

**Міністерство науки і освіти України  
Таврійський державний агротехнологічний університет  
імені Дмитра Моторного**

***ЮЛІЯ ХОЛОДНЯК***

***КОМП'ЮТЕРНЕ ПРОЕКТУВАННЯ  
ПРОМИСЛОВИХ ВИРОБІВ***

***Конспект лекцій  
для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр»  
зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»***

**Мелітополь  
2021**

УДК [004.94:62](075.8)  
X71

*Рекомендовано до друку рішенням вченої ради механіко-технологічного факультету Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного  
Протокол №3 від 10 листопада 2020 р.*

**Рецензенти:**

**О. В. Строкань** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри комп'ютерних наук. Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного;

**О. А. Дереза** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технічної механіки та комп'ютерного проектування імені проф. В.М. Найдиша. Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного.

**Холодняк Ю. В.**

**Комп'ютерне проектування промислових виробів:** конспект лекцій / Ю. В. Холодняк; ТДАТУ. – Мелітополь: Люкс, 2021. – 140 с.

У навчально-методичному посібнику зібраний, систематизований та викладений матеріал, який охоплює теоретичні питання дисципліни «Комп'ютерне проектування промислових виробів». Наведені загальні відомості про проектування промислових виробів, геометричне та параметричне моделювання, характеристики сучасних САД, САМ, САЕ, PDM та PLM систем. Розглянуто можливості та характеристики сучасного спеціального обладнання для проектування та критерії вибору систем автоматизованого проектування.

Зміст видання відповідає освітньо-професійній програмі підготовки бакалаврів зі спеціальності 131 «Прикладна механіка».

## ЗМІСТ

ТЕМА 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПРОЕКТУВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВИРОБІВ .....	6
1.1 Поняття проектування .....	6
1.2 Структура процесу проектування промислових виробів .....	8
1.3 Поняття і класифікація систем автоматизовано проектування	9
1.4 Історія розвитку систем автоматизовано проектування.....	12
1.5 Види забезпечення САПР .....	15
Питання для самоконтролю .....	19
ТЕМА 2. ГЕОМЕТРИЧНЕ ТА ПАРАМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВИРОБІВ.....	20
2.1 Основні поняття моделювання .....	20
2.2 Каркасне моделювання.....	21
2.3 Поверхневе моделювання .....	23
2.4 Твердотіле моделювання.....	26
2.5 Основні поняття параметричного конструювання.....	28
2.6 Види параметризації .....	30
2.7 Асоціативне та об'єктно-орієнтоване конструювання.....	34
Питання для самоконтролю .....	37
ТЕМА 3. ХАРАКТЕРИСТИКА СУЧАСНИХ САД-СИСТЕМ... ..	38
3.1 Загальна характеристика 2D САД-систем .....	38
3.2 Ієрархія об'єктів в САД-системах .....	39
3.3 Спеціалізовані модулі 2D-програм .....	41
3.4 Загальна характеристика 3D САД-систем .....	44
3.5 Генератор креслень .....	50
3.6 Системи промислового дизайну.....	52
Питання для самоконтролю .....	53
ТЕМА 4. СПЕЦІАЛІЗОВАНІ САД-СИСТЕМИ. САЕ СИСТЕМИ ДЛЯ ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКІВ .....	54
4.1 АЕС САД - архітектурно-будівельні САПР .....	54
4.2 EDA-проектування електронних пристроїв.....	58

4.3 Геоінформаційні системи .....	61
4.4 Характеристика CAE-систем .....	62
4.5 Метод кінцевих елементів.....	63
4.6 Моделювання кінематики .....	65
4.7 Аеро-гідродинамічні розрахунки .....	68
4.8 Електростатика та електродинаміка.....	70
Питання для самоконтролю .....	70
<b>ТЕМА 5. САМ-СИСТЕМИ. ТЕХНОЛОГІЧНА ПІДГОТОВКА ВИРОБНИЦТВА .....</b>	<b>71</b>
5.1 Характеристика САМ-систем .....	71
5.2 Характеристика САМ-систем .....	73
5.3 Верифікація та оптимізація NC-програм.....	74
5.4 Види обробки Види траекторій для обробки деталей.....	75
5.5 CAPP - технологічна підготовка.....	80
5.6 Цифрове виробництво .....	84
Питання для самоконтролю .....	88
<b>ТЕМА 6. СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДАНИМИ. ....</b>	<b>89</b>
6.1 Структуризація проекту и класифікатори, класифікація документів.....	89
6.2 Атрибути та система пошуку.....	91
6.3 Розмежування доступу .....	92
6.4 Інтеграція різних CAD-систем.....	94
6.5 Автоматичне відслідковування, історія створення та керування змінами.....	95
6.6 Колективна робота над проектом.....	96
6.7 Передача даних в ERP-системи .....	99
Питання для самоконтролю .....	109
<b>ТЕМА 7. СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЖИТТЄВИМ ЦИКЛОМ ВИРОБІВ .....</b>	<b>110</b>
7.1 Характеристика PLM-системи.....	110
7.2 Компоненти та складові PLM систем .....	113
7.3 Головні процеси PLM .....	115

Питання для самоконтролю .....	119
<b>ТЕМА 8. СПЕЦІАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ .....</b>	<b>120</b>
8.1 Сучасні плотери .....	120
8.2 Інструменти для виконання швидкого прототипування .....	121
8.3 Пристрої вводу та вказівок .....	125
8.4 Відповідність відеоадаптерів сучасним САПР .....	128
Питання для самоконтролю .....	129
<b>ТЕМА 9. ВИБІР СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ .....</b>	<b>130</b>
9.1 Ініціація процесу вибору САПР .....	130
9.2 З'ясування потенційних переваг системи .....	132
9.3 Формалізація вимог до системи .....	133
9.4 Аналіз витрат на придбання САПР .....	133
9.5 Вибір системи САПР .....	135
Питання для самоконтролю .....	137
<b>ЛІТЕРАТУРА .....</b>	<b>138</b>

# ТЕМА 1

## ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПРОЕКТУВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВИРОБІВ

- 1.1. Поняття проектування
- 1.2. Структура процесу проектування промислових виробів
- 1.3. Поняття і класифікація САПР
- 1.4. Історія розвитку САПР
- 1.5. Види забезпечення САПР

### 1.1 Поняття проектування

Проектування нових видів і зразків машин, устаткування, пристроїв, апаратів, приладів та інших виробів представляє складний і тривалий процес, що включає в себе розробку вихідних даних, креслень, технічної документації, необхідних для виготовлення дослідних зразків і подальшого виробництва і експлуатації об'єктів проектування.

**Проектування** - це комплекс робіт з метою отримання описів нового або модернізованого технічного об'єкта, достатніх для реалізації або виготовлення об'єкта в заданих умовах. В процесі проектування виникає необхідність створення опису, необхідного для побудови ще не існуючого об'єкта. Отримувані при проектуванні описи бувають остаточними або проміжними. Остаточні описи представляють собою комплект конструкторсько-технологічної документації у вигляді креслеників, специфікацій, програм для ЕОМ і автоматизованих комплексів і т.п.

На рис. 1 показано місце проектування в структурі життєвого циклу виробу.

Представлення про складні технічні об'єкти в процесі їх проектування поділяються на аспекти і ієрархічні рівні. Аспекти характеризують ту чи іншу групу споріднених властивостей об'єкта. Типовими аспектами в описах технічних об'єктів є: функціональний, конструкторський і технологічний.

**Функціональний аспект** відображає фізичні та інформаційні процеси, що протікають в об'єкті при його функціонуванні.

**Конструкторський аспект** характеризує структуру, розташування в просторі і форму складових частин об'єкта.

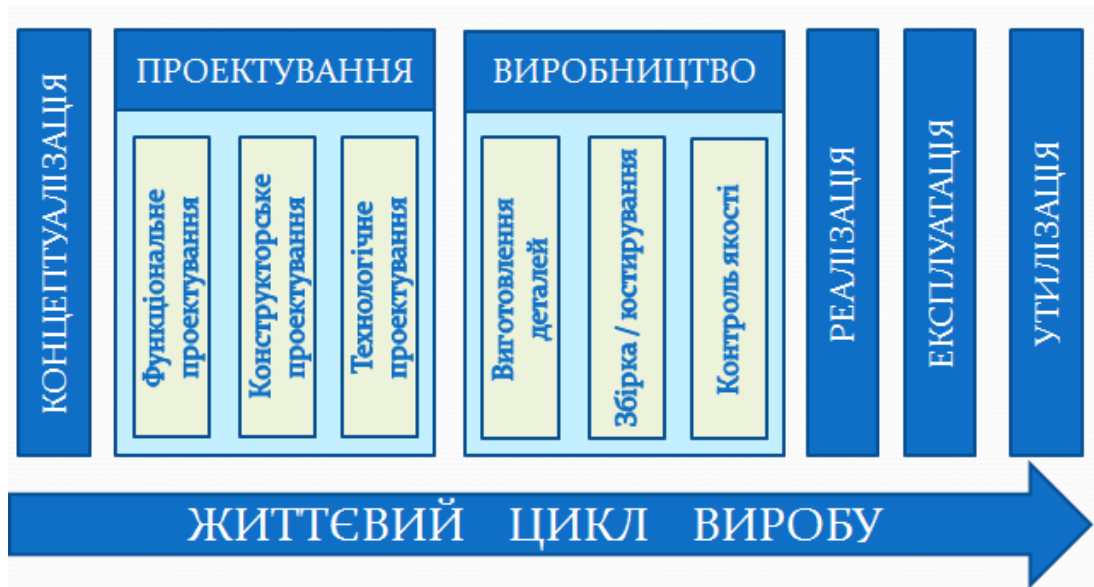


Рис. 1. Структура життєвого циклу виробу

**Технологічний аспект** визначає технологічність, можливості і способи виготовлення об'єкта в заданих умовах.

Поділ описів проєктованих об'єктів на ієрархічні рівні за ступенем подробиць відображення властивостей об'єктів становить сутність блочно-ієрархічного підходу до проєктування.

Типовими ієрархічними рівнями функціонального проєктування є:

- функціонально-логічний (функціональні і логічні схеми);
- схемотехнічний (електричні схеми вузлів і окремих блоків);
- компонентний (проєктування елементів і їх розміщення).

Будь-який сучасний складний технічний пристрій є результатом комплексного знання. Проєктувальник повинен знати маркетинг, економіку країни і світу, фізику явищ, численні технічні дисципліни (обчислювальну техніку, математику, машинобудування, метрологію, організацію і технологію виробництва та ін.), умови експлуатації виробу, керівні технічні документи і стандарти. Крім того, слід враховувати особливості та вимоги реального життя, колективу, чужий досвід, вміння отримувати та оцінювати інформацію.

Чи не останньою вимогою до проєктувальника є комплексність мислення, вміння працювати з великою кількістю організацій. Особливо це вміння необхідно розробнику виробу, що входить в більш складний комплекс (наприклад, радіостанції для судна, літака) або пов'язаного з іншими системами (з видачі

даних, харчуванню, управління та ін.).

Найчастіше повний цикл проектування називають науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи (в англійській мові передається як Research & Development, R&D) - комплекс заходів, що включає в себе як наукові (дизайнерські, концептуальні та ін.) дослідження, так і виробництво дослідних і дрібносерійних зразків продукції, що передують запуску нового продукту або системи в промислове виробництво.

## **1.2 Структура процесу проектування промислових виробів**

**Проектне рішення** – опис об'єкта або його частини, достатній для прийняття висновку про закінчення проектування або шляхах його продовження.

**Проектна процедура** – частина проектування, що закінчується отриманням проектного рішення.

**Маршрутом проектування** називається послідовність проектних процедур, що веде до отримання необхідних проектних рішень.

Проектні процедури діляться на процедури синтезу та аналізу. Процедура синтезу полягає в створенні описів проєктованого об'єкта. В описах відображаються структура і параметри об'єкта (тобто здійснюється структурний і параметричний синтез).

Процедура аналізу – дослідження об'єкта. Власне завдання аналізу формулюється як задача встановлення відповідності двох різних описів одного і того ж об'єкта. Один з описів вважається первинним, і його коректність передбачається встановленою. Другий опис відноситься до більш докладного рівню ієрархії, і його правильність потрібно встановити зіставленням з первинним описом. Таке зіставлення називають верифікацією.

Частина процесу проектування, що включає в себе формування всіх необхідних описів об'єкта називається етапом проектування.

Етапи проектування промислового виробу:

- 1) технічне завдання;
- 2) технічна пропозиція;
- 3) ескізне проектування;



- 4) технічне проектування;
- 5) робоче проектування;
- 6) виготовлення дослідного зразка.

Проектування як окремих об'єктів, так і систем починається з вироблення **технічного завдання** на проектування. У технічному завданні містяться основні відомості про об'єкт проектування, умови його експлуатації, а також вимоги, що пред'являються замовником до проектованого виробу. Найважливіша вимога до технічного завдання - це його повнота. Виконання цієї вимоги визначає терміни і якість проектування. Наступний етап - попереднє проектування - пов'язаний з пошуком принципів можливостей побудови системи, дослідженням нових принципів, структур, обґрунтуванням найбільш загальних рішень. Результатом цього етапу є **технічна пропозиція**.

На етапі **ескізного проектування** проводиться детальне опрацювання можливості побудови системи, його результатом є ескізний проект.

На етапі **технічного проектування** виконується укрупнене уявлення всіх конструкторських і технологічних рішень; результатом цього етапу є технічний проект.

На етапі **робочого проектування** проводиться детальне опрацювання всіх блоків, вузлів і деталей проектованої системи, а також технологічних процесів виробництва деталей і їх складання у вузли і блоки.

Заключний етап - **виготовлення дослідного зразка**, за результатами випробувань якого вносять необхідні зміни в проектну документацію.

При неавтоматизованому проектуванні найбільш трудомісткими є етапи технічного і робочого проектування. Впровадження автоматизації на цих етапах призводить до найбільш ефективних результатів.

### **1.3 Поняття і класифікація систем автоматизовано проектування**

Процес проектування, здійснюваний повністю людиною, називають неавтоматизованим. В даний час найбільшого поширення при проектуванні складних об'єктів отримало проектування, при якому відбувається взаємодія людини і ЕОМ.

Таке проектування називають автоматизованим.

**Система автоматизованого проектування** – це організаційно-технічна система, що складається з комплексу засобів автоматизації проектування, взаємодіє з підрозділами проектної організації і виконує автоматизоване проектування.

Інженерна діяльність може бути підрозділена на кілька послідовних етапів: проектування, конструювання, підготовка і організація виробництва. Відповідно, і кошти автоматизації інженерної діяльності мають стала вже традиційною класифікацію, поділяє їх **за цільовим призначенням**:

- засоби проектування CAD (Computer Aided Design);
- засоби інженерного аналізу CAE (Computer Aided Engineering);
- засоби підготовки автоматизованого виробництва CAM (Computer Aided Manufacturing);
- засоби планування технологічних процесів CAPP (Computer Aided Process Planning);
- засоби управління життєвим циклом виробу PLM (product lifecycle management);
- засоби управління документообігом PDM (Product Document Management).

У свою чергу, всередині всієї безлічі CAD-рішень прийнято виділяти за галузевим призначенням:

- машинобудівні CAD - MCAD (Mechanical Computer Aided Design);
- САПР електронних пристроїв, EDA (Electronic Design Automation);
- архітектурно-будівельні САПР, АЕС (Architecture Engineering and Construction).

Продукти CAE поділяються на системи:

- на міцність (в основному засобами MCE - методу скінченних елементів);
- теплових розрахунків;
- обчислювальної гідродинаміки, CFD (Computational Fluid Dynamics);
- кінематичного аналізу;
- механічної симуляції MES, (Mechanical Event Simulation);
- симуляції процесів лиття та обробки тиском;
- електромагнітних і електродинамічних розрахунків;

- оптимізуючі.

САПР також класифікують за різновидом та складністю об'єктів проектування:

- легкі (AutoCAD, Компас-графік);
- середні (Solid Works, Solid Edge, Компас-3D);
- важкі (CATIA, Pro / ENGINEER, NX).

Легкі САПР застосовують, в основному, замість кульмана. Можна сказати, що 2D креслення на комп'ютері легше, ніж за кульманом, адже програми налаштовані спеціальним чином так, щоб креслити було максимально легко і комфортно. Тут не потрібно стежити за якістю графіки, все малює комп'ютер. Можна без проблем виконувати кресленики будь-якої складності і розмірів (що важливо, коли виконуєш збірки формату A1 і A0).

Середні використовуються для 3D моделювання і побудови креслеників по 3D моделям. Природно, побачивши 3D модель двигуна ви зрозумієте набагато більше, ніж за кресленням також як і те, що деталь виконана верстатом з ЧПУ по 3D моделі буде точніше, ніж робочим по 2D кресленнику.

Важкі САПР - навіть не програми, а цілі комплекси програм для великого підприємства. В одній ви виконаєте 3D модель деталі (САД-програма), у другій - розрахуєте її на міцність (САЕ-програма), в третій - проектуєте інструмент для її виготовлення, в четвертій - розробляєте керуючу програму для верстатів з ЧПУ (САМ-програма). Ну і вартість у них відповідна кількості функцій. Тому для багатьох компаній по співвідношенню ціна / якість найбільш оптимальною виглядає категорія середніх САПР, куди входить і програма SolidWorks.

**Класифікація САПР за рівнем автоматизації:**

- низько-автоматизовані (до 25% проектних процедур автоматизовано);
- середньо-автоматизовані (25-50%);
- високо-автоматизовані (50-75%);

**Класифікація САПР за рівнем комплексності:**

- одноетапні (один етап проектування);
- багатоетапні (кілька етапів);
- комплексні (весь процес створення виробу).

**Класифікація САПР за характером і кількістю випущених проектом документів:**

- САПР низької продуктивності (100-10 000 проектних

документів в перерахунку на формат А4 за рік);

- САПР середньої продуктивності (10 000-100 000);
- САПР високої продуктивності (100 000 і вище).

#### **1.4 Історія розвитку систем автоматизовано проектування**

Випадки застосування ЕОМ для проектування були відомі ще до того, як було сформульовано поняття САПР. У якості подібних прикладів можна навести програми для розрахунків методом кінцевих елементів і програми для автоматизованого проектування електронних схем і пристроїв. Як приклади з області технології можна привести системи підготовки програм для верстатів з ЧПУ і для креслярських автоматів. Як важливий внесок в розвиток методів автоматизованого проектування з застосуванням ЕОМ слід розглядати розробку мови Фортран. У 1955-1959 роках в Массачусетському технологічному інституті під керівництвом Росса була розроблена система програмування АРТ, в рамках якої і сформулювалося поняття САПР. На противагу сьгоднішньому поняттю САПР тоді малося на увазі просто використання ЕОМ з метою проектування.

Під поняттям САПР розумілося всеосяжне і зростаюче використання ЕОМ. В кінці 50-х років не могло бути й мови про повністю автоматизоване проектуванні, але вже в цей час за основу приймалося ведення діалогу.

Якщо саме поняття автоматизованого проектування утвердилося вже в 50-х роках, то фірми, що займаються створенням САПР, з'явилися в 60-х роках.

У 1963 році фірмою «Дженерал Моторс» була продемонстрована перша промислова розробка САПР, названа ДАС-1. Приблизно в той же час фірма «Ітек» почала проектування оптичних лінз із застосуванням ЕОМ.

У 1966 році в Кембріджському університеті була розроблена перша технічно незалежна графічна система GINO. Там же в 1967-1968 роках. Грау розробив зручний варіант зберігання даних про об'єкт - систему ASP (асоціативна база даних).

У 1969 році в Західно-Берлінському технічному університеті було розпочато роботу по реалізації нової спеціальної програми «Техніка виробництва і автоматизації», в рамках якої була

розроблена тривимірна система графічного моделювання.

Норвезька САПР AUTO КОМ, створена для вирішення завдань суднобудування в 1971 році, була пристосована для зберігання великих обсягів даних по концепції побудови банку даних, розробленої в 1962 році Бахманом.

У США найбільш успішно працювала фірма «Макдоннел Дуглас», яка створила систему САДД. В Японії створена система TI PS-1, GEOMAP. В Англії розробили систему BUILD та ін.

З тих пір кількість впроваджуваних систем безперервно зростає. За оцінкою фахівців, в 1985 році кількість використовуваних систем істотно перевищує 1000.

У 1982 році група програмістів об'єдналася і створила компанію, відому як Autodesk. Рік по тому вони зробили свою флагманську програму AutoCAD доступною всьому світу, вартістю всього 1 тис. дол. Правда, в ті часи персональні комп'ютери були 16-розрядними, і їх потужності вистачало лише для двовимірних побудов - креслеників і створення ескізів. Однак це не завадило новинці мати величезний успіх у користувачів.

Це був найперший відомий програмний пакет для автоматизованого проектування, створений для комп'ютерів IBM, і знову поле змінилося назавжди.

Випуск AutoCAD став важливою подією в розвитку програмного забезпечення для автоматизованого проектування. У програмістів в Autodesk була мета створити продукт, який би робив майже все, що могли робити інші пакети САПР в той час, при цьому стягуючи невелику частину витрат.

При цьому Autodesk одноосібно змінила траєкторію програмування САПР, а також комерційної та доступних протягом десятиліть. Проте, майже всі такі програми застрягли в двох вимірах.

Програма, яка змінила ландшафт ще раз - і буквально дала світу дизайну інший вимір - була названа Pro / ENGINEER, створеної Parametric Technology Corporation.

Це було рішення для автоматизованого проектування, засноване на тривимірній геометрії і багатофункціональних, заснованих на значеннях операціях для визначення аспектів і вузлів інженерних або конструкторських проектів. Програма насправді все ще використовується на ПК Microsoft, хоча зараз вона називається Creo.

Pro/ENGINEER (Creo) також працював на комп'ютерних терміналах UNIX, оскільки персональні комп'ютери не мали достатньої обчислювальною потужністю і швидкістю, щоб надійно використовувати таке програмне забезпечення, але це все ще було важливим поворотним моментом. Зрештою, були випущені дві інші програми-однодумці, ACIS і Parasolid, кожна з яких заклала основу для інших програмних пакетів для автоматизованого проектування і графічних рішень.

Найбільш бурхливий розвиток САПР відбувалося в 90-х роках, коли Intel випустила процесор Pentium Pro, а Microsoft - систему Windows NT. Тоді на поле вийшли нові гравці «середньої вагової категорії», які заповнили нішу між дорогими продуктами, що володіють великою кількістю функцій, і програмами типу AutoCAD. В результаті склалося існує й нині поділ САПР на три класи: важкий, середній і легкий. Така класифікація виникла історично, і хоча вже давно йдуть розмови про те, що межі між класами поступово стираються, вони продовжують існувати, так як системи як і раніше розрізняються і за ціною, і за функціональними можливостями. Слід додати, що крім універсальних САПР також випускаються і різні спеціалізовані продукти, наприклад, для інженерного аналізу, розрахунку трубопроводів, аналізу лиття металів,

Сьогодні світ програмного забезпечення для 3D-дизайну є віртуальною індустрією програм і графічних пакетів, які роблять практично всі, що може собі уявити дизайнер або інженер. Вищезгаданий Autodesk є лідером в області програм САПР, але є і багато інших, деякі з яких призначені для вузчих, більш нішевих областей або інтересів.

Ось кілька основних прикладів сучасних рішень для 3D CAD проектування: Kompas 3D, 3ds Max, Blender, Cinema 4D, Rhino3D, SketchUp, Fusion 360 і SolidWorks. Хочете вірте, хочете ні, але насправді це все популярні рішення в цій галузі, в залежності від конкретних потреб дизайнера або інженера. В даний час на ринку залишилося лише три САПР верхнього цінового класу - Unigraphics NX компанії EDS, CATIA французької фірми Dassault Systemes (яка просуває її разом з IBM) і Pro/Engineer від PTC (Parametric Technology Corp.). Раніше потужних системи було більше, але після низки злиттів і поглинань компаній, число пакетів скоротилося.

Згадані компанії - лідери в області САПР, а їх продукти займають лівову частку ринку в грошовому вираженні. Головна особливість «важких» САПР – великі функціональні можливості, висока продуктивність і стабільність роботи - все це результат тривалого розвитку. Однак, ці системи немолоді - CATIA з'явилася в 1981 році, Pro/Engineer - в 1988 році, а Unigraphics NX, хоча і вийшла у 2002 році, є результатом злиття двох вельми поважних за віком систем – Unigraphics і I-Deas, отриманих фірмою EDS в результаті придбання компаній Unigraphics і SDRC.

Незважаючи на те, що важкі системи коштують значно дорожче своїх більш «легких» побратимів (десятки тисяч доларів за одне робоче місце), витрати на їх придбання окупаються, особливо коли мова йде про складне виробництво, наприклад машинобудування, двигунобудування, авіаційну та аерокосмічну промисловість.

Зараз ринок розвивається еволюційно: розширюються функціональні можливості продуктів, підвищується продуктивність, спрощується використання. Але, можливо, незабаром нас чекає чергова революція. Аналітики з компанії Cambashi вважають, що це станеться, коли постачальники САПР почнуть використовувати для зберігання інженерних даних (креслеників, тривимірних моделей, списків матеріалів і т. д.) не файлові структури, а стандартні бази даних SQL-типу. В результаті інженерна інформація стане структурованою, і керувати нею буде набагато простіше, ніж тепер.

## **1.5 Види забезпечення САПР**

Забезпечення систем автоматизованого проектування включає в себе:

- теорію процесів, що відбуваються в схемах і конструкціях;
- методи аналізу і синтезу конструкцій, систем і їх складових частин, їх математичні моделі;
- математичні методи і алгоритми чисельного рішення систем рівнянь, що описують конструкції.

Зазначені компоненти складають ядро САПР. В забезпечення САПР входять також алгоритмічні спеціальні мови програмування, термінологія, нормативи, стандарти та інші дані.

Розробка комплексу забезпечення САПР вимагає спеціальних знань в областях застосування САПР. Отже, розробка забезпечення САПР - прерогатива фахівців в предметній області. Зазвичай в якості відокремлених блоків в забезпеченні САПР виділяються наступні.

**Математичне забезпечення (МЗ)** - сукупність математичних методів, моделей і алгоритмів проектування, представлених в заданій формі.

МЗ при автоматизованому проектуванні в явному вигляді не використовується, а застосовується похідний від нього компонент - програмне забезпечення. Разом з тим розробка математичного забезпечення є найскладнішим етапом створення САПР, від якого при використанні умовно однакових технічних засобів в найбільшій мірою залежать продуктивність і ефективність функціонування САПР в цілому.

Математичне забезпечення будь-яких САПР за призначенням і способам реалізації ділиться на дві частини. Першу складають математичні методи і побудовані на їх основі математичні моделі, які описують об'єкти проектування або їх частини або обчислюють необхідні властивості і параметри об'єктів.

Другу частину складає формалізоване опис технології автоматизованого проектування.

У складі будь-якої САПР ці частини математичного забезпечення повинні органічно взаємодіяти. Способи та засоби реалізації першої частини математичного забезпечення найбільш специфічні в різних САПР і залежать від особливостей процесу проектування. Розвиток і вдосконалення методів в даній частині - процес постійний. Створення САПР стимулює ці роботи, і перш за все в частині розробки оптимізаційних методів проектування.

Друга частина математичного забезпечення - формалізація процесів автоматизованого проектування в комплексі - є більш складним завданням, ніж алгоритмізація та програмування окремих проектних завдань, так як необхідно формалізувати всю логіку технології проектування, в тому числі логіку взаємодії проектувальників один з одним з використанням засобів автоматизації. Зазначені проблеми вирішувалися і вирішуються в даний час емпіричним шляхом, головним чином методом проб і помилок. Отже, математичне забезпечення САПР має описувати



у взаємозв'язку об'єкт, процес і засоби автоматизації проектування.

**Технічне забезпечення** - сукупність пов'язаних і взаємодіючих технічних засобів, що забезпечують роботу САПР. Технічне забезпечення САПР включає пристрої обчислень і організаційної техніки, засоби передачі даних, вимірювальну техніку, пристрої підготовки даних і організації архівів. В даний час більшість практично діючих САПР будуються на базі локальних обчислювальних мереж.

**Програмне забезпечення** - сукупність машинних програм, необхідних для здійснення процесу проектування, що включає системне і прикладне програмне забезпечення. У програмному забезпеченні САПР виділяють:

- загальносистемне програмне забезпечення (базова операційна система та моніторні системи САПР);
- пакети прикладних програм (комплекси програмних засобів, орієнтованих на вирішення завдань у певній галузі);
- системи програмування (сукупність засобів написання текстів, трансляції і налагодження програм користувача).

**Інформаційне забезпечення** - сукупність відомостей, необхідних для виконання проектування. Включає СУБД (Систему управління базами даних), саму базу даних і базу знань. До інформаційного забезпечення висуваються такі вимоги:

- адекватність інформації стану предметної області;
- масовість використання (колективний доступ);
- швидкодія (час реакції на запит);
- продуктивність (кількість запитів, які виконуються в одиницю часу);
- можливість розширення;
- надійність і захист інформації.

Інформаційне забезпечення САПР складається з опису стандартних проектних процедур, типових проектних рішень, типових елементів, комплектуючих виробів і їх моделей, матеріалів, числових значень параметрів і інших даних. Ці дані в закодованій формі записуються на машинних носіях. Крім того, в інформаційне забезпечення САПР входять правила і норми проектування, що містяться у відповідній нормативно-технічній документації, а також інформація про правила документування результатів проектування. Структура і зміст ІЗ САПР, а також

характер його використання залежать від ступеня розвитку банку даних (БД).

В БД можна виділити суттєві частини, які відіграють різну роль в процесі проектування:

- довідник містить довідкові дані про ГОСТах, нормаль, уніфікованих елементах, раніше виконаних типових проектах. Ця частина змінюється найменш часто, характеризується одноразовим записом і багаторазовим зчитуванням і називається постійною частиною БД.

- проект містить відомості про виріб, що знаходиться безпосередньо в процесі проектування. У проект входять результати вирішення проектних завдань, отримані до теперішнього моменту (різного типу геометричні моделі, схеми, специфікації і т. П.). Проект поповнюється або змінюється в міру завершення чергових ітерацій на етапах проектування і конструювання.

Часто довідник і проект об'єднують під загальною назвою архів.

**Лінгвістичне забезпечення** - сукупність мов проектування, включаючи терміни, визначення, правила формалізації природної мови, методи стиснення і розгортання текстів.

В свою чергу, лінгвістичне забезпечення САПР підрозділяється на мови програмування, проектування і управління.

Мови програмування служать для розробки і редагування системного і прикладного програмного забезпечення САПР. Вони базуються на алгоритмічних мовах - наборі символів і правил освіти конструкцій з цих символів для завдання алгоритмів розв'язання задач. Сукупність мови програмування і відповідного йому мовного процесора називають системою програмування.

Мови проектування - це проблемно-орієнтовані мови, що служать для обміну інформацією про об'єкти та процесі проектування між користувачем і комп'ютером.

Мови управління служать для формування команд управління технологічним обладнанням, пристроями документування, периферійними пристроями.

Існують різні рівні мов програмування: високі, більш зручні для користувача, і низькі, близькі до машинних мов.

**Методичне забезпечення** - сукупність документів, що встановлюють склад, правила відбору і експлуатації засобів забезпечення системи.

**Організаційне забезпечення** - сукупність документів, що визначають склад проектної організації, зв'язок між підрозділами, а також форму представлення результатів проектування та порядок розгляду проектних документів.

### **Питання для самоконтролю**

1. Дайте визначення поняттю «проектування». Охарактеризуйте аспекти проектування.
2. Перелічіть етапи життєвого циклу промислових виробів.
3. Назвіть види робіт, які виконуються на етапі ескізного проектування промислового виробу.
4. Назвіть види робіт, які виконуються на етапі робочого проектування промислового виробу.
5. Дайте визначення поняттю «система автоматизованого проектування».
6. Яка з компаній першою в світі розробила програмний продукт для автоматизованого проектування?
7. Наведіть класифікацію систем автоматизованого проектування.
8. Які компоненти складають ядро автоматизованої системи проектування?
9. Охарактеризуйте види забезпечення систем автоматизованого проектування.
10. Поясніть різницю між проектною операцією та проектною процедурою.

## ТЕМА 2

# ГЕОМЕТРИЧНЕ ТА ПАРАМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ВИРОБІВ

- 2.1 Основні поняття геометричного моделювання
- 2.2 Каркасне моделювання
- 2.3 Поверхневе моделювання
- 2.4 Твердотіле моделювання
- 2.5 Основні поняття параметричного конструювання
- 2.6 Види параметризації
- 2.7 Асоціативне та об'єктно-орієнтоване конструювання

### 2.1 Основні поняття моделювання

3D-модель – це об'ємна фігура в просторі, створювана в спеціальній програмі. За основу, як правило, приймаються кресленики, фотографії, технічні рисунки та детальні описи, спираючись на які, фахівці і створюють комп'ютерну модель.

Створення 3D-моделі об'єкта здійснюється за допомогою 3D-моделювання. На першому етапі 3D-моделювання проводиться збір інформації: ескізи, кресленики, фотографії і відеоролики, технічні рисунки, часто навіть використовують готовий зразок виробу - загалом все, що допоможе зрозуміти зовнішній вигляд і структуру об'єкту.

На підставі отриманої інформації проєктувальник створює тривимірну модель в спеціальній САПР. Після того як модель буде виконана, на неї можна буде подивитися з будь-якого ракурсу, наблизити, віддалити, внести необхідні корективи. Отримана модель вже готова для подальшого використання: друку на 3D-принтері, 3D-фрезерування на верстатах з ЧПК або будь-якого іншого методу прототипування. Існують наступні види тривимірних моделей:

- полігональна модель;
- NURBS поверхні.

Другі мають більш високий рівень точності, так що їх найчастіше використовують інженери, машинобудівники і архітектори. Полігональні моделі частіше використовуються для створення 3D-зображень в мультиплікації, кінематографі та комп'ютерних іграх. Вони складаються з численних найпростіших геометричних фігур, які називають примітивами.

Під геометричним моделюванням розуміють створення моделей геометричних образів, що містять інформацію про геометрію об'єкта. Структуру графічного моделювання наведено на рис. 1.

