перехід від геометричної моделі деталі до геометричної моделі заготовки – виливання або штампування;

3) за отриманими геометричними моделями заготовки конструюється технологічне оснащення:

- будуються поверхні й лінії рознімань;
- визначаються формувальні елементи – півформи для виливків, вставки для прес-форм, комплекти «матриця-пуансон» для штампувань;

- формуються управляючі програми для верстатів з ЧПУ для виготовлення оснащення;

- виробляється оснащення, причому формотворні поверхні виготовляються або механічною обробкою на верстатах із ЧПУ, або електроерозійною обробкою також на верстатах із ЧПУ;

- одержується виріб відповідно до розробленого технологічного процесу, контролюється на контрольно-

вимірювальних приладах і порівнюються отримані контури з геометричною моделлю деталі. При задовільних результатах виготовляється дослідно-промислова партія деталей, складання і здійснюється випробування виробу.

*Різновиди інтегрованих програмних середовищ [11].* Програмні середовища, за допомогою яких вирішуються завдання технологічної підготовки виробництва (ТПВ), можна об'єднати у дві групи.

До першої з них варто віднести програмні комплекси, спеціально розроблені для виконання всього циклу або окремих процедур ТПВ. Серед цієї групи програмного забезпечення можна виділити:

- *ADEM, ArtCAM, EdgeCAM і деякі розробки російських фірм;*

- *КОМПАС АВТОПРОЕКТ (Аскон) – проектування технологічних процесів механообробки, штампування, складання, термообробки;*

- *T-FLEX ТехноПро (Топ Системы) – проектування технології механообробки, складання, зварювання, паяння, нанесення покриттів, штампування, кування, термообробки;*

- *СИТЕП МО (Станкин СОФТ) – механообробка, СИТЕП ЛШ – листове штампування;*

- *TECHCARD (Интермех) – комплексна система автоматизації ТПВ;*

- *ТехноПро (Вектор) – універсальна система автоматизації технологічного проектування;*

- *SprutCAM, СПРУТ-ТП (СПРУТ-технологии) – система автоматизованого проектування технологічних процесів і т. ін.*

Другу групу програмного забезпечення становлять програмні системи наскрізного проектування і ТПВ. До неї можна віднести такі пакети, як *CATIA5, EUCLID3, Unigraphics, Pro/ENGINEER, CADD5*. Контроль якості управляючих програм виконують спеціальні програми, наприклад, *NC Simul, NC Formater* та ін.

Для безпосереднього програмного управління технологічним устаткуванням використовують системи *CNC* на базі контролерів (спеціалізованих комп'ютерів, які називають промисловими), вбудованих у технологічне встаткування.

Для виконання диспетчерських функцій (збору й обробки даних про стан устаткування і технологічних процесів) і розроблення програмного забезпечення для вбудованого устаткування до складу АСУТВ вводять систему SCADA.

*Гетерогенні (неоднорідні) системи CAD/CAE/CAM.* Реально в багатьох випадках в експлуатації підприємств знаходяться неоднорідні або гетерогенні системи CAD/CAE/CAM.

*Неоднорідність прикладного програмного забезпечення, реально використовуваного у виробництві, збільшується гетерогенністю інструментальної бази систем CAD/CAE/CAM, до якої можна віднести системні програмно-апаратні засоби, включаючи засоби організації локальних обчислювальних мереж, і системи управління базами даних.*

Основна проблема, що виникає при використанні в одному проекті різних систем, полягає у перенесенні з однієї системи до іншої геометричних моделей сконструйованих деталей і вузлів (проблема обміну даними). При цьому необхідно забезпечити адекватність опису геометричних моделей із заданою точністю у різних системах.

Шляхи вирішення:

1) перетворення внутрішнього подання геометричної моделі у формат одного з розповсюджених графічних стандартів. Однак при цьому не вдається досить повно погодити графічні можливості системи-джерела і системи-приймача геометричної моделі;

2) використання модулів (конвертерів) прямого зв'язку між відомими системами CAD/CAE/CAM, наприклад, CATIA-CADDS, CADDS-CATIA. Застосування прямих трансляторів дозволяє більш повно використовувати графічні можливості систем.

*Стандарти обміну геометричними даними.* Важливе значення для забезпечення відкритості САПР, її інтегрованості з іншими автоматизованими системами мають інтерфейси, що реалізовані в системі форматами міжпрограмних обмінів. Очевидно, що у першу чергу необхідно забезпечити зв'язок між CAE-, CAD- і CAM-підсистемами.

Головні цілі, переслідувані графічною стандартизацією:

- забезпечити гнучкість поєднання складових програмного й апаратного забезпечення системи, зданої під ключ;
- надати засоби створення мобільних пакетів прикладного програмного забезпечення, які можна без особливих зусиль запуснути на обладнанні різних випусків і конфігурації;
- забезпечити обмін графічними даними між двома або більше проектними організаціями, які можуть мати різні системи САПР.

*Основна проблема при встановленні графічних стандартів і спеціальних вимог полягає у тому, щоб вони отримали міжнародне визнання. Зараз існують деякі домінуючі стандарти, прийняті багатьма фірмами. Реалізацією цих стандартів на різних рівнях займаються такі найбільші організації, як ANSI (American National Standards Institute — Американський національний інститут стандартів) і ISO (International Standards Organisation — Міжнародна організація із стандартизації).*

*Рівні зв'язку графічних стандартів класифікуються таким чином:*

- *Зв'язок між графічними утилітами і пристроями графічного виведення (наприклад, плоттерами, дисплеями і т. п.).* Найбільш важливим стандартом цієї категорії є стандарт VDI (Інтерфейс віртуального пристрою) або інша назва CGI (Інтерфейс комп'ютерної графіки). CGI встановлює стандартний формат для передачі графічних даних між графічними утилітами і драйверами пристроїв.

- *Зв'язок між прикладними програмами і графічними утилітами.* Найбільш поширеним стандартом цього типу є GKS (Graphics Kernel System — Графічна коренева система – ГКС), розроблена у ФРН у 1979 р. Вона являє собою набір графічних стандартів, що забезпечують інтерфейс між прикладним програмним забезпеченням і графічними утилітами будь-яких систем САПР. Згодом був поданий на розгляд набір стандартів PHIGS (Programmers Hierarchical Interface for Graphics – Програмістський ієрархічний графічний інтерфейс) з метою усунення деяких обмежень на сучасну ГКС. Розвинені засоби, описувані PHIGS, включають до себе більш складні ієрархічні структури графічних даних і дані тривимірної геометрії.

▪ *Зв'язок між різними системами САПР.* Важливе місце тут займає стандарт IGES (Initial Graphics Exchange Specification – Стандартний протокол обміну графічною інформацією), який розроблявся у 1979-1982 рр. IGES — стандартний формат кодування даних САПР, які можуть бути повністю незалежними від будь-яких систем. Така незалежність забезпечує можливість обміну графічними і виробничими даними між різними системами (рисунок 6.2).

У форматі IGES різні типи даних класифікується за термінами сутностей, які можуть належати до однієї з трьох категорій:

- 1) геометрії (точки, відрізки, дуги, площини, вузли скінченних елементів і т. п.);
- 2) анотації (типи розмірів, осьові лінії, стрілки і т. п.);
- 3) структури (геометричні групи, макроозначення, циркулярні масиви і т. п.).

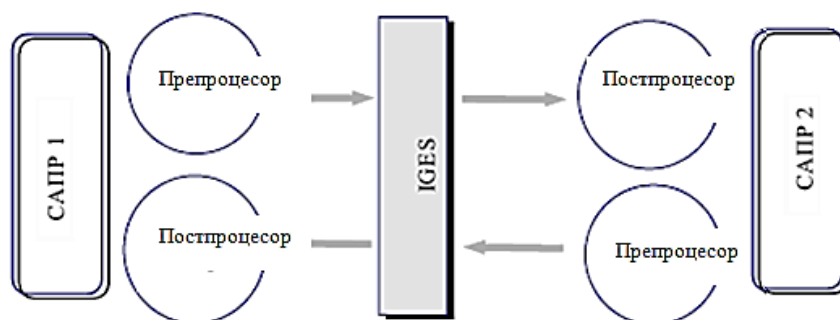


Рисунок 6.2 – Організація зв'язку між САПР через формат IGES

На рисунку 6.2 показано ідеологію обміну даними у форматі IGES. Щоб використовувати IGES, кожна система САПР забезпечується двома програмами, що транслюють, – препроцесором і постпроцесором.

Для передачі даних з однієї системи САПР до іншої спочатку потрібні дані вибираються з бази даних САПР першої системи і засобами препроцесора перетворюються у набір сутностей формату IGES. Потім ці незалежні дані у форматі IGES передаються постпроцесору другої системи. І нарешті, постпроцесор транслює сутності IGES у ті дані, з якими працює остання система.

Як мови – формати міжпрограмних обмінів, крім IGES, використовуються DXF, Express (стандарт ISO 10303-11, входить до сукупності стандартів STEP), SAT (формат ядра ACIS) та ін.

Найбільш перспективними вважаються діалекти мови Express, що пояснюється загальним характером стандартів STEP, їх спрямованістю на різні додатки, а також на використання у сучасних розподілених проектних і виробничих системах.

### 6.1.3 Спеціалізовані системи

Спеціалізовані системи можуть використовуватися як автономні самостійні системи, так і включатися до складу універсальних систем. Їх можна розділити залежно від сфери застосування і вирішуваних завдань на такі три групи:

- програми для графічного ядра системи;
- системи для функціонального моделювання;
- системи для підготовки управляючих програм.

*Програми для графічного ядра системи.* Ядро – це бібліотека основних математичних функцій CAD-системи, що визначає і зберігає 3D-форми, очікуючи команди користувача. Розрізняють такі основні типи ядер геометричного моделювання:

- ліцензовані;
- доступні у вихідному коді;
- приватні.

*Уніфіковані ліцензовані графічні ядра,* застосовуються у більш ніж одній САПР, наприклад, *Parasolid* фірми *EDS Unigraphics*. Parasolid – це найшвидше ядро, доступне для ліцензування, розроблене UGS. Parasolid забезпечує технологію для твердотільного моделювання, узагальненого мережного моделювання, інтегрованих поверхонь вільної форми і листового моделювання (рисунок 6.3). Parasolid дозволяє розроблювачам швидко створювати конкурентоспроможні продукти. На цьому ядрі розроблено багато CAD/CAM/CAE-систем високого й середнього рівня, наприклад, SolidWorks, Delmia, Pro/DESKTOP, і FEMAP.