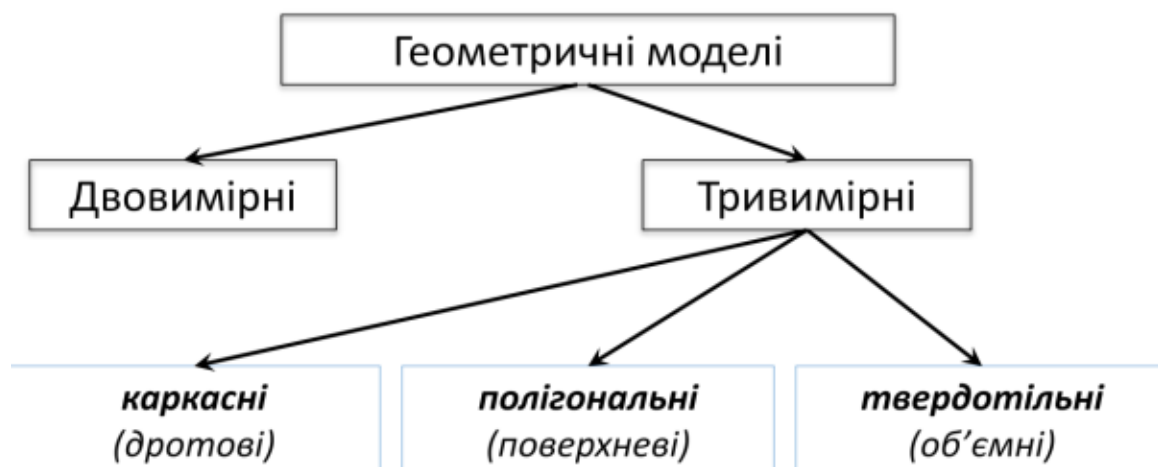


Рис. 1. Класифікація геометричних моделей об'єктів

Під моделлю геометричного образу будемо розуміти сукупність відомостей, однозначно визначають його форму. Наприклад, точка може бути представлена двома (двовимірною моделлю) або трьома (тривимірною моделлю) координатами; коло – координатами центру та радіусом тощо.

Двовимірні моделі дозволяють формувати і змінювати кресленики; тривимірні моделі призначені для представлення виробу в трьох вимірах.

Для тривимірних моделей прийняти наступна класифікація :

- каркасні (дротові) моделі - задані координатами вершин і з'єднують їх ребрами;
- полігональні (поверхневі) моделі - задані поверхнями (площинами, поверхні обертання та ін.)
- твердотілі (об'ємні) – формуються з елементарних об'єктів (базисних тіл) з використанням логічних операції об'єднання, віднімання, перетину.

## 2.2 Каркасне моделювання

Завдання геометричного моделювання є важливою областю САПР. Оскільки дані про фізичні об'єкти реального світу не можуть бути цілком введені в комп'ютер, необхідно обмежити обсяг інформації про об'єкт, наприклад:

Які частини об'єкта є видимими?

Який колір повинен бути присвоєний кожному елементу об'єкта?

Яка площа поверхні об'єкта, який об'єм займає об'єкт і яку масу він має?

Чи не перетинається об'єкта з іншими об'єктами?

Знаходиться об'єкт всередині або зовні іншого об'єкта?

І якщо буде вибрано відповідне подання геометричної моделі об'єкта для обумовленого кола завдань, вона буде вирішена ефективно, і навпаки.

Геометричні моделі в САПР використовуються для вирішення багатьох завдань: візуалізації, побудови розрахункових сіток, генерації керуючих програм числового програмного керування та ін. В першу чергу вони призначені для зберігання інформації про форму об'єктів, їх взаємне розташування і надання її для обробки в зручному для комп'ютерної програми вигляді. У цьому ключова відмінність електронної геометричної моделі від кресленника, який представляє собою умовне символічно-графічне зображення, призначене для читання людиною.

Це історично перша технологія подання об'ємної геометрії. Вона природним чином розвинулася з систем 2D-креслення. Це найпростіший спосіб представлення тривимірних моделей - так звані дротові каркаси, або просто каркаси, які дають незаперечні переваги в порівнянні з моделюванням на площині. Вони допомагають більш чітко уявляти модель і надійно контролювати взаємне розташування складових її елементів. Крім того, каркаси можна використовувати і для створення проєкційних видів. Досить прості структури даних і алгоритми роботи з каркасами дозволили реалізувати їх на малопотужному обладнанні кінця 70-х років минулого століття.

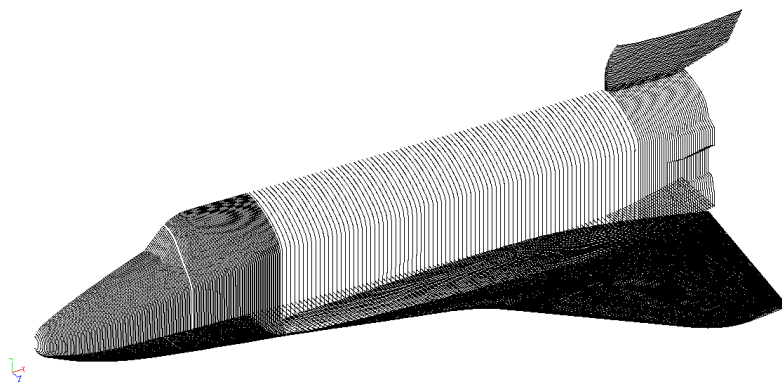


Рис.1. Каркасна модель теоретичних обводів космічного корабля Буран

Недолік каркасного представлення моделей полягає в тому, що програми не можуть відобразити всі особливості поверхонь, що визначаються каркасами, і це унеможлиблює побудову, наприклад, точних перетинів. Візуальне представлення досить аскетичне і в ряді випадків не дає можливості однозначно інтерпретувати побачене.

Проте навіть така, що має безліч обмежень, технологія дозволила істотно розширити функціональні можливості САПР в порівнянні з 2D-системами. В даний час побудова каркасів також використовується в геометричному моделюванні САПР, але лише як допоміжна система проміжних побудов.

### 2.3 Поверхневе моделювання

На відміну від каркасного представлення, моделювання за допомогою поверхонь має істотно менше обмежень, так як дозволяє визначити своєрідну «оболонку» тривимірного об'єкту.

Геометричні моделі на основі поверхневого представлення забезпечують якісну візуалізацію, більш простий перехід до побудови розрахункових сіток для чисельного моделювання, забезпечують ряд корисних функцій, таких як побудова просторових сполучень, перетинів, визначення лінії перетину оболонок, генерацію креслярських проєкцій.



Рис. 2. Поверхнева модель теоретичних обводів космічного корабля Буран

Поверхневі моделі розрізняються за способом апроксимації поверхні. Простіший в частині структури даних і використовуваних

для роботи з ними алгоритмів є полігональна апроксимація, коли поверхня представляється набором взаємопов'язаних плоских граней (на практиці частіше за все трикутних). Така апроксимація легко будується, для неї розроблені ефективні алгоритми реалістичної візуалізації, вона не вимагає значних обчислювальних ресурсів, хоча може бути і витратною по пам'яті. Головним обмеженням подібної апроксимації є те, що вона має фіксовану точність, тобто відхилення положення модельної поверхні від «ідеальної». Для досягнення високої точності потрібно створення сіток з малим кроком, що веде до зростання вимог до обчислювальних можливостей системи.

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

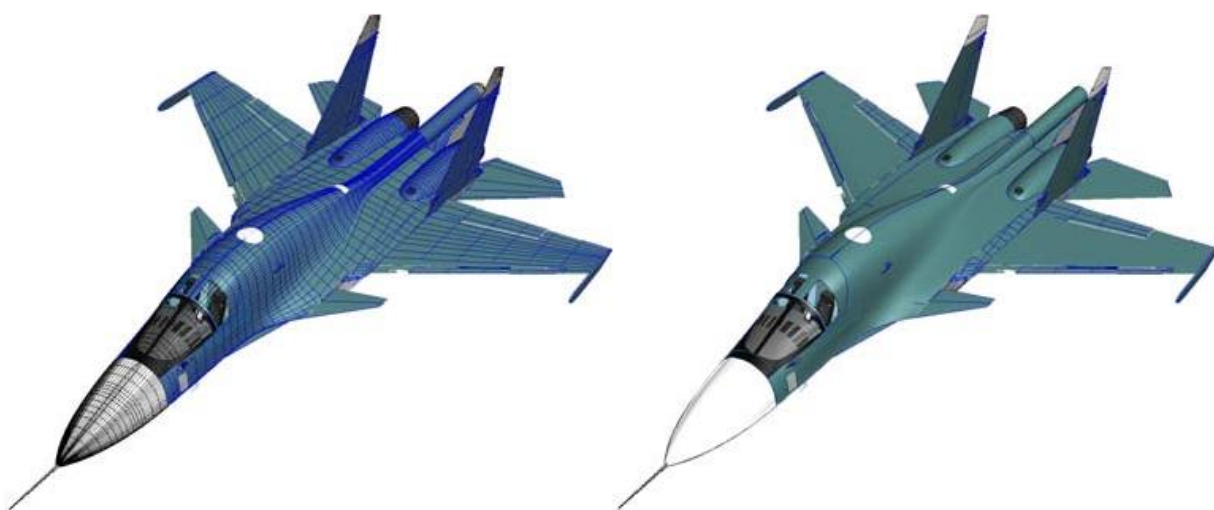


Рис. 3. Апроксимація теоретичних обводів літака:  
а) полігональна; б) NURBS-апроксимація.

Певною мірою NURBS-представлення є розвитком полігонального, але на відміну від нього, дозволяє описувати не тільки плоскі, а й криволінійні грані і ребра (кромки). Сукупність таких граней з загальними ребрами за традицією називають сіткою.

Технологія NURBS забезпечує реалізацію ряду функціональних можливостей, недоступних або істотно обмежених при використанні



каркасного або полігонального подання: обчислення радіуса кривизни поверхонь, їх гладке стикування, побудова траєкторій на поверхні (це особливо важливо для підготовки програм для верстатів з ЧПК), отримання точних зображень, спроектованих на площину, наприклад, для отримання креслярських видів та ін.

Традиційно в САПР використовуються кілька типових контекстів створення поверхонь:

- плоска поверхня – утворюється заповненням плоского контуру (2D-ескіз або набір замкнутих крайок, що лежать в одній площині);

- поверхня витяжки – утворюється в результаті плоскопаралельного витягування замкнутого або розімкнутого 2D-ескіза в напрямку, перпендикулярному площині ескізу, або під довільним кутом;

- поверхня обертання – утворюється обертанням довільного профілю щодо вісі;

- поверхня по траєкторії – утворюється рухом ескізу уздовж криволінійної твірної (2D або 3D-ескіз, 3D-крива) і довільного числа напрямних кривих (2D або 3D-ескіз, 3D-крива), які деформують вихідний контур;

- поверхня по перетинах – аналог поверхні по траєкторії; відрізняється тим, що будується не по одному, а по декільком поперечним перетинам з направляючими кривими;

- гранична поверхня – аналог поверхні по перетинах; відрізняється тим, що будується за кількома довільно зорієнтованими в просторі 3D-кромкам інших поверхонь із збереженням дотичності до них і з дотриманням безперервності по другій похідній (гладка стиковка); при побудові можуть використовуватися напрямні криві;

- поверхня вільної форми – будується розбиттям сітки з керуючими точками на поверхні грані 3D-моделі; зміна форми поверхні досягається перетягуванням контрольних точок;

- еквідистантна поверхня – утворюється зміщенням на певну відстань від існуючих граней або поверхонь;

- поверхня роз'єму – використовується при проектуванні ливарних форм в якості допоміжної геометрії для поділу матриці та пуансона;

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

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

У тому випадку, якщо встановлений програмний зв'язок між допоміжним каркасом і результуючою поверхнею, моделювання стає асоціативним, при цьому зміна каркасних елементів веде до автоматичної зміни геометрії поверхонь, побудованих з використанням цього контексту.

## 2.4 Твердотіле моделювання

Незважаючи на досить широкі можливості, які надає поверхневе моделювання, воно має ряд істотних обмежень з точки зору використання в САПР. До них можна віднести зокрема неможливість обчислення об'єму, маси і моментів інерції об'єктів, обмеженість застосування до них булевих операцій (віднімання, об'єднання, перетину). Ці обмеження знімаються при використанні твердотілого моделювання, яке на сьогодні стало стандартом в 3D CAD / CAM / CAE-системах.

Існують різні алгоритмічні методи представлення твердотілих моделей: воксельний, використання октарних та бінарних дерев. Проте в практиці САПР найбільш широке застосування має технологія, що базується на граничному поданні елементарних однозв'язних тіл (BREP, Boundary Representation) в сукупності з конструктивною геометрією (CSG, Constructive Solid Geometry), яка описує операції над тілами.

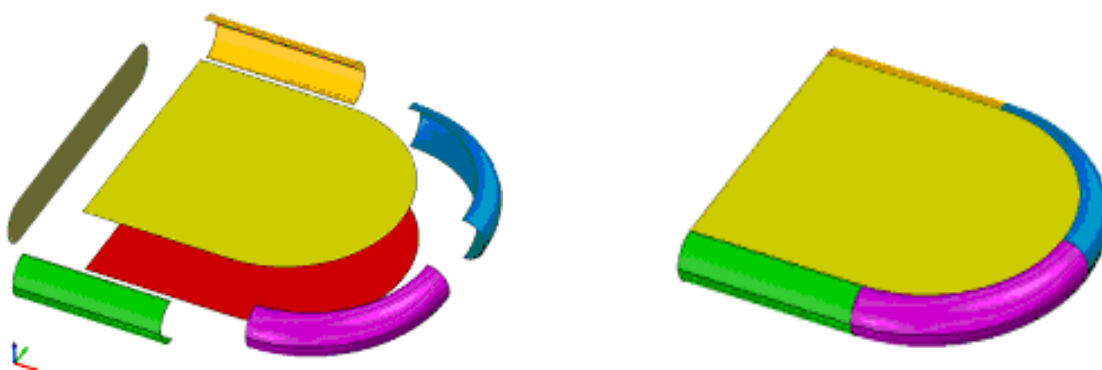


Рис. 4. BREP-представлення простих твердих тіл

Граничне представлення визначає суцільне тіло та неявно (шляхом опису) обмежує його поверхні. Сутність BREP-представлення полягає в тому, що тверде тіло описує замкнута просторова область, обмежена набором елементарних тонких поверхонь (граней) з загальними контурами (ребрами) на границі поверхонь і ознакою зовнішньої або внутрішньої сторони поверхні, а

також забезпечує наступний ряд операцій, визначених над тілами:

- перевірка правильності завдання, для однозв'язних тіл здійснюється за формулою Ейлера, 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 кривини поверхні;
- знаходження точки перетину з контуром або іншою поверхнею;
- визначення положення точки відносно поверхні.

Для опису складних тіл, які моделюють об'єкти реального світу та отримуються обробкою матеріалу або нероз'ємним складанням, використовується ієрархічна структура. Ця структура описує тіла як послідовність застосування булевих операцій над набором елементарних твердих тіл, - так зване CSG-дерево (Constructive Solid Geometry Tree).

В рамках CSG-представлення для опису складових твердих тіл визначені наступні операції над вихідними (а) елементарними тілами:

- віднімання (б);
- об'єднання (в);
- перетин (г).

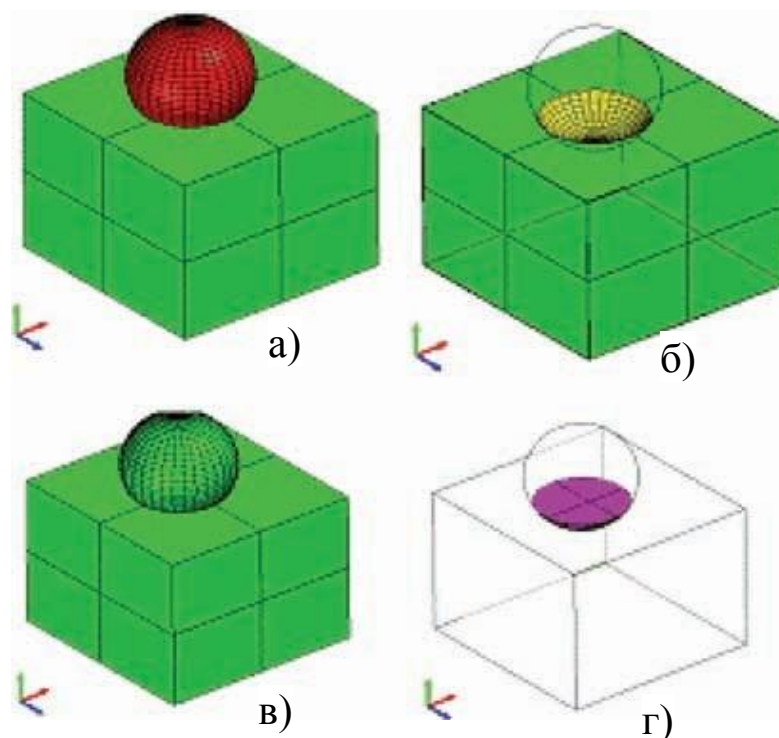


Рис. 5. Булеві операції над простими твердими тілами

Таким чином, будь-яке складене тіло може бути описано у вигляді традиційного рівняння з булевих функцій, в якому аргументами є або елементарні тіла, або інші складові тіла. Це представлення називають деревом побудов. Таке представлення, крім зручності модифікації геометрії результуючого тіла, дозволяє істотно знизити вимоги до обчислювальних ресурсів за рахунок застосування оптимізуючих процедур до дерева побудов.

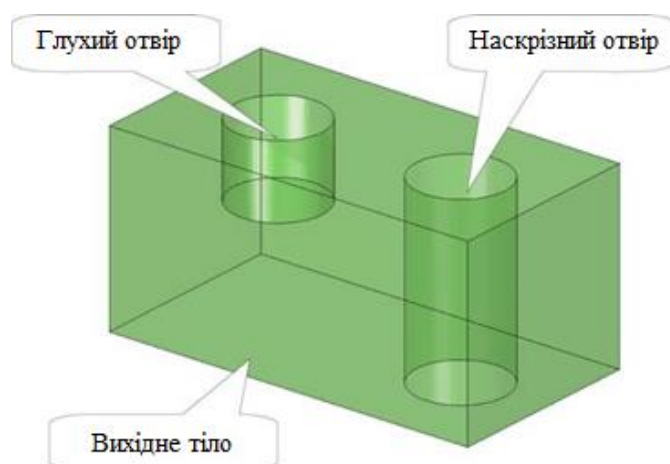


Рис. 6. CSG-представлення складних твердих тіл

Подання твердих тіл у вигляді дерева побудов (рис. 7) зручно також і з точки зору організації призначеного для користувача інтерфейсу, що забезпечує наочний і швидкий доступ до будь-якого елемента, що входить в опис геометрії тіла, його модифікацію і отримання звітної інформації.

## 2.5 Основні поняття параметричного конструювання

Процес проектування і конструювання, як правило, інтерактивний і передбачає перебір кількох варіантів, тому спрощення та автоматизація побудови моделі майбутнього виробу є однією з найважливіших задач САПР. Одним з широко поширених методів вирішення цього завдання є параметричне проектування (або просто параметризація), засноване на моделюванні деталей і виробів з використанням параметрів елементів моделі і співвідношень між цими параметрами. Параметризація дозволяє за короткий час перебрати за допомогою зміни параметрів або геометричних відносин різні конструктивні схеми, вибрати оптимальні рішення і уникнути принципових помилок.

Визначити мету конструювання досить просто, проте процес

пошуку оптимального рішення складний і вимагає гармонійного поєднання різних методів автоматизованого конструювання виробів. Параметричне конструювання як методологія автоматизованої розробки є основою для паралельного ведення проектно-конструкторських робіт і дозволяє уточнити кінцеву мету конструювання вже на ранніх стадіях реалізації проекту, що і визначає ефективність поєднання процесів конструювання, інженерного аналізу та виробництва на єдиному часовому інтервалі і їх взаємної інтеграції. Параметризація передбачає використання різних видів взаємозв'язків між компонентами моделі і додатками, які використовують дану модель.

Використання технології параметричного конструювання дозволяє, при необхідності, легко змінювати форму моделі, в результаті чого користувач має можливість швидко і ефективно отримувати альтернативні конструкції або переглянути концепцію виробу в цілому. При відсутності коштів забезпечення параметричного конструювання модель визначена однозначно тільки своєю геометрією, тому внесення навіть найменших змін вимагає значних трудових витрат. Зміни ж параметричної моделі виконуються так само легко, як і зміни значення розмірів на креслениках.

Параметризація - концепція, яка охоплює всі методи для вирішення задач конструювання. Важливою особливістю сучасної концепції параметричного конструювання є, перш за все, можливість створення геометричної моделі з використанням зв'язків і правил, які можуть перевизначатися і доповнюватися на будь-якому етапі її створення. Зв'язки представляються у вигляді розмірних, геометричних і алгебраїчних співвідношень. Правила ж визначаються як умови виконання базової операції (наприклад, наскрізний або «глухий» отвір).

Параметричне проектування істотно відрізняється від звичайного двомірного креслення або тривимірного моделювання. У разі параметричного проектування створюється по суті математична модель об'єктів з параметрами, при зміні яких відбуваються зміни конфігурації і розмірів деталей, їх взаємного розташування в збірках.

На практиці застосовується досить багато різних методів параметризації, на сьогоднішній день немає однозначно кращого рішення.

В сучасних САПР середнього і важкого класів наявність

параметричної моделі закладено в ідеологію самих САПР. Існування параметричного опису об'єкта є базою для всього процесу проектування.

Виділяють наступні види параметризації:

- таблична параметризація;
- ієрархічна параметризація;
- варіаційна (розмірна) параметризація;
- геометрична параметризація.

## 2.6 Види параметризації

**Таблична параметризація** полягає в створенні таблиці параметрів типових деталей. Створення нового примірника деталі проводиться шляхом вибору з таблиці типорозмірів. Можливості табличній параметризації вельми обмежені, оскільки завдання довільних нових значень параметрів і геометричних відносин зазвичай неможливо.

Однак таблична параметризація знаходить широке застосування у всіх параметричних САПР, оскільки дозволяє істотно спростити і прискорити створення бібліотек стандартних і типових деталей, а також їх застосування в процесі конструкторського проектування.

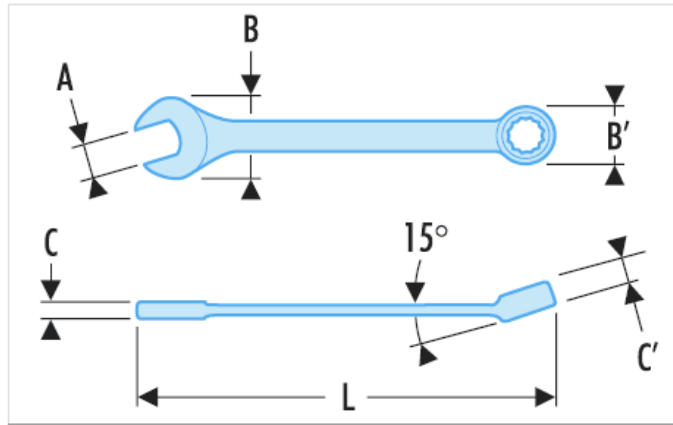
**Ієрархічна параметризація** (параметризація на основі історії побудов) полягає в тому, що в ході побудови моделі вся послідовність побудови відображається в окремому вікні у вигляді «дерева побудови». У ньому перераховані всі існуючі в моделі допоміжні елементи, ескізи і виконані операції в порядку їх створення.

Крім «дерева побудови» моделі, система запам'ятовує не тільки порядок її формування, а й ієрархію її елементів (відносини між елементами). Наприклад, збірки - підзбірки - деталі. Параметризація на основі історії побудов присутня практично у всіх САПР, які використовують тривимірне твердотіле параметричне моделювання. Зазвичай такий тип параметричного моделювання поєднується з варіаційною та/або геометричною параметризацією.

**Варіаційна, або розмірна, параметризація** заснована на побудові ескізів (з накладенням на об'єкти ескізу різних параметричних зв'язків) і накладенні користувачем обмежень у вигляді системи рівнянь, що визначають залежності між параметрами.

**Technical document(s)**

- Dimension drawing



Please select one table row below:

Item code	A (")	B (mm)	B' (mm)	C (mm)	C' (mm)	L (mm)	Mass (g)
> 40.1/4	1/4"	15	10.4	3.8	6	113	18
> 40.5/16	5/16"	19.5	12.9	4.3	6	130	28
> 40.11/32	11/32"	21.6	14.2	4.3	6.1	137	34
> 40.3/8	3/8"	23.6	15.9	4.8	6.6	145	40
> 40.7/16	7/16"	25.6	17	5.1	7	153	53
> 40.1/2	1/2"	29.4	19.8	5.6	8	170	70
> 40.9/16	9/16"	31.5	21.2	6	8.5	178	80
> 40.5/8	5/8"	35.5	23.8	6.9	9.8	193	104
> 40.11/16	11/16"	37.5	25	7	10.3	200	120
> 40.3/4	3/4"	41.8	29.4	7.6	11.3	216	160
> 40.13/16	13/16"	44	29.4	8	11.6	224	172
> 40.7/8	7/8"	48	32	8.2	12.3	248	212
> 40.15/16	15/16"	52	34.7	8.5	12.9	268	270
> 40.1"	1"	54.4	36.3	8.5	13.2	270	297
> 40.1 1/16	1" 1/16	59	39	8.8	14	294	355
> 40.1 1/8	1" 1/8	61.6	41	9	14.4	305	394
> 40.1 1/4	1" 1/4	68.8	46	10.1	16	356	575

Рис. 7. Таблична параметрична модель гайкового ключа

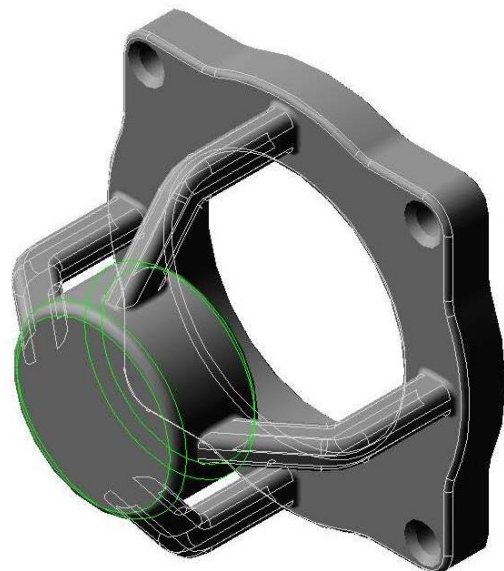


Рис. 8. Геометрична модель з «деревом побудови»

Процес створення параметричної моделі з використанням варіаційної параметризації виглядає наступним чином:

- На першому етапі створюється ескіз (профіль) для тривимірної операції. На ескіз накладаються необхідні параметричні зв'язки.

- Далі ескіз «оброзмірюється». Уточнюються окремі розміри профілю. На цьому етапі окремі розміри можна позначити як змінні (наприклад, присвоїти ім'я Length) і задати залежності інших розмірів від цих змінних у вигляді формул (наприклад,  $Length / 2$ ).

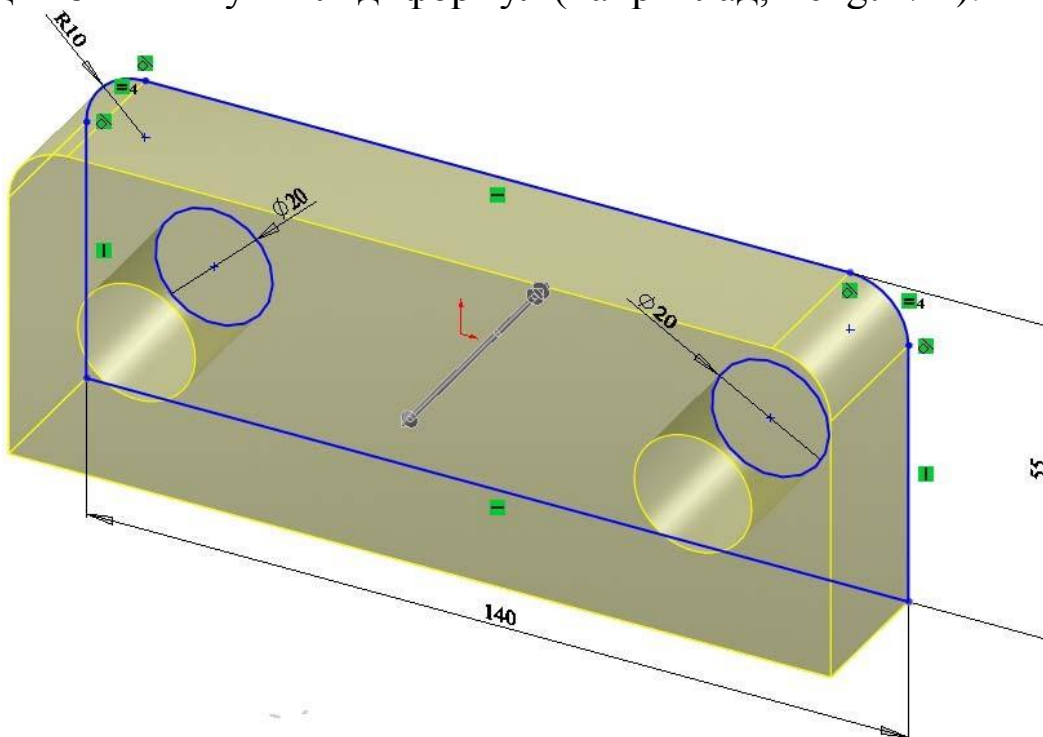


Рис. 9. Геометрична модель з варіаційною параметризацією

- Проводиться тривимірна операція (наприклад, видавлювання). Значення атрибутів операції теж служить параметром (наприклад, величина видавлювання).

- У разі необхідності створення збірки взаємне розташування компонентів збірки задається шляхом вказівки сполучень між ними (збіг, паралельність або перпендикулярність граней і ребер, концентричність центрів отворів, розташування об'єктів на відстані або під кутом один до одного та ін.).

Варіаційна параметризація дозволяє легко змінювати форму ескизу або величину параметрів операцій, що дозволяє зручно модифікувати тривимірну модель.

**Геометричною параметризацією** називається параметричне моделювання, при якому геометрія кожного параметричного об'єкта перераховується в залежності від положення батьківських об'єктів,



його параметрів і змінних.

Параметрична модель в разі геометричній параметризації складається з елементів побудови та елементів зображення. Елементи побудови (конструкторські або допоміжні лінії) задають параметричні зв'язку. До елементів зображення належать лінії зображення (якими обводяться конструкторські лінії), а також елементи оформлення (розміри, написи, штрихування і т. д.).

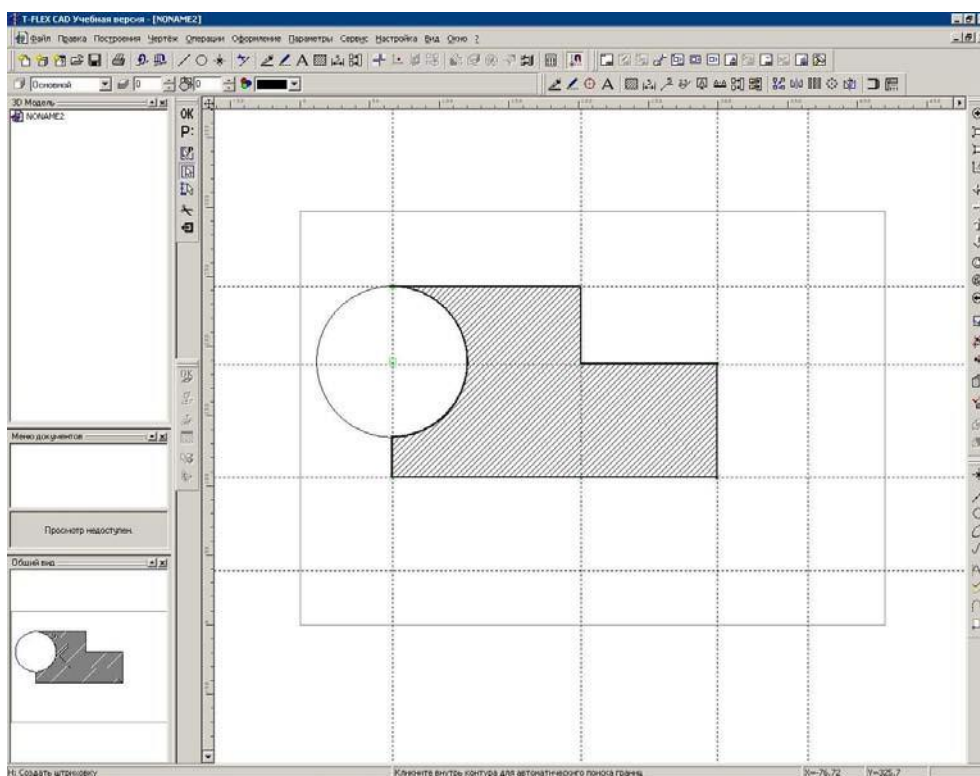


Рис. 10. Геометрична параметризація контуру з використанням напрямних ліній

Одні елементи побудови можуть залежати від інших елементів побудови. Елементи побудови можуть включати в себе і параметри (наприклад, радіус кола або кут нахилу прямої). При зміні одного з елементів моделі всі залежні від нього елементи перебудовуються відповідно до своїх параметрів і способів їх завдання.

Процес створення параметричної моделі методом геометричної параметризації виглядає наступним чином:

- На першому етапі конструктор задає геометрію профілю конструкторськими лініями, відзначає ключові точки.
- Потім проставляє розміри між конструкторськими лініями. На цьому етапі можна задати залежність розмірів друг від друга.
- Потім обводять конструкторські лінії лініями зображення -

виходить профіль, з яким можна здійснювати різні тривимірні операції.

Наступні етапи в цілому аналогічні процесу моделювання з використанням методу варіаційної параметризації. Геометрична параметризація забезпечує можливість більш гнучкого редагування моделі. У разі необхідності внесення незапланованих змін в геометрію моделі необов'язково видаляти вихідні лінії побудови (це може привести до втрати асоціативних взаємозв'язків між елементами моделі), можна провести нову лінію побудови і перенести на неї лінію зображення.

## 2.7 Асоціативне та об'єктно-орієнтоване конструювання

Асоціативне конструювання (Associative Design) - це узагальнююча назва технології параметричного конструювання, що забезпечує єдиний, в тому числі і двосторонній, інформаційний взаємозв'язок між геометричною моделлю, розрахунковими моделями, програмами для виготовлення виробу на верстатах з ЧПК, конструкторською документацією, базою даних проекту.

Використання технології асоціативного конструювання дозволяє, при необхідності, змінювати форму моделі і отримувати автоматично перебудовані кресленики або траєкторії інструменту для обробки на верстатах з ЧПК.