Рисунок 6.3 – Викрутки, зроблені на ядрі Parasolid Unigraphics

*ACIS* фірми *Intergraph* – об'єктно-орієнтована C++ геометрична бібліотека, яка містить більше 50 DLL-файлів (DLL – від англ. Dynamic-Link Library – бібліотека, що підключається динамічно та дозволяє багаторазове застосування різними програмними додатками) і включає до себе каркасні структури, поверхні і твердотільне моделювання. Ядро ACIS здійснює виведення файлів у форматі SAT, які будь-яка підтримуюча ACIS програма може читати безпосередньо. Вона дає розроблювачам програм багатий вибір геометричних операцій для конструювання і маніпулювання складними моделями, а також повний набір булевих операцій.

*VX Overdrive* (*Varimetrix Corp.*) – високопродуктивне ексклюзивне ядро, що має складні можливості тривимірного гібридного моделювання, яке об'єднує твердотільне і поверхневе моделювання (рисунок 6.4). *VX Overdrive* підтримує такі функції, як одночасне розроблення, зберігання інформації про версії об'єкта, гнучкий хронологічний контроль, складні засоби заповнення і змішування, необмежене undo/redo.



Рисунок 6.4 – Приклад розробки на *VX Overdrive*

Ядра, доступні у вихідному коді, подібні до ліцензованих ядер. Вони також розробляються і підтримуються однією компанією, а потім ліцензуються іншими компаніями для



використання у CAD-додатках. Відмінність полягає у тому, що цим розроблювачам доступний вихідний код ядра. Для користувачів, які мають групи розробки, і хочуть самостійно надбудувати ядро системи, дуже зручно мати можливості налаштування, оскільки вихідний код доступний.

*Open CASCADE v3.1* представляє проекти Visual C++, які дозволяють користувачам компілювати код *Open CASCADE* на їх платформах. На додаток представлений *Open CASCADE Application Framework* для швидкої розробки додатків 3D-моделювання (рисунок 6.5). Додаткові послуги полегшують оптимальну реалізацію користувальницьких проектів і включають до себе навчання в on-line, технічну допомогу і щорічні пакети підтримки, які адаптовані до різних вимог користувачів. Користувачі так само можуть замовити індивідуальні доповнення до проекту та консультації.

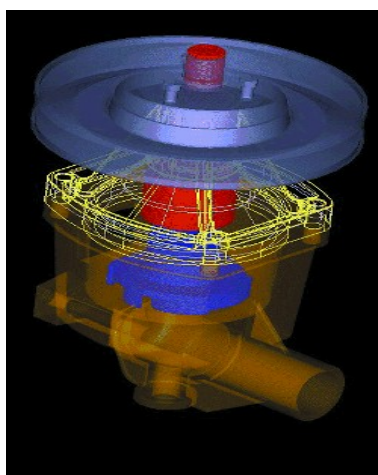


Рисунок 6.5 – Модель, розроблена на *Open CASCADE*

*Приватні ядра геометричного моделювання* розробляються і підтримуються розроблювачами CAD-систем для використання винятково у своїх додатках. Перевагою приватних ядер є більше глибока інтеграція з інтерфейсом CAD-додатка. Як результат цього – більші можливості управління системою користувачем.

*Системи для функціонального моделювання* використовуються для аналізу й оцінки функціональних властивостей проєктованих об'єктів на різних рівнях їхнього фізичного подання. Системи відрізняються високою складністю і вартістю, охоплюють широке коло завдань моделювання технічних об'єктів.

Найпоширеніші системи для моделювання на розподіленому рівні ті, що використовують метод скінченних елементів. Серед них відомі такі універсальні системи, як NASTRAN, NISA II, PATRAN, ANSYS та інші, що дозволяють виконувати різні види аналізу на розподіленому рівні. Спеціалізовані системи MCE орієнтовані на конкретні види аналізу.

*Для моделювання кінематики та динаміки механізмів використовуються пакети ADAMS, DADS та ін. Моделювання технічних об'єктів різної фізичної природи проводять із використанням пакета SABER.*

*Розвиток засобів обчислювальної техніки стимулював поширення інженерного аналізу практично на всі етапи проектування як окремих деталей, вузлів і агрегатів, так і виробів у цілому.*

*При виконанні інженерних розрахунків часто використовують автоматизовані системи, що утворюють окремий клас CAE-систем (NASTRAN, LS DINA, ANSYS, PAM CRASH, PAM SAFE, STRESS LAB, PAM STAMP, PAM FLOW, MOLD FLOW і ін.).*

Особливості підготовки виробництва наукомісткої техніки, що обумовлюють появу і розвиток класу програм CAE:

- різноманіття фізичних процесів;
  - суб'єктивність у постановці завдань аналізу;
  - особливості в підходах до ідеалізації процесів, що протікають;
  - особливості у виборі методів вирішення та інші причини.
- Всі вони призвели до створення багатьох спеціальних методик, алгоритмів і програм, призначених для вирішення завдань аналізу машинобудівних виробів.

Можна умовно виділити чотири основні групи програм аналізу.

*Перша група – програмні системи проектування, які органічно об'єднують процеси конструювання та аналізу в єдиному комплексі. До них відносяться системи CATIA, EUCLID, UNIGRAPHICS й ін.*

*Характерні риси:*

▪ при використанні не виникають труднощі зі створенням складної і математично точної моделі виробу, тому що системи мають потужні засоби геометричного моделювання;

▪ організація обміну між підсистемами конструювання та аналізу також непомітна для користувача – обидві підсистеми оперують з однією базою даних або мають внутрішні формати даних;

▪ склад різних видів аналізу обмежений у порівнянні із складом універсальних програм і в основному призначений для вирішення таких завдань, як структурний аналіз, лінійний статичний, модальний, поздовжніх деформацій, тепловий, аналіз стійкості (електропровідність, лінійна конвекція) та ін.

До другої групи входять універсальні програми аналізу машинобудівних виробів. Лідерами у сфері розроблення, поставки і супроводу цих програм є ANSYS, Inc. (США), SAMTECH (Бельгія), MacNeal Schwendler Corporation (MSC) (США). У 1970-ті роки одним із провідних методів комп'ютерного моделювання став метод скінченно-елементного аналізу.

Завдяки розробкам цих і багатьох інших фірм інженерний аналіз став практично повсюдним і поступово переріс у потужний напрямок, що одержав своє втілення у CAE-системах.

Характерні риси:

▪ в універсальні програми аналізу включені власні середовища побудови геометричної моделі виробу. Однак можливості геометричного моделювання цих пакетів набагато слабкіші в порівнянні із програмними системами проектування, тому що з їхньою допомогою можуть вирішуватися завдання твердотільного моделювання порівняно простих форм;

▪ всі універсальні програми аналізу мають стандартні формати обміну графічною інформацією з пакетами конструювання. При необхідності геометрична модель проєктованого виробу може бути попередньо створена на етапі конструювання в CAD-системі;

▪ універсальні програми використовуються при проектуванні виробів машинобудування, суднобудування, аерокосмічної й електротехнічної галузей для вирішення таких

специфічних завдань, як нелінійний теплообмін (з перехідним або стаціонарним режимом), структурна оптимізація, аналіз пружних механізмів, втомні руйнування, аналіз явищ в'язкопластичності й ін.;

▪ багатocільова спрямованість цих програм дає можливість застосовувати їх для вирішення навіть таких змішаних завдань, як аналіз міцності при тепловому навантаженні, вплив магнітних полів на міцність конструкції, тепломасоперенесення в електромагнітному полі, вирішення завдань аерогідродинаміки. Програми дозволяють урахувувати різноманітні конструктивні нелінійності, наявність великих деформацій і ін.

Третю групу становлять численні спеціалізовані програми аналізу, які виконують моделювання окремих операцій, процесів, що вирішують специфічні завдання окремих технологій.

До них можна віднести:

▪ пакет *MSC.SuperForge* (фірма *MSC*), призначений для об'ємного моделювання процесів штампування і кування. Результати аналізу можуть бути використані для проектування оснащення і технологічних процесів;

▪ американська компанія *SFTC* (система *DEFORM*), французька компанія *TRANVALOR* (система *FORGE*) і російська фірма «Квантор-Софт» – в області моделювання процесів штампування й кування.

У сфері розроблення програмних середовищ інженерного аналізу значні результати отримано фірмами пострадянського простору:

▪ *ИСПА (АЛЕКСОФТ)* – розрахунок та аналіз на міцність;  
▪ *ПОЛИГОН (ЦНИИ материалов (Санкт-Петербург))* – система моделювання ливарних, гідродинамічних, теплових та усадочних процесів у *SD*-постановці;

▪ *РИМАН (ПроПроГруппа)* – розрахунок та аналіз напружено-деформованого стану конструкцій, рішення пружних і пластичних завдань, у тому числі й штампування ударних напруг;

▪ *АРМ WinMachine (НТЦ АПМ)* – комплекс програм для проектування і розрахунків деталей машин, аналізу напружено – деформованого стану конструкцій та їхніх елементів;

- ДИАНА (НИЦ АСК) – аналіз конструкцій та їх елементів;
- GasDinamics Tool (Тульський державний університет) – моделювання газодинамічних процесів та ін.

*Приклади завдань, що вирішуються:*

- об'ємне моделювання процесів штампування і кування;
- розрахунок та аналіз на міцність;
- гідродинамічні, теплові й усадочні процеси у заготівельному виробництві;
- аналіз напружено-деформованого стану конструкцій;
- вирішення пружних і пластичних завдань та аналіз ударних напруг у процесах штампування;
- проектування і розрахунки деталей машин і механізмів;
- моделювання газодинамічних процесів.

*Недолік: на жаль, деякі з перерахованих пакетів не мають стандартних інтерфейсів, тому їх використання у наскрізних процесах проектування проблематичне.*

*Четверта група – програми аналізу систем управління, призначені для дослідження динамічних процесів, що протікають у системах автоматичного регулювання та управління, а також для вирішення інших завдань аналізу, імітаційного моделювання, прогнозування, аналізу випадкових процесів. Широке застосування знаходять спеціальні програмні комплекси MATRIX, Matlab Simulink, VisSim, LabView, EASY5, MBTU.*

*Системи підготовки управляючих програм для технологічного встаткування з ЧПУ, як правило, мають власний, досить розвинутий графічний редактор, що дозволяє на основі креслення деталі створити її геометричну модель з метою подальшого використання для генерації управляючої програми.*

*Прикладів таких програм досить багато, до найбільш відомих можна віднести: SmartCAM, PEPS, DUCT та ін. Часто вони спеціалізуються на конкретних видах механообробки або мають набір спеціалізованих модулів.*

*Система автоматизованого проектування управляючих програм (САПР УП) для обладнання з ЧПУ — комплекс технічних, програмних, мовних, інформаційних засобів, що здійснюють перетворення даних креслення деталі і технологічного процесу її обробки в коди пристрою управління обладнання з ЧПУ.*

Область застосування САПР УП визначається конструктивно-технологічними ознаками деталей і технологічною групою верстатів.