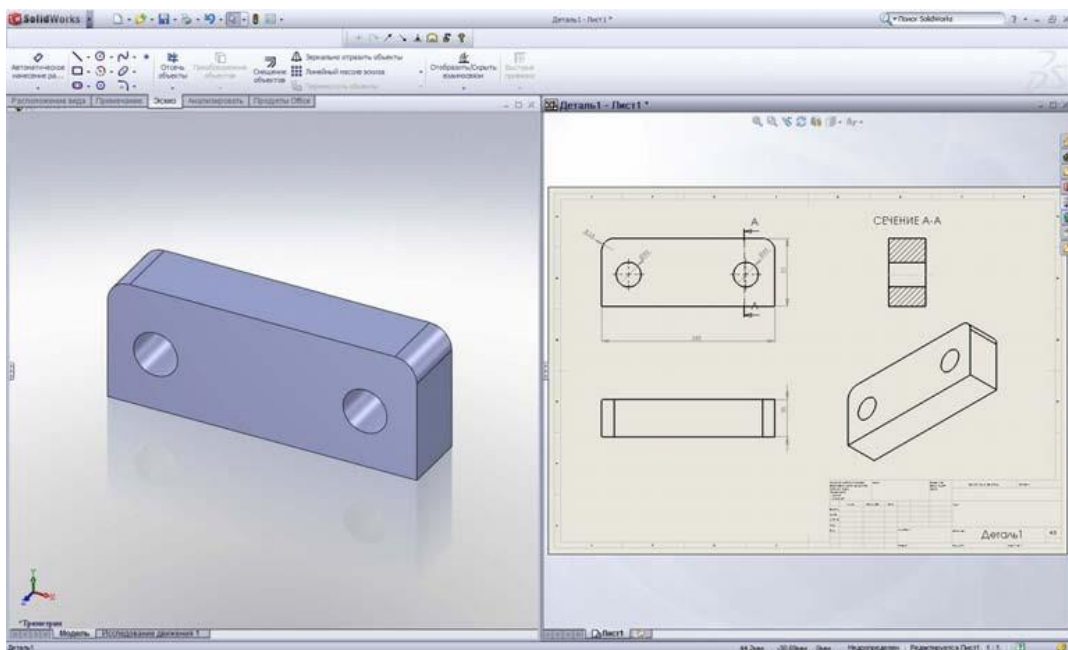


Рис. 11. Конструкторський кресленик, асоціативно пов'язаний з геометричною моделлю

Окремим випадком асоціативного конструювання є технологія асоціативної геометрії, яку також називають спрямованою асоціативністю (directed associativity). Це технологія асоціативного конструювання, яка базується на безпосередніх взаємозв'язках між об'єктами. Найпростіший приклад - визначення паралельності двох відрізків. Відрізок *A* може бути визначений паралельно відрізку *B*. В результаті при переміщенні відрізка *B* відрізок *A* також змінить своє положення зі збереженням орієнтації по відношенню до відрізка *B*. Власне ж положення відрізка *A* не може бути безпосередньо змінено. Можна визначити відрізки *A* і *B* як паралельні й іншим способом так, що можна буде змінювати положення будь-якого з цих відрізків, задовольняючи умовам інших накладених зв'язків. Це випадок так званої «м'якої» асоціативності. Перевага використання асоціативної геометрії - швидкість. Недолік же полягає в тому, що користувач повинен повністю визначити розміри і орієнтацію елемента, перш ніж приступити до створення наступного елемента.

Об'єктно-орієнтоване конструювання (Feature-Based Modeling) засновано на тому, що конструктивні елементи геометрії (features) є об'єктами з визначеною поведінкою і структурою даних. Це один з підходів асоціативного конструювання, за допомогою якого визначається поведінка геометричної форми при подальших змінах.

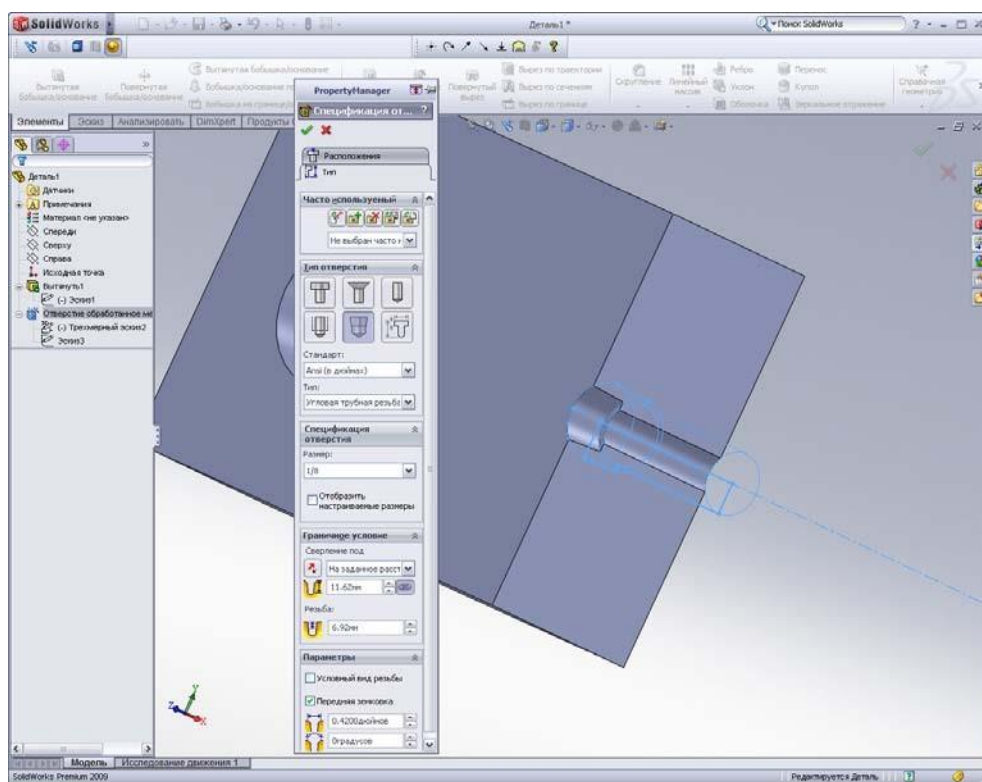


Рис. 12. Конструювання отворів як спеціального об'єкта побудови

Цей підхід реалізований на основі певного набору правил і атрибутів, що задаються при виконанні базової операції, на додаток до вже заданих зв'язків і асоціативної геометрії. Базові операції є високоефективним інструментом для створення геометричної моделі конструкції, інженерного аналізу або виготовлення.

Об'єктно-орієнтоване моделювання надає в розпорядження користувача макрофункції, раніше визначені як послідовність дій, які використовують булеві операції. Наприклад, наскрізний отвір може бути представлено як булева операція віднімання і циліндр достатньої довжини, більшої, ніж поточна товщина деталі. Але якщо модель стане товще, то циліндр вже не буде мати достатньої довжини і отвір перетвориться в «глухий». Однак під наскрізним отвором розуміється додаткове правило, яке визначає наскрізний прохід в зазначеному місці через тіло моделі, незалежно від того, змінилася форма моделі чи ні. Базові операції також можуть мати і додаткові атрибути, які використовуються в інших додатках, таких як аналіз і виготовлення. Обов'язкові вимоги до базових операцій при об'єктно-орієнтованому моделюванні:

- базова операція, яка використовується, має бути повністю визначеною. Після виконання базової операції її топологія повинна зберігатися і розпізнаватися як базова операція (отвір, паз та ін.), а також надавати можливість зміни її геометричних параметрів (діаметр, глибина та ін.);

- визначення базової операції повинно включати в себе правила, що визначають поведінку геометричної форми, а також засоби контролю за дотриманням цих правил після виконання базової операції. Наприклад, наскрізний отвір має залишатися таким, в той час як форма моделі піддається зміні;

- для підвищення ефективності процесу паралельної розробки програми для інженерного аналізу і виготовлення повинні мати доступ до опису об'єкта, не вимагаючи при цьому від користувача інформації про об'єкт, використаної раніше при виконанні базової операції.

Вже існуючі типи конструктивних елементів можуть бути використані для створення нових типів шляхом успадкування всіх властивостей вихідних об'єктів і додавання нових атрибутів і поведінки. Обов'язковим компонентом об'єктно-орієнтованого конструювання є механізми створення конструктивного елемента і його оновлення шляхом зміни даних кожного елемента. Запуск

механізму поновлення при зміні даних автоматично ініціює операцію його створення, а так як ці механізми успадковуються всіма конструктивними елементами від базового типу, забезпечується сумісність структур даних для всього набору елементів. Конструктивні елементи включені в загальний цикл поновлення, таким чином, будь-яка зміна даних призводить до автоматичного оновлення моделі відповідно до правил побудови і даними для кожного елемента.

### **Питання для самоконтролю**

1. Назвіть види геометричних моделей.
2. Вкажіть особливості каркасних моделей.
3. В чому відмінність між поверхневим та твердотілим моделюванням?
4. Назвіть переваги та недоліки каркасних моделей.
5. Назвіть види тривимірних моделей.
6. У чом полягає суть параметричного конструювання?
7. Назвіть види параметризації.
8. Поясніть сутність табличної параметризації.
9. Поясніть відмінності між ієрархічною параметризацією і варіаційною параметризацією.
10. Вкажіть особливості ієрархічної параметризації.
11. Для чого використовується асоціативна параметризація?
12. У чому суть методу об'єктно-орієнтованого конструювання?
13. Якими механізмами здійснюється зміна моделі при зміні даних, які входять до конструктивного елемента?
14. Опишіть етапи створення параметричної моделі методом геометричної параметризації.
15. Вкажіть переваги та недоліки параметричного конструювання.

## **ТЕМА 3**

### **ХАРАКТЕРИСТИКА СУЧАСНИХ CAD-СИСТЕМ**

- 3.1 Загальна характеристика 2D CAD-систем
- 3.2 Ієрархія об'єктів в CAD-системах
- 3.3 Спеціалізовані модулі 2D-програм
- 3.4 Загальна характеристика 3D CAD-систем
- 3.5 Генератор креслень
- 3.6 Системи промислового дизайну

#### **3.1 Загальна характеристика 2D CAD-систем**

Проектування за допомогою комп'ютера (Computer-Aided Design, CAD) - термін, який використовується для позначення широкого спектру комп'ютерних інструментів, які допомагають інженерам, архітекторам та іншим професіоналам в здійсненні проектування. Будучи ключовим інструментом в рамках концепції управління життєвим циклом виробу (PLM), CAD-системи включають в себе безліч програмних і апаратних засобів - від систем двовимірного креслення до тривимірного параметричного моделювання поверхонь і об'ємних тіл.

По областям застосування автоматизоване проектування традиційно підрозділяється на архітектурно-будівельне (AEC CAD), механічне (MCAD), проектування електронних приладів і пристроїв (EDA).

Історично CAD-системи почалися з 2D-програм, що забезпечують створення традиційних креслеників в електронному вигляді. Це значно знизило трудомісткість створення і особливо модифікації і тиражування конструкторської документації. 2D CAD залишаються досить популярними і в даний час. Вони використовуються і як самостійні системи, і як допоміжні додатки до 3D-систем, забезпечуючи професійне оформлення креслярської документації. Креслярські CAD-системи є універсальним інструментом, так як їх образотворчі можливості використовуються для виконання як машинобудівних, так і архітектурно-будівельних креслеників, електричних і гідравлічних принципових схем, планів місцевості та ін.

Найбільш типовим представником сімейства креслярських

редакторів є AutoCAD, який, незважаючи на те, що в ньому присутні і інструменти 3D-модеювання, часто використовується саме як «електронний кульман». Полегшена версія AutoCAD LT призначена тільки для 2D-креслення.

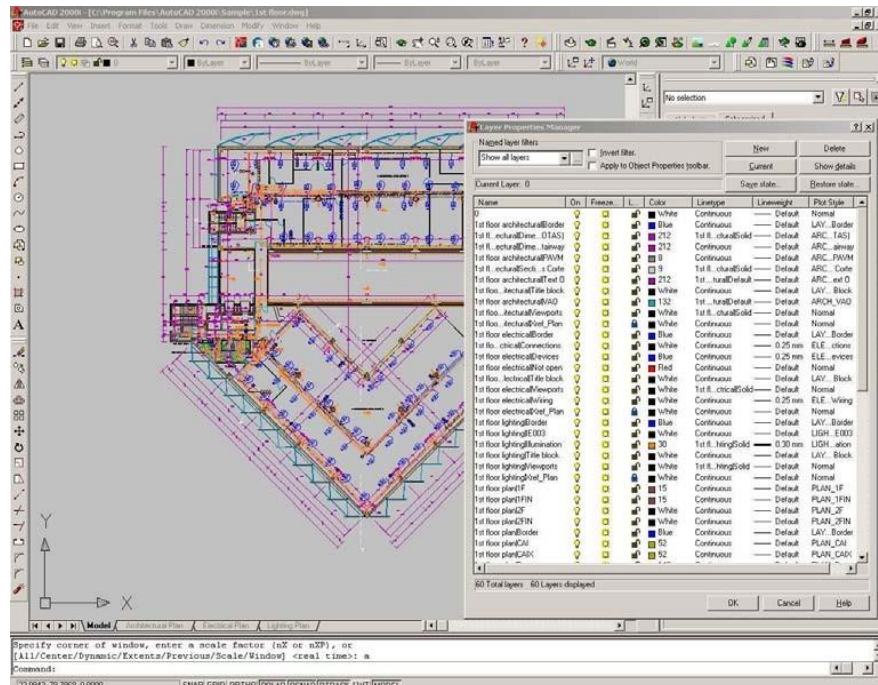


Рис. 1. Робоча сесія AutoCAD

У складі розвинуеного 2D-пакета традиційно існують інструменти побудови типових геометричних елементів: ліній, дуг, кіл, еліпсів, сплайнів кривих. Для прискорення процесу креслення також автоматизовано побудови прямокутників, багатокутників, заливку області різними типами штриховок. При побудові широко використовуються так звані об'єктні прив'язки - автоматичне визначення координат базових точок, побудови по вже існуючим в кресленні об'єктам: граничній точці або середині відрізка, найближчій точці на контурі, центру дуги або кола та ін.

Спеціалізовані інструменти забезпечують створення текстових елементів, виносок і анотацій. Автоматизоване проставлення розмірів забезпечує швидке «образмірювання» креслень відповідно до національних і галузевих стандартів.

### 3.2 Ієрархія об'єктів в CAD-системах

Традиційно ієрархія об'єктів в 2D CAD заснована на парадигмі шарів (layers). При такому підході кресленики складаються з стопки прозорих аркушів, для яких можливе управління видимістю,

доступом до редагування, загальними параметрами для всіх об'єктів шару - типом, кольором ліній та ін. Таким чином, різні елементи кресленника можна і потрібно розташовувати на своїх шарах, наприклад, на плані будівлі так можна розділити контури стін, елементи електропроводки, трубопроводів.

Всередині шару об'єкти можна збирати в групи (groups), які при базовому редагуванні мають себе поводити (переміщення, повороти, масштабування) як єдиний цілісний об'єкт.

Окремою сутністю є так звані блоки (blocks), що представляють собою окремі кресленники, завантажені в окрему область пам'яті, а їх вставки (inserts) в основний кресленник є лише посиланням на блоки, забезпечені інформацією про місце вставки, кут повороту і масштаб. Цей механізм дозволяє істотно економити ресурси комп'ютера і час на створення типових і елементів, які часто зустрічаються на кресленнику. Блоки можуть бути оформлені і як зовнішні посилання на безпосередньо файли кресленників (external reference). В цьому випадку забезпечуються базові можливості колективної роботи, коли окремі елементи кресленника створюються різними розробниками.

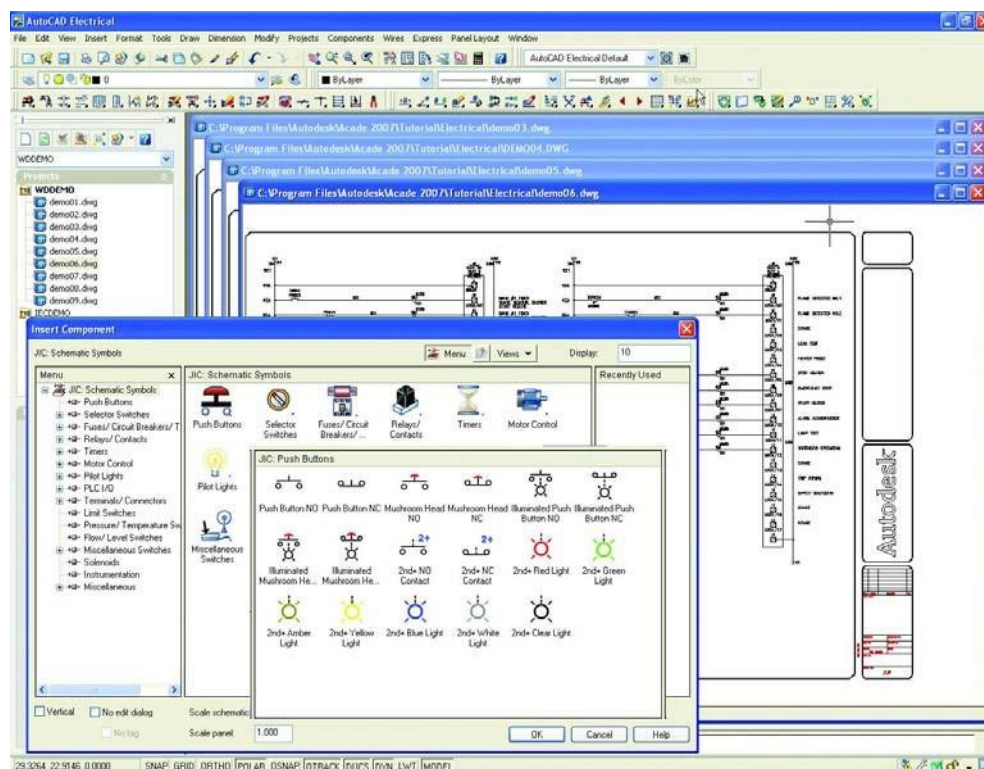


Рис. 2. Використання блоків позначень електротехнічних компонент в AutoCAD Electric

Інтерфейс користувача в інших системах 2D-креслення є в достатній мірі загальноприйнятим і часто повторює інтерфейс



AutoCAD. Він заснований на використанні системи команд, які можна вводити в командний рядок, а також продубльований набором меню і піктограм, які по суті автоматизовано виконують ті ж команди. Вказівка координат може проводитися як шляхом їх введення в командний рядок, так і шляхом позиціонування перехрестя курсору в полі кресленика. Цим же курсором елементи креслення можуть вибиратися як індивідуально, так і груповим методом. При виборі геометричних елементів з'являються рукоятки (handles), що забезпечують можливість детального редагування об'єктів, а також надаються панелі параметрів (property sheets), що дають можливість налаштовувати числові і текстові параметри об'єктів.

### **3.3 Спеціалізовані модулі 2D-програм**

Для підвищення ефективності роботи в конкретних прикладних областях на базі універсальних редакторів прийнято створювати набори спеціалізованих модулів, що прискорюють виконання типових креслярських операцій: побудова стін, трубопроводів, кріпильних елементів та ін. Такі програмні модулі, як правило, доповнюються великими наборами бібліотек типових конструктивних елементів.

Таким чином, на базі універсальної платформи AutoCAD створені кілька спеціалізованих видів продуктів: AutoCAD Architecture для архітектурно-будівельного проектування, AutoCAD Civil 3D - для проектування інфраструктури, AutoCAD Electrical для роботи з електротехнічними проектами, AutoCAD Map 3D для створення і управління картографічними даними, AutoCAD Mechanical для виконання машинобудівних креслень, AutoCAD MEP для проектування інженерних систем будівель, AutoCAD Raster Design для обробки раніше напрацьованої паперової документації, що дозволяє підчищати, редагувати і створювати креслення, що складаються зі змішаних растрових і векторних даних, а також перетворювати відскановані кресленики у векторну форму.

Серед західних компаній - розробників САПР позначилася тенденція випускати «полегшені» безкоштовно поширювані 2D-версії креслярських редакторів своїх 3D-систем. На думку розробників, це повинно стимулювати ринок до більш швидкого переходу з технологій двовимірного проектування на об'ємне параметричне

моделювання. Такі додатки випустили Dassault SolidWorks - DWGseries, засновані на технології IntelliCAD, Siemens PLM Software (колишня Unigraphics) - Solid Edge 2D Drafting.

Solid Edge 2D Drafting полегшує перехід з двовимірного кресленика в AutoCAD за допомогою майстрів імпорту, сумісних шрифтів і колірних схем, підтримки зовнішніх посилань типу XREF і роботи в просторі листа / моделі, а також багатьох інших функцій. Освоєння системи спрощується за рахунок наявності вбудованої системи пошуку команд Command Finder - користувачеві немає необхідності запам'ятовувати еквіваленти команд AutoCAD.

Останнім часом стали популярні недорогі або безкоштовні клони AutoCAD, що базуються на платформі IntelliCAD, альтернативні базовій програмі для комп'ютерного креслення і найпростішого 3D-моделювання. Власником коду - IntelliCAD Technology Consortium (ІТС) - є міжнародна організація (консорціум), яка об'єднує розробників САПР. Цілями організації є розробка і підтримка DWG-сумісної програмної платформи IntelliCAD. Учасники консорціуму «надбудовують» і адаптують платформу, а також займаються просуванням системи під власними торговими марками.

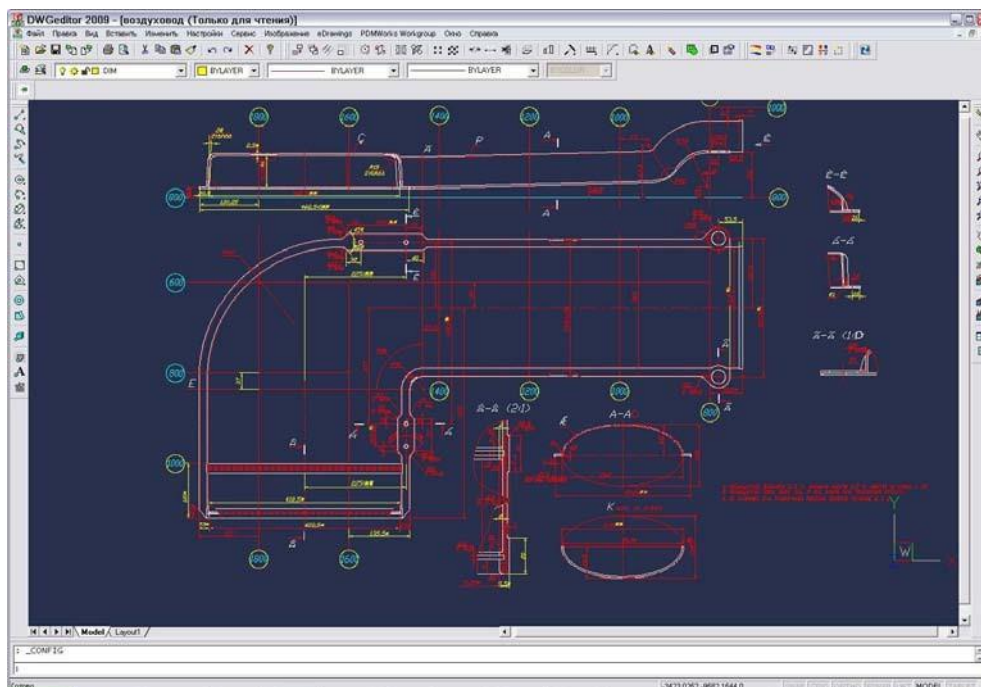


Рис. 5.4. SolidWorks DWG Editor побудований на платформі IntelliCAD

САПР IntelliCAD будується на програмній бібліотеці DWGdirect, розробленій некомерційною організацією Open Design Alliance.

Основним «робочим» форматом файлів IntelliCAD є DWG. Інтерфейс систем на базі IntelliCAD дуже схожий на інтерфейс AutoCAD. Засоби користувальницької адаптації IntelliCAD сумісні з аналогічними засобами AutoCAD. До переваг цих систем можна віднести невисоку вартість - в межах 10-20% від вартості повного пакету AutoCAD. Однак є і недоліки, серед яких, перш за все, обмежена сумісність з оригінальним форматом файлів DWG від Autodesk. Найбільш частою і типовою причиною проблем сумісності є випадок, коли файл був створений в одному з вертикальних додатків на базі AutoCAD та містить специфічні елементи. В силу цих особливостей обмінюватися даними між AutoCAD і IntelliCAD слід з достатньою мірою обережності.

На сучасному ринку досить широко також поширені креслярські редактори, такі як КОМПАС-Графік компанії АСКОН, T-FLEX CAD 2D компанії «Топ Системи» і ін. Їх відмітною особливістю можна назвати ретельну підтримку вимог ЕСКД і СНиП, а також високу ступінь параметризації креслярської геометрії.

2D-системи з моменту їх появи пробрели величезну популярність в силу ряду об'єктивних і суб'єктивних причин:

- вони безумовно знизили трудомісткість оформлення якісної конструкторської та технологічної документації, так як відпала сама потреба в такій штатній одиниці, як кресляр;
- спростилася і здешевшала процедура архівування креслеників;
- потужні можливості модифікації і перевикористання вже існуючих креслеників багаторазово підвищили ефективність праці конструкторів;
- з'явилася можливість більш швидкого обміну інформацією при колективній роботі над проектами;
- завдяки очевидній аналогії з роботою на кульмані 2D-системи досить просто впроваджуються і легко освоюються інженерами при мінімумі витрат на навчання;
- креслярські системи ефективно працюють на недорогому обладнанні, тому витрати на їх впровадження відносно невеликі;
- впровадження 2D CAD-систем не вимагало змін в існуючу виробничу структуру.

Проте вже практично з самого початку впровадження і використання 2D-систем було видно і їх недоліки, що перешкоджають більш повній автоматизації інженерної праці, підвищенню її ефективності, переходу до автоматизованого

виробництва. Справа в тому, що кресленик - документ, за своєю суттю призначений для сприйняття людиною, тобто схематичне, часом неточне, символічне зображення проєктованих виробів. Неточність зображень заповнюється великою кількістю спеціалізованих символів: розмірів, виносок, умовних позначень, написів та ін. Для повної автоматизації потрібна інформація, адаптована саме для комп'ютерної обробки та інтерпретації. Цьому завданню 2D-креслення в їх класичному вигляді не відповідають, для цього потрібні повноцінні просторові (3D) і, навіть, просторово-тимчасові (4D) дані.

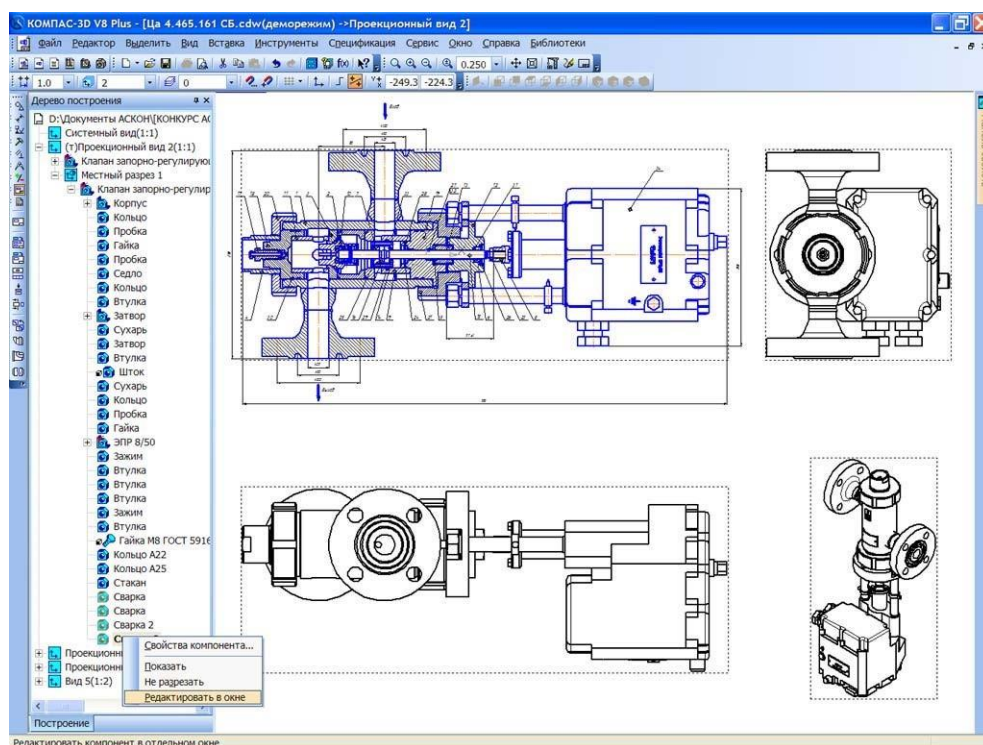


Рис. 5. Виконання креслення в КОМПАС-Графік

### 3.4 Загальна характеристика 3D CAD-систем

Системи двомірного креслення далеко не в повній мірі задовольняють вимогам автоматизації проектної, конструкторської діяльності, завданням технологічної підготовки виробництва. Найчастіше на машинобудівних підприємствах, і не тільки, вирішується наступне коло конструкторських і виробничих завдань:

- опрацювання зовнішнього вигляду і внутрішньої компоновки вузлів і агрегатів;
- аналіз і оптимізація напружень, переміщень, коливань, теплових і температурних режимів;

- підготовка керуючих програм для верстатів з ЧПК;
- підготовка анімації збірок, реалістичних зображень виробу для презентацій, технічної документації (інструкцій по збиранню) та ін.;
- контроль якості виробів за допомогою лазерних вимірювальних пристроїв або координатно-вимірювальних машин;
- створення фізичних зразків методами швидкого прототипування;
- створення специфікацій, оцінки вартості, закупівель і планування ресурсів виробництва.

Всі ці завдання вимагають, щоб проектувальник переніс задуманий ним в його уяві образ майбутнього виробу не у вигляді схематичного запису, а у вигляді віртуальної просторової моделі, яка описує не тільки геометрію, але і механічні, фізичні, оптичні та інші властивості матеріалів.

Для задоволення вказаних вище потреб було розроблено 3D CAD-системи. Першою такою системою вважається CATIA (Computer Aided Three-dimensional Interactive Application), яку було випущено французькою компанією Dassault Systemes в 1981 році. Перші 3D-системи використовувалися в основному в аерокосмічній, автомобільній та інших машинобудівних галузях, тому для них став використовуватися термін MCAD (mechanical computer aided design).

Так як робота з 3D-даними вимагає істотних обчислювальних потужностей, спочатку всі ці системи працювали на потужних спеціалізованих робочих станціях під керуванням ОС Unix. Подібні рішення мали високу вартість як закупівлі ліцензій програмного забезпечення і самого обладнання, так і супроводу в процесі використання. Так тривало до кінця 1995 року, поки не вийшла перша версія системи SolidWorks.

Спочатку ця система була створена однойменною компанією для роботи на відносно недорогих персональних комп'ютерах під управлінням операційної системи Windows. Крім того, система мала надзвичайно дружній призначений для користувача інтерфейс. Протягом першого року SolidWorks придбала дуже високу популярність - 3D MCAD стала доступна сотням тисяч інженерів.

Слідом за SolidWorks з'явилися і інші продукти для персональних комп'ютерів - Autodesk Inventor, SolidEdge, російські КОМПАС 3D, T-FLEX CAD, а існуючі на ринку гравці почали спішно переносити свої системи з середовища робочих станцій Unix на персональні компютери з Windows. До кінця 90-х років практично не залишилося

реально використовуваних MCAD-систем для інших платформ. Тим часом SolidWorks, користуючись позицією технологічного лідера, постійно вдосконалюється, нові версії випускаються щорічно, і система донині залишається лідируючою 3D MCAD в світі. Решта систем, які з'явилися потім, багато в чому йдуть по її стопах. Ті, що існували раніше, запозичивши багато чого у SolidWorks в основному зосередилися на автоматизації великих корпорацій і виробництв. Архітектура 3D MCAD, реалізована в SolidWorks, стала по суті класичною. Більшість продуктів цього класу влаштовані аналогічно, тому, розглядаючи устрій сучасної 3D MCAD-системи, будемо орієнтуватися на цей зразок, при необхідності обумовлюючи особливості, реалізовані в тих чи інших продуктах.

Практично всі сучасні 3D MCAD складаються з трьох основних модулів:

- редактора геометрії деталей;
- редактора збірок;
- асоціативного генератора креслеників і специфікацій.

На практиці ці модулі доповнюються вбудованими сервісними компонентами: системами експрес-розрахунків, верифікації даних, доступу до бібліотек зовнішніх компонент, майстрами побудови типових і стандартних елементів геометрії, підсистемами реалістичної візуалізації, сполучення з системами документообігу (PDM), обміну даними з іншими системами та ін. Розглянемо основні модулі.

Модулями створення і модифікації деталей сучасних 3D MCAD-систем є гібридні редактори, які забезпечують створення твердотілої геометрії тіла, поверхонь і об'ємних ескізів, побудованих на основі стандартних геометричних ядер. Найбільш часто використовуються ядра Parasolid (NX, SolidEdge, SolidWorks) або ACIS (Inventor, SpaceClaim, KeyCreator). Деякі системи, такі як CATIA і Pro/Engineer, використовують геометричні ядра власної розробки. У свою чергу, редактор деталі, як правило, складається з двох найважливіших компонентів:

- редактора ескізів;
- редактора 3D-геометрії.

Редактор ескізів служить для побудови параметризованих 2D-контурів, які використовуються потім в якості вихідних і допоміжних каркасів. Користувачеві доступні інструменти побудови ліній, дуг, еліпсів, сплайнів, численні способи встановлення взаємозв'язків між

ними і створення сполучень. Як площині побудови ескізів можуть бути використані базові координатні площині, довільні площині, визначені самим користувачем, або плоскі грані вже побудованої раніше геометрії.

Потім по створеному ескізу будується власне об'ємна геометрія - тверде тіло або поверхня, одним з типових способів:

- видавлювання контуру з різними кінцевими умовами, в тому числі на задану довжину або уздовж іншого контуру;
- обертання контуру навколо заданої осі;
- по заданих контурах з використанням декількох твірних.

В якості додаткових, але де-факто обов'язкових, засобів побудови геометрії служать інструменти створення фасок, заокруглень постійного і змінного радіуса, отвори складної форми, сполучення поверхонь, перетворення поверхонь в листове тіло та ін.

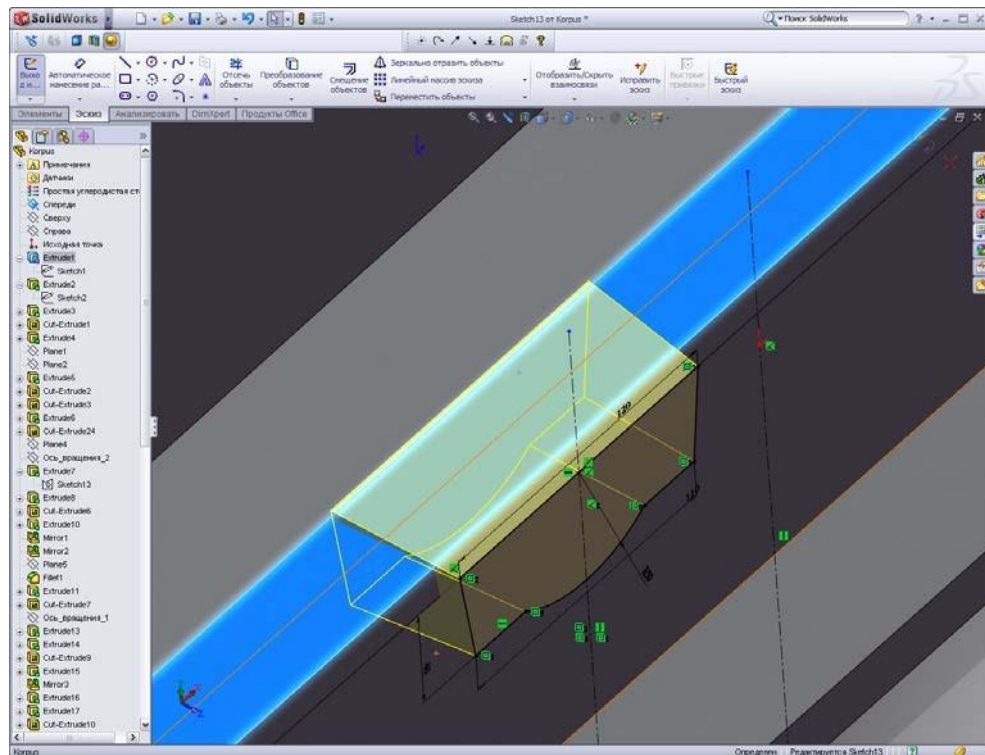


Рис. 6. Редагування ескізу бобишки на площині стінки деталі корпуса

Для підвищення ефективності і зниження трудомісткості роботи створені також численні майстри створення складних, але часто вживаних елементів геометрії: різьби, зубчасті колеса, гвинтові поверхні, типові профілі та ін.

Послідовність операцій по створенню геометрії, їх контекст і параметри зберігаються в дереві побудов, яке відображається також у

вигляді дерева в інтерфейсі. Таким чином, щоб відредагувати будь-який елемент, потрібно вибрати його в дереві побудов, модифікувати, і ці зміни автоматично поширяться вниз по дереву побудов. Це загальноприйнята у всіх сучасних 3D MCAD технологія редагування. Однак в 2007 році компанія Siemens PLM Software в своїх продуктах NX6 і SolidEdge ST на додаток до такого підходу реалізувала так звану синхронну технологію редагування, що дозволяє вносити зміни не тільки від кореня дерева, а й від його кінця, що істотно розширило можливості систем.

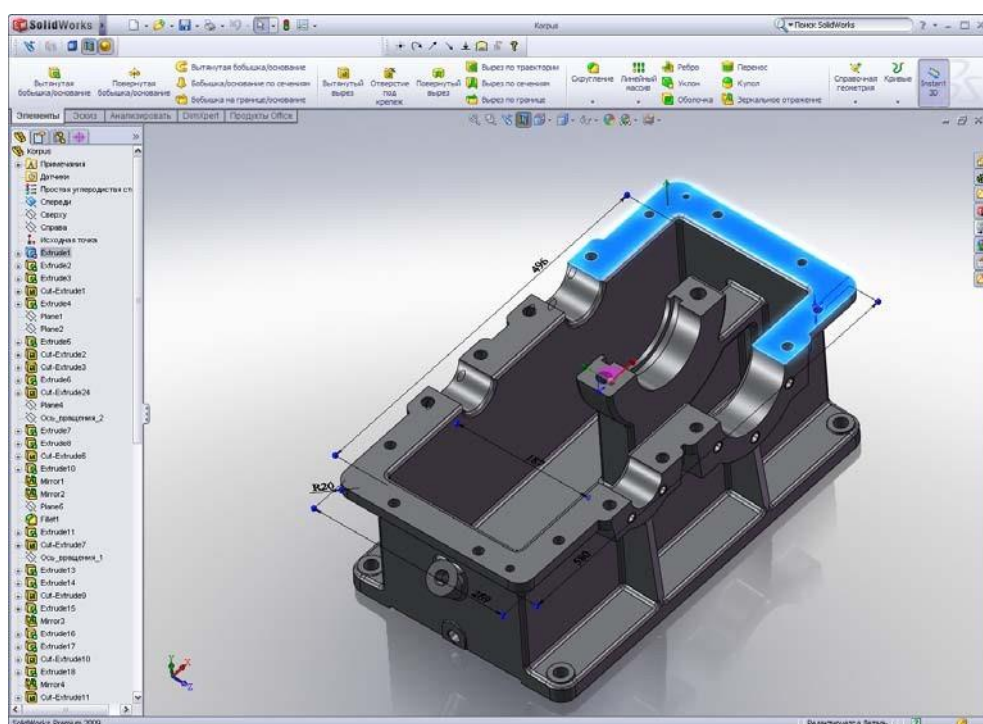


Рис. 7. Редагування деталі корпусу

Модуль створення деталей забезпечує збереження всієї інформації в єдиному файлі, її експорт в поширені формати обміну даними або імпорт з них заготовок для подальшого опрацювання. Найчастіше імпортована геометрія не містить інформації про дерево побудов, а тільки геометричні дані про грані і ребра, що визначають тіло. Це суттєво ускладнює роботу. Щоб обійти цю проблему, використовуються різні системи розпізнавання сутностей (feature recognition), що дозволяють в автоматичному чи напівавтоматичному режимі визначити тіла витягування, обертання, отвори, заокруглення, фаски та ін.

Потужним засобом моделювання виробів є створення збірок. З точки зору складання, деталі являють собою вже готові



конструктивні елементи, для яких необхідно лише задати положення в просторі і додати обмеження рухливості відповідно до виконуваних ними в виробі функцій. Тому складальна модель в поняттях 3D CAD - це файл, який містить декілька окремих моделей деталей, з описом того, як вони розташовані щодо один одного. Для отримання даного файлу в 3D CAD можуть використовуватися два принципово різних методи проектування.

**Проектування «знизу вгору».** Загальний принцип створення складальної моделі за цим методом повністю відповідає реальному виробничому процесу складання. Тобто попередньо потрібно створити моделі деталей (причому моделі можуть створюватися незалежно), а потім об'єднати їх в єдину конструкцію шляхом накладення обмежень на просторове положення об'єктів. Для циліндричних поверхонь можуть бути задані зв'язки концентричності, для площин - їх збіг, паралельність з відстанню між ними, перпендикулярність або кут взаємного розташування.

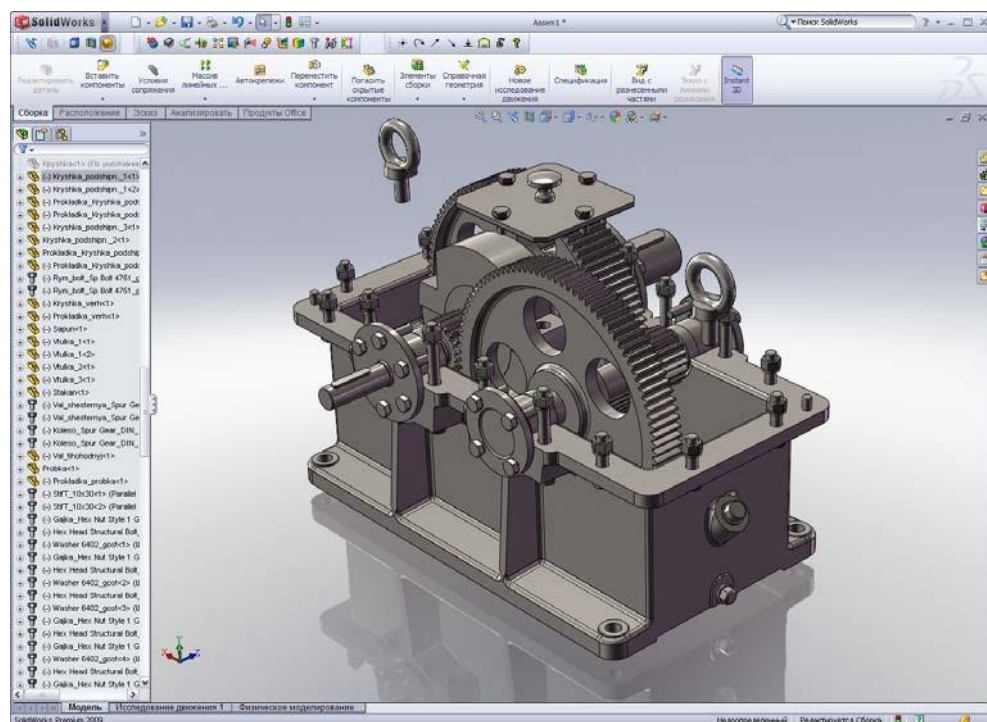


Рис. 8. Редагування збірки (верхня кришка редуктора для наочності прихована)

**Проектування «зверху вниз».** З точки зору процесу конструювання, це ідеологічно більш правильний підхід, так як моделі всіх деталей розробляються в контексті однієї збірки, тобто на основі геометричних елементів інших деталей (простіше кажучи,

прив'язуються до їх гранях, ребрах або вершин). Відповідно до даного методу спочатку створювана збірка є вихідною інформацією для виконання подальшого деталювання. Працюючи зі складанням в такому стилі, можна в міру необхідності створювати нові деталі, визначаючи їх розміри і розташування в просторі щодо інших елементів збірки.

В обох випадках накладені зв'язки дозволяють автоматично перебудувувати всю збірку при зміні параметрів будь-якої з деталей, що входять у вузол. Для проектування виробів, одержуваних за допомогою зварювання, система дозволяє виконати об'єднання кількох деталей, що зварюються в одну.

При додаванні деталі або підзбірки в ієрархічному дереві збірки автоматично з'являється об'єкт з ім'ям компонента. Дерево збірки відображається у вікні проектування. Будь-який елемент складання може бути закріпленим або вільним. Закріплені компоненти не переносяться операціями переміщення. Вільний компонент може бути перенесений з урахуванням призначених зв'язків або без їх урахування.

### **3.5 Генератор креслень**

Який би не був рівень розвитку тривимірного моделювання, конструкторська документація у вигляді креслень, специфікацій і технічних умов ще довгий час буде залишатися основним документом на виробництві. З цієї причини модулі для її створення присутні в будь-якій САД-системі. Процес створення 2D-креслень як документальної основи проекту практично повністю автоматизований. Однак це не означає, що конструктор не в змозі вплинути на кінцевий результат. У більшості 3D САД-систем передбачено два способи отримання креслень: автоматичне генерування та інтерактивний режим.

У першому випадку всі побудови ведуться на основі твердотілої моделі деталі або збірки, а в другому - використовуються інструменти, аналогічні інструментам для створення ескізів, або традиційні офісні додатки (наприклад, Excel). До інформації, що обробляється, відносяться:

- зображення конструкції (види, розрізи, перерізи);
- розмірна інформація;
- текстова інформація.

Процес отримання всього цього і є повний цикл розробки конструкторської документації.

Якщо кресленик виконується по вже існуючій 3D-моделі, то природно, що отримання будь-якого зображення повністю автоматизовано. Вид - це всього лише проекційне зображення одного з незліченних просторових положень моделі. Види діляться на наступні групи: основні, додаткові і місцеві. Однак окремі види, як геометричні конструкції, можна створювати декількома способами, тому зазвичай передбачений цілий набір відповідних команд.

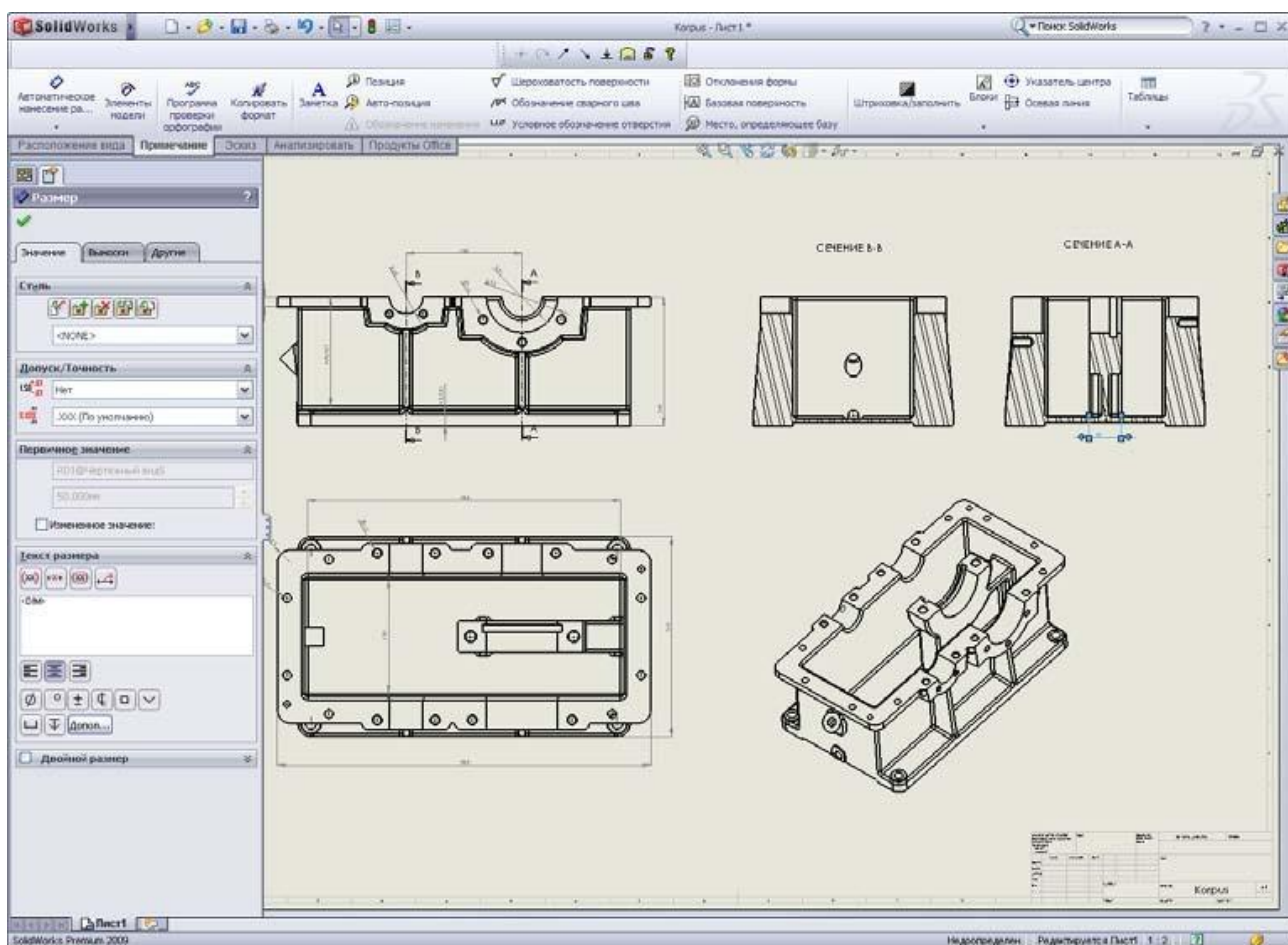


Рис. 9. Асоціативний кресленик, автоматично створений за 3D-моделі деталі

Проставлення розмірів є найважливішим кроком у побудові кресленика. Справа в тому, що положення кожного геометричного об'єкта необхідно однозначно задати в просторі. Робити це в абсолютній системі координат для інженера незручно як з точки зору виготовлення, так і з точки зору контролю просторового положення поверхонь, тому використовується відносна система координат (наприклад, завдання відстані між двома вершинами). Чисельні

значення подібних відстаней і називаються розмірами.

Оскільки сучасна 3D CAD - це параметрична система, то за кожен розмір відповідає окрема змінна. Саме з цієї причини об'єкти кресленика автоматично збільшуються або зменшуються відповідно до змін, що вносяться в 3D-модель, незалежно від того, яка їх довжина була спочатку зображена на кресленику. У системах з двобічною асоціативністю можливий і зворотний режим - зміни на кресленику спричиняють за собою модифікацію відповідних елементів 3D-моделі.

Можна також створити кресленик використовуючи і тільки двомірні геометричні фігури, без посилання на існуючі моделі або збірки. Побудовані геометричні фігури можуть управлятися взаємозв'язками (паралельність, дотичність та ін.), а також параметричними розмірами. Інструменти і взаємозв'язки ескізу працюють в документі кресленика таким же чином, як і в документі деталі або збірки. Єдиною відмінністю є те, що замість побудови на поверхнях або гранях моделі побудова здійснюється безпосередньо на аркуші кресленика або в активному вигляді.

### **3.6 Системи промислового дизайну**

Дещо осібно від класичних MCAD-систем стоять рішення для опрацювання зовнішнього вигляду майбутніх виробів. Їх застосування найбільш характерно для галузей, які виробляють промислову продукцію для кінцевого споживача: автомобілебудування, виробництва побутової техніки та електроніки, упаковки та ін. Дизайн будь-якого виробу - це результат спільної роботи дизайнерів, конструкторів, маркетологів. І чим оригінальніше та індивідуальніше буде цей дизайн, тим більш привабливим виявиться даний продукт серед інших рівних. Найчастіше підприємства конкурують при рівній ціні і однаково високій функціональності продукції, тому дизайн виробу стає єдиною різницею, яка вплине на споживача.

Для систем автоматизованого дизайну, на відміну від промислових MCAD-систем, характерні велика гнучкість у створенні довільних форм, можливості поєднання векторної, растрової та об'ємної графіки, потужні засоби реалістичної візуалізації.

Як правило, 3D-пакети для промислового дизайну будуються на архітектурі, що не спирається на історію побудови і технологічні обмеження. На будь-якій стадії проектування існує можливість

підбору потрібної форми шляхом видозміни наявної. Для того щоб дослідити варіанти 3D-форм, використовують динамічне моделювання. У той же час, на відміну від просто художнього опрацювання, в завдання промислового дизайну входить і точне опрацювання геометрії. На етапі остаточного формування елементів виробу дуже важлива можливість точного моделювання поверхонь. Маючи перед собою таку модель, керівники проектного відділу та відділу маркетингу можуть прийняти рішення про затвердження виробу і його передачу у виробництво.

На підставі даних про поверхні виробу підбираються інструменти для їх виготовлення на верстатах. В автомобільній промисловості виконується додаткова перевірка, чи відповідають зовнішні поверхні вимогам стандартів для так званих поверхонь класу А, для яких безперервність поверхонь, що сполучаються по загальній дотичній і мають рівну кривину в зоні сполучення - обов'язкові умови для того, щоб виріб був технологічним у виготовленні.

### **Питання для самоконтролю**

1. Які переваги дає використання електронних креслеників перед паперовою технологією?
2. Який механізм використовується в 2D CAD-системах для управління видимістю груп образотворчих елементів?
3. Для чого використовуються механізми блоків і зовнішніх посилань на креслениках?
4. У чому полягають обмеження використання 2D-систем і креслярської документації?
5. Які додаткові можливості дає 3D-проекування в порівнянні з 2D-кресленням?
6. Назвіть основні інструментальні компоненти сучасної 3D MCAD-системи.
7. Який метод проектування реалізується при побудові деталей в контексті збірки?
8. У чому вигоди використання асоціативного побудови креслеників по 3D-моделі?
9. Опишіть способи проектування збірок, назвіть їх переваги та недоліки.
10. Які особливості характерні для систем промислового дизайну?

## **ТЕМА 4**

### **СПЕЦІАЛІЗОВАНІ CAD-СИСТЕМИ.**

### **CAE СИСТЕМИ ДЛЯ ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКІВ**

- 4.1 AEC CAD - архітектурно-будівельні САПР
- 4.2 EDA-проекування електронних пристроїв
- 4.3 Геоінформаційні системи
- 4.4 Характеристика CAE-систем
- 4.5 Метод кінцевих елементів
- 4.6 Моделювання кінематіки
- 4.7 Аерогідродінамічні розрахунки
- 4.8 Електростатика та електродінаміка

#### **4.1 AEC CAD - архітектурно-будівельні САПР**

По мірі розвитку САПР і адаптації їх до завдань конкретних галузей стали з'являтися спочатку набори додаткових спеціалізованих модулів до універсальних систем, потім і повністю спеціалізовані САПР, орієнтовані на ефективне виконання проектних робіт в специфічних областях застосування. Згодом, крім традиційної MCAD, сформувалися цілі самостійні підгалузі САПР, такі як:

- архітектурно-будівельна (AEC, Architecture Engineering and Construction);
- електронна (EDA, Electronic Design Automation);
- геоінформаційна (GIS, GeoInformatic Systems) та ін.

Загалом асортимент спеціалізованих систем великий, розглянемо найбільш показові приклади.

Історія архітектурно-будівельних додатків починається зі створення бібліотек будівельних елементів і спеціалізованих команд в двовимірних креслярських редакторах, в першу чергу AutoCAD. Їх використання знижувало трудомісткість виконання проектних і робочих креслеників будівель, мостів та інших споруд. Так як в архітектурному проектуванні особливе значення має візуальне уявлення майбутніх споруд, поряд з креслярськими редакторами широко використовувалися і використовуються тривимірні дизайнерські пакети, такі як 3D Max, Lightwave, SoftImage та ін. Візуалізація забезпечує самоконтроль з боку архітектора і значно більш просте сприйняття проекту замовником.



Рис. 1. 2D-кресленик проекту фасаду будівлі

Однак такий симбіоз недостатньо ефективний, так як практично відсутня асоціативний автоматичний зв'язок між проектною документацією і віртуальним макетом будівлі для візуалізації. Кожна зміна, що вноситься в кресленик або в макет, вимагає його ручного відтворення в паралельній системі. Крім зайвої трудомісткості, такий підхід загрожує помилками, розбіжністю візуальних і проектних даних.

Тому на рубежі 80-90-х років ХХ століття з'явилася концепція віртуальної будівлі, яка набирає все більшої популярності. Найбільш типовими зразками продуктів, що реалізують цю концепцію, можна назвати пакет ArchiCAD компанії Graphisoft, сімейство програм Revit компанії Autodesk, комплекс All Plan компанії Nemetchek.

Концепція віртуальної будівлі (virtual building) дозволяє управляти інформацією про весь життєвий цикл будівлі. На відміну від простої тривимірної моделі, віртуальна будівля містить комплексну інформацію - це тривимірна цифрова база даних, яка відстежує всі елементи, що складають проект: площі і об'єми, опис кімнат, ціну матеріалів і готових елементів і виробів: вікон, дверей, комунікацій та ін.

Концепція віртуальної будівлі передбачає новий підхід до проектування: архітектор займається безпосередньо дизайном проекту, а САПР автоматично формує документацію. У той час, коли проектувальник «зводить» стіни, розміщує перекриття, вбудовує вікна і двері, споруджує дах, програма створює єдину базу даних

## тривимірної моделі будівлі.

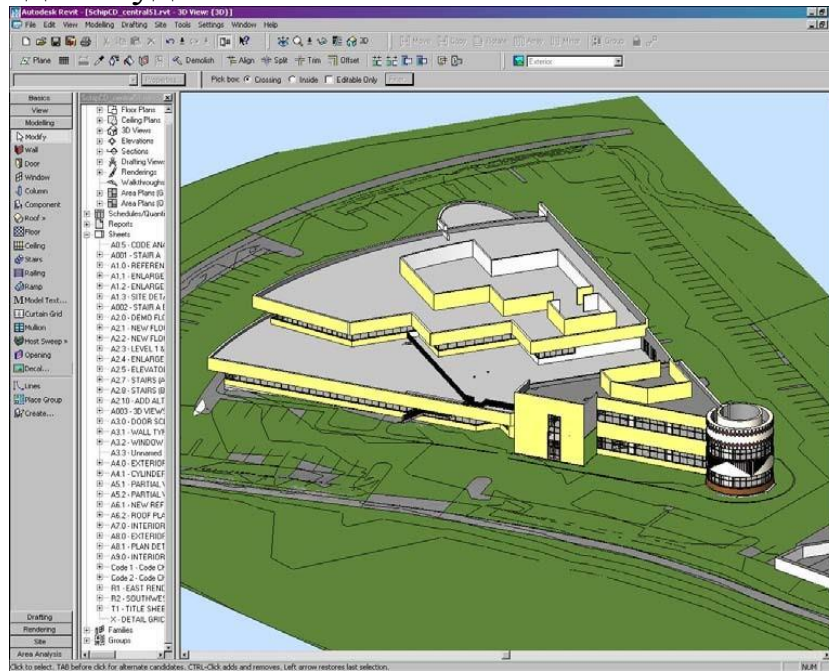
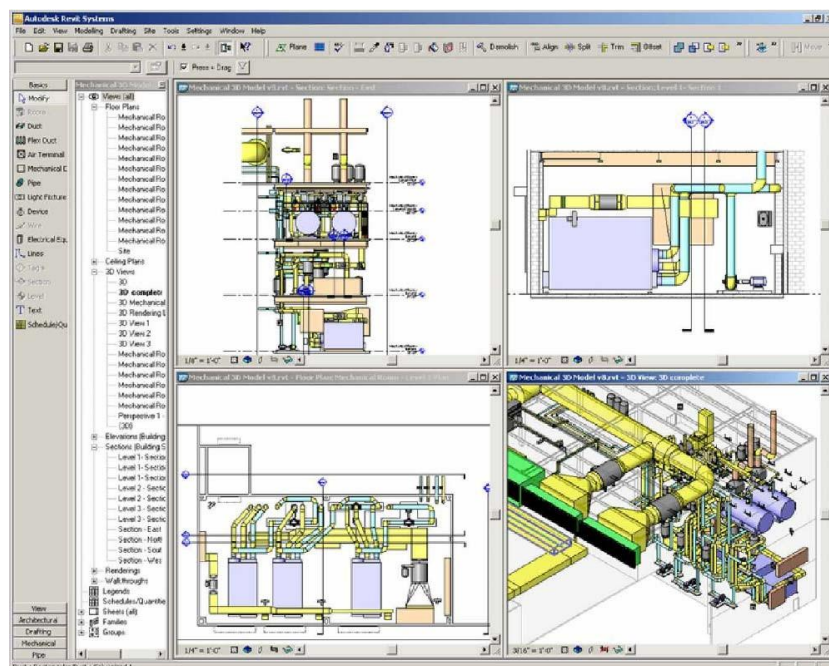


Рис. 2. Комплексний тривимірний проект будівлі

Зміни, що вносяться до проекту, відображаються у всій звітній документації: в планах поверхів, розрізах, фасадах, кошторисних завданнях, 3D-моделі і фотозображеннях. Інтелектуальні об'єкти (двері, вікна, колони, перекриття та ін.) постійно взаємодіють з іншими елементами конструкції будівлі або споруди: вікно вбудовується в стіну, перекриття спирається на колону, під скат даху споруджується несуча конструкція та ін. У подальшому з бази може бути залучена вся необхідна інформація.





### Рис. 3. Цифрова модель інженерних комунікацій будівлі

В результаті віртуальна будівля стає єдиним і універсальним інструментом організації колективної роботи всіх учасників створення і реалізації проекту. Головний архітектор отримує інформацію про поточний стан проекту в незалежному електронному форматі (цю інформацію він гарантовано зможе переглянути), відображає зміни, які необхідно внести в проект, і передає їх співробітникам для подальшої роботи.

Кошторисники отримують із загальної проектної бази різні специфікації, відомості, кошторисні завдання, а конструктори - тривимірну модель і параметри несучих конструкцій для розрахунків на міцність; інженери - постійно оновлювані актуальні кресленики поверхових планів, вузлів і фрагментів будівлі в заданому масштабі. Для будівельників можна пропрацювати графіки робіт, а в подальшому передавати на площадку кресленик і відеоролики, що відображають різні етапи будівництва або демонтажу будівлі.

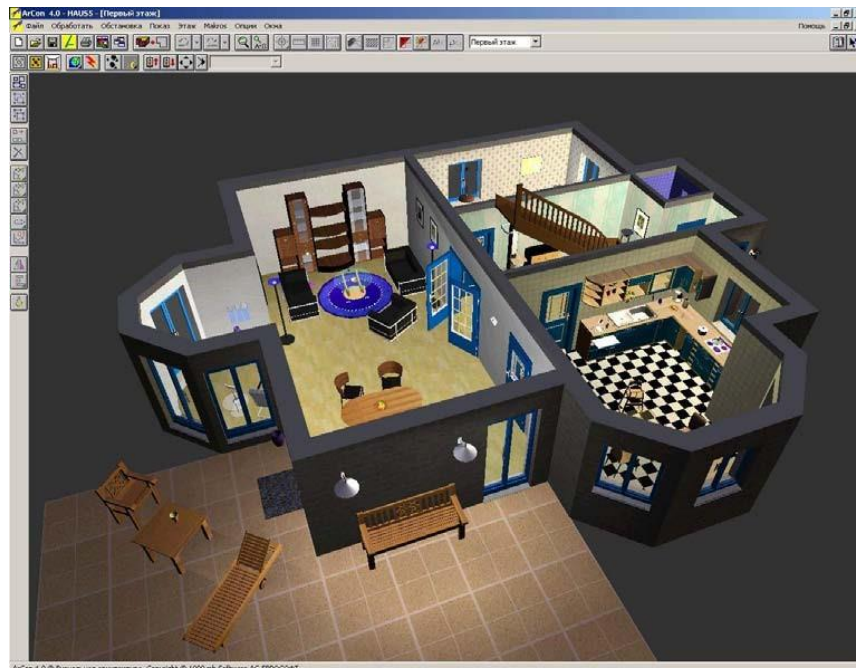


Рис. 4. Візуалізація інтер'єру житлового будинку (другий поверх умовно прихований)

Працюючи з тією же віртуальною будівлею, що і архітектор, агент з нерухомості має можливість легко отримати точні параметри приміщень та оцінити їх площу, показати клієнтам вигляд з будь-якої точки і навіть запросити їх здійснити віртуальну подорож по будівлі. Дизайнери інтер'єрів можуть починати працювати на етапі

концептуальної моделі, використовуючи той же проект, що і архітектор. Після завершення етапу проектування будівельникам видаються специфікації, відомості, звіти, графіки будівництва, робочі плани та інша інформація.

Так як вся інформація виходить з одного джерела - віртуальної будівлі, вона завжди актуальна і відповідає поточному стану проекту. Інформація про зміни, що вносяться будь-яким з учасників проекту, стає доступною його колегам.

## **4.2 EDA-проекування електронних пристроїв**

EDA (Electronic Design Automation - Автоматизація проектування електроніки) - комплекс програмних засобів і бібліотек стандартних елементів, що забезпечує автоматизацію розробки електронних пристроїв, в першу чергу створення мікросхем і друкованих плат. Найбільш поширеними є пакети Pcad і Orcad.

EDA-системи дозволяють почати розробку зі створення безпосередньо принципової електричної схеми проектованого пристрою з використанням бази радіоелектронних компонентів, змодельовати її роботу в різних режимах. Потім ця схема перетворюється в заготовку проектованої друкованої плати з різним ступенем автоматизації. Сучасні програмні пакети дозволяють виконати автоматичну розстановку елементів і автоматично розвести доріжки на кресленику багатошарової друкованої плати, поєднуючи тим самим виводи радіоелектронних компонентів відповідно до принципової схеми.

Типовий склад EDA-комплексу:

- редактор принципів електричних схем;
- бібліотека стандартних електронних компонент;
- редактор друкованих плат;
- вбудовані модулі симуляції принципів схем і друкованих плат;
- транслятори даних;
- допоміжні утиліти.

Модуль створення принципів схем є спеціалізованим графічним редактором, що забезпечує вибір електронних компонент з бібліотеки, розміщення їх на схемі і з'єднання лініями-провідниками. Електричні схеми виконуються без дотримання масштабу. Реальне розташування компонентів на монтажно-комутаційному полі не

враховується при побудові електричних схем. В першу чергу рисунок схеми повинен забезпечити компактність і ясність при читанні її деталей. На електричній схемі зображуються символи компонентів, електричні зв'язки між ними, текстова інформація, таблиці, буквено-цифрові позначення і основні написи на схемі. Поставляються разом з системою бібліотеки електронних компонент, які забезпечують як їх графічне зображення на схемі, так і моделювання логіки і електронних параметрів.

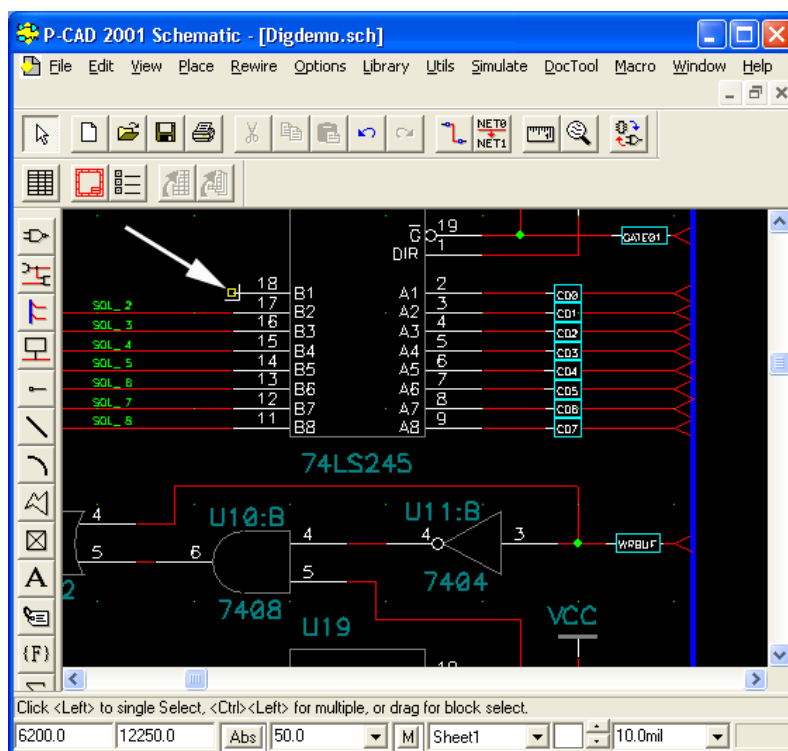


Рис. 5. Редактор принципних електричних схем

Редактор друкованих плат використовується для розміщення компонентів безпосередньо на монтажно-комутаційному полі, а також і для ручної, інтерактивного або автоматичного трасування провідників. В інтерактивному режимі курсором відзначаються початок і кінець сегмента провідника, який відразу ж трасується з урахуванням перешкод. При цьому дотримуються всі обмеження на проведення траси, встановлені користувачем.

Завдяки асоціативному сполученню з модулем створення принципних схем редактор друкованих плат може автоматично скласти список з'єднань схеми і перенести на поле друкованої плати зображення корпусів компонентів із зазначенням ліній електричних з'єднань між їхніми виводами. Потім викреслюється контур плати, на ньому розміщуються компоненти і, нарешті, проводиться трасування

провідників.

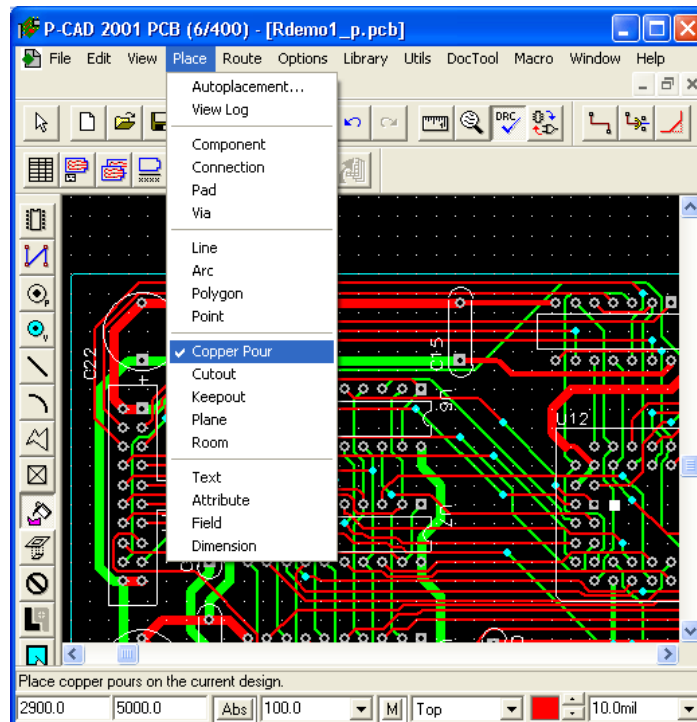


Рис. 6. Редактор друкованих плат

Важливою компонентою сучасних редакторів друкованих плат є модулі автоматичного трасування провідників. Автотрасувальник викликається з керуючої оболонки редактора друкованих плат, в якому проводиться налаштування стратегії трасування. Інформацію про особливості трасування окремих ланцюгів можна отримати за допомогою стандартних атрибутів ввести на етапах створення принципової схеми або друкарської плати.