*Розрізняють чотири типи САПР УП, областями застосування яких є:*

- обробка отворів на свердлильних верстатах із позиційним управлінням і обробка поверхонь, паралельних координатним площинам, на фрезерних верстатах з 2,5-координатним управлінням;

- комплексна (багатоцільова) обробка корпусних деталей на свердлильно-розточувальних верстатах та обробних центрах;

- обробка поверхонь деталей складної форми (штампи, прес-форми, турбінні лопатки тощо) на багатокоординатних фрезерних верстатах;

- обробка тіл обертання із ступінчастим і криволінійним профілями на токарних верстатах.

Більшість сучасних САПР УП побудовано за принципом «процесор - постпроцесор» і в загальному вигляді включає до себе:

- процесор;
- бібліотеку препроцесорів;
- бібліотеку постпроцесорів;
- вхідну мову препроцесорів і процесора (вхідну мову САПР УП), проміжну мову «процесор-постпроцесор» (CLDATA);
- мову управління завданнями;
- монітор (диспетчер системи);
- системну сервіс-бібліотеку;
- базу даних.

*Процесор САПР УП* – програмний виріб, призначений для вирішення спільних геометричних і технологічних завдань, а також завдань управління процесом обробки даних на ЕОМ. Результатом його роботи є повністю розрахована траєкторія руху інструменту, зображена в проміжному уніфікованому вигляді.

*Препроцесор САПР УП* – програмний виріб, що вирішує певні цільові завдання і формує у результаті вихідні дані для процесора. Характерними завданнями для препроцесора є:

- переведення вихідних даних з однієї системи координат в іншу (наприклад, полярних у декартові);
- проектування операційних технологічних процесів;
- розроблення УП для групи деталей, що розрізняються тільки значеннями окремих параметрів;
- вирішення спеціальних завдань і т. д.

У сучасних САПР УП спільно з одним процесором можуть працювати кілька препроцесорів.

*Постпроцесор САПР УП* — програмний виріб, призначений для адаптації УП до конкретного устаткування з ЧПУ.

До основних функцій постпроцесора входить:

- зчитування сформованих процесором даних мовою CLDATA та їх обробка;
- формування команд, що забезпечують цикл зміни інструменту;
- виведення на перфострічку або дискету УП та її роздрукування;
- діагностика помилок;
- виконання ряду сервісних функцій (розрахунок машинно-оперативного часу УП, управління графопобудовником, виведення перфострічки для контролю геометрії оброблюваного контуру і т. д.);
- прийняття спеціальних рішень, пов'язаних із особливостями програмування для конкретного верстата.

Для розробки управляючих програм до конкретних верстатів з ЧПУ до складу САПР УП повинна бути включена бібліотека відповідних постпроцесорів. Із збільшенням кількості моделей верстатів з ЧПУ система поповнюється новими постпроцесорами. У деяких САПР УП замість бібліотеки постпроцесорів застосовують універсальні (узагальнені) постпроцесори. Кожен з них призначений для цілої групи однотипних верстатів і пристроїв ЧПУ. Особливості моделей верстатів враховані в узагальненому постпроцесорі, розроблювальному відповідно до спеціальної анкети, заповнюваної технологом-програмістом.

*Вхідна мова САПР УП* — проблемно-орієнтована мова, призначена для опису вихідних даних про деталь і технологічного процесу її обробки на обладнанні з ЧПУ.

*Проміжна мова «процесор — постпроцесор» (CLDATA)* — внутрішня проблемно-орієнтована мова САПР УП, призначена для подання даних, переданих від процесора до постпроцесора.

*Мова управління завданнями* — мова оперативного управління роботою системи (забезпечує обробку завдань у пакетному і діалоговому режимах).

*Монітор (диспетчер) системи* — головний блок системи в оперативній пам'яті ЕОМ, основними функціями якого є: обробка управляючої інформації; автоматичне завантаження блоків із системних бібліотек; передача проміжних даних між блоками; обробка збійних ситуацій, що виникають через неправильну організацію пакета завдань і передчасне припинення роботи деяких блоків системи.

Найвищий ступінь автоматизації процесу підготовки управляючих програм — об'єднання систем автоматизованого конструювання, технологічного проектування із системами автоматизованого проектування управляючих програм. Вони дозволяють значно прискорити процес підготовки УП, підвищити ефективність технології виготовлення деталей і практично повністю уникнути помилок у підготовці управляючих програм.

## **6.2 Інформаційне забезпечення САПР**

Організація збереження і доступу до інформації у САПР становить окрему проблему [18].

*База даних (БД)* — сукупність інформації про об'єкт проектування. Дані зберігаються у запам'ятовувальних пристроях ЕОМ і мають певну структуру.

*Об'єктами проектування і зберігання даних* є результати окремих етапів проектування:

- геометричні моделі;
- аналітичні розрахунки;
- технологічні операції та процеси;
- оснащення та ін.

*Банк даних (БНД)* у САПР є важливою обслуговуючою підсистемою, виконує функції інформаційного забезпечення і має ряд особливостей. У ньому зберігається як нормативно-довідкова інформація (архіви, довідкові дані, типові проектні рішення), так



і оперативна (відомості про поточний стан різних версій виконуваних проектів). Як правило, БНД працює в багатокористувальницькому режимі. Він повинен забезпечувати створення та експлуатацію інформації, що надходить від декількох джерел, її оновлення, коректування і використання, а також прямий зв'язок з користувачем для одержання відповідей на довільні, у тому числі незаплановані питання.

*БНД* включає до себе:

- спеціальні структури організації інформації;
- алгоритми;
- спеціальні мови;
- програмні і технічні засоби.

*Система управління базою даних (СУБД)* — сукупність програмних засобів, що забезпечують функціонування *БНД*. За допомогою *СУБД* здійснюється запис даних у *БНД*, їх вибірка за запитами користувачів і прикладних програм.

*Вимоги до СУБД у САПР:*

- забезпечення цілісності даних;
- захист даних від несанкціонованого доступу та порушення цілісності;
- зручність користувальницького інтерфейсу;
- можливість розподіленої обробки в мережах ЕОМ;
- ієрархічна структура проектних даних і спадкування з метою скорочення об'єму бази даних.

*Певною мірою названі особливості враховуються у СУБД третього покоління, у яких стали застосовуватися риси об'єктно-орієнтованих СУБД.*

*Функції конструкторських баз даних:*

1 *Забезпечення паралельно-агрегатного колективного проектування.* База паралельно-агрегатного інженірингу забезпечує одночасний доступ до структур даних проекту з робочих місць учасників робіт над проектом –дизайнерів, конструкторів виробу, розраховувачів, конструкторів оснащення, технологів. З моменту першого збереження об'єкта в базі даних учасники можуть використовувати у своїй роботі результати проектування і за необхідності впливати на процес проектування. Таким чином, погодження конструкції йде паралельно із

проектуванням. Конструктор оснащення також починає свою роботу, не чекаючи закінчення проектування.

*Наприклад, як тільки готовий загальний вигляд деталі, можна вибрати розмір плит пакета прес-форми, визначити тип, гніздовість, ввести за необхідності додаткові елементи (рухливі елементи, додаткові плити). Коли буде закінчена конструкція деталі — закінчити проектування формотворних елементів прес-форми (рисунок 6.6).*

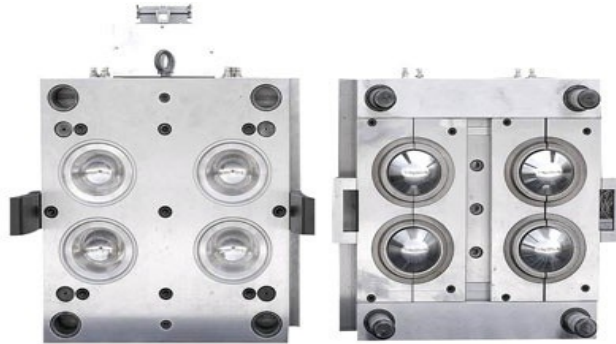


Рисунок 6.6 – Модель прес-форми

*2 Формування структури виробу. БД забезпечує формування структури виробу шляхом організації посилань на створені раніше об'єкти. Наприклад, якщо деталь входить у кілька вузлів, то її модель не розмножується, а формуються посилання на цю деталь. За створеними складаннями може бути виконане документування виробів. Причому форми документів специфікації, відомості матеріалів та ін. можуть бути подані у тому вигляді, який прийнято на підприємстві, і/або приведені до форматів, придатних для передачі в інші автоматизовані системи. Створені об'єкти, як самі деталі, так і оснащення, використовуються при оформленні й випуску конструкторської документації (специфікації).*

*3 Відстеження коректності внесення змін. У випадку зміни об'єктів система відслідковує посилання у базі даних, інформація оновлюється у складаннях і машинному поданні документів. Якщо внесені зміни не здійснені (наприклад, внаслідок некоректного використання якої-небудь функції), завжди залишається можливість повернутися до кожної із попередніх версій моделі.*

**Структура бази даних.** Відзначимо, що в пакетах нижнього і середнього рівнів в основному реалізована файлова структура даних. У пакетах верхнього рівня для зберігання і наступної проробки інформації об'єктів проектування використовуються внутрішні або зовнішні бази даних. Структури баз даних у системах верхнього рівня, їх логічна і фізична організація різні.

Виділяють чотири *типи організації структури бази даних*:

- 1) ієрархічна;
- 2) мережна;
- 3) реляційна;
- 4) об'єктно-реляційна.

*Ієрархічна структура БД* — це така структура, в якій існує впорядкований за рівнями запис елементів об'єкта (рисунок 6.7). У кожній групі записів один елемент вважається головним, а інші елементи носять підпорядкований характер. Групи записів упорядковуються за рівнями у певній послідовності.