Допоміжні утиліти використовуються для перенумерації компонентів, створення звітів в необхідному форматі, автоматичного створення компонент, розрахунку параметрів друкованих плат, оформлення конструкторської документації, розміщення на креслениках схем або друкованих плат, різних діаграм і таблиць, складання різних списків і звітів, які динамічно оновлюються, даних про структуру плати, технологічної та облікової інформації, розміщення на креслениках схем списків з'єднань, висновків підключення живлення іншої текстової інформації.

Найважливішим елементом EDA-системи є транслятори даних, що забезпечують обмін проектною інформацією з іншими електронними САПР або з MCAD-системами для остаточного конструктивного компонування електронних блоків у складі машинобудівних конструкцій. В останньому випадку транслятор

створює тривимірну збірку в форматі MCAD, що складається з друкованої плати і елементів.

Можливо і розв'язання оберненої задачі - збереження моделі MCAD в форматі EDA CAD. Цю можливість зручно використовувати в тих випадках, коли габарити друкованої плати залежать від форми і розміру корпусу приладу або відсіку обладнання, в якому ця друкована плата буде експлуатуватися.

Розвитком технології трансляторів між EDA- і MCAD-системами є мехатроніка - система засобів спільного проектування і моделювання вузлів точної механіки з електронними, електротехнічними і комп'ютерними компонентами, що забезпечують проектування і виробництво якісно нових модулів, машин і систем з інтелектуальним керуванням їх функціональними рухами.

### 4.3 Геоінформаційні системи

Геоінформаційні системи (ГІС) призначені для збору, зберігання, аналізу та графічної візуалізації просторових географічних даних і пов'язаної з ними інформації. Інструменти ГІС забезпечують систематизоване зберігання, пошук, аналіз і редагування цифрових карт, а також додаткову інформацію про об'єкти, наприклад, висоту будівлі, адреси, кількість мешканців, розташування транспортних комунікацій та ін.

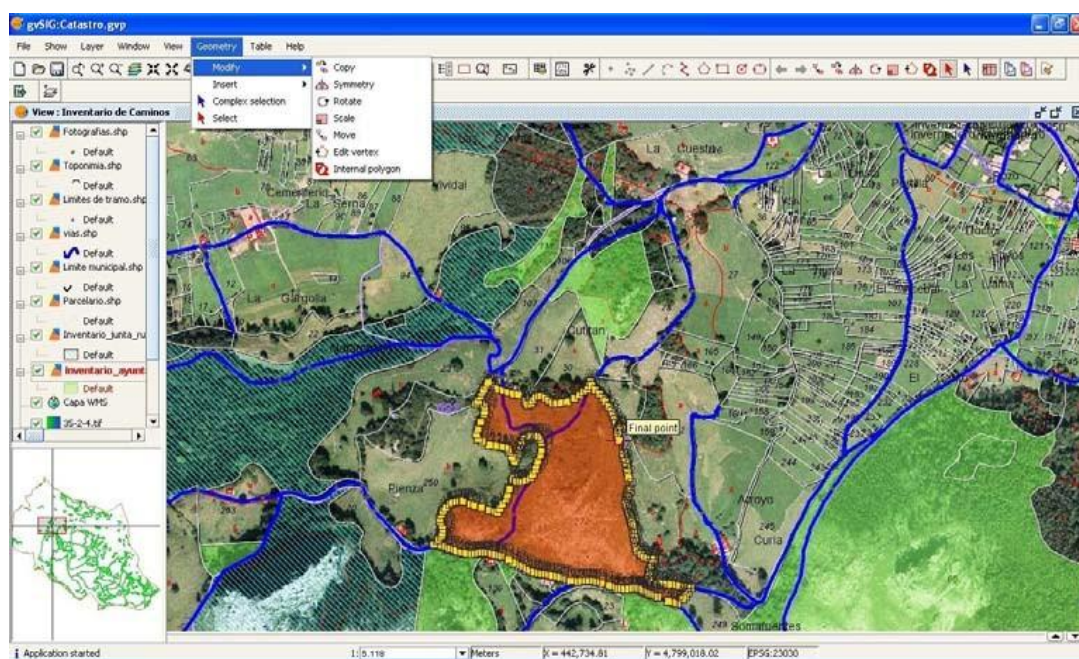


Рис. 7. Поєднана векторна карта дорожніх комунікацій і даних

## аерофотознімання

ГІС включають в себе системи управління базами даних, пов'язані з редакторами растрової (наприклад, аеро-фотознімків) і векторної (карти висот, комунікацій, планів населених пунктів) графіки і аналітичних засобів. ГІС широко застосовуються в різних галузях, в тому числі безпосередньо не пов'язаних з проектуванням: картографії, геології, метеорології, землеустрій, будівництві, управлінні транспортом та ін.

Галузева орієнтація ГІС - інвентаризація ресурсів (в тому числі кадастр), аналіз, оцінка, моніторинг, управління і планування, підтримка прийняття рішень. Інтегровані ГІС поєднують функціональні можливості ГІС і систем цифрової обробки зображень (даних дистанційного зондування) в єдиному інтегрованому середовищі.

Найбільшого поширення набули так звані масштабно-незалежні ГІС, засновані на множинних уявленнях просторових об'єктів, і забезпечуючі графічне або картографічне відтворення даних в будь-якому з обраних масштабів на основі єдиного набору даних з найбільшим просторовим дозволом.

На практиці ГІС набули широкого поширення в будівництві, проектуванні дорожніх мереж, магістральних трубопроводів та ліній електропередач.

## **4.4 Характеристика САЕ-систем**

САЕ (Computer-Aided Engineering) - це різноманітні програмні продукти, які забезпечують виконання інженерних розрахунків і фізично подібної симуляції функціонування проєктованих виробів, перевірки їх працездатності, прогнозування тривалості життєвого циклу, визначення робочих характеристик на етапі проєктування до виготовлення дослідних зразків і їх випробувань, оптимізації цих характеристик.

Розрахункова частина пакетів найчастіше заснована на чисельних методах вирішення диференціальних рівнянь: метод кінцевих елементів, кінцевих об'ємів, кінцевих різниць та ін. Це обумовлено тим, що розрахункові системи, побудовані на основі чисельних методів, на відміну від аналітичних, практично не залежать від геометричної конфігурації аналізованого виробу.

Окремо варто виділити системи симуляції і моделювання

складних технологічних процесів, таких як лиття металів і пластмас, штампування, хімічне фрезерування та ін. Особливістю подібних розрахунків є спільне розв'язання задач, що описують різні фізичні процеси - гідродинамічні течії, затвердіння, тепловий обмін, хімічні реакції полімеризації та інше.

Поряд з розрахунком конструкцій комп'ютерне моделювання та симуляція можуть використовуватися і для оптимізації проектів. Оптимізацію можна проводити для задач статички, стійкості, сталих і несталих динамічних перехідних процесів, власних частот і форм коливань, акустики і аеропружності. Все це робиться одночасно, шляхом варіації параметрів форми, розмірів та інших властивостей виробу. Ефективні алгоритми оптимізації обробляють будь-яку кількість проектних параметрів і обмежень. Вага, напруги, переміщення, власні частоти і багато інших характеристик можуть розглядатися або як цільові функції проекту (в цьому випадку їх можна мінімізувати або максимізувати), або в якості обмежень. Алгоритми аналізу чутливості дозволяють досліджувати вплив різних параметрів на поведінку цільової функції і управляти процесом пошуку оптимального рішення. Крім того, комп'ютерне моделювання застосовується для планування експериментів (визначення місць розташування датчиків) та оцінки повноти отриманих експериментальних даних.

Таким чином, чисельне моделювання задач міцності істотно заощаджує час, ресурси, дозволяє скоротити обсяги реальних випробувань, а також більш ретельно оптимізувати конструкції.

## **4.5 Метод кінцевих елементів**

Метод скінченних елементів (МСЕ, Finite Elements Method, FEM) - найбільш поширений чисельний метод розв'язання задач прикладної механіки, в першу чергу на міцність, механіку деформованого твердого тіла, теплообмін.

Суть методу полягає в тому, що розрахункова область розбивається на плоскі або об'ємні, в залежності від розв'язуваної задачі, підобласті з елементарною геометрією (найчастіше методом триангуляції), для яких записані найпростіші системи диференціальних рівнянь. Кожна така підобласть є кінцевим елементом, що має свій порядковий номер. Загальні вершини кінцевих елементів називаються вузлами, які також нумеруються.

Кінематичні граничні умови задаються у вузлах на границях. Навантаження на границях замінюються зосередженими силами у вузлах, зв'язок кінцевих елементів між собою здійснюється також у вузлах.

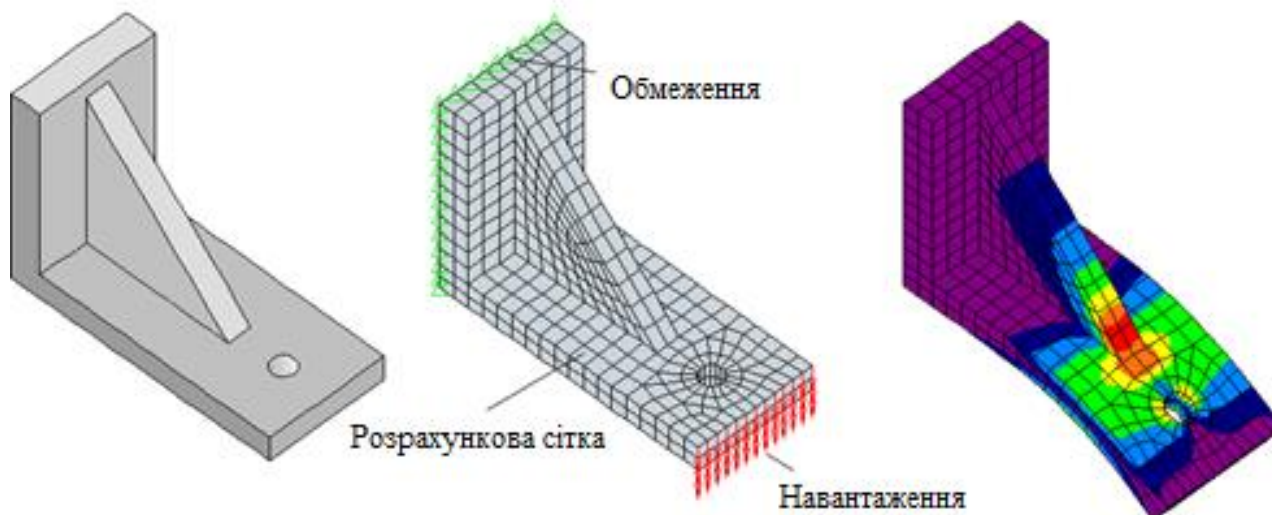
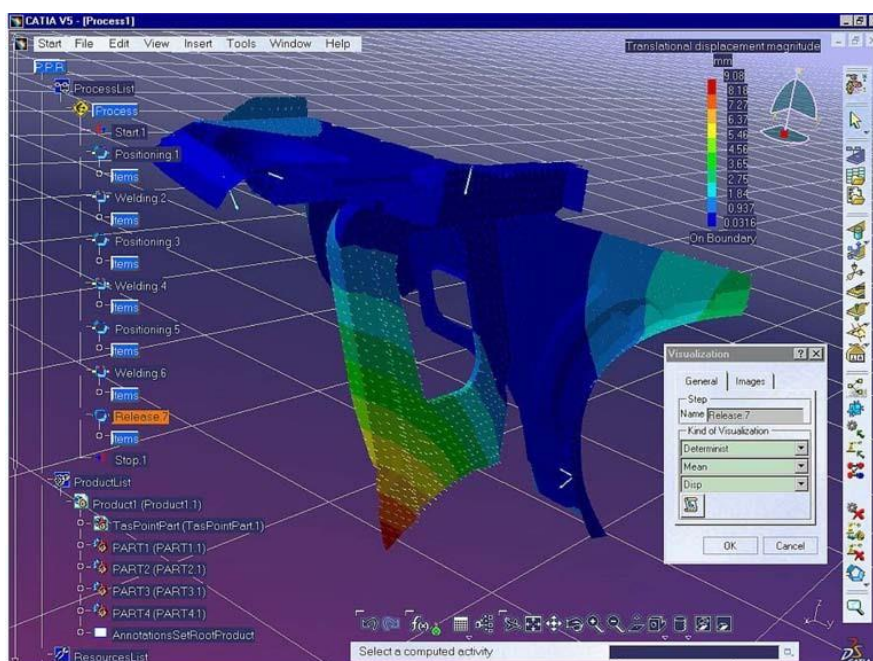


Рис. 8. Схема переходу від твердотілої моделі до розрахункової сітки

Сучасні системи автоматизації інженерних розрахунків, як правило, застосовуються спільно з CAD-системами, часто просто інтегровані в них. Таким чином, інженер може оперативно провести перевіірочні розрахунки безпосередньо в процесі створення конструкції і при необхідності змінити її так, щоб задовольнити вимогам працездатності.





### Рис. 9. Аналіз напружено-деформованого стану деталі

Істотною перевагою розрахункових систем перед перевірочними випробуваннями є можливість визначення елементів не тільки з недостатньою міцністю, але і з надлишковою. Це дозволяє оптимізувати геометрію деталей з метою зниження їх маси, що особливо критично, наприклад, в авіакосмічній галузі, двигунобудуванні.

Розрахункові системи дозволяють «заглянути» всередину деталі, що практично неможливо при натурних випробуваннях, отримати вичерпну картину розподілу будь-яких параметрів: деформацій, напружень, температурних полів та ін. Важливо те, що розрахунок може бути проведений не тільки для статичного навантаження, а і в динаміці, в сполученні з кінематичним розрахунком. Сучасні розрахункові системи забезпечують комплексний аналіз характеристик конструкцій, включаючи розрахунок напружено-деформованого стану, власних частот і форм коливань, аналіз стійкості, розв'язання задач теплопередачі, дослідження сталих і несталих процесів, акустичних явищ, нелінійних статичних процесів, нелінійних динамічних перехідних процесів, розрахунок критичних частот і вібрацій роторних машин, аналіз частотних характеристик при впливі випадкових навантажень. Передбачена можливість моделювання практично всіх типів матеріалів, включаючи композитні та еластичні.

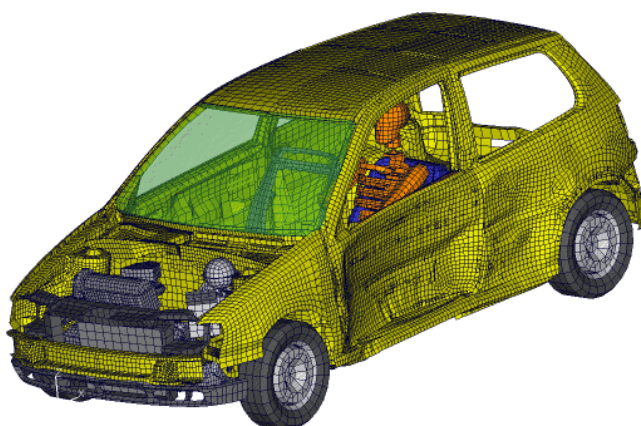


Рис. 10. Моделювання аварійного удару автомобіля

## 4.6 Моделювання кінематики

Просторові механізми є важливою складовою сучасної техніки і виробничих технологій, наприклад, шасі літаків та автомобілів, механізація крила і механізми управління літаків, промислові роботи-

маніпулятори послідовної і паралельної структури, стрілецька зброя, побутова техніка та ін. Так як конструювання складних механізмів здійснюється з використанням MCAD-систем, то логічним стало використання отриманих геометричних моделей для моделювання та аналізу їх руху. Проектування кінематики відрізняється високою геометричною складністю і визначає якість кінцевого продукту, вартість його виготовлення і експлуатації.



Рис. 11. Моделювання прямої задачі кінематики в САПР

У 70-80-ті роки, в період активного розвитку робочих станцій і їх застосування для проектування виробів машинобудування, з'явилися перші системи для динамічного і кінематичного аналізу просторових механізмів, такі як ADAMS, ANSYS Mechanical, COSMOS Motion і ін. До теперішнього часу ці системи отримали визнання фахівців і увійшли в повсякденну практику роботи сотень тисяч інженерів. Інженерні системи моделювання кінематики забезпечують можливість розв'язання як прямих, так і зворотних задач. Пряма задача полягає в тому, щоб за відомими зусиллями і іншими характеристикам приводів (наприклад, пневмо- і гідроциліндрів, електродвигунів) визначити швидкості і траєкторії руху всіх елементів, які складають механізм. При розв'язанні зворотної (часто вживається термін інверсна) задачі – навпаки.

Ще однією важливою задачею, яка розв'язується в кінематичних розрахункових системах, є визначення працездатності механізмів: відсутність заклинювань, попередження небажаних дотиків і зіткнень елементів механізму, вписування механізму в задані габарити.

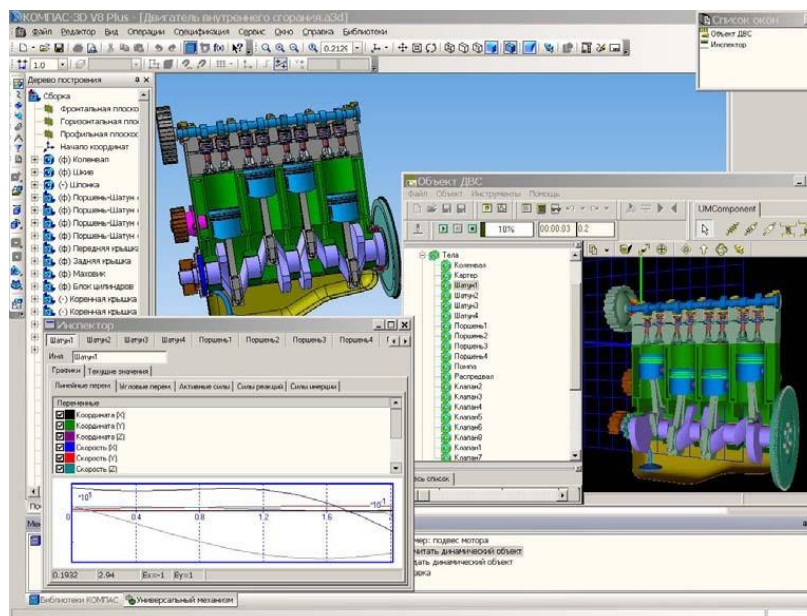


Рис. 11. Розв'язання оберненої задачі кінематики в КОМПАС 3D

І нарешті, моделювання кінематики забезпечує розв'язання задач завдань не тільки аналізу механізмів, а й їх синтезу. По заданій траєкторії і циклограмі роботи механізму можна розрахувати форму кулачків, необхідні розміри ланок важільних механізмів, параметри зубчастих коліс та ін.

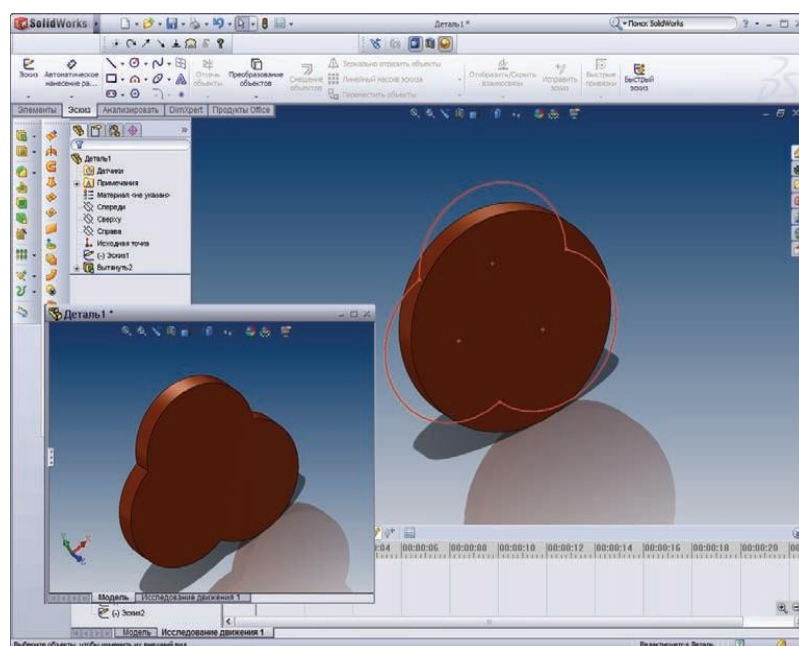


Рис. 12. Побудова геометрії кулачка по заданій траєкторії в

## COSMOS Motion

Результати таких обчислень можуть бути використані як ескізи для побудови твердотілих моделей деталей з наперед заданою точністю.

### 4.7 Аеро-гідродинамічні розрахунки

Обчислювальна гідро-газодинаміка (CFD, Computational Fluid Dynamics) широко застосовується як в традиційних для неї галузях: авіації, суднобудуванні, проектуванні автомобілів, - так і при створенні побутової техніки, поліграфічного і медичного обладнання та ін. Розрахунки, які здійснюються з використанням чисельних методів і алгоритмів для вирішення і аналізу завдань течій рідин і газів, як правило, полягають в рішенні рівнянь Нав'є-Стокса методами скінченних об'ємів, кінцевих елементів, кінцевих різниць та ін. Сучасні програмні комплекси для моделювання течій в рідині і газах дозволяють розраховувати широкий діапазон течій за кількістю Маха, багатофазні й багатоконпонентні течії, течії в нестискуваних рідинах.

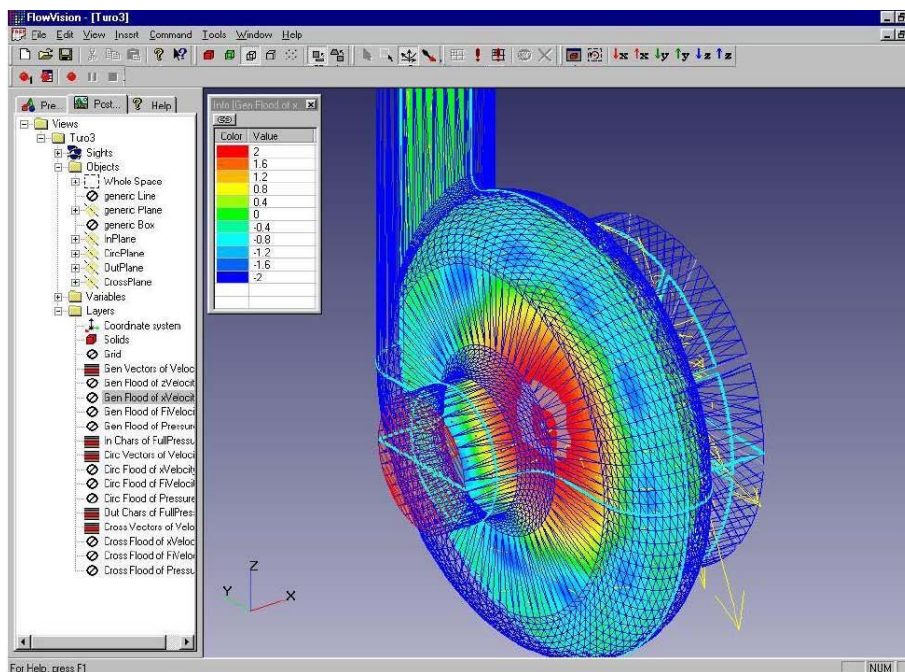


Рис. 13. Розрахунок течії в вихровому насосі

При розгляді актуальних промислових завдань розрахункова модель повинна забезпечувати точну передачу геометрії без спрощень, характерних для задач розрахунку напружено-деформованого стану.

У ряді випадків навіть наявність геометричної симетрії в моделі не дозволяє розглядати половину моделі з огляду на несиметричності течії. Це призводить до серйозного збільшення розмірності і збільшення часу розрахунків. Характерні розмірності для задач зовнішнього обтікання можуть бути до 50 млн елементів і більше, залежно від деталізованості геометрії і застосованих розрахункових моделей.

Спочатку обчислювальна гідро-аеродинаміка використовувалася стосовно завдань проектування авіаційної, космічної техніки і суднобудування. З розвитком програмних засобів і підвищенням продуктивності настільних персональних комп'ютерів вона знаходить все більш широке застосування і в інших галузях. Деякі, що стали звичними, продукти було б дуже важко спроектувати без її використання, наприклад струменеві принтери. Використання CFD при проектуванні струменевих принтерів виправдано і дає ряд переваг для вивчення того, як форма, розмір і швидкість випускаємої краплі залежать від таких параметрів, як імпульс керуючого тиску, форма форсунки, коефіцієнт поверхневого натягу, і багато іншого.

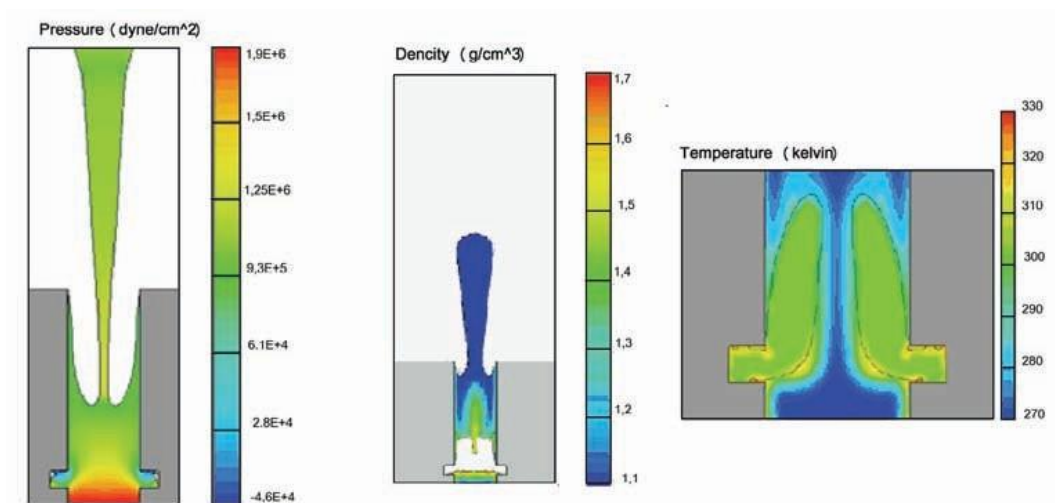


Рис. 14. Моделювання утворення краплі в струменевому принтері

Іншим прикладом використання CFD для створення побутових продуктів можна назвати моделювання течій в водопровідних та каналізаційних системах. Одним зі складних для розрахунку об'єктів є звичайний унітаз.

Обчислювальна аеродинаміка сьогодні широко використовується для проектування систем вентиляції електроапаратури та приміщень, оцінки навантажень на житлові та промислові будівлі, мости, гідротехнічні споруди та ін.

## 4.8 Електростатика та електродинаміка

У зв'язку з масовим впровадженням електронних пристроїв до складу практично будь-яких виробів машинобудування, від складної авіаційної техніки до побутових приладів, завдання моделювання електромагнітних полів, що створюються цими пристроями, їх взаємодії між собою і вплив на навколишнє середовище стало як ніколи актуальним. Тому більшість постачальників інтегрованих САЕ-систем пропонують спеціалізовані модулі для 3D-моделювання роботи електромагнітних і електромеханічних виробів в низькочастотному наближенні. Розрахунки проводяться, як правило, методом кінцевих елементів, що дозволяє розв'язувати рівняння прямим методом без спрощень і припущень. Модулі розраховують електричні і магнітні поля, моменти і сили, енергетичні втрати на вихрові струми, значення струмів, напруг, проводимостей, ємностей, індуктивностей в проєктованих електротехнічних виробках, розрахунок імпульсних електромагнітних полів, що виникають в електричних пристроях при скачках напруги і струмів.

### Питання для самоконтролю

1. У чому полягає перевага концепції віртуальної будівлі перед використанням традиційних 2D та 3D-систем?
2. Які основні програмні компоненти входять в EDA-систему?
3. Для чого потрібен асоціативний зв'язок між принциповою електричною схемою і редактором друкованих плат?
4. Що таке мехатроніка?
5. У чому полягає перевага масштабно-незалежних ГІС?
6. У чому причина поширеності чисельних методів в системах інженерних розрахунків у порівнянні з аналітичними методами?
7. Назвіть основні етапи побудови розрахункової моделі.
8. Що таке пряма і зворотна задачі кінематики?
9. В яких галузях використовується обчислювальна гідро-аеродинаміка?
10. Чому завдання CFD вимагають побудови деталізованих розрахункових сіток?

## **ТЕМА 5**

### **САМ-СИСТЕМИ. ТЕХНОЛОГІЧНА ПІДГОТОВКА ВИРОБНИЦТВА**

- 5.1 Історичний огляд САМ-систем
- 5.2 Характеристика САМ-систем
- 5.3 Верифікація та оптимізація NC-програм
- 5.4 Види траєкторій для обробки деталей
- 5.5 САРР - технологічна підготовка
- 5.6 Цифрове виробництво

#### **5.1 Характеристика САМ-систем**

Виробництво за допомогою комп'ютера (Computer-Aided Manufacturing, САМ) - термін, який використовується для позначення програмного забезпечення, основною метою якого є створення програм для керування верстатами з числовим програмний керуванням (англ. CNC - Computer Numerical Control).

Числове програмне керування, або ЧПК, означає комп'ютеризовану систему управління, що зчитує інструкції спеціалізованої мови програмування і керується приводами метало-, дерево- пластмасооброблювальних верстатів і верстатним оснащенням.

Інтерпретатор системи ЧПК виробляє переклад програми з вхідної мови в команди управління головним приводом, приводами подач, контролерами управління вузлів верстата (наприклад, включити або вимкнути, охолодження). Для визначення необхідної траєкторії руху робочого органу в цілому (інструменту або заготовки) відповідно до керуючої програми (КП) використовується інтерполятор, який розраховує положення проміжних точок траєкторії по заданим в програмі кінцевим. Абревіатура ЧПК відповідає двом англomовним - NC (numeric control) і CNC (computer numeric control) та відображає еволюцію розвитку систем управління обладнанням.

Системи типу NC, що з'явилися в кінці 40-х років ХХ століття, передбачали використання жорстко заданих схем керування обробкою, завдання програми за допомогою штекерів або перемикачів, зберігання програм на зовнішніх носіях, таких як магнітні стрічки, перфоровані паперові стрічки. Будь-яких пристроїв оперативного зберігання даних, керуючих мікропроцесорів не

передбачалося.

Системи ЧПК, описувані як CNC, засновані на процесорі з оперативною пам'яттю, з операційною системою. Приводи управляються власними мікроконтролерами.

Перший верстат з ЧПК був створений в 1954 році в Массачусетському технологічному інституті. Програма для обладнання з ЧПК може бути завантажена з зовнішніх носіїв, наприклад, дискет або флеш-накопичувачів. Окрім цього, обробка з використанням ЧПК збільшує продуктивність і акуратність операцій, гарантує постійний рівень якості, який в більшості випадків набагато перевищує якість традиційної ручної обробки. Багато замовлень, від яких раніше доводилося відмовлятися, зараз можна виконувати з легкістю і без великих зусиль, що між тим вважається ексклюзивним і становить категорію найбільшого прибутку.

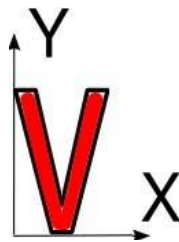
Основна мова програмування ЧПК – G-код, описаний документом ISO 6983 Міжнародного комітету зі стандартів. G-код був створений компанією Electronic Industries Alliance на початку 1960-х років. Фінальна доробка була схвалена в лютому 1980 року як стандарт RS274D. Комітет ISO затвердив G8 код як стандарт ISO 698381:1982, Держкомітет по стандартах СРСР - як ГОСТ 20999-83. У старій технічній літературі G8 код позначається як код ISO 78 біт (ISO 7 bit).

Виробники систем управління використовують G-код в якості базової підмножини мови програмування, розширюючи його на свій розсуд. В окремих випадках, наприклад, системи управління гравірувальними верстатами, мова управління принципово відрізняється від стандарту. Для простих завдань, наприклад розкрий плоских заготовок, система ЧПК в якості вхідної інформації може використовувати текстовий файл у форматі обміну даними, наприклад DXF або HP-GL.

Програма, написана з використанням G-кода, має жорстку структуру. Всі команди управління об'єднуються в кадри - групи, що складаються з однієї або більше команд. Кадр завершується символом переведення рядка (ПС/LF) і має номер, за винятком першого кадру програми і коментарів. Порядок команд в кадрі строго не обмовляється, але зазвичай мається на увазі, що першими вказуються підготовчі команди (наприклад, вибір робочої площини), потім команди переміщення, далі вибору режимів обробки і технологічні команди. Розглянемо приклад програми, написаної на G-



кодi i керуючої фрезерним верстатом, який обробляє букву V розміром 17x24 мм i глибиною 1 мм. Червоним кольором на рис. 9.1 позначений результат обробки.



Кадр	Содержание	Комментарий
	%	Начало программы
N1	G90 G40 G17	Система координат абсолютная, компенсация на инструмент выключена, плоскость интерполяции XOY
N2	G00 X2.54 Y26.15	Переход в точку начала обработки
N3	S500 F0.5 M3	Выбрать режимы резания и включить привод главного движения
N4	G01 Z-1.0	Врезание в заготовку
N5	G01 X5.19 Y 2.0	Первый штрих буквы V
N6	G01 X7.76	Продолжение движения
N7	G01 X16.93 Y26.15	Второй штрих буквы V
N8	G00 Z12	Отвод инструмента от заготовки
N9	M5	Выключить привод главного движения
N10	M02	Конец программы

Рис. 1. Приклад найпростішої 2D-обробки на верстаті з ЧПК

## 5.2 Характеристика САМ-систем

Написання та налагодження програм безпосередньо на G-кодi для деталей складної форми є досить трудомістким процесом, тому цей процес автоматизований шляхом створення САМ-систем. Вхідними даними системи САМ є геометрична модель виробу, розроблена в системі автоматизованого проектування (CAD). У процесі інтерактивної роботи з тривимірною моделлю в САМ-системі інженер визначає траєкторії i швидкість руху ріжучого інструменту по заготовці виробу (CL-дані, англ. Cutting Location), які потім автоматично верифікуються, візуалізуються (для візуальної перевірки коректності) i обробляються постпроцесором для отримання програми керуванням конкретним верстатом у вигляді G-коду.

САМ-системи дозволяють «підняти» програмування для верстатів з ЧПК на більш високий рівень в порівнянні з рутинним ручним програмуванням. Узагальнюючи, можна сказати, що САМ-системи полегшують працю технолога-програміста в трьох головних напрямках:

- вони позбавляють технолога-програміста від необхідності

робити математичні обчислення вручну;

- дозволяють створювати на одному базовому мовою керуючі програми для різного устаткування з ЧПК;

- нарешті, вони забезпечують технолога типовими функціями, що автоматизують ту чи іншу обробку.

Процеси обробки, створені і налагоджені в САМ-системі, можна зберігати і застосовувати повторно, використовуючи базу знань. Функції моделювання допомагають підготувати геометрію для потреб обробки за допомогою створення каркасної, поверхневої і твердотілої геометрії.

Вбудований механізм імітації видалення матеріалу точно відображає весь процес обробки, показуючи як зміну в часі геометрії заготовки, так і всі можливі колізії. Результат розрахунку можна порівняти з вихідною геометрією моделі, виявивши залишки матеріалу або зарізи. Повна асоціативність між геометрією, параметрами процесу і траєкторіями дозволяє швидко змінювати модель і параметри обробки і автоматично отримувати скориговані траєкторії.

САМ-системи забезпечують перевірку складних переміщень інструменту на віртуальній моделі верстата для впевненості, що інструмент не конфліктує з приладами, деталями верстата і заготовкою, до виконання програми в цеху дозволяє уникнути дорогих помилок.

### **5.3 Верифікація та оптимізація NC-програм**

Інструменти верифікації надають програмісту можливості для перевірки траєкторії руху інструменту в NC-програмі до її відправки в цех. Такий метод практично повністю виключає як можливість аварійної відмови верстата, так і важкість доведення NC-програми. Багато підприємств констатують, що застосування верифікаторів призводить до суттєвої економії матеріалів, витрат робочої сили і робочого ресурсу дорогого устаткування.

У разі використання опцій оптимізації програмне забезпечення читає файл шляху руху інструменту (NC-програму) і автоматично змінює призначені швидкості подачі так, щоб підібрати найбільш оптимальну подачу в залежності від умов обробки і параметрів ріжучого інструменту.

Індивідуальний підбір режимів різання підвищує ефективність

процесу обробки і зменшує час виготовлення деталі без втрати якості. Як правило, існують окремі методи оптимізації для різних матеріалів або видів обробки. Наприклад, в процесі чорнової обробки алюмінієвих плит матеріал був видалений на постійну глибину, але радіальна ширина зрізу може змінюватися. Для операцій даного типу є спеціальні методики підтримки постійної швидкості різання, що забезпечують відсутність биття фрези і сталість знімання металу. Використання цих методик в програмному забезпеченні оптимізаторів дає можливість визначити кількість матеріалу, вилученого в кожному сегменті шляху інструменту, а також дозволяє автоматично призначити оптимальну швидкість подачі.

## 5.4 Види обробки Види траекторій для обробки деталей

У практиці ЧПК прийнято класифікувати види обробки за кількістю ступенів свободи інструменту: 2D, 2.5D, 3D і 5D, - а також за типом обробки: токарна, фрезерна, електроерозійна та ін.

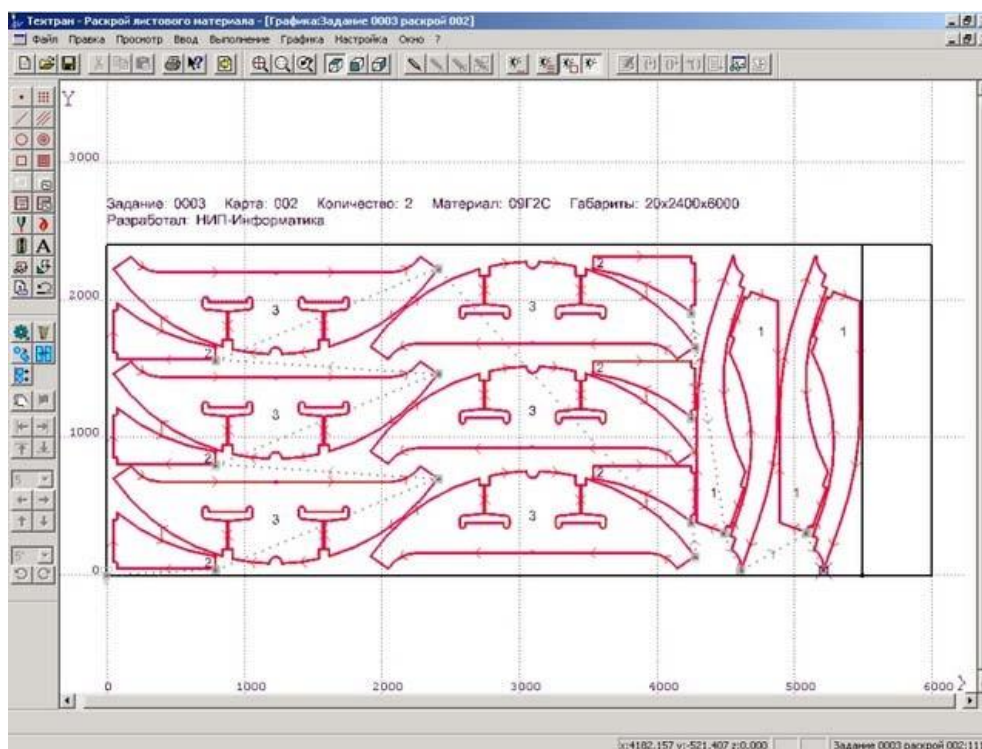


Рис. 2. Карта 2D-траекторій для розкрою листового матеріалу на верстаті з ЧПК

Найбільш простими є верстати з ЧПК, які використовують для обробки тільки дві координати: токарні, ерозійні дратові, газового та плазмового різання, навіть існують фрезерні верстати, які керуються

тільки за координатами X і Y. Ці верстати виконують 2D-обробку.

Особливим випадком токарної обробки є токарно-фрезерна, коли замість жорсткого різця на токарному верстаті використовується фреза, яка обертається. У разі токарно-фрезерної обробки САМ-система відображає на екрані траєкторію, розгорнуту в просторі таким чином, як якщо б не деталь позиціонувалася певним чином при нерухомому інструменті, а, навпаки, фреза або свердло оберталася навколо зафіксованої деталі. Такий підхід дозволяє досягти більшої наочності, уникнувши накладення безлічі траєкторій біля інструменту, обмеженого в переміщеннях двома координатами (складова по третій координаті задається за рахунок повороту заготовки).

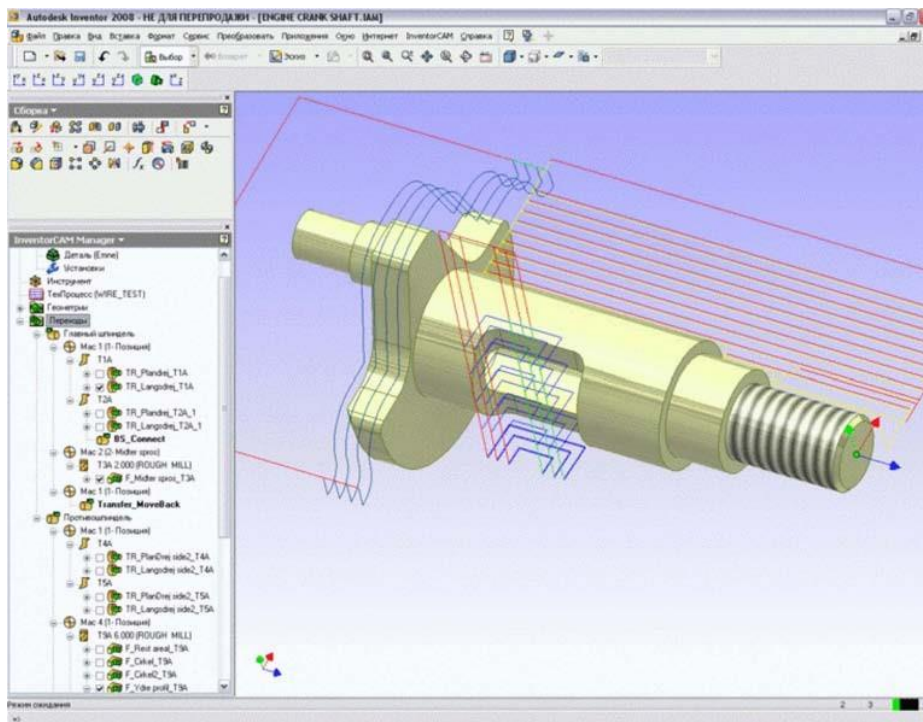


Рис. 3. Симуляція токарно-фрезерної обробки

При виконанні токарно-фрезерних переходів може бути обраний один із таких способів управління віссю обертання в КП:

- Поворот заготовки для обробки в фіксованих положеннях (координати X, Y, Z змінюються безперервно при постійній C). Плоска траєкторія інструменту, як у звичайної фрезерної обробки, але орієнтована певним чином по відношенню до циліндричної заготовки.

- Обробка за рахунок безперервного обертання заготовки (координати X, Z, C змінюються безперервно при постійній Y).

Проектування плоскої траєкторії на циліндричну поверхню. Зокрема, запрограмоване в такому режимі переміщення по відрітку породжує радіальний або гвинтовий паз. Завданням поперечного зсуву для осі інструменту можна домогтися того, щоб стінки паза не сходилися до центру, а були паралельні.

- Обробка за рахунок безперервного обертання заготовки (Координати X, Y, Z змінюються безперервно). Відрізняється від попереднього способу представлення в КП тим, що в даному випадку в КП програмується плоска траєкторія в режимі «намотування» на циліндр.

Відносно орієнтації осі інструменту при обробці найпростіше справа йде з геометрією для позиційних переходів. Найбільш поширений випадок - свердління радіальних отворів або свердління отворів по торцю деталі. І в тому, і в іншому випадку досить вказати точки виконання обробки, не будуючи допоміжних систем координат і обчислюючи кути повороту заготовки.

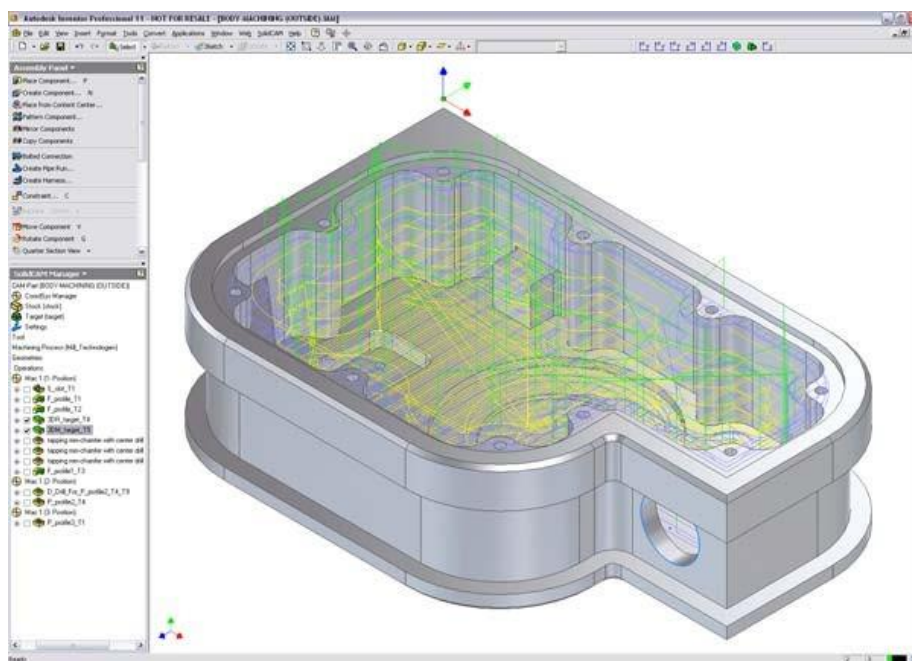


Рис. 4. Фрезерна обробка в режимі 2.5D

Особливо варто розглянути верстати для 2.5 D-обробки. Верстати цієї групи можуть переміщувати інструмент тільки по двох координатах одночасно. Наприклад, можуть виконати обробку складного контуру в площині XY, але щоб перемістити інструмент по Z, необхідно повністю зупинитися за іншими координатами. Популярність цього підходу викликана тим, що близько половини керуючих програм основного виробництва виконуються в стилі

2.5 D-обробки. Вони короткі, зрозумілі і практично завжди застосовуються з використанням контурної корекції, що, в свою чергу, дозволяє здешевити виробництво і підвищити якість виготовлених деталей. У найпростішому випадку загальна глибина обробки може бути розбита на шари, для кожного з яких буде проведена обробка за індивідуальним алгоритмом.

При побудові траєкторії відбувається автоматичне перемикання подачі в залежності від типу ділянки. Рівні обробки можуть задаватися або в абсолютних значеннях, або щодо оброблюваного шару.

Найбільш популярні в даний час фрезерні верстати, що виконують повноцінну 3D-обробку. Ці верстати можуть переміщувати інструмент по трьом координатам одночасно.

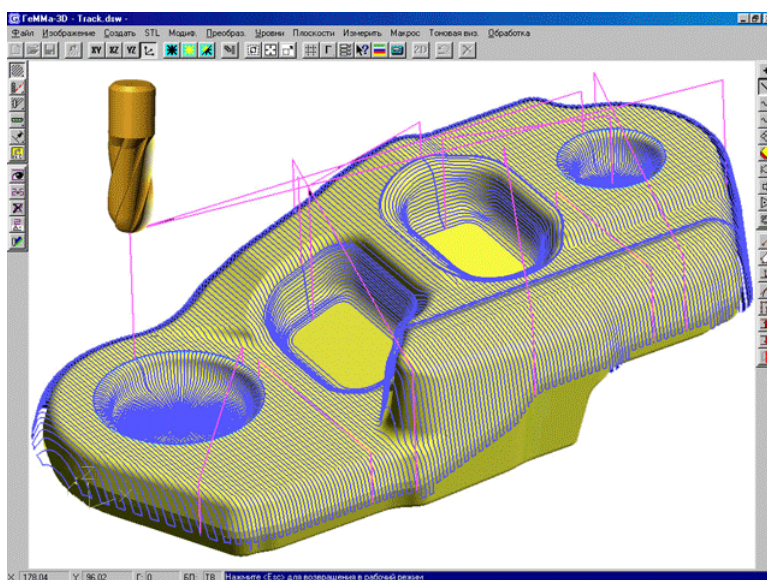


Рис. 5. Фрезерна обробка в режимі 3D

Верстати з можливістю п'ятикоординатної обробки можуть управляти не тільки лінійними координатами інструменту XYZ, але також і його нахилом, таким чином, з'являються ще два ступеня свободи. Подібні верстати дають можливість точно обробляти складні криволінійні поверхні. П'ятикоординатні верстати, в свою чергу, діляться за типом обробки на позиційні і безперервні.

У позиційній схемі обробки, яку ще називають 3 + 2D, повороти інструменту виконуються поза процесом різання. Це свого роду набір триосьових траєкторій, які виконуються для різного положення осі інструменту. В цьому випадку жорсткість технологічної системи істотно вище, а керуючі програми простіше.

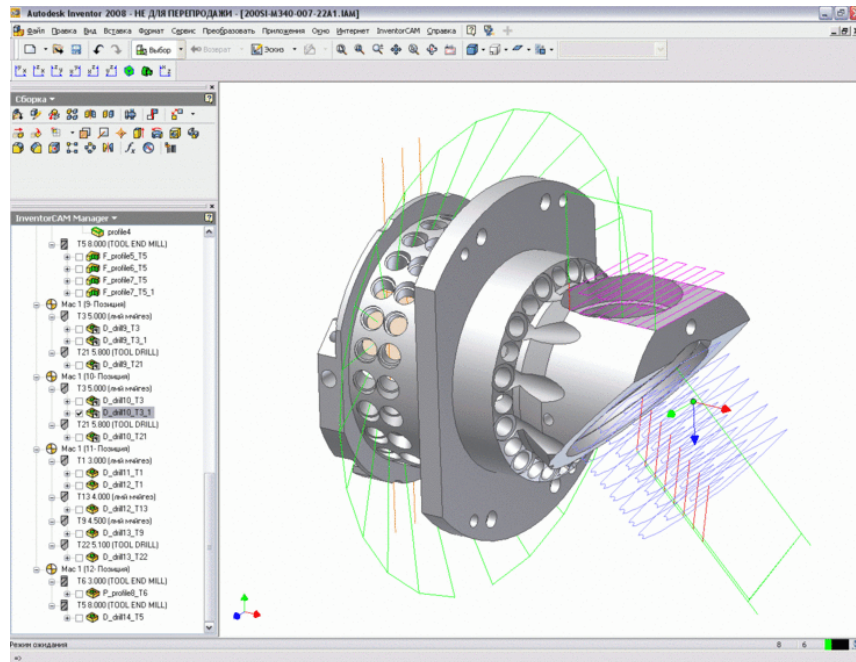


Рис. 6. Позиційна 3D + 2D-фрезерна обробка

У п'ятикоординатних системах безперервного типу зміна нахилу інструменту проводиться безпосередньо в процесі обробки.

Найбільш часто використовується стратегія безперервної п'ятиосьової обробки та заснована на відстеженні нормалі до оброблюваної поверхні. Однак в ряді випадків при описі осі інструменту необхідно завдання двох кутів щодо нормалі: кута випередження, який вимірюється в напрямку руху, і кута відхилення, який вимірюється в перпендикулярній цьому напрямку площині.

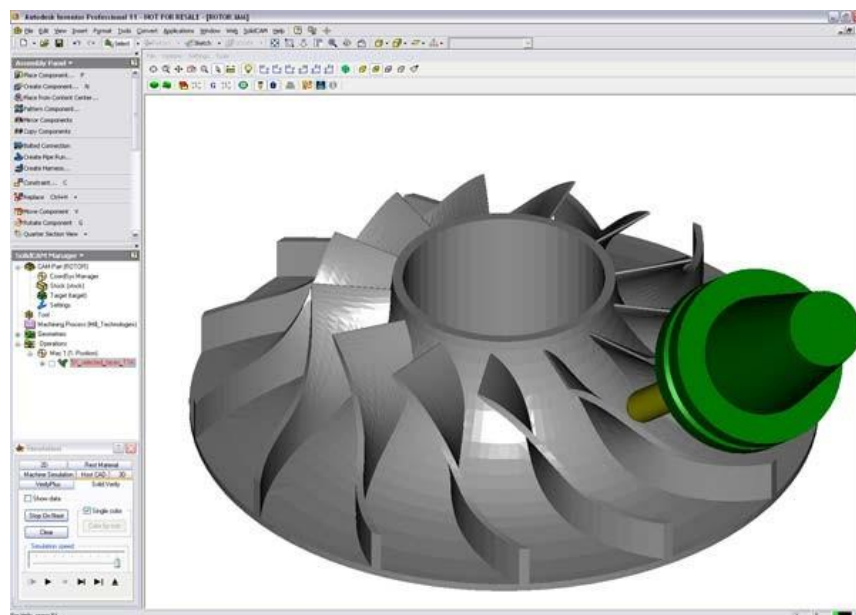


Рис. 7. П'ятикоординатна фрезерна обробка складної криволінійної поверхні

Кут випередження створює кращі умови різання, а кут відхилення зазвичай служить для кращого доступу до оброблюваних поверхонь поблизу виступів. Використання кута випередження дозволяє обробляти, зокрема, лопатки турбін округленим інструментом, коли обробка по нормалі просто неможлива.

Окремим випадком є багатоосьова обробка тонким інструментом, наприклад дротова електроерозійна. При такій технології управління кутом випередження не має сенсу, і в цьому випадку говорять про чотирьохкоординатну обробку.

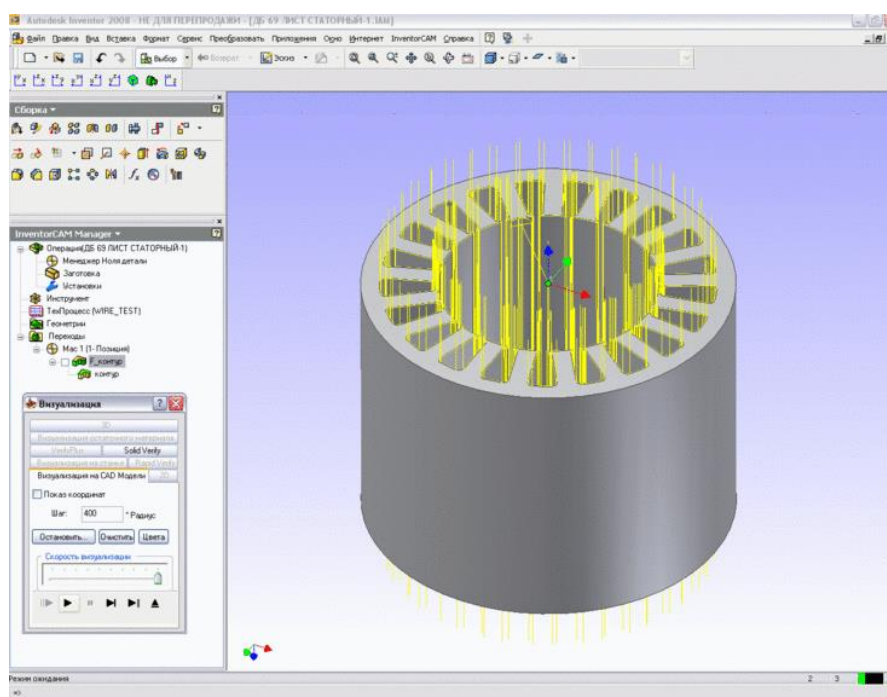


Рис. 8. Чотирьохкоординатна обробка на електроерозійному обладнанні

## 5.5 CAPP - технологічна підготовка

Автоматизована технологічна підготовка виробництва (англ. Computer Aided Process Planning, CAPP) використовується для позначення програмних інструментів, що застосовуються на стику систем автоматизованого проектування і виробництва. Завдання технологічної підготовки - по створеній конструкторами CAD-моделі виробу скласти план його виробництва, який називається операційною, або маршрутною, картою. Цей план містить вказівки про послідовність технологічних і складальних операцій, верстати і інструменти, які використовуються, режими обробки та ін.



Технологічна підготовка виробництва завжди здійснюється за наявною базою даних типових технологічних процесів, які застосовуються на конкретному підприємстві. Розрізняють два підходи до автоматизованої технологічної підготовки - модифікований (варіантний) і генеративний.

При модифікованому підході завдання САРР-системи полягає в пошуку найбільш схожого виробу в існуючій базі даних і пред'явленні його операційної карти для модифікації. При модифікованому підході широко застосовується групова технологія, що дозволяє проводити класифікації деталей в сімейства схожих.

Групова технологія використовується при модифікованому підході до технологічної підготовки виробництва. Вона полягає в класифікації деталей в сімейства, що представляють собою сукупність об'єктів, подібних один одному по геометричній формі, розмірам і технологічним процесам їх виготовлення. Віднесення деталі до відомого сімейства на основі її форми і розмірів дозволяє швидко знайти в технологічній базі даних підприємства послідовність процесів, які використовуються для виготовлення схожих деталей, і модифікувати її для виготовлення нової деталі.

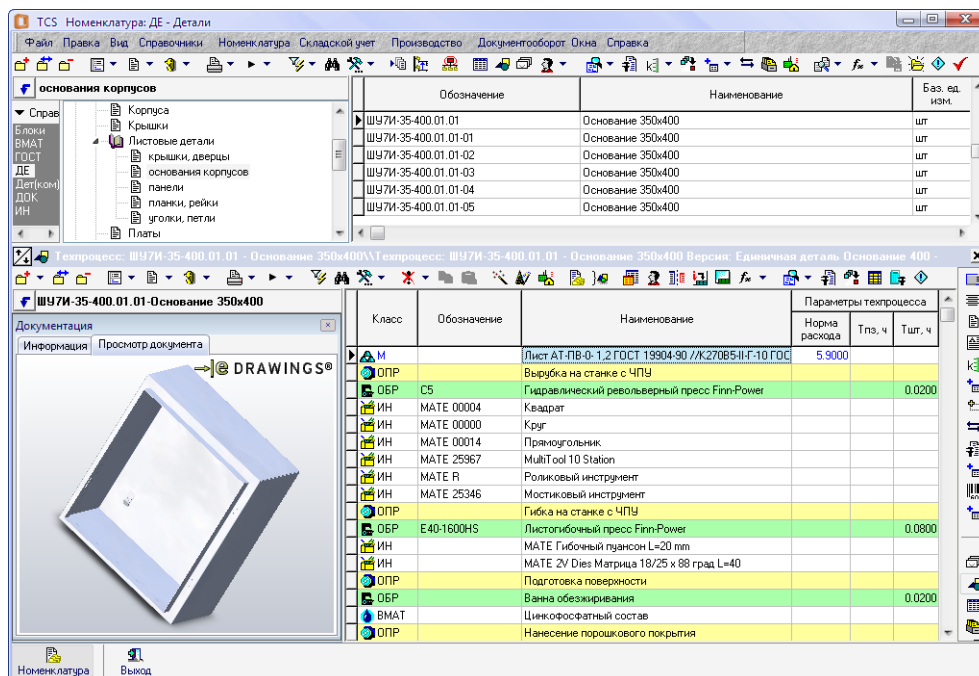


Рис. 9. Класифікатор типових деталей

Ще одне призначення групова технологія знаходить при компонуванні обладнання у виробничому цеху. Класична схема компонування полягає в угрупованні верстатів за видами обробки

(токарний, фрезерний, свердлильний, шліфувальний і складальний ділянки). Однак дана схема має очевидний недолік в разі, якщо підприємство виробляє невелику кількість родин деталей (в порівнянні з обсягами виробництва), - тоді накладні витрати на передачу заготовок з дільниці на дільницю дуже високі. Альтернативна схема компоновання верстатів при подібному варіанті полягає в розміщенні їх по дільницях відповідно до родинами деталей. У цьому випадку кожна ділянка відповідає за виготовлення деталей свого сімейства.

Генеративний підхід полягає в розпізнаванні у деталі типових конструктивних елементів та застосування до них типових технологічних процесів (токарна обробка, свердління та інше). При генеративному підході використовуються відомі методи штучного інтелекту для розпізнавання елементів і логічного висновку.

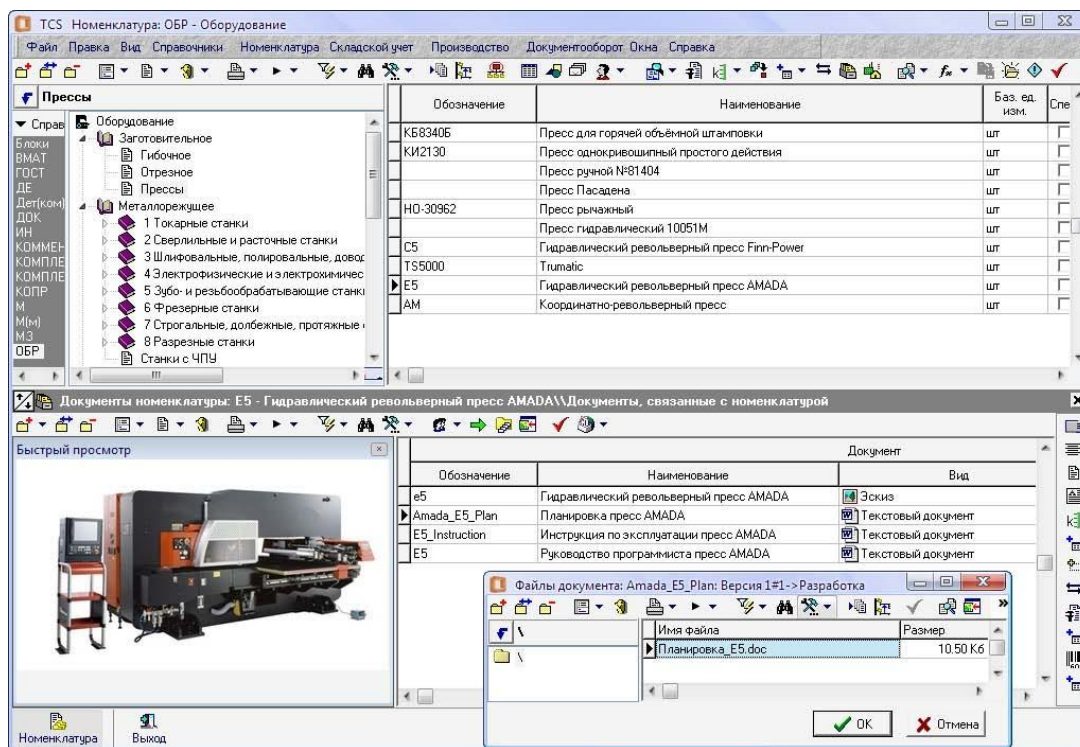


Рис. 10. Классификатор оборудования

Важливым элементом САРР-систем є їх відкритість. Це означає, що систему можна не тільки налаштувати на вирішення завдань конкретного підприємства, а й модернізувати як на рівні інтерфейсу, так і на рівні функціонального призначення. Зазвичай до складу системи входить спеціальний редактор, за допомогою якого створюються бланки документів. Тому кожне підприємство, що використовує нестандартні форми документації, може без залучення

сторонніх програмістів створити необхідний комплект документів.

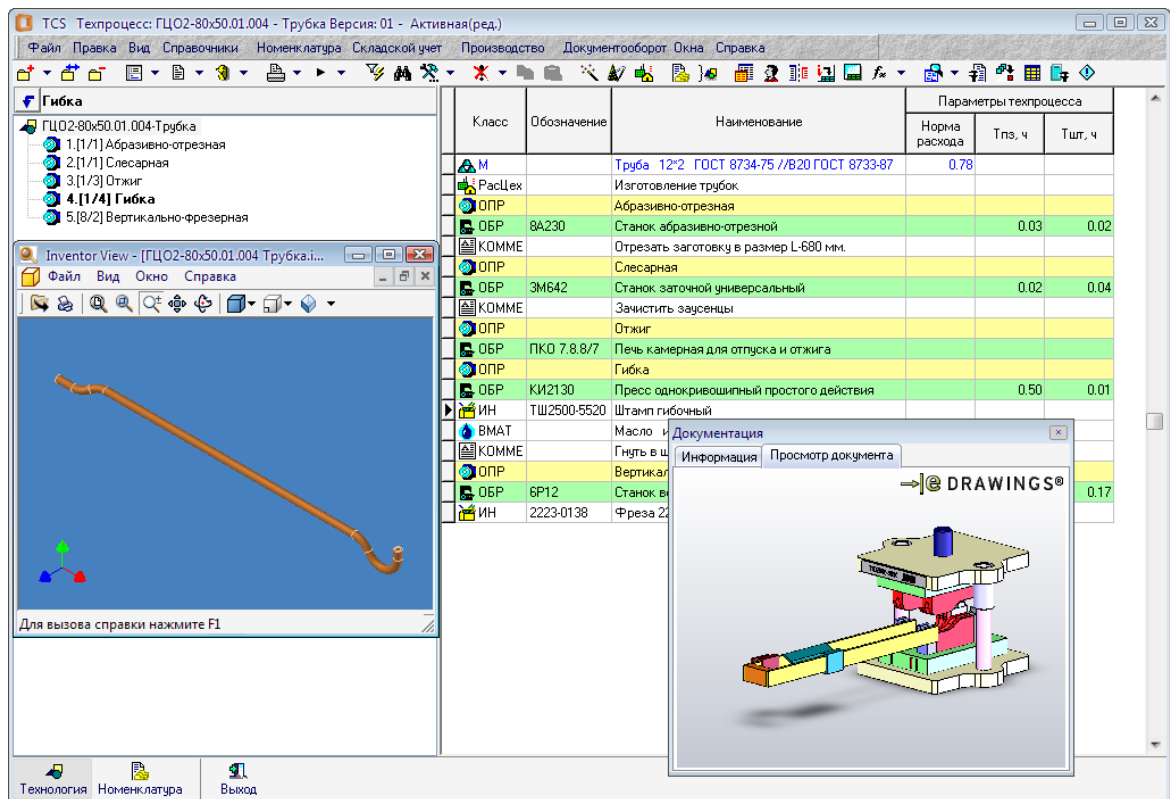


Рис. 11. Узагальнений технологічний процес, обладнання і оснащення для типових деталей

При проектуванні нових технологічних процесів використовуються бази типових ТП і типових технологічних переходів. База типових ТП і переходів поповнюється по ходу проектування, а також редагується менеджером БД. Типи операцій і переходів закладені у відповідних класифікаторах, а склад основних властивостей представлений в стандартах ЕСТД. Власні функціональні можливості САРР-систем і наскрізна інтеграція з програмним комплексом САД забезпечують вирішення наступних завдань:

- управління зберіганням даних і документів: авторизація доступу, пошук інформації, цілісність даних, архівування, резервне копіювання, відновлення даних;
- управління процесами: управління роботою, протоколювання роботи;
- управління структурою виробу: технологічний склад виробу, виконання;
- інтерактивне проектування технологічних процесів (ТП);
- основні режими: застосування ТП, інтерактивне заповнення ТП

з використанням БД-ресурсів і контекстних закладок, копіювання ТП з інших проектів;

- автоматизоване проектування нових технологічних процесів на основі знань структурно-параметричного синтезу;

- види технологічних процесів: узагальнений ТП, механообробка, збірка, холодне штампування, гаряче штампування, лиття, термічна обробка, нанесення покриттів, зварювання, пайка, виготовлення деталей з пластмас і гуми та ін.;

- автоматизоване проектування операцій;

- управління виробничими і технологічними ресурсами;

- формування зведених відомостей і специфікацій;

- друк сформованих документів.

Окремо варто обумовити поняття загального технологічного процесу. Його створення дозволяє акумулювати досвід і знання провідних фахівців підприємства різних галузей діяльності і використовувати його. Програма для технологічної підготовки виробництва забезпечує автоматичне проектування конкретних технологічних процесів виготовлення виробів з автоматичним формуванням структури конкретного технологічного процесу, підбором оснащення і різними технічними розрахунками, закладеними в загальному технологічному процесі.

## **5.6 Цифрове виробництво**

Наступним кроком у розвитку САРР-систем стала поява засобів цифрового реалістичного моделювання виробничих процесів, які об'єднують в собі логістику традиційних САРР, моделювання технологічних процесів на рівні САМ-систем і доповнене можливостями симуляції ергономічних процесів, тобто поведінки людей, що беруть участь у виробництві. Будучи оснащеними розвиненими засобами оптимізації, такі системи дозволяють створювати досконалі технологічні процеси, моделювати виробництво в масштабах підприємства, відпрацьовувати не тільки виробничі процеси, а й експлуатаційні і ремонтні операції, тим самим реалізуючи концепцію управління життєвим циклом виробу (PLM).

Найбільш характерними рішеннями цього класу є Technomatics компанії Siemens PLM Software і Delmia компанії Dassault Systemes. Обидві системи мають розвинені і різноманітні можливості та поставляються в декількох варіантах, які забезпечують вирішення

наступних завдань:

- моделювання складних виробничих систем і стратегій управління;
- побудова ієрархічних об'єктно-орієнтованих моделей, що включають виробничі, логістичні та бізнес-процеси;
- створення і використання спеціалізованих об'єктних бібліотек для швидкого моделювання типових об'єктів;
- формування діаграм і графіків для аналізу продуктивності, ресурсів і вузьких місць;
- аналіз спроектованих виробничих і життєвих циклів, включаючи аналізатори вузьких місць, побудова діаграм Ганта і Сенкі;
- тривимірна анімація і візуалізація виробничих і експлуатаційних процесів;
- оптимізація процесів і ресурсів на основі генетичних алгоритмів;
- сполучення з ERP і MES-системами за рахунок відкритої архітектури, що підтримує різні інтерфейси (ORACLE, SQL, ODBC, XML, CAD, Socket, ActiveX і т. д.).