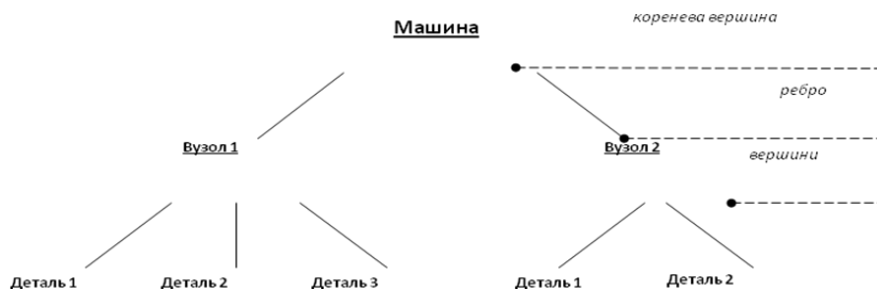


Рисунок 6.7 – Ієрархічна деревоподібна модель бази даних

*Мережна структура бази даних* — це така структура, у якій елементарні дані та відношення між ними подаються у вигляді орієнтованої мережі: вершини — дані, дуги — відношення, зв'язки (рисунок 6.8). Така структура дозволяє користувачеві одержати доступ до потрібного файла без звертання до всіх інших файлів більш високого рівня інтеграції.

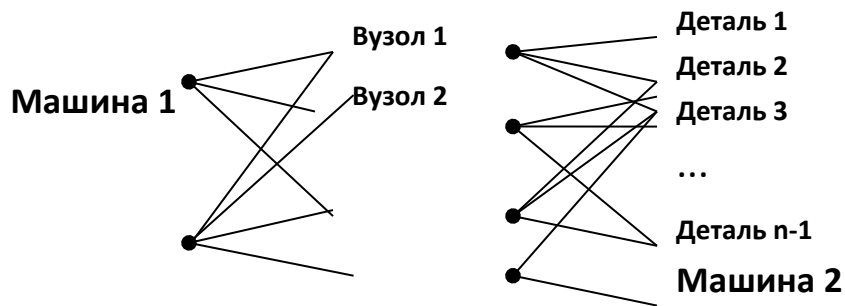


Рисунок 6.8 – Мережна структура бази даних

*Реляційна й об'єктно-реляційна БД* – це такі БД, у яких елементарні дані (об'єкти) і відношення, взаємозв'язки між ними подаються у вигляді таблиць (рисунок 6.9). Стовпці таблиці — це атрибути даних, а рядки — записи. Основними позитивними перевагами реляційних баз даних є простота, більша гнучкість і доступність; недоліком — менша продуктивність у порівнянні з ієрархічною і мережною структурами бази даних.

Ідентифікаційний Номер	Прізвище
246	Іванов
344	Петров
... ..	
422	Сидоров

Рисунок 6.9 – Реляційна база даних

*Посилання* – тільки адреса об'єкта із зовнішнього з'єднання. Для візуалізації геометричного подання складання, наприклад, що використовує деталі із зовнішніх з'єднань, будуть відновлені подання кожної деталі з бази даних.

Модифікувати та зберегти такі об'єкти у своєму поєднанні не можна, оскільки кожен об'єкт у системі унікальний і зберігається у базі даних тільки один раз. Так підтримується асоціативність між об'єктами, їхніми відображеннями та кресленнями. Якщо об'єкт, збережений у базі даних, з'являється кілька разів у різних позиціях у топологічній операції або складанні, то він піддається розмноженню. У результаті цієї операції у базі даних зберігається посилання на вихідний об'єкт і матриця перетворень – координати позицій, параметри переміщень, поворотів та інших трансформацій.

Існують можливості управління цими об'єктами, примусового «розблокування» посилавних кодів і т. д.

## Розділ 7

# АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ У ВАГОНБУДУВАННІ

## 7.1 Програмні комплекси для автоматизації конструкторсько-технологічної підготовки виробництва

У даний час в Україні розповсюджено програмні продукти T-FLEX фірми «Топ-Системы» і КОМПАС ЗАТ «Аскон», які орієнтовані на автоматизацію таких завдань конструкторсько-технологічної підготовки виробництва:

- створення тривимірної моделі виробу;
- розроблення конструкторської документації на виріб;
- інженерні розрахунки параметрів виробу;
- розроблення технологічної документації на виріб;
- проектування технологічного оснащення;
- підготовка програм для устаткування з ЧПУ;
- управління проектами і технічним документообігом.

Ці програмні комплекси типу *CAD/CAM* являють собою набір автоматизованих робочих місць (*АРМ*), кожне з яких може працювати як у мережі від єдиної інформаційної бази, так і в автономному режимі.

До їх складу звичайно входять такі *АРМ*:

- конструктора – розроблення креслень деталей, складальних одиниць, специфікацій, відомостей покупних виробів, інженерні розрахунки;
- технолога – проектування технологічних процесів і оформлення технологічних документів (маршрутних і операційних карт, карт ескізів, відомостей оснащення);
- технолога розробника програм для верстатів з ЧПУ – підготовка та імітація програм;
- конструктора оснащення – розроблення конструкторської документації на засоби технологічного оснащення;

- конструктора-технолога штампів – розрахунки і вибір конструкції штампів, оформлення конструкторської документації;

- конструктора-технолога прес-форм – розрахунки і вибір конструкції прес-форм, оформлення конструкторської документації.

Разом із програмними продуктами поставляються *основні бібліотеки* параметричних елементів виробів:

- машинобудівна – для проектування складань, яка містить зображення стандартних деталей: болтів, гвинтів, гайок, штифтів, втулок, підшипників, шайб, швелерів, кутиків;

- тривимірних примітивів – для проектування валів, яка містить зображення циліндрів, конусів, отворів, канавок, пазів шпон;

- кінематична – для створення кінематичних схем, яка містить зображення кінематичних пар, муфт, підшипників, кулачків, штовхачів;

- елементів гідравлічних і пневматичних схем, яка містить зображення клапанів, суматорів, дроселів, манометрів, витратомірів, подільників, розподільників;

- елементів електричних схем, яка містить зображення, мікросхем, електродвигунів, приладів, комутаційних пристроїв, трансформаторів та ін.;

- елементів трубопроводів, яка містить зображення перехідників, трійників, муфт, опор, компенсаторів, хрестовин.

Проектування машин і механізмів супроводжується виконанням інженерних розрахунків, пов'язаних як з вирішенням завдань кінематичного та динамічного синтезу механізмів машинних агрегатів, так і з оцінкою їх параметрів. Тому до систем конструювання виробів звичайно входять і програмні продукти для інженерних розрахунків.

Так, до програмного комплексу КОМПАС входить система АРМ WinMachine, яка забезпечує розрахунки:

- енергетичних і кінематичних параметрів;
- міцності, жорсткості і стійкості;
- витривалості при змінних навантаженнях;
- надійності і зносостійкості;
- динамічних характеристик.

Крім того, в системі АРМ WinMachine є набір інструментальних засобів (модулів) для розрахунку, аналізу і проектування елементів машин. Нижче вказані деякі модулі:

- розрахунку, аналізу і проектування валів та осей;
- розрахунку й аналізу радіальних і упорних підшипників, що працюють в умовах рідинного та напіврідинного тертя;
- проектування передач обертання, призначені для розрахунку всіх типів зубчастих, черв'ячних, пасових і ланцюгових передач, а також виконання креслень цих передач в автоматичному режимі;
- розрахунку нарізних, зварних, клепаних з'єднань, а також з'єднань деталей обертання;
- розрахунку і проектування механізмів довільної структури;
- розрахунку і проектування приводу довільної структури і планетарних передач.

Аналогічні системи інженерних розрахунків є і в програмному комплексі T-FLEX. Так, система автоматизації проектувальних і перевірних розрахунків зубчастих передач T-FLEX «Расчеты/Зубчатые передачи» дозволяє здійснювати багатоваріантний міцносний і геометричний розрахунок зубчастих передач з урахуванням режиму навантаження. Відповідно до цих результатів автоматично формуються параметричні моделі T-FLEX CAD.

Доповненням до зазначених програмних продуктів для інженерних розрахунків є система автоматизованих розрахунків механізмів і машин, розроблена в Одеському національному політехнічному університеті. Система являє собою набір інструментальних засобів (модулів) для синтезу, розрахунку та аналізу різних механізмів.

Основні модулі:

- синтезу шарнірних чотириланкових, кривошипно-повзункових і кривошипно-кулісних механізмів;
- кінематичного розрахунку шарнірних механізмів;
- силового розрахунку шарнірних механізмів;
- аналізу та синтезу кулачкових механізмів;
- аналізу кінематики зубчастих механізмів і синтезу зачеплень зубчастих коліс;

- геометричного розрахунку евольвентних зубчастих коліс;
- аналізу динаміки агрегатів машин.

До складу програмних продуктів T-FLEX і КОМПАС входять також системи управління документообігом (*PDM-системи*), які забезпечують централізоване зберігання документів на сервері з надійним захистом від несанкціонованого доступу. *Основні функції* таких систем (відповідно T-FLEX DOCs і КОМПАС-МЕНЕДЖЕР):

- зберігання, оброблення та супровід інформації про виробу;
- маршрутизація робіт з контролем їх поточного стану;
- організація взаємодії користувачів з контролем виконання за схемою «начальник-підлеглий»;
- контроль термінів виконання робіт за проектом, звіти про стан робіт;
- задавання часу початку і закінчення проекту;
- створення та проведення сповіщень;
- складання і виведення на друк звітів різної форми.

*AutoCAD* – програмний продукт, який довгі роки був практично єдиною системою для автоматизації конструювання виробів. Першою версією, призначеною для роботи виключно в операційному середовищі Windows, була Release 14.

Однак тільки у версії AutoCAD 2000 повною мірою були реалізовані всі можливості графічного інтерфейсу, характерного для ОС Windows. У результаті користувач отримав доступ до всіх функцій AutoCAD за допомогою графічних екранних засобів, аналогічних тим, які використовуються у програмних продуктах Microsoft Office.

В AutoCAD 2000 є 24 інструментальних панелі, на кожній з яких скомпоновані піктограми певної групи команд – креслення елементарних об'єктів, їх редагування, запиту параметрів об'єктів і т. д. При створенні нового креслення чотири інструментальні панелі виводяться на екран за замовчуванням, а саме: Стандарт (Стандартна), Об'єкт (Властивості об'єктів), Draw (Рисування) і Modiffy (Редагування). Всі інші панелі вибираються з меню.

На базі AutoCAD існує цілий ряд спеціалізованих систем автоматизації проектування, зокрема для автоматизації конструювання у машинобудуванні фірмою Autodesk розроблено



систему Mechanical Desktop, яка являє собою повнофункціональну систему об'ємного моделювання, а також автоматизації параметричного проектування машинобудівних виробів. Вона включає до свого складу весь комплекс двовимірної машинної графіки. Результати моделювання можна перетворити у двовимірні конструкторські креслення деталей і складальні креслення, а також сформулювати відомості деталей і складальних одиниць.

Вбудовані в Mechanical Desktop програми аналізу розподілу напружень дозволяють моделювати поведінку конструкції у різних умовах, а також підбирати матеріал для виготовлення деталі.

Система *Pro/Engineer* – ще один широкорозповсюджений програмний продукт для дво- і тривимірного конструювання виробів, розроблений фірмою СТВ. Основні переваги цієї системи – зручні інструментальні панелі, простота освоєння, різноманітні бібліотеки параметричних графічних елементів, а також довідники матеріалів.

*T-FLEX CAD* – фірма «Топ Системы» для автоматизації конструкторської підготовки виробництва пропонує кілька систем:

- *T-FLEX CAD LT* – система для автоматизації двовимірного креслення, орієнтована на швидке створення креслярської документації унікальних виробів з малим рівнем уніфікації деталей. У системі передбачено повний набір функцій, необхідних для розроблення непараметричних креслень;

- *T-FLEX CAD 2D* – система для автоматизації двовимірного параметричного проектування, що дозволяє розробляти параметричні креслення деталей будь-якої складності. Забезпечується створення складальних креслень з окремих параметричних деталей у режимі «перенеси і залиш»;

- *T-FLEX CAD 3D* – система для автоматизації параметричного твердотілого тривимірного моделювання, яка дозволяє працювати як з окремими тривимірними об'єктами, так і тривимірними складальними моделями. Моделювання може здійснюватися як безпосередньо в 3D-просторі в режимі «робоча площина – ескіз – тверде тіло», так і на основі двовимірного креслення;

- *T-FLEX CAD 3D SE* – система для підготовки креслень за *3D-моделями*, що є засобом оформлення креслень, створених за тривимірними моделями. При цьому підтримується асоціативний зв'язок між тривимірною моделлю складання і кресленнями, отриманими на її основі, тобто при модифікації складання у системі *CAD 3D-креслення* у системі *3D SE* будуть автоматично скоректовані.

У *T-FLEX CAD* немає поділу файлів на креслення, *3D-деталі* і *складання 3D*. Всі дані зберігаються в одному файлі й організовані за єдиною схемою, що не вимагає такого поділу. Передбачено режими експорту та імпорту моделей деталей і складань.

Потужні тривимірні можливості системи, які практично не поступаються відомим західним системам, зручний інтерфейс з повним набором засобів швидкого і якісного оформлення креслярської документації стали визначальними факторами для вибору *T-FLEX CAD* як базової на багатьох підприємствах.

*КОМПАС* [16] – для автоматизації конструкторської підготовки виробництва ЗАТ АСКОН пропонує:

- креслярсько-графічний редактор *КОМПАС-ГРАФИК* для двовимірного креслення і проектування, що дозволяє розробляти різні документи: складальні і детальні креслення, ескізи, схеми, плакати. Система працює з «аркушем креслення», який складається з виглядів, технічних вимог і штампа. *Вигляд* – це будь-яке ізольоване зображення (головний вигляд, інші проекції, внесений елемент, перетин, таблиця і т. д.). Положення кожного вигляду на кресленні визначається точкою прив'язки, кутом повороту і масштабом. Розташування технічних вимог і штампа визначається автоматично. При роботі в режимі компонування можна переміщати вигляди і змінювати їх масштаб, візуально контролюючи проведені зміни;

- систему *КОМПАС-3D* для тривимірного проектування, яка призначена для створення моделей окремих деталей і складальних одиниць. Модель складання містить окремі компоненти – деталі і складання, які в свою чергу також можуть складатися з деталей і складань. Проектування складання ведеться «зверху вниз» – кожна деталь моделюється на основі

вже наявних деталей із використанням параметричних взаємозв'язків.

До системи КОМПАС-3D входять:

1) бібліотека стандартних кріпильних елементів, яка містить тривимірні параметричні моделі кріпильних елементів;

2) модуль «Технорма», який містить параметричні моделі деталей оснащення, деталей машин, сортаментів, різальних інструментів, стандартних отворів, проточувань, різьблень та ін.;

3) розрахунковий модуль для визначення об'єму, маси, моментів інерції, центра мас та інших характеристик окремої деталі або складання.

Для параметричного проектування деталей типу «тіла обертання» – валів, втулок, циліндричних і конічних шестерень, черв'ячних коліс і черв'яків – пропонується система КОМПАС-SHAFT Плюс, до якої входять модуль генерації тривимірної ТМ за побудованим зображенням і модуль перевірки розрахунків зубчастих і пасових передач.

Текстовий редактор КОМПАС-ГРАФИК дозволяє формувати текстові документи в діалоговому режимі, а також вводити тексти в графічні документи.

Система проектування специфікацій призначена для випуску специфікацій, відомостей та інших табличних документів.

Для обміну інформацією з іншими САПР КОМПАС-ГРАФИК містить конвертори, які забезпечують читання і запис графічних файлів стандартних форматів, а також запис даних специфікації у формати DBF і Microsoft Excel.

## **7.2 Особливості використання САПР у вагобудуванні**

Вагобудівне і вагоноремонтне виробництва тісно пов'язані між собою технологією виготовлення та ремонту вагонів [2, 5, 6]. Прогресивна технологія при проектуванні і будівництві вагонів позитивно впливає на ефективність їх ремонту та технічного обслуговування в експлуатації.

Вагобудування забезпечує магістральний, промисловий і міський залізничний транспорт рухомим складом і

великотоннажними контейнерами, а також гальмівним і автозчепним обладнанням, запасними частинами для вагонів.

Вагоноремонтне виробництво, володіючи високою організацією і технологією, підтримує у справному стані рухомий склад в експлуатації, високий рівень його надійності та довговічності, забезпечує безпеку руху поїздів.

Ці два виробництва пов'язані між собою рішенням загальних теоретичних і практичних завдань, заснованих на використанні методів конструювання та оптимізації, розрахунків на міцність, теорії пластичної деформації, теорії різання металів, теорії механізмів і деталей машин, математичної статистики, теорії ймовірностей та ін.

Надійна конструкція вагона враховує його характерну особливість – взаємодію з усіма основними технічними засобами залізниць та підприємствами народного господарства країни (вагони піддаються впливу вантажно-розвантажувальних механізмів, маневрових та інших операцій).

Іншою особливістю вагона є складність обладнання, що включає до себе механічні конструкції, електротехнічні, теплотехнічні системи, а також системи автоматики, життєзабезпечення та ін.

До проектування вагонів входить розроблення проектної, конструкторської, технологічної та інших видів єдиної документації, призначеної для створення нових, більш досконалих типів і конструкцій рухомого складу з обов'язковим підвищенням технологічності їх ремонту та технічного обслуговування в експлуатації.

При створенні нових типів вагонів та виробництві їх ремонту в експлуатації використовується великий перелік технологічних процесів, пов'язаних з технологією лиття, обробки металів різанням, зварювання деталей та елементів, збирання окремих вузлів і конструкції в цілому та ін.

Метою САПР вагона (САПРВ) є автоматизоване одержання у найкоротший термін проектної документації, необхідної для виробництва конкурентоспроможної конструкції вагона.

За завданнями і функціональними можливостями складові САПРВ можна розділити на такі групи:

- системи автоматизованого проектування ходових частин вагонів;
- системи автоматизованого проектування конструкцій кузовів вагонів;
- розрахунково-оптимізаційні системи;
- графічні системи;
- системи підготовки технічної документації;
- системи автоматизованого проектування технологічних процесів виробництва елементів вагонів.

САПР ходових частин вагонів передбачають визначення оптимальних параметрів підвішування, включаючи параметри гасників коливань, а також розмірів несучих елементів візків.

САПР конструкцій кузовів вагонів призначені для автоматизованого визначення габаритних розмірів вагона й оптимізації параметрів несучих елементів кузова вагона.

До розрахунково-оптимізаційних САПР входить комплекс пакетів прикладних і управляючих програм, призначених для виконання нормативних розрахунків вагонів і визначення оптимальних параметрів елементів конструкції.

Графіка в таких системах використовується для перевірки правильності формування розрахункових моделей і наочного відображення результатів розрахунку й оптимізації. Графічні системи призначені для автоматизованого креслення складальних одиниць і деталей вагона. У них передбачається графічна база даних і система управління базою даних.

Технічне забезпечення САПР, крім ЕОМ, включає до себе графобудівники різних типів, які виконують креслення.

Системи підготовки технічної документації дозволяють одержувати текстові конструкторські документи в автоматизованому режимі.

Найважливішою особливістю вагонного парку є його масовість, що вимагає проектування вагонів, які мають раціональну конструктивно-технологічну схему та компонування з використанням стандартних, типових і уніфікованих складальних одиниць, агрегатів і деталей для швидкої їхньої взаємозамінності при ремонті.

При створенні конструкції вагонів ураховують екстремальні умови їхньої експлуатації, технологічність і зручність у ремонті й

технічному обслуговуванні, вимоги екології, наявність пристроїв та умов для забезпечення правил техніки безпеки, протипожежних вимог, санітарно-гігієнічних норм для пасажирів і обслуговуючого персоналу.

Створення нових типів і моделей вагонів передбачає етапи проектування, виготовлення й експериментальних досліджень дослідних зразків або дослідних партій, освоєння серійного виробництва з урахуванням корегування робочої документації за результатами випробувань і дослідної експлуатації. На всіх етапах проектування враховують вимоги, пропоновані до рухомого складу стандартами й іншою законодавчою і нормативною документацією.

Стосовно до сфери автоматизації проектування і ремонту вагонів можна виділити такі основні джерела економічної ефективності САПР: зростання продуктивності праці проектувальників, конструкторів і технологів; підвищення якості проектування технології виробництва й ремонту вагонів; вплив соціально-психологічних факторів автоматизації на привабливість праці конструкторів і технологів; економію виробничих ресурсів – жива праця, сировина, матеріали, паливо, електроенергія, капітальні вкладення у виробництво й ремонт вагонів.

Зростання продуктивності праці забезпечується за рахунок уніфікації та стандартизації методів проектування, оптимізації проектних і технологічних рішень, автоматизації виконання креслярсько-графічних робіт, формування текстової документації, скорочення обсягу технологічних робіт, зниження трудомісткості технологічних операцій у сфері виготовлення і ремонту вагонів та ін.

Підвищення якості технологічної підготовки виробництва й ремонту вагонів у результаті використання САПРВ досягається: використанням математичних методів різноманітного оптимізаційного розрахунку; забезпеченням технологічності, високих експлуатаційних якостей і надійності проєктованих і ремонтваних вагонів; підвищенням якості оформлення проєктної, конструкторської і технологічної документації, точності розрахунків з використанням засобів обчислювальної техніки; автоматизованою підготовкою і контролем управляючих

програм для устаткування із ЧПУ; зниженням впливу суб'єктивних факторів у процесі розрахунків та ін.