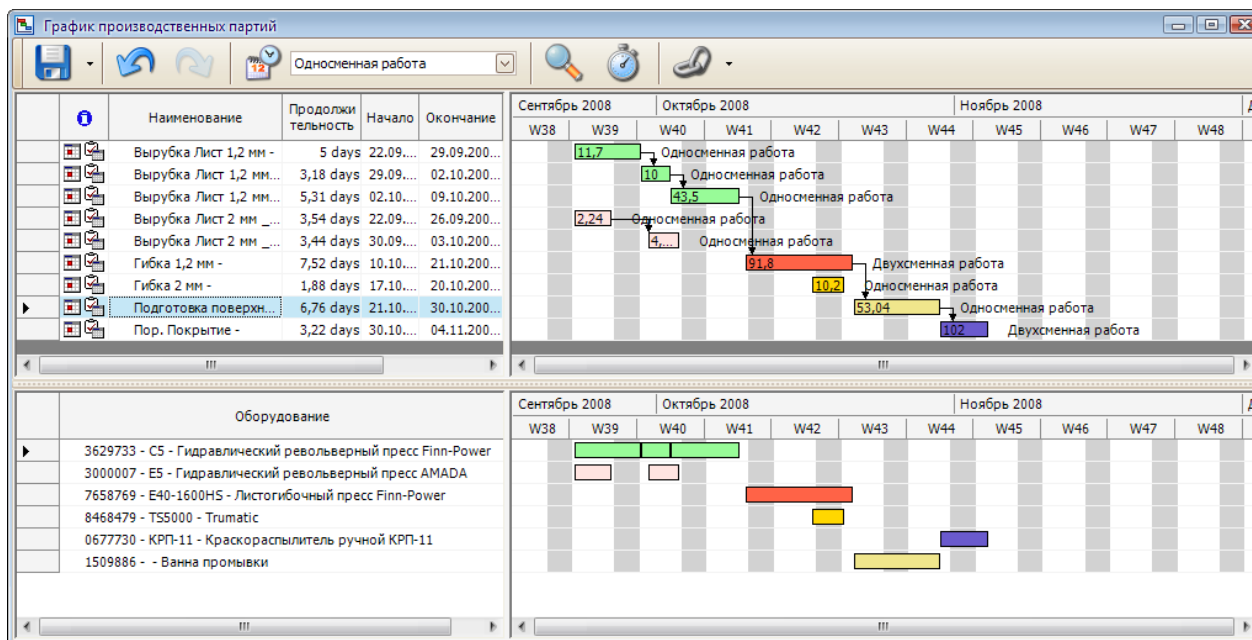


Рис. 12. Складання графіка виробничих партій, змінної роботи і завантаження устаткування

На сучасних успішних підприємствах, що досягають ефективності та конкурентоспроможності за рахунок зниження собівартості і скорочення часу виходу продукту на ринок, логістика

стає ключовою технологією. Таким чином, використання підходів just-in-time (точно вчасно) і just-in-sequence (в належному порядку), проектування нових і модернізація наявних виробничих, транспортних і обслуговуючих потужностей вимагають наявності об'єктивних критеріїв для порівняння і оцінки різних рішень ще на етапі прийняття рішень.

Системи цифрового моделювання виробництва забезпечують створення моделі виробничих і логістичних процесів, систем з метою аналізу та оптимізації їх характеристик. Ці моделі дозволяють проводити віртуальні експерименти і аналіз за принципом «що, якщо» без втручання в роботу реальної системи або задовго до початку будівництва реальних виробничих потужностей. Потужні засоби збору детальної статистики, аналізу та візуалізації дають проектувальнику можливість оцінити різні варіанти і на основі їх порівняльного аналізу вжити рішення на ранніх стадіях проектування виробництва.

Моделювання з використанням цифрової моделі виробничого циклу використовується також для оптимізації продуктивності, виявлення і «розшивки» вузьких місць і мінімізації обсягу незавершеного виробництва. За допомогою цифрової моделі можна розрахувати необхідні виробничі ресурси, врахувати зовнішніх і внутрішніх постачальників, супутні бізнес-процеси і інші чинники, аналізуючи їх вплив на майбутнє виробництво. Таким чином, з'являється можливість порівняти різні стратегії управління об'єктом, перевірити ритмічність роботи технологічних ліній і окремих ділянок. Ставлячи різні правила і параметри для потоків матеріалів і комплектуючих, можна перевірити, як вони впливають на інтегральні показники роботи всієї виробничої системи.

В системи вбудовані модулі для моделювання та програмування роботизованих виробничих ділянок. Це дозволяє оптимізувати і узгодити час циклів, позиції, руху кожного робота, виключити реальні колізії між роботами, деталями, інструментами, оснащенням і оточенням. На додаток до програмування кожного окремого робота також можливо моделювання всього роботизованого процесу підприємства, так само як і змішаного - за участю роботів і людей.

Підсистеми моделювання робочих місць дозволяють здійснювати ергономічний аналіз робочого місця з урахуванням ергономічних стандартів. Ергономічний аналіз може бути проведений як в статичному режимі (використовуючи інтерактивні серії запитів і

слідуючи конкретним стандартам), так і в динамічному з використанням анімованих манекенів. Ці модулі забезпечують не тільки формування оптимального робочого циклу співробітників, але і дотримання норм і правил техніки безпеки, раціонального планування відпочинку і перерв, визначення необхідної кількості співробітників.

Окремо ефективно застосування модулів моделювання ергономіки на етапі проектування виробів і продуктів, що забезпечує їх збирання, ремонтпридатність, високі експлуатаційні якості.

Спеціалізовані модулі систем цифрового виробництва дозволяють також враховувати в моделі випадкові чинники, такі як збої обладнання, відхилення від номінальних значень часів обробки деталей, переналадок і інших параметрів. Випадкова величина відхилення будь-якого параметра може бути задана у вигляді математичного розподілу, при цьому відхилення можливі декількох типів, або у вигляді емпіричного розподілу, в тому випадку коли потрібно врахувати наявну на підприємстві реальну статистику надійності обладнання.



Рис. 13. Моделювання роботизованого робочого місця в DELMIA

Таким чином, системи цифрового моделювання виробництва дозволяють створити віртуальне підприємство, що враховує всі виробничі процеси і ресурси: обладнання, промислових роботів, людські ресурси, потоки матеріалів і енергії та ін., в якому можна

змінювати будь-які параметри, домагаючись найбільш підходящої конфігурації. Підприємства, які володіють такими віртуальними моделями, здатні ефективно контролювати і управляти циклами створення продуктів і запуску їх у виробництво. Цифрові моделі виробництва забезпечують не тільки моделювання локальних процесів (наприклад, роботи верстатів з ЧПК), але і всіх етапів життєвого циклу продукту - від формування концепції та проектування, через виготовлення і виробництво, до експлуатації, ремонту і утилізації.

### **Питання для самоконтролю**

1. У чому відмінність NC і CNC-систем?
2. Що дає використання САМ-систем в порівнянні з розробкою керуючих програм безпосередньо на G-кодів?
3. Чим відрізняються 2.5 D і 3D-обробки?
4. Що таке позиційна обробка?
5. В яких напрямках вимірюються кути випередження і відхилення?
6. Назвіть два основні підходи до автоматизованої технологічної підготовки.
7. Що таке групова технологія?
8. В чому полягає суть генеративного підходу до проектування технологічної документації?
9. Дайте поняття узагальненого технологічного процесу.
10. Які переваги дають системи цифрового моделювання віртуального підприємства?



## **ТЕМА 6**

### **СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДАНИМИ.**

- 6.1 Структуризація проекту и класифікатори, класифікація документів
- 6.2 Атрибути та система пошуку
- 6.3 Розмежування доступу
- 6.4 Інтеграції різних CAD-систем
- 6.5 Автоматичне відслідковування, історія створення та керування змінами
- 6.6 Колективна робота над проектом
- 6.7 Передача даних в ERP-системи

#### **6.1 Структуризація проекту и класифікатори, класифікація документів**

Системи управління даними про виріб (Product Data Management, PDM) - категорія програмного забезпечення, що дозволяє зберігати дані про виріб в базах даних. До даних про виріб, насамперед, відносять інженерні дані, такі як CAD-моделі і кресленики (CAD), цифрові макети (DMU), специфікації матеріалів (BOM), а також технологічну інформацію. PDM-системи є також інтегруючою ланкою при побудові системи управління життєвим циклом (PLM).

PDM дозволяє створити на підприємстві єдине інформаційне середовище розробки виробів, ресурсами якої можуть користуватися всі зацікавлені служби: відділи головного конструктора та головного технолога, відділ технічної документації, служби постачання, маркетингу та збуту, представники замовника і ін. Для забезпечення цієї можливості в PDM реалізована концепція єдиного сховища документів, що дозволяє легко використовувати документ в декількох проектах, отримувати спеціалізовані для різних служб і окремих користувачів представлення проекту, створювати бібліотеки типових рішень і забезпечувати можливість колективної роботи над одним або різними проектами.

Архітектура сучасних PDM дозволяє одночасно використовувати кілька окремих тематичних сховищ документів. Наприклад, можна створити робочий архів підприємства, сховище документації для допоміжного виробництва, спеціалізоване сховище для колективної роботи над окремим проектом, індивідуальні сховища для робочих груп або користувачів. Для доступу та роботи в цих сховищах

використовується єдина клієнтська програма PDM.

До основних функцій PDM відносяться:

- зберігання документів;
- структуризація проекту та класифікація документів;
- пошук документів;
- управління доступом до документів;
- відстеження історії і управління змінами;
- організація колективної роботи;
- формування звітів та специфікацій;
- інтеграція різних CAD / CAM / CAE-систем і зв'язок з ERP.

Розглянемо кожну функцію більш детально.

Електронне сховище служить для фізичного зберігання електронних документів, виготовлених за допомогою різних програм MS Office, CAD-систем, графічних пакетів та іншого.

Електронний документ являє собою структурований набір даних, що містить реквізитну частину, змістовну частину і електронний цифровий підпис (опціонально).

Сховище PDM реалізує фізичну, прикладну середу обміну інформацією між різними фахівцями, є багатий інформаційний ресурс підприємства і забезпечує основу для організації колективної роботи і впровадження єдиного інформаційного простору.

PDM-система управляє і надає інформацію про прямі та зворотні зв'язки між об'єктами. Наприклад, для виробів є зв'язки «Складається з» та «Входить в»; для документів - «Що використовує» і «Де використовується», «пов'язані вироби» і т. д. Зв'язки між виробами утворюють структуру виробу і можуть мати свої власні атрибути, наприклад «кількість».

Документи і вироби можна групувати всередині проекту в ієрархічну структуру за допомогою папок. Рівень вкладеності не обмежений. Цей же механізм використовується для створення ієрархічних класифікаторів будь-якого призначення.

PDM дозволяє об'єднувати схожі об'єкти в групи (класи) на основі одного набору атрибутів. Цей підхід також відомий як групова технологія. Класифікація дозволяє ефективніше обробляти великі обсяги даних, наприклад швидше знаходити документи і вироби в сховищі завдяки звуженню області пошуку до об'єктів одного класу. В системі пошуку PDM використовується індексація всіх об'єктів, що мають атрибути, завдяки яким час виконання запиту не перевищує декількох секунд.

Система класифікації також дозволяє забезпечити тематичну угруповання електронних документів незалежно від того, в яких програмах вони були створені. Система класифікації збільшує гнучкість моделі даних і, отже, здатність PDM до одночасної інтеграції з різними САПР і іншими інформаційними системами.

При додаванні в сховище документів або виробів PDM дозволяє призначити їм певний клас. Призначення класу може бути виконано автоматично на основі типу документа або його властивості. Наприклад, креслеником, зробленим в SolidWorks, при збереженні в PDM-системі може присвоюватися клас «Кресленик», а в супровідній записці, створеної в Microsoft Word, - клас «Текстовий документ».

Визначаючи клас, адміністратор системи задає список атрибутів, які будуть мати всі об'єкти одного класу. На додаток до атрибутів класу кожен окремий об'єкт може мати будь-яку кількість додаткових (користувальницьких) атрибутів. У свою чергу, класи можуть бути згруповані за допомогою батьківських класів. В результаті документ отримує всі атрибути, за дані в своєму класі, а також всі атрибути батьківських класів. Атрибути нового документа будуть автоматично вилучені з властивостей файлу кресленника або таблиці.

Системи PDM забезпечують роботу з будь-якими форматами даних і мають засоби класифікації документів (файлів) за видами документів, наприклад відповідно до ГОСТ 2.102 (Види і комплектність конструкторських документів) як в офіційній редакції, так і в пропонованій новій з урахуванням електронних документів. Ієрархічна структура класів з успадкуванням атрибутів в PDM-системі надає гнучкі можливості для класифікації документів і налаштування відповідно до стандартів і правил (СтП), що діє на підприємстві.

## **6.2 Атрибути та система пошуку**

Кожен документ, що зберігається в PDM, може мати необмежений набір атрибутів, який служить для визначення додаткових характеристик. Для атрибутів призначається рівень зміни (об'єкт-версія-ітерація). Атрибути, визначені для всіх об'єктів одного класу, є обов'язковими і присутні у всіх об'єктах одного класу. Решта атрибутів є додатковими.

Запити можуть бути досить складними з використанням логічних

операцій І та АБО для умов на системні атрибути, атрибути класу, а також довільно задані характеристики об'єктів. Результати пошуку зазвичай відображаються у вигляді дерева об'єктів, які відповідають умові запиту.

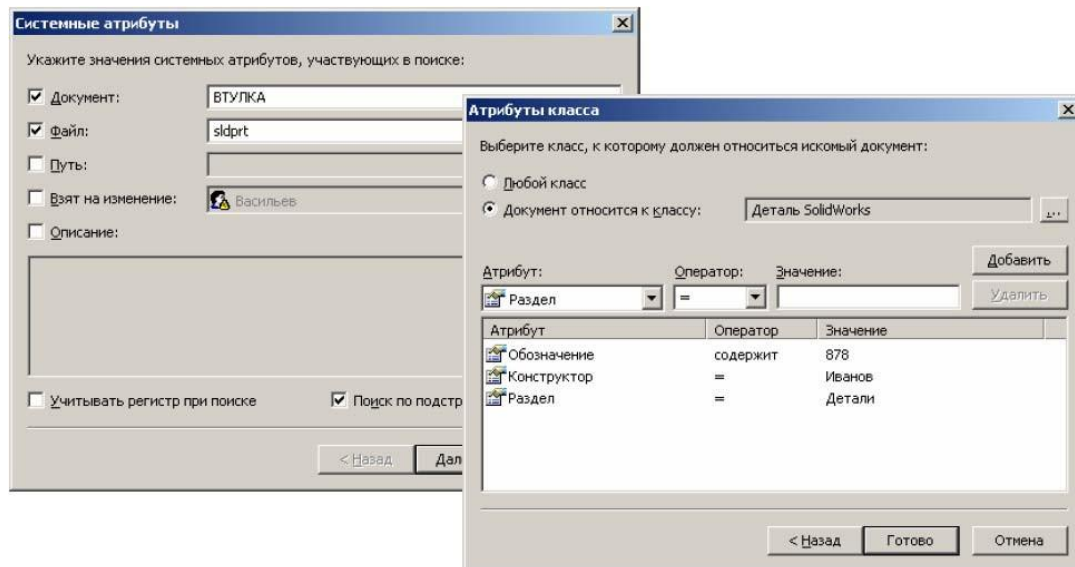


Рис. 1. Налаштування запиту на пошук документа

### 6.3 Розмежування доступу

PDM-система надає ефективні засоби для управління доступом до інформаційних ресурсів сховища. PDM дозволяє багатьом користувачам з різними повноваженнями зберігати і обробляти документи в єдиному сховищі незалежно від інших користувачів, надаючи або забороняючи доступ до даних з боку інших користувачів. Поряд з цим PDM дає можливість одночасно зберігати документи різного рівня секретності: документи загального доступу, секретні документи, цілком таємні документи та ін. Список рівнів доступу налаштовується адміністратором захисту.

Система розмежування доступу призначена для реалізації визначених адміністратором захисту правил на виконання операцій користувачами над об'єктами сховища. Для цього всі сутності інформаційної системи PDM розділені на дві категорії: суб'єкти та об'єкти.

Суб'єкти є активними сутностями, а об'єкти - пасивними. Суб'єкти виконують операції над об'єктами, а ядро системи - розмежування доступу на підставі встановлених в системі правил та приймає рішення про дозвіл або відхилення запиту на доступ. В сучасних PDM-системах управління доступом не є повністю

централізованим, зосередженим в руках тільки адміністратора, - кожен користувач (конструктор, керівник проекту, технолог, працівник архіву та ін.) може сам керувати доступом до об'єктів (документів або виробів), якими він володіє.

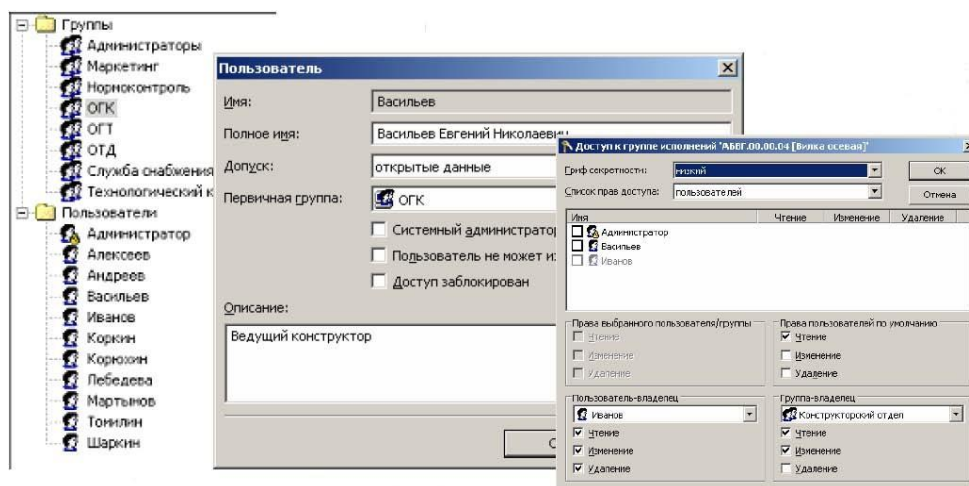


Рис. 2. Дискреційний і мандатний принципи контролю доступу

Дискреційний принцип контролю доступу (найбільш часто зустрічається в інформаційних системах) дозволяє для будь-якого з об'єктів системи визначити права кожного користувача і груп користувачів на виконання операцій над об'єктом. Недолік даного принципу полягає в тому, що при активному допуску нових співробітників до роботи з системою, а також при зміні посади, звання та інших статусів співробітника необхідно щоразу переглядати його права доступу до кожного з об'єктів системи.

Мандатний принцип контролю доступу заснований на тому, що кожному об'єкту (документу або виробу) присвоюється гриф секретності з упорядкованого списку рівнів безпеки, а кожен суб'єкт (користувач) має рівень допуску з цього списку. Наприклад, можуть використовуватися такі рівні: відкриті дані, для службового користування, конфіденційно, таємно і цілком таємно (перелік може бути налаштований індивідуально для підприємства). Операція буде дозволена, якщо рівень допуску користувача не нижче грифа секретності документа. Допуск присвоюється не тільки користувачам, але і їх групам. При перевірках обчислюється ефективний допуск - максимальне значення з допуску користувача і всіх груп, в які він входить.

Мандатний принцип дозволяє одночасно, шляхом простої зміни допуску відповідного користувача або групи, контролювати доступ

користувача або групи до великої кількості об'єктів.

Рішення про санкціонованість операції над документом приймається тільки при одночасному вирішенні його по обом принципам.

### 6.4 Інтеграція різних CAD-систем

В силу особливостей задач, що вирішуються окремими конструкторами і технологами, на підприємствах використовується безліч строго спеціалізованих пакетів. Наприклад, для створення об'ємних моделей виробів машинобудування можна використовувати методи твердотілого або поверхневого моделювання (і відповідні CAD-системи).

Для розробки більшості деталей і вузлів машинобудівних виробів досить використовувати твердотеле моделювання, однак деякі завдання, наприклад проектування складних виробів, що виготовляються штампуванням, або зовнішніх поверхонь деталей для літаків, автомобілів, побутової техніки, можуть бути виконані тільки з використанням поверхневого моделювання.

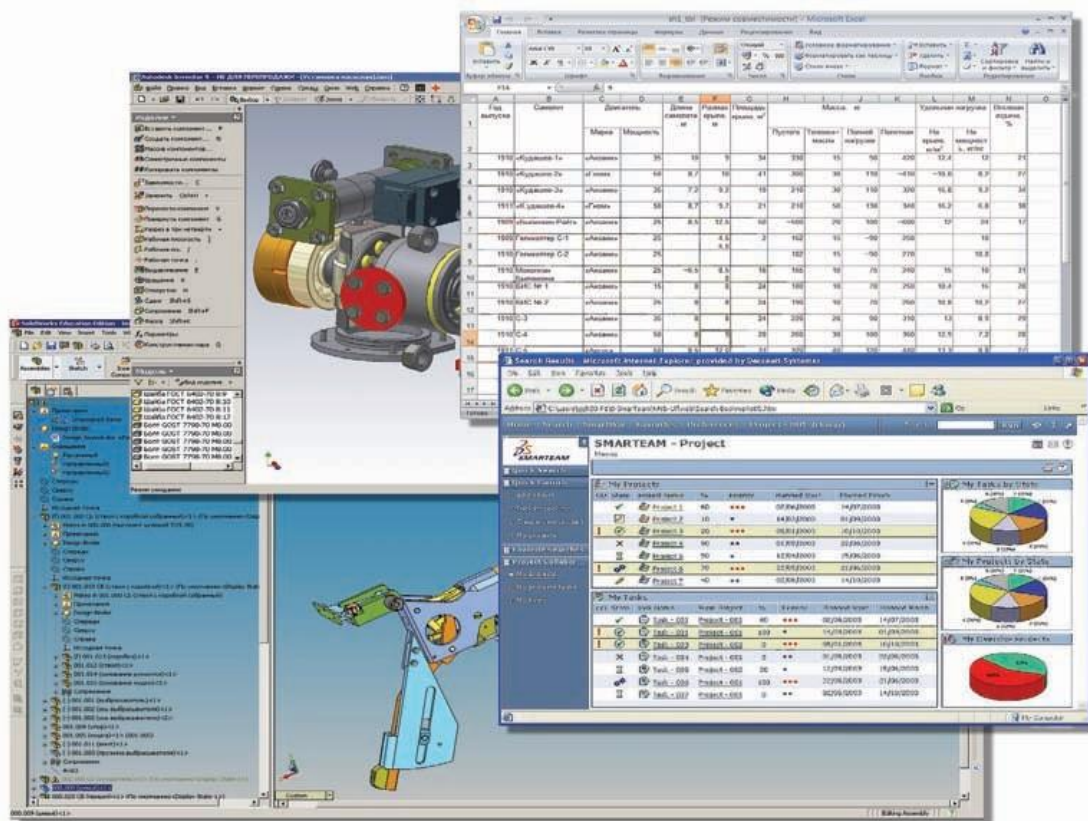


Рис. 3. Інтеграція PDM SmarTeam с Autodesk Inventor, Microsoft Office і SolidWorks

Нерідко підприємству доводиться вирішувати інші завдання, пов'язані з розробкою, наприклад, проектувати розведення для друкованих плат (якщо в виріб входять електронні компоненти), виконувати інженерний аналіз конструкції. Ці завдання також вирішуються за допомогою відповідних САД-систем. Крім цього, суміжники підприємства можуть використовувати в своїй роботі інші САД-системи.

PDM-системи є по суті центром інтегрованої системи управління, сполучною ланкою між усіма системами в корпоративному середовищі підприємства. За допомогою PDM також вирішується завдання інтеграції різних САД-систем та систем технологічного проектування. Однією з найважливіших переваг використання PDM-системи є можливість формування на підприємстві несуперечливої бази нормативно-довідкової інформації та підтримки її в актуальному стані.

## **6.5 Автоматичне відслідковування, історія створення та керування змінами**

Виріб, а також елементи виробу в процесі життєвого циклу описуються в базі даних PDM різними станами, які відносяться також до супутньої документації. Це можуть бути стани типу «Розробка», «Архів» та «Історія».

Стан «Розробка» характеризує документацію, яка розробляється в даний час. Цей стан не накладає ніяких обмежень на модифікацію елемента або документа. Елемент в стані «Архів» можна змінити, тобто автор втратив право на редагування елемента складу виробу.

Стан «Історія» характеризує анульовані документи, які раніше перебували в стані «Архів».

Зміна стану елемента в системі відбувається за допомогою спеціалізованого бізнес-процесу «Зміна стану». Даний бізнес-процес описує карту маршруту зміни станів, а також вказує вихідне і цільове стану елемента. У підсистемі повинен бути передбачений вбудований механізм ведення повідомлень про зміни. Для формування сповіщення про зміну призначений спеціалізований документ. При проведенні даного документа в системі відбувається зміна структури виробу.

За допомогою механізму управління версіями PDM веде історію всіх змін документів сховища, не накладаючи обмежень на кількість

версій. Користувач може переглядати, змінювати або використовувати різні версії, незалежні одну від одної, отримуючи тим самим засіб ведення альтернативних варіантів одного і того ж документа (аналогічний механізм використовується і для роботи зі складом виробу). Таким чином, користувач може переглянути всі збережені варіанти та використовувати будь-який з них.

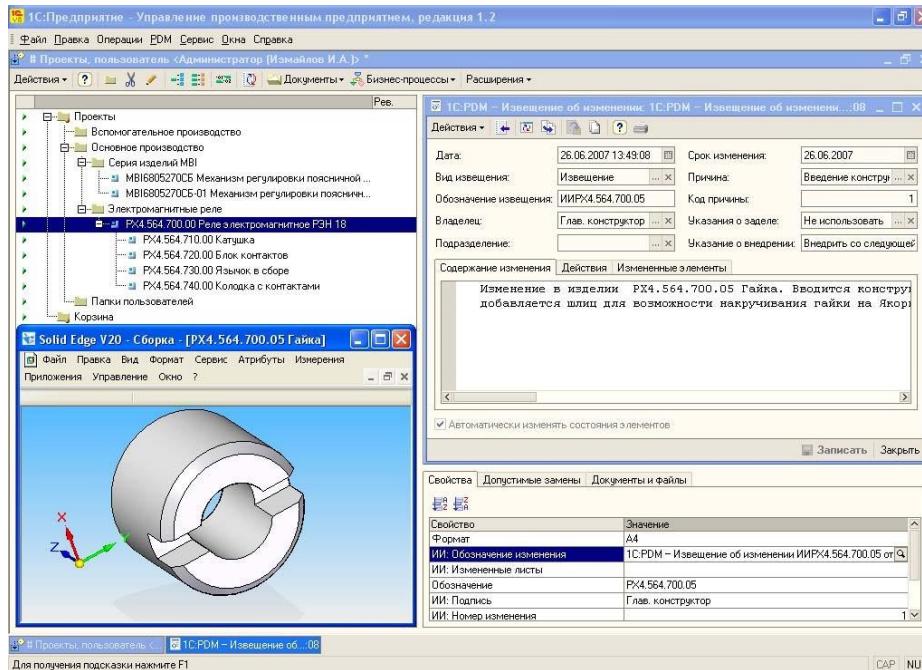


Рис. 4. Повідомлення про зміну конструкції

## 6.6 Колективна робота над проектом

Забезпечення колективної роботи в PDM реалізовано за допомогою декількох взаємопов'язаних механізмів: управління версіями документів, система забезпечення спільного доступу до документів на основі блокувань і роботи з локальними копіями (Check-In / Out) і розмежування доступу на основі дискреційного принципу.

Для упорядкування спільного доступу до документів єдиного сховища і вирішення завдання передачі документів по мережі використовуються процедури «Взяти на редагування» (Check-Out) і «Зберегти в PDM» (Check-In). При взятті документа на редагування PDM-система витягує його з сховища, створює його копію на локальному диску і встановлює в сховище блокування на оригінал документа. При цьому документ в сховищі залишається доступним для читання і використання іншими користувачами. Змінений документ повертається в сховище за допомогою процедури «Зберегти



в PDM», після чого ці зміни стають доступними всім зацікавленим користувачам.

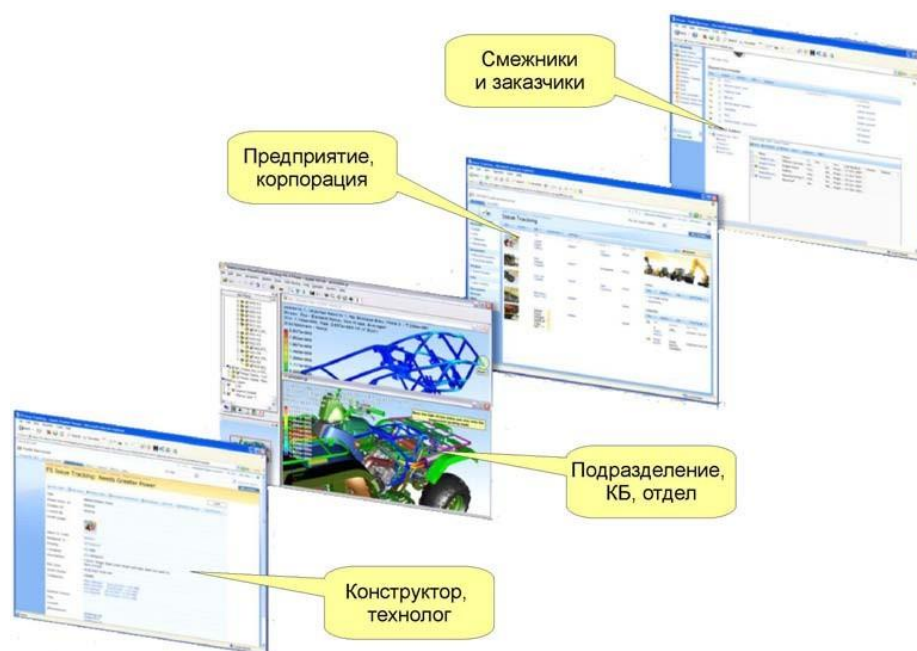


Рис. 5. Спільна робота і обмін даними між підрозділами підприємства

Наведемо приклад: провідний конструктор може взяти зі сховища на редагування повну збірку виробу. Одночасно з ним інший конструктор може також відкрити цю збірку в САД-системі на іншому робочому місці і спроектувати нову деталь, використовуючи збірку як кількість посилань, або змінити одну з деталей, яка вже входить до складу цієї збірки. При цьому ведучий конструктор негайно отримує повідомлення про зміну деталі. Далі ведучий конструктор може прийняти або відхилити змінений варіант (і навіть виправити його), а потім зберегти новий варіант всієї збірки.

Для оформлення одиничних і групових специфікацій до складу PDM входять або інтегровані, або адаптовані генератори звітів і специфікацій. Для передачі даних про структуру виробу з урахуванням усіх рівнів вкладеності в зовнішні системи сучасні PDM-системи оснащуються можливістю експорту даних в XML-форматі.

Наприклад, до складу SWR-PDM включений інтегрований варіант програми «SWR-Специфікація», що забезпечує створення специфікацій, оформлених відповідно до вимог ЕСКД, який дозволяє також підготувати дані про склад виробу в форматах Excel, текстовому та інших.

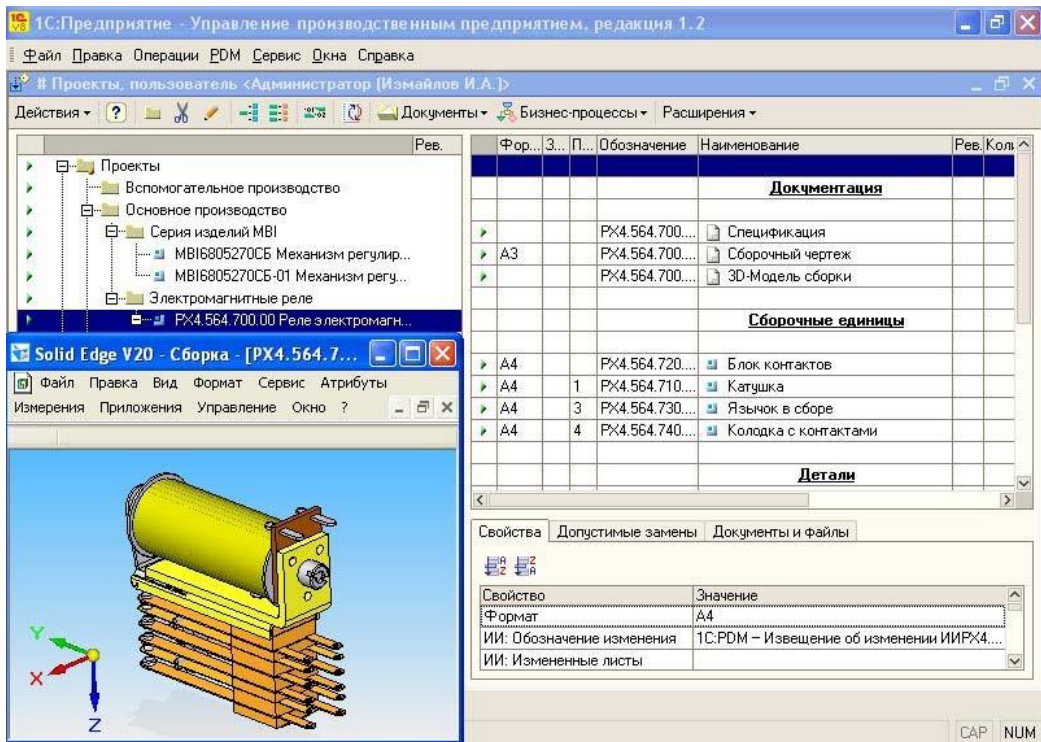


Рис. 6. Складання групової специфікації в PDM

PDM може ефективно використовуватися не тільки для зберігання та доступу до конструкторських і технологічних документів для конкретних виробів, а й для ведення нормативно-довідкової інформації за матеріалами, за стандартними і по іншим виробам, тобто застосовується в якості конструкторсько-технологічного довідника.