Застосування ЕОМ і графічних програм у процесі технологічної підготовки виробництва й ремонту вагонів істотно полегшує працю, але висуває підвищені вимоги до кваліфікації проектувальників, конструкторів і технологів. Якість виконуваних робіт залежить також від характеристик технічних засобів і програмного забезпечення САПРВ, від конструктивної особливості вагона та прийнятої технології його виготовлення і ремонту, організації робіт на вагонобудівному й вагоноремонтному підприємстві, а також від уміння фахівців працювати із засобами автоматизованого проектування.

Найважливішим показником при проектуванні та впровадженні нового типу вагона є технологічність конструкції, що є сукупністю властивостей, які забезпечують його виготовлення, ремонт і технічне обслуговування за найбільш ефективною технологією.

Застосування ефективною технології забезпечує оптимальні витрати праці, матеріалів, коштів, часу при технологічній підготовці виробництва, в процесі виготовлення, експлуатації та ремонту нового типу вагона, включаючи його підготовку до функціонування, контроль працездатності, профілактичне обслуговування.

Розроблення технологічних процесів у вагонобудуванні та вагоноремонтному виробництві при відновленні й обробці деталей, складанні вузлів і компонуванні вагонів здійснюється із застосуванням САПРВ, яка являє собою організаційно-технічну систему, що складається з комплексу засобів автоматизації проектування, взаємопов'язаного з підрозділами проектних організацій, і виконує автоматизоване вирішення поставлених завдань. Все це дозволяє значно прискорити й істотно підвищити точність обчислень і виконання логічних операцій з видачею оптимальних варіантів технологічних процесів.

*Методологічна основа проектування вагонних конструкцій базується на трьох принципах:*

- декомпозиція та ієрархічність;
- багатетапність та ітераційність;
- типізація та уніфікація.

*Декомпозиція та ієрархічність.* Будь-який процес і об'єкт проектування можуть бути розкладені (декомпозовані) на складові частини. Декомпозиція об'єкта при проектуванні проводиться до такого рівня, при якому елементи проектуваного об'єкта (процесу) можна вважати неподільними (у даному процесі).

Опис проекту вагона подано у вигляді ієрархічної структури («дерева»), де кожен уніфікований вузол вагона являє собою деякий об'єкт проектування (наприклад, кузов, візок і ін.) (рисунок 7.1).

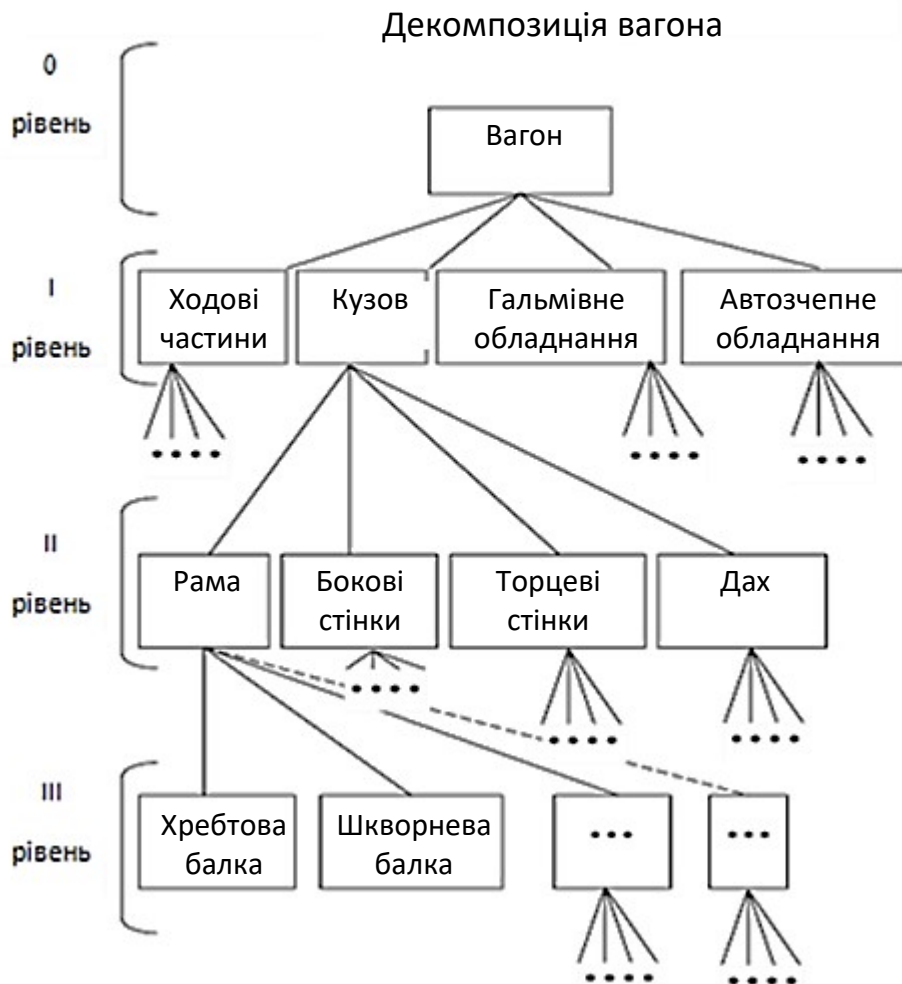


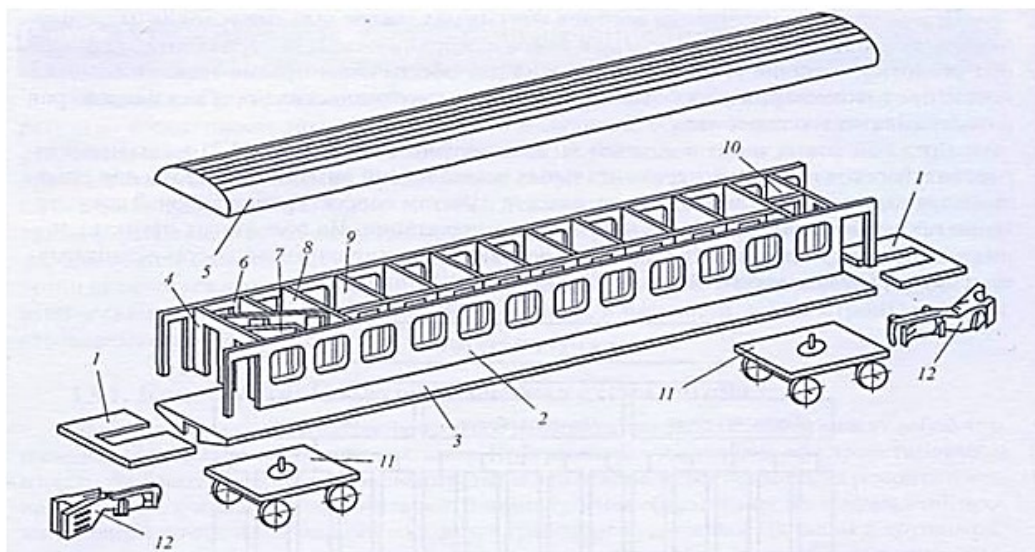
Рисунок 7.1 – Опис проекту вагона у вигляді ієрархічної структури



На рівні «0» підлеглий проектуванню складний об'єкт – вагон – розглядається як система ВАГОН з чотирьох взаємопов'язаних і взаємодіючих елементів (ходові частини, кузов, ...). Кожен з елементів в описі рівня «0» являє собою досить складний об'єкт, який розглядається як система (X, K, ...) на рівні «I». Так, елементами системи є об'єкти X (рама, бокові стіни, ...).

Як правило, виділення елементів відбувається за функціональною ознакою.

У свою чергу уніфіковані вузли декомпозуються на більш елементарні об'єкти (рисунок 7.2).



блоки: 1 – торцева стінка; 2 – бокова стінка; 3 – рама;  
4 – перегородка; 5 – дах;

модулі: 6, 10 – туалети; 7 – котельне відділення; 8 – службове відділення; 9 – купе; 11 – візок; 12 – автозчепний пристрій

Рисунок 7.2 – Конструктивно-технологічні блоки і модулі пасажирського вагона

Організація опису проекту у вигляді ієрархічної структури забезпечує концептуальний поділ проекту вагона. За кожен уніфіковану одиницю проекту (гілки ієрархічної структури на рівні «I») відповідає спеціалізований відділ конструкторського бюро. У межах кожної гілки проектувальники можуть досить

вільно приймати ті чи інші проектні рішення, враховуючи тільки задані обмеження для даної частини проекту.

Таким чином, принцип ієрархічності означає структурування уявлень про об'єкти проектування за ступенем деталізації описів, а принцип декомпозиції (блоковості) – розбиття уявлень кожного рівня на ряд складових частин (блоків) із можливостями роздільного проектування об'єктів на кожному рівні.

Оскільки прийняті рішення можуть не виправдатися, часто потрібно повторне виконання проектних процедур попередніх етапів після виконання проектних процедур подальших етапів. Такі повторення забезпечують послідовне наближення до оптимальних результатів і обумовлюють ітераційний характер проектування.

*Багатоетапність та ітераційність.* Методологія проектування передбачає ітераційний характер проектування, коли один або кілька етапів проектування можуть повторюватися. Наприклад, у випадку отримання негативного проектного рішення або невідповідності параметрів вагона вимогам технічного завдання потрібно повернутися до одного із попередніх етапів і повторити процес проектування. Ітераційний характер проектування найбільш часто спостерігається при проектуванні складних об'єктів.

*Типізація та уніфікація.* Принцип типізації та уніфікації передбачає використання у процесі проектування типових та уніфікованих рішень (наприклад, кришки люків напіввагонів, колісні пари та ін.).

Використання типових та уніфікованих проектних рішень приводить до спрощення і прискорення проектування. Так, типові елементи розробляються одноразово, але присутні в різних проектах.

Розглянуті принципи покладені в основу проектування нових конструкцій і вдосконалення (модернізації) старих вагонів.

Головною сферою застосування САПР у вагонобудуванні до теперішнього часу є розроблення креслярської та іншої конструкторської документації. Серед систем подібного класу слід виділити AutoCAD, КОМПАС. Застосування таких САПР є довгостроковим завданням, пов'язаним із створенням банку

даних електронних креслень. Тільки в цьому випадку можна отримати економію часу при проектуванні нових вузлів і деталей вагонів та внесення змін до існуючих.

Значне місце при проектуванні нових вагонів займає інженерний аналіз конструкцій. Серед завдань інженерного аналізу, що вирішуються у даний час, можна виділити оцінку міцності конструкції від дії навантажень відповідно до існуючих норм.

Застосування МСЕ дозволяє розширити область вирішуваних завдань, а саме: аналіз ресурсу конструкції під впливом циклічних навантажень, контактні завдання «колесо-рейка», прогнозування тріщиноутворення і руйнувань від утомленості, моделювання процесів руйнування. Серед систем МСЕ виділимо ANSYS, NASTRAN.

При проектуванні вагонів значне місце займають методи твердотілого параметричного моделювання. Найбільше застосування отримали системи твердотілого моделювання КОМПАС, Solid Works, Solid Edge. За допомогою тривимірного моделювання можуть бути створені моделі різних вузлів і деталей вагонів, що дозволяє на стадії проектування отримати уявлення про геометричну форму об'єкта проектування. Завдяки цьому стає можливою відмова від виготовлення дорогих демонстраційних моделей, що вимагають великих витрат часу на виготовлення. Крім того, сучасні системи твердотілого моделювання дозволяють за розробленими моделями створювати робочі креслення деталей, передавати геометрію проектованого виробу до систем МСЕ.

Одним із методів скорочення часу на проектування, підвищення якості вагонів є використання кінематичного і динамічного моделювання, побудови імітаційних моделей. Серед систем даного класу слід зазначити Working Model 3D, ADAMS. Програмне забезпечення ADAMS включає до себе спеціалізований модуль моделювання залізничних екіпажів (ADAMS Rail). Застосування цих засобів дозволяє отримати динамічні характеристики, дослідити поведінку вагона (або окремого вузла) при дії експлуатаційних навантажень, змодельовати аварійні ситуації, отримати зображення рухомих процесів (наприклад, робота поглинального апарата). Робота з

імітаційними моделями в процесі проектування вагонів на вітчизняних заводах ще не отримала широкого розповсюдження. Це пояснюється, по-перше, складністю і дорожнечою програмних засобів, а по-друге, відсутністю досвіду використання подібних систем.

*Процедури автоматизованого проектування вагонів.* Виходячи з вищевказаної технології процес проектування можна розглядати як набір проектних процедур:

- порівняння конструктивних варіантів на простих розрахункових схемах;
- твердотільне параметричне моделювання деталей;
- створення твердотільних складань;
- лінійний статичний розрахунок деталей на міцність за методом скінченних елементів і виявлення зон концентрації напружень, де найбільш вірогідна поява тріщин від утомленості в експлуатації;
- динамічний аналіз просторової імітаційної моделі, з урахуванням геометричних і фізичних нелінійностей, власних частот і форм коливань, сухого і в'язкого тертя, сил псевдоковзання, різних за своєю природою навантажень;
- технологічне опрацювання виробу за допомогою засобів *CAM*;
- отримання на основі тривимірної твердотільної геометрії конструкторської документації відповідно до ЄСКД і реалістичних просторових моделей з метою реклами.

*Приклад тривимірної моделі в SOLIDWORKS.* Розглянемо процес створення тривимірної моделі клина візка вантажного вагона. Даний приклад ілюструє процес розроблення та подальшого використання ТМ (рисунок 7.3).

Існує кілька способів створення моделей:

- накреслити три проекції клина і витягнути їх. На перетині цих проекцій можна отримати «заготовку» майбутньої моделі. Потім, використовуючи базові конструкторсько-технологічні операції – віднімаючи і додаючи конструктивні тіла, можна отримати тривимірну модель клина;
- вибрати базову поверхню (вертикальну стінку, основу клина і т. д.) і задати її габаритні розміри (за розмірами обраної поверхні клина). Витягаючи побудовану поверхню, отримаємо

твердотільний примітив – паралелепіпед. Подальші дії щодо створення моделі зводяться до поступового додавання або віднімання базових конструктивних тіл.

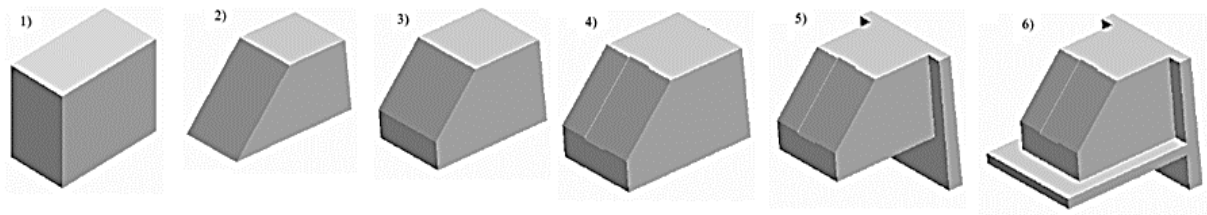


Рисунок 7.3 – Процес створення моделі клина

На рисунку 7.4 показано ТМ клина, побудована в SolidWorks.

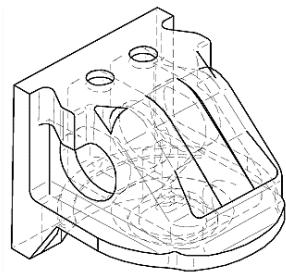


Рисунок 7.4 – Твердотільна модель клина

Після видалення невидимих ліній модель набуде вигляду, показаного на рисунку 7.5.

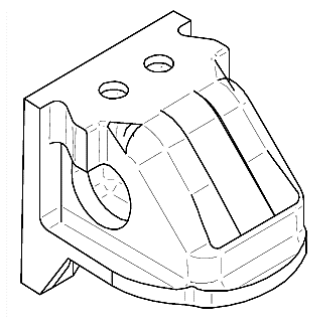


Рисунок 7.5 – Тривимірна модель клина з видаленими невидимими лініями

Процес видалення невидимих ліній може бути виконаний як вручну, так і автоматично.

Після створення повної тривимірної моделі можна виконати деталізоване креслення клина. Зробити це дозволяють наявні в SolidWorks засоби автоматичного отримання зображення необхідних двовимірних виглядів і проставлення розмірів на цих виглядах (рисунок 7.6).

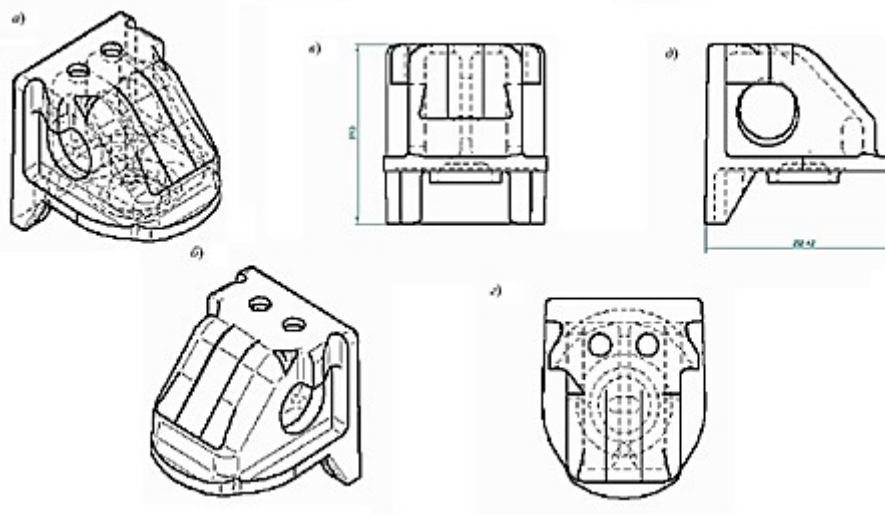


Рисунок 7.6 – Твердотільна модель клина вантажного візка

Використовуючи засоби рендерингу, тривимірну модель можна подати у вигляді, показаному на рисунку 7.7.



Рисунок 7.7 – Рендерингована тривимірна модель клина вантажного візка

Отримана ТМ може бути передана до системи скінченно-елементного аналізу, де буде виконане розбиття на скінченні елементи (рисунок 7.8).

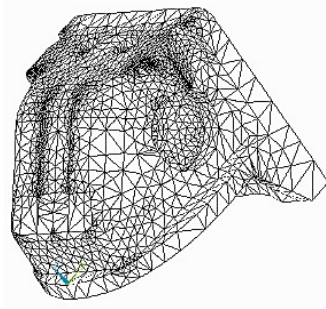


Рисунок 7.8 – Скінченно-елементна модель клина вантажного візка

Таким чином, використовуючи систему SolidWorks, можна ефективно створювати тривимірні моделі. Надалі за цими моделями можна отримати робочі креслення виробу і скінченно-елементну модель.

### 7.3 Розвиток САПР

У зв'язку з поширенням Інтернету з'являється можливість для взаємодії проектувальників через всевітню мережу та онлайніві бібліотеки типових деталей.

Одна із ключових тем розвитку САПР – *«хмарні» обчислення* – дистанційна робота з даними, розміщеними на віддалених серверах, з різних пристроїв, що мають вихід в Інтернет. На сьогоднішній день *«хмари»* дуже суттєво просунулися у сегменті легких додатків і сервісів – переважно у споживчому секторі.

Можливі два варіанти інтеграції.

У першому випадку до *«хмари»* переноситься вся інфраструктура інженерних служб, і відповідно необхідність в інженерному ПО, встановленому на робочому місці, зникає зовсім.

У другому випадку у конструктора раніше залишається графічна робоча станція із встановленою САПР, але при цьому він отримує з неї доступ до різних *«хмарних»* сервісів, завдяки яким можна вирішувати завдання, що вимагають дуже істотних ресурсів (наприклад, проводити міцносний аналіз).

Здійснювати *«хмарну»* взаємодію можливо двома способами: *публічно*, коли доступ до серверів, розташованих у провайдера, відкритий через Інтернет, і *в приватному порядку*,

коли сервер знаходиться на підприємстві і звернення до нього відбуваються по закритій локальній мережі.

Зараз розвиток «хмар» у галузі САПР стримується необхідністю дотримуватися у дуже багатьох проектах зайвої таємності. Тому швидше за все саме приватні «хмари» стануть найближчим часом основним драйвером ринку. «Хмари» – це не тільки нові технології, але ще й можливість експериментувати з новими бізнес-моделями.

*Альтернативні ОС.* Ще років п'ять тому, коли починали говорити про альтернативу Microsoft Windows, мова, як правило, йшла про Linux. Дана тема актуальна і сьогодні: програмна платформа буде зроблена на базі ядра Linux; до цієї ОС зростає інтерес у галузі освіти і в держструктурах. Однак тепер вже можна говорити про істотний потенціал операційної системи Google Chrome OS. І тут згаданий тренд зістиковується з «хмарним» трендом ОС Google, який не передбачає установаження додатків на локальному комп'ютері.

«Залізо». По-перше, все знову визначається незадоволеністю ринку рішенням монополіста – класичною архітектурою Intel (темпами її розвитку). У цьому зв'язку явно відзначається тренд на розвиток архітектури ARM. Її зараз підтримує кілька виробників, серед яких одним з найактивніших є компанія Nvidia. Поки дана архітектура активно застосовується тільки в мобільних пристроях, але найближчим часом, судячи з усього, вона перейде і на стаціонарні ПК. Побічно про це свідчить той факт, що майбутні ОС Microsoft Windows зможуть працювати і на ARM-архітектурі теж (вперше не тільки на Intel).

По-друге – перенесення суттєвої частини обчислень з центрального процесора на графічне ядро. Дана тема відноситься скоріше до галузі паралельних обчислень.

*Зростання ринку мобільних пристроїв.* Найбільшого прискорення він набув з появою iPad. Спочатку суто споживацький ринок, згодом зарекомендував себе і для вирішення багатьох інженерних завдань. У секторі САПР сьогодні багато співробітників є мобільними – працюють на виїзді, на віддалених об'єктах, переміщаються країною, працюють вдома. (Все це вимагає зручного мобільного пристрою). Так чи інакше за кордоном планшет скоро буде у



кожного співробітника інженерної служби, про це сьогодні говорять як про доведений факт. Вже з'явилися привабливі для розробників мобільні платформи IOS Apple, Android від Google, а також значна кількість САПР-додатків під них.

Зараз досить складно сказати, чи зникнуть через десять років з нашого арсеналу клавіатура і миша, але факт у тому, що інтерфейси, орієнтовані на роботу з мультитач-екранами (пальцеорієнтовані), явно набирають популярність. У мобільних пристроях вони вже практично стали стандартом. На сьогоднішній день зрозуміло, що цей інтерфейс цілком підходить для споживання інформації. Чи буде він зручний для роботи із САПР, сказати поки складно. Для масового переходу до подібних інтерфейсів досі не вистачає технологічної бази. Зараз на ринку просто не існує досить великих мультитач-панелей з необхідним для САПР дозволом.

Ринок САПР дуже консервативний. Навіть заміна однієї такої системи на іншу в рамках роботи над одним проектом – завдання досить складне. Що вже говорити про серйозну зміну парадигми, інтерфейсів, поколінь САПР. Тому даний ринок явно не входить до лідерів технологічної гонки – розвиток є, але повільний. Втім, на підприємства прийшли інженери, які виростили вже в епоху Інтернету, нових технологій і мобільних пристроїв, і так чи інакше вони активно привносять на ринок елементи своєї культури.

## ВИСНОВКИ

Нове покоління графічних САПР – це інтегроване середовище проектування виробів, що включає до свого складу ефективні системи тривимірного моделювання, інженерних розрахунків, розроблення та ведення конструкторської документації. Разом з програмними продуктами для автоматизації конструювання виробів звичайно поставляються:

- спеціалізовані системи для інженерних розрахунків;
- системи управління документообігом.

Можливість динамічного підключення різноманітних параметричних бібліотек забезпечує значне підвищення продуктивності та якості проектування за рахунок використання стандартних конструктивних елементів, деталей і вузлів.

Процедури імпортування та експортування зображень дозволяють об'єднати середовище розроблення креслень з іншими САПР та з Інтернетом, пересилати креслення електронною поштою, а також розміщати на Web-сервері.

Сучасні САПР-системи охоплюють всі рівні автоматизації конструкторських робіт і практично досягли межі з точки зору архітектури, організації та використання інструментальних засобів. З позицій організації інтегрованих програмних комплексів типу *CAD/CAM* для конструкторської підготовки виробництва мають застосовуватися тільки дві системи конструювання виробів: тривимірного моделювання та оформлення креслень, створених за тривимірними моделями.

Слід зазначити й інші важливі напрямки розвитку автоматизації проектування: розвиток і вдосконалювання методів оптимізаційного проектування; розвиток автоматизації безпосередньо конструювання; удосконалювання технології автоматизованого проектування.

Інтеграція САПР потребує істотного розширення складу БД та об'єднання їх у єдину базу інтегрованої системи; створення галузевих і міжгалузевих банків даних нормативно-технічної, техніко-економічної й науково-технічної інформації, багаторівневих обчислювальних систем колективного користування з різними типами комп'ютерів, уніфікації структур переданих масивів інформації; розвитку операційних систем і

доповнення прикладного програмного забезпечення численними інтерфейсами для сполучення з новими підсистемами.

Розвиток і вдосконалювання методів оптимізаційного проектування потребує розроблення нових математичних методів, які сприятимуть збільшенню продуктивності обчислювального комплексу САПР.

Розвиток автоматизації безпосередньо конструювання приведе насамперед до розвитку в САПР засобів обробки геометричної інформації тривимірних об'єктів, що дозволяють здійснювати складні перетворення, одержувати проекції та просторові відображення об'єктів на базі високопродуктивних комп'ютерів, графічних дисплеїв, графобудівників і відповідного програмного забезпечення.

Удосконалювання технології автоматизованого проектування спричинить зміну розподілу проектування на стадії та перерозподіл проектних робіт між стадіями. Зокрема вирішення загальних питань має здійснюватися на ранніх стадіях, роботи з оформлення проектних рішень — на заключній стадії. Режим роботи проектувальника з комп'ютером є повністю інтерактивним. Основний робочий інструмент користувача — комп'ютер, підключений до загальної обчислювальної мережі.

Мови спілкування проектувальників із системою мають бути максимально наближені до природної мови, можливий перехід до усного спілкування. Всі проміжні проектні рішення будуть зберігатися у комп'ютері, остаточні рішення передаватися у виробництво на машинних носіях.

Удосконалювання технології проектування передбачає істотну зміну складу технічних засобів САПР, програмного й організаційного забезпечення.

Розвиток САПР відіб'ється на змісті проектних робіт, що автоматизуються. Найбільш досконалі САПР будуть автоматизувати всі проектні операції, за винятком прийняття рішень, узгодження їх зі співвиконавцем, складання пояснювальних записок і інших робіт. Більше того, у ряді випадків система буде формувати рішення, і проектувальникові залишиться тільки погодитися з ним або переробити частину проекту.

## **СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1 Автоматизация проектно-конструкторской деятельности у вагонобудованні та вагонному господарстві [Текст] : навч. посібник / В. С. Блиндюк, І. Е. Мартинов, В. С. Меркулов [та ін.]. – Харків : УкрДУЗТ, 2016. – 208 с.

2 Болотин, М. М. Системы автоматизации производства и ремонта вагонов [Текст] : учебник / М. М. Болотин, В. Е. Новиков. – М. : Маршрут, 2004. – 307 с.

3 Математика и САПР [Текст] : в 2 кн. / П. Жермен-Лакур, П. Л. Жорж., Ф. Пистр, П. Безье ; пер. с фр. – М. : Мир, 1989. – 264 с.

4 Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике. [Текст] / О. Зенкевич ; пер. с англ. – М. : Мир, 1975. – 543 с.

5 Котуранов, В. Н. Вагоны. Основы конструирования и экспертизы технических решений [Текст] : учеб. пособие для ВУЗов ж.-д. трансп. / В. Н. Котуранов, А. П. Азовский [и др.]; под ред. В. Н. Котуранова. – М. : Маршрут, 2005. – 490 с.

6 Лапшин, В. Ф. Компьютерные технологии расчета вагонов и систем [Текст] : учеб.-метод. пособие / В. Ф. Лапшин, К. М. Колясов. – Екатеринбург : УрГУПС, 2008. – 68 с.

7 Лапшин, В. Ф. Компьютерные технологии проектирования и расчета [Текст] : учеб. пособие / В. Ф. Лапшин, А. Э. Павлюков, К. М. Колясов. – Екатеринбург : УрГУПС, 2012. – 92 с.

8 Меркулов, В. С. Системы автоматизованого проектування рухомого складу. ч.1[Текст] : конспект лекцій. / В. С. Меркулов. – Харків : УкрДУЗТ, 2016. – Ч. 1. – 90 с.

9 Мороз, В. І. Основи конструювання і САПР [Текст] : навч. посібник / В. І. Мороз, О. В. Братченко, В. В. Ліньков. – Харків : ПП вид-во “Нове слово”, 2003. – 193 с.

10 Норенков, И. П. Основы автоматизированного проектирования [Текст] : учебник для ВУЗов / И. П. Норенков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002. – 336 с.

11 Павлюков, А. Э. Интеграция программных комплексов проектирования и анализа на примере создания грузового подвижного состава [Текст] : материалы междунар. конф.,

посвящ. 120-летию Свердловской ж.д. / А. Э. Павлюков, С. В. Котов. – Екатеринбург, 1998. – С. 5-8.

12 Пашкевич, А. П. Основы систем автоматизированного проектирования [Текст]: метод. пособие / А. П. Пашкевич, О. А. Чумаков. – Минск : БГУИР, 2004. – 48 с.

13 Потемкин, А. В. Трехмерное твердотельное моделирование [Текст] / А. В. Потемкин. – М. : КомпьютерПресс, 2002. – 296 с.

14 Сабоннадьер, Ж.-К. Метод конечных элементов и САПР [Текст] / Ж.-К. Сабоннадьер, Ж.-Л. Кулон; пер. с фр. – М. : Мир, 1989. – 190 с.

15 Смольянинов, А. В. Основы метода конечных элементов и его применение к расчету вагонных конструкций [Текст] Ч. 1. Теоретические основы метода конечных элементов : учеб. пособие. / А. В. Смольянинов. – Екатеринбург : Изд-во УрГАПС, 1996. – 38 с.

16 Сторчак, Н. А. Моделирование трехмерных объектов в среде КОМПАС-3D [Текст]: учеб. пособие / Н. А. Сторчак, В. И. Гегучадзе, А. В. Синьков. – Волгоград : ВолгГТУ, 2006. – 216 с.

17 Хокс, Б. Автоматизированное проектирование и производство [Текст] / Б. Хокс ; пер. с англ. – М. : Мир, 1991. – 296 с.

18 Хорафас, Д. Конструкторские базы данных [Текст] / Д. Хорафас, С. Легг; пер. с англ. Д. Ф. Миронова. – М. : Машиностроение, 1990. – 224 с.

19 Шпур, Г. Автоматизированное проектирование в машиностроении [Текст] / Г. Шпур, Ф.-Л. Краузе; пер. с нем. Г. Д. Волковой и др.; под ред. Ю. М. Соломенцева, В. П. Диденко. – М. : Машиностроение, 1988. – 648 с.