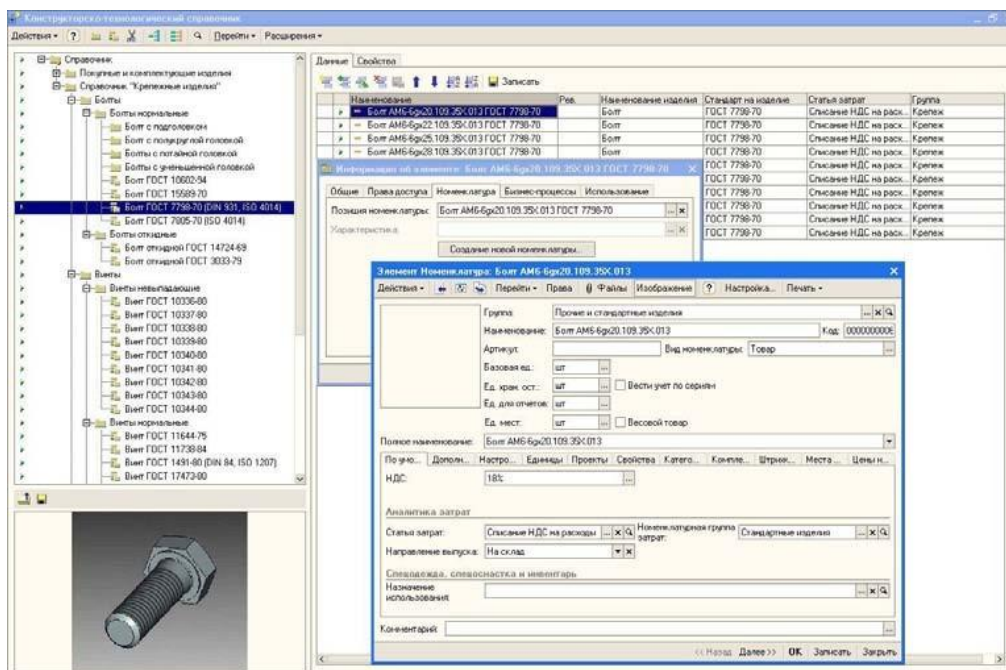


Рис. 7. Конструкторсько-технологічний довідник

Цей довідник також можна використовувати для зберігання елементів інших видів. У той же час основне призначення довідника полягає в організації обмежувального переліку, або, іншими словами, переліку вживаності стандартних виробів, матеріалів, інших виробів і заготовок.

Колективна робота над проектом завжди пов'язана з інтенсивним обміном інформацією між розробниками. PDM першого покоління зазвичай використовували зовнішню стандартну поштову систему. До листа можна прикріпити спеціальний файл-ярлик, що містить посилання на об'єкт PDM.

У більш розвинених PDM використовується спеціалізована поштова система, що дозволяє обмінюватися інструкціями, зауваженнями, коментарями. Зовнішній поштова система працює за традиційними правилами, наприклад як Microsoft Outlook, але відрізняється тим, що в повідомлення можна вкласти посилання на проект, папку і на будь-яку версію або ітерацію документа або виробу і відправити його зазначеним користувачам або групам користувачів. Отримавши повідомлення, користувач може відкрити прикріплений об'єкт в окремому вікні PDM і працювати з ним.

## **6.7 Передача даних в ERP-системи**

Однією з основних завдань ERP-систем на промислових підприємствах є виробниче планування. Для успішного вирішення цього завдання ERP-система повинна оперувати певним обсягом нормативно-довідкової інформації, без якої планування або буде неефективним, або не зможе здійснюватися зовсім. Ця інформація нерідко створюється і зберігається в системах управління даними про виріб - PDM-системах. Таким чином, стає необхідним забезпечення обміну даними між системами класів ERP і PDM.

Інформацію про виріб умовно можна розділити на два великі блоки: дані, пов'язані з конструкторсько-технологічною підготовкою виробництва, і дані, пов'язані з управлінням матеріальними потоками. Для вирішення завдань управління матеріальними потоками використовуються вхідні в будь-яку ERP-систему модулі логістики («Управління закупівлями», «Управління запасами», «Замовлення», «Закупівлі», «Склад» та ін.). Їх можливостей, як правило, досить для того, щоб повністю задовольнити потреби підприємства в управлінні рухом матеріалів, їх закупівлею і зберіганням.

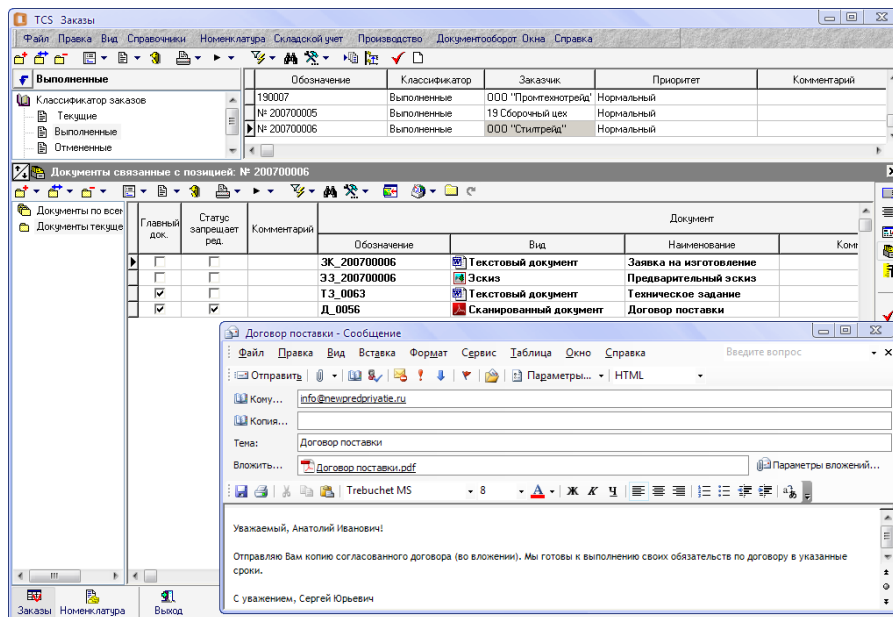


Рис. 8. Формування портфеля і документів замовлення

Основою даних для підготовки виробництва є конструкція виробу. На етапі конструювання не тільки формується концептуальний вигляд майбутнього виробу, а й створюються математично точні геометричні моделі як усього виробу в цілому, так і окремих його деталей. На цьому ж етапі створюються специфікації - по суті, опис складу виробу, норми витрат матеріалів, необхідних для виробництва, та ін.

Провідні постачальники ERP-систем останнім часом приділяють все більше уваги питанням інтеграції з PDM, так як це може забезпечити ERP-систему актуальною нормативною інформацією для планування та істотно скоротити надмірність даних і витрати часу на передачу виробів з розробки у виробництво.

Для вирішення завдання інтеграції ERP і PDM Міжнародна організація по стандартам (ISO) в середині 90-х років розробила набір стандартів ISO 10303 STEP, що включає в себе різні прикладні протоколи інтеграції, мова розробки Express для опису моделей даних, механізми тестування та ін. Підтримка цього стандарту виробниками CAD, ERP і PDM-систем могла б істотно полегшити проблеми інтеграції додатків між собою. Однак, незважаючи на всі зусилля, стандарт ISO не отримав широкого поширення, і сьогодні на ринку не так багато систем, що підтримують інтеграцію з його допомогою.

В основному інтеграція виконується двома шляхами: або за допомогою API, або за допомогою файлів експорту / імпорту даних. Використання API більш вписується в традиційні уявлення про

технологічну інтеграцію і дозволяє домогтися більш тісної інтеграції систем, однак має ряд обмежень. Перш за все існує сильна прив'язка розробленого інтерфейсу до конкретних версій інтегрованих продуктів. Навіть незначні зміни в структурі даних одного з таких продуктів можуть викликати переробку інтерфейсів. Крім того, для розробки інтерфейсів необхідні досить серйозні знання в програмуванні.

Використання файлів експорту / імпорту для інтеграції хоча і менш технологічне (обмін файлами в рази простіше, ніж застосування інших засобів інтеграції), проте в ряді випадків забезпечує більш гнучкий підхід і не вимагає настільки глибоких знань в програмуванні, як при використанні АРІ. Тому більшість проектів по інтеграції виконуються саме таким способом.

Ефективність виробництва, успіх продажів і якість післяпродажного супроводу складних технічних виробів все більше і більше залежать від того, як швидко і своєчасно всі етапи життєвого процесу такого роду виробів будуть підтримані різного роду документами, посібниками, інструкціями, описами, каталогами запасних частин і комплектуючих та ін.

З розвитком глобальних мереж, ємності серверів, поширенням мобільних пристроїв з бездротовим доступом на зміну традиційним паперовим копіям технічних документів приходять електронні публікації. Крім компактності носія і системи перегляду, вони можуть забезпечити високу ступінь автентичності і актуальності документації, так як при мережевому доступі звернення відбувається до єдиної копії документа.

Публікація креслеників має на увазі під собою переклад їх в форму, що забезпечує перенесення між робочими місцями, передачу по каналах електронного зв'язку з гарантованим збереженням всієї візуальної інформації, позначень, стилів тексту, типів ліній та ін. Виконати таку процедуру з використанням вихідного робочого формату файлів (у випадку з AutoCAD - DWG) представляється складним, тому що вимагає досить трудомісткого процесу копіювання шрифтів, зовнішніх блоків, бібліотек штрихових візерунків і пунктирних ліній. Крім того, в більшості випадків стоїть завдання зробити кресленик недоступним для редагування. Для забезпечення вирішення всіх цих завдань існують кілька технологічних рішень.

DWF (Design Web Format) - це безпечний формат файлу,

розроблений Autodesk для передачі проектних даних у вигляді, який був би незалежним від оригінального прикладного програмного забезпечення, апаратних засобів або операційної системи, за допомогою якої створювалися дані проекту. Файл DWF може описати дані проекту, що містять будь-яку комбінацію тексту, графіки і зображень в незалежному пристрої. Ці файли можуть бути одним листом або багаторазовими листами, дуже простими або надзвичайно складними з багатим використанням шрифтів, графіки, кольору і зображень. Для перегляду файлів DWF пропонуються безкоштовні засоби перегляду, в тому числі і вбудовані в інтернет-браузери.

Альтернативним рішенням є використання популярного формату PDF, розробленого фірмою Adobe, який початково призначався для подання в електронному вигляді поліграфічної продукції, але згодом отримав широке поширення будь-яких текстових і графічних документів. Перевагою використання PDF для публікації креслеників є те, що для перегляду можна використовувати офіційну безкоштовну і широко поширену універсальну програму Acrobat Reader, а також програми сторонніх розробників.

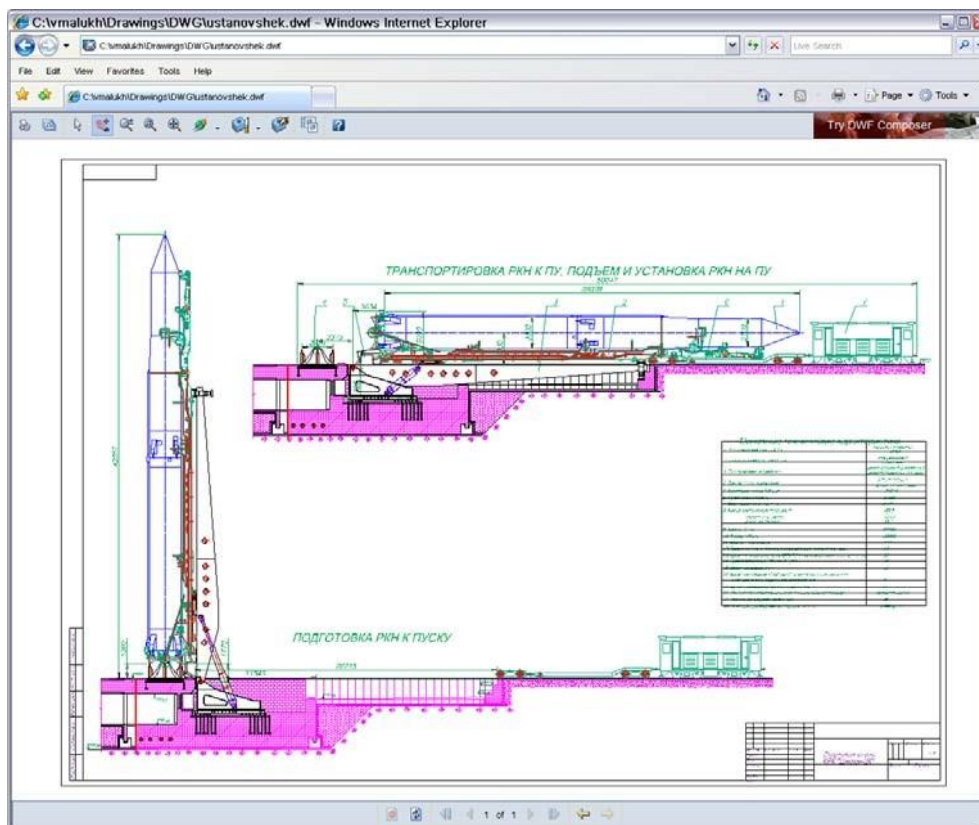


Рис. 9. Перегляд кресленника, опублікованого в DWF-форматі за допомогою інтернет-браузера

Аналогічно плоским кресленикам, існує необхідність передачі 3D-проектів на робочі місця, на яких не встановлена САПР, в якій проект створений. Для вирішення цього завдання створено незалежні від САПР інструменти публікації проектних даних: система eDrawings розробки компанії SolidWorks, формат 3D-XML, розроблений Dassault Systemes, розширена специфікація вже згаданого формату DWF компанії Autodesk, формат 3D PDF фірми Adobe, що дозволяє вставляти тривимірні ілюстрації в електронні текстові документи. Розглянемо таку технологію на прикладі eDrawings.

eDrawings - це незалежний формат полегшеного подання та публікації конструкторських даних, отриманих в САД-системі. Він схожий на загальновідомі формати обміну даних Parasolid, STEP, IGES і VRML, але це зовсім не одне і те ж саме. На відміну від форматів, призначених лише для обміну даними про ілюстрації між різними тривимірними редакторами, eDrawings - це незалежний інструмент уявлення (перегляду, друку) і анотування даних.

У порівнянні з іншими, формат eDrawings має ширші можливості представлення графічної інформації (як тривимірної, так і двовимірної креслярської) і пред'являє значно менше вимог для забезпечення цього подання. 3D-моделі і 2D-кресленики, збережені у форматі eDrawings, можна переглядати на комп'ютері, на якому не встановлена жодна САД-система. Перегляд даних здійснюється за допомогою спеціального додатку - eDrawings Viewer, який розповсюджується безкоштовно. Сьогодні формат eDrawings в тому чи іншому вигляді підтримують практично всі відомі зарубіжні та багато російських САД-платформи.

Крім малого обсягу файлів, можливості надання збережених даних приймаючій стороні для перегляду без наявності САД-системи, гнучкості в поданні даних (можна переміщати, робити прозорими або приховувати компоненти, створювати перетину), найголовніше, що надає система eDrawings, - можливість рецензування моделей або креслень і збереження рецензій в одному файлі.

eDrawings і аналогічні системи забезпечують можливість передачі моделі замовнику, партнеру, керівнику і будь-яким іншим зацікавленим особам, в результаті чого вони можуть ознайомитися з наочно представленими спроектованим виробом, не вдаючись до САД-системі. При цьому інтелектуальні права розробника надійно захищені, наприклад, за допомогою заборони виведення в STL і

проставляння розмірів. З використанням такого методу публікації проектів досить просто здійснюється організація колективної роботи над проектом різних служб підприємства. Анотація документів (на професійному сленгу - функція «червоний олівець») дозволяє проектувальнику легко отримувати зауваження або вимоги по доопрацюванню виробу від замовника (керівника проекту). Один і той же документ можуть по черзі рецензувати різні учасники процесу розробки, додаючи свої специфічні вимоги до проєктованого об'єкту.

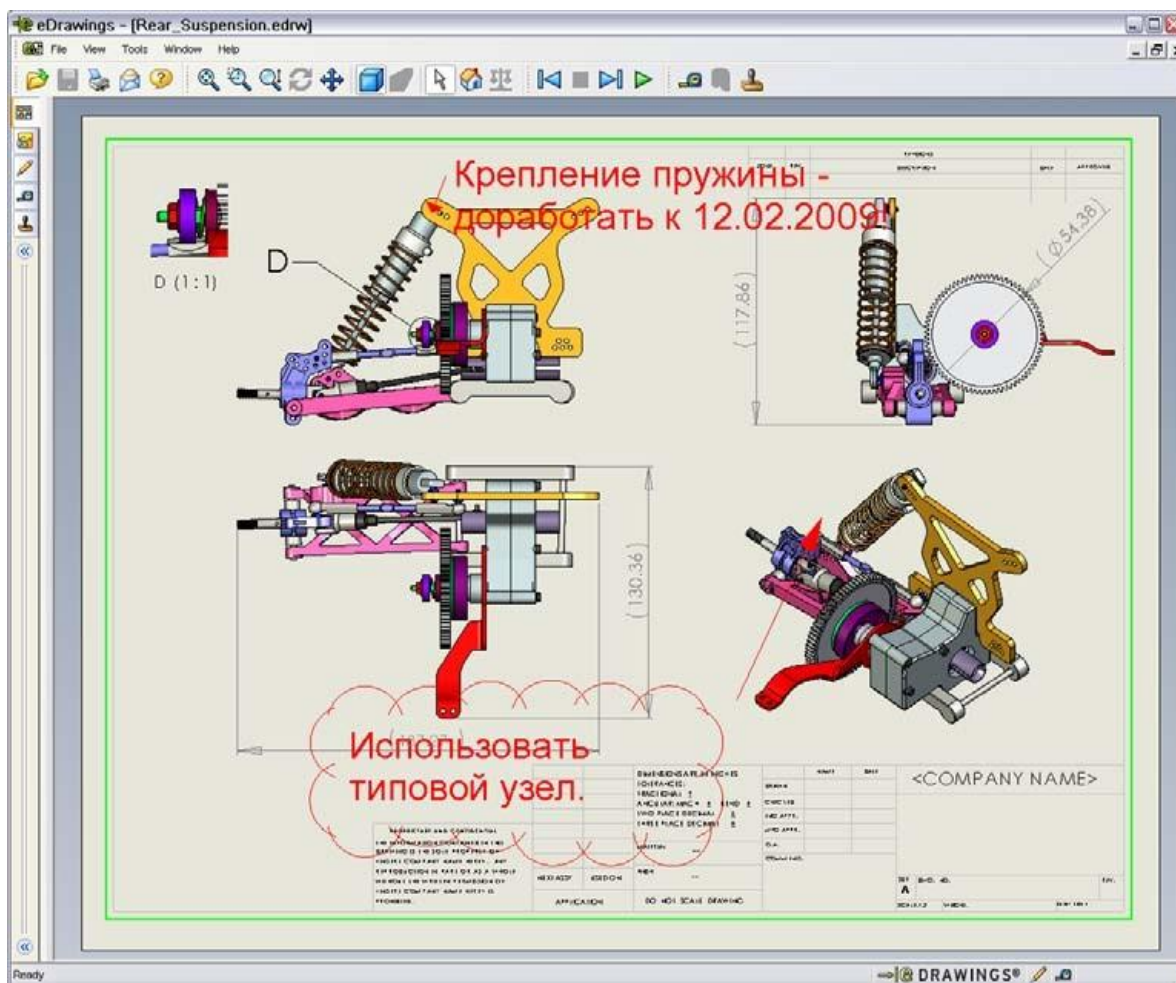


Рис. 10. Проект у форматі eDrawings з позначками замовника

Після повернення документа розробник, проаналізувавши всі замітки, може відповісти на кожну з них, прийняти її або відмовити рецензенту. Всі відповіді на зауваження також зберігаються в єдиному файлі. Після цього документ може бути знову відісланий приймаючій стороні для ознайомлення з відповідями розробника, поки всі вимоги не будуть враховані, а виріб - спроектовано належним чином.

Особливе місце в створенні і публікації технічної документації



займають технічні ілюстрації. Вони використовуються в інструкціях по збірці, ремонті, експлуатації виробів, каталогах запасних частин, в навчальних посібниках і рекламних буклетах. На відміну від традиційних креслень, в яких застосовується стандартизоване символічне зображення елементів конструкції, в технічних ілюстраціях більше уваги приділяється наочності і близькості зображення до зовнішнього вигляду реального виробу. Порівнюючи креслення і технічні ілюстрації, можна виділити наступні відмінності:

- технічні ілюстрації швидко і ясно доводять різну інформацію про розроблений продукт, зазвичай показаний в ситуації, коли продукт вже використовується, збирається чи обслуговується;
- на ілюстраціях відображаються в першу чергу значущі деталі, несуттєві часто опускаються або зображуються умовно;
- широко використовуються різні образотворчі прийоми, наприклад перспективні види, видалення прихованих ліній, розрізи, збільшені фрагменти, які виділяють ключові деталі ілюстрації.

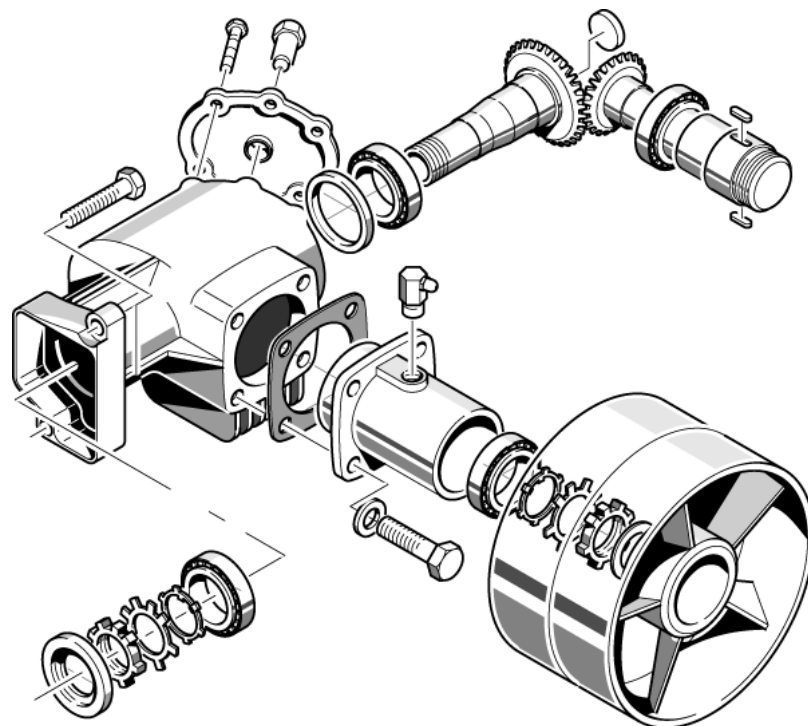


Рис. 11. Приклад технічної ілюстрації, виконаної в пакеті Arbortetxt IsoDraw

Найбільш типовою системою для підготовки технічних ілюстрацій з використанням вихідних даних CAD є сімейство продуктів Arbor IsoDraw компанії PTC, зокрема пакет Arbortext IsoDraw CADprocess, який дозволяє автоматично створювати

двовимірні ілюстрації з тривимірних моделей САПР з одночасним встановленням посилань на оригінальні файли САПР. Всі зміни, зроблені в початкових моделях, автоматично регенеруються в ілюстрації. В результаті розробку ілюстрацій можна починати на ранніх стадіях розробки виробу, що скорочує час розробки. У разі необхідності ілюстратори коректують вихідну графіку і вручну додають елементи рисунка.

Природним кроком у розвитку технологій публікації електронної документації стала поява інтерактивних документів, здатних показати не тільки статичні схеми та ілюстрації, але і анімовані інструкції по збірці, ремонту та експлуатації. Інтерактивна технічна та експлуатаційна документація, електронні каталоги і навчальні системи сьогодні стають стандартом де-факто при постачанні продукції замовникам. Особливо важливе це питання для підприємств автомобілебудування, аерокосмічної галузі, суднобудування і військово-промислового комплексу, що випускають складну наукомістку продукцію. В даному контексті автоматизація праці розробників інтерактивної технічної документації набуває все більшої актуальності, одним з характерних прикладів засобів створення таких документів є пакет 3D VIA Composer компанії Dassault Systemes.

3D VIA Composer уможливорює створення технічних ілюстрацій, відео та інтерактивних 3D-об'єктів, які не тільки забезпечують краще сприйняття інформації, але і підвищують якість документації. Використання інтерактивних і графічних елементів дозволяє скоротити обсяг приміток, завдяки чому знижуються витрати на переклад текстів при випуску документації на декількох мовах.

Система дозволяє імпортувати 3D-дані з більшості сучасних CAD і PLM-систем в їх власні формати або в 3D XML. Імпортовані об'єкти групуються в збірку, на основі якої може бути сформована специфікація. Розроблені інтерактивні керівництва можна зберігати у вигляді компактних EXE-файлів з вбудованим безкоштовним переглядачем 3D VIA Player. Завдяки цьому їх можна відкрити на будь-якому комп'ютері без використання попередньо встановлених CAD-систем. Проекти також можна зберігати в різних стандартних форматах, наприклад PDF, HTML, SVG, CGM, 3DXML, AVI, Microsoft Office та ін., які дозволяють застосовувати графічні і мультимедійні об'єкти навіть у традиційній текстовій документації.

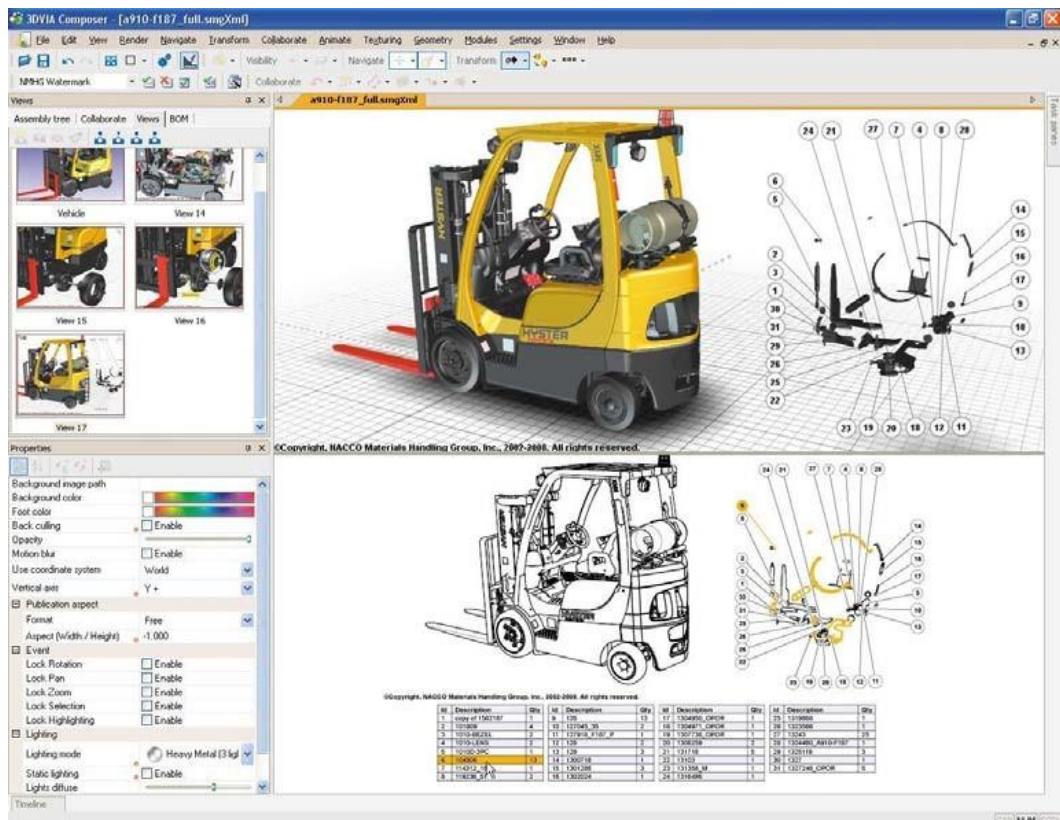


Рис. 12. Створення технічної ілюстрації та складальної специфікації на основі 3D-моделі

Застосування 3D VIA Composer і аналогічних йому систем дозволяє істотно скоротити час, що витрачається на переробку або оновлення документації при внесенні змін у конструкцію виробу. Оновлення відбувається автоматично за рахунок асоціативного зв'язку з конструкторською 3D-моделлю. Вартість і терміни розробки документації скорочуються за рахунок більш ефективного використання інформації про проєктований виріб: розробку документації можна починати на ранніх етапах, коли конструкторська модель ще не сформована повністю, а по завершенні проєктування легко оновлювати графічний і мультимедійний контент в підготовленому шаблоні документа.

Інтерактивні документи можуть бути захищені від нелегального використання шляхом призначення прав доступу до функцій перегляду, копіювання та друку.

Пакети підготовки інтерактивних документів можуть успішно вирішувати завдання підготовки інтерактивної технічної документації не тільки як самостійний продукт, а й в складі PDM. Як правило, для підвищення ефективності роботи процес розробки документації ведеться паралельно з проєктуванням самого виробу,

що дозволяє скоротити час, що витрачається на переробку або оновлення документації при внесенні змін у конструкцію виробу. Виконавець документації при роботі у взаємодії з розробниками виробу через PDM-систему отримує ряд переваг:

- паралельна робота «конструктор виробу - розробник документації»;
- логічний зв'язок технічної документації з основною структурою виробу;
- можливість відстеження актуальності вихідних даних і автоматична синхронізація інструкції та реальної моделі;
- отримання сповіщень при внесенні змін до дизайн виробу;
- капіталізація і багаторазове повторне використання знань;
- перегляд 3D-моделей без спеціалізованого програмного забезпечення.

Крім цього, безумовний вигравш дають і стандартні можливості використання PDM-системи, такі як:

- вибірковий доступ і безпечно зберігання інформації;
- контроль версій;
- функціональні можливості пошуку даних (по атрибутам або зв'язкам);
- логічні і структурні зв'язки документів;
- спільна робота в контексті єдиного проекту;
- автоматизовані потоки робіт (Workflow).

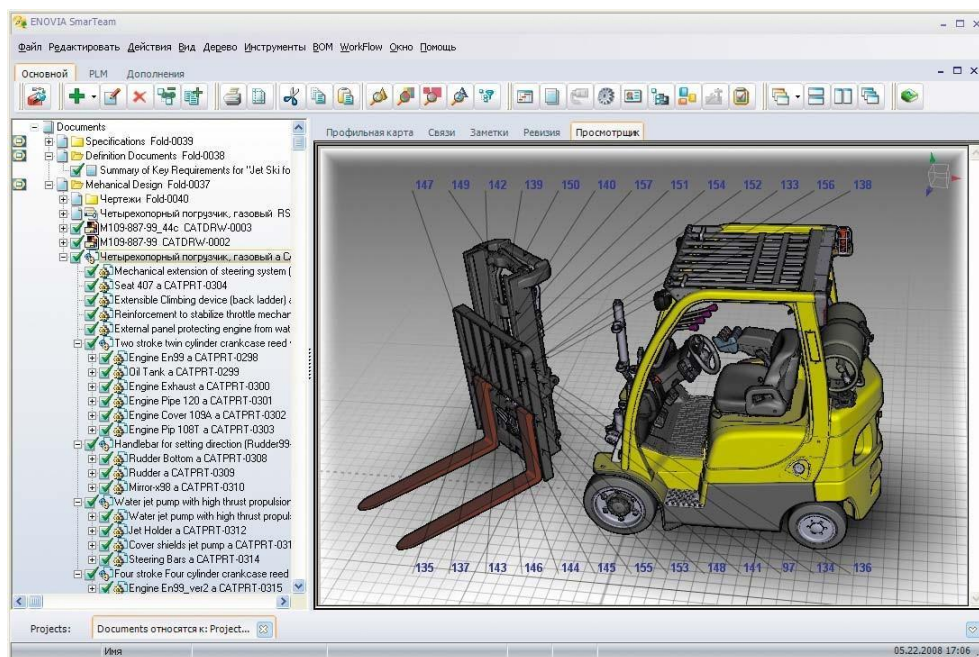


Рис. 13. Автоматичне оновлення номерів позицій моделі 3DVIA Composer в середовищі ENOVIA SmarTeam

Велика перевага систем, подібних 3D VIA Composer і ENOVIA SmarTeam, полягає в тому, що вони є САД-незалежні. Таким чином, можна організувати взаємодію з зовнішніми партнерами (наприклад, з постачальниками комплектуючих), які працюють в САД-системах, відмінних від базової системи підприємства. У структурі виробу можуть бути присутніми і немодельовані (нефізичні, допоміжні) об'єкти, такі, наприклад, як лакофарбові матеріали, монтажний інструмент та інші. Повну структуру виробу зручно використовувати для отримання різних звітів (специфікацій, відомостей покупних виробів), до того ж її легко синхронізувати з поданням даного виробу в ERP.

Створюючи інструкції по збірці і монтажу, зручно використовувати бібліотеку тривимірних моделей інструменту (гайкові ключі, пристосування та ін.). Моделі можуть бути безкоштовно завантажені з Інтернету, наприклад з каталогу постачальника.

Відкрита структура документа, що базується на XML, можливість прямого читання і запису в файл моделі і управління моделлю через інтерфейс прикладного програмування відкривають для розробників широкі можливості інтеграції інтерактивних посібників з будь-якими Windows-додатками.

### **Питання для самоконтролю**

1. Які дані зберігаються в PDM-системах?
2. Назвіть основні функції PDM.
3. Для чого використовуються атрибути класів документів?
4. Які стани можуть мати документи по відношенню до ведення історії?
5. В чому полягає суть мандатного принципу контролю доступу?
6. За допомогою яких інструментів можна реалізувати розмежування доступу до документів?
7. Наведіть алгоритм передачі даних в ERP-систему?
8. За яких умов з одним кресленником можуть працювати одночасно декілька розробників?
9. Чому виникає необхідність публікації креслень у форматі, відмінному від вихідного САД?
10. Для чого використовується метод «червоного олівця»?
11. Чим відрізняються від креслень технічні ілюстрації?

# ТЕМА 7

## СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЖИТТЄВИМ ЦИКЛОМ ВИРОБІВ

- 7.1 Концепція PLM-систем
- 7.2 Компоненти та складові PLM-систем
- 7.3 Головні процеси PLM-систем

### 7.1 Характеристика PLM-системи

В останні роки в галузевій пресі САПР все наполегливіше і частіше використовується аббревіатура PLM. Провідні постачальники, в першу чергу Dassault Systems і Siemens PLM Software, просто використовують тільки цей термін замість комплексу CAD, CAM, CAE. Однак якщо серед постачальників рішень термін став сам собою зрозумілим, слід зазначити, що споживачі часом просто не знають, що саме за ним стоїть. Щоб зрозуміти, що це таке і в чому ключова відмінність від попередніх технологій, варто трохи пригадати історію.



Рис. 1. Этапы развития технологий разработки виробів

На самих ранніх етапах розвитку проектних технологій одноосібний розробник робив для себе ескізи майбутніх конструкцій і споруд, якими він користувався при керівництві виконуваних робіт. Так тривало до початку промислової революції, коли необхідність поділу проектних робіт і виробництва спонукала створити стандартизовану систему креслярської документації, що забезпечила надійну передачу проектної інформації від конструктора на виробництво.

Ця технологія успішно проіснувала більше двох століть, значна частина машинобудівних виробів, архітектурних споруд була створена саме з її використанням. Розвиток комп'ютерних технологій дозволило на рубежі 70-х років XX століття значно знизити трудомісткість створення і особливо модифікації креслень за рахунок використання 2D CAD-систем.

Трансформація світової економіки в глобальну, висококонкурентну привела до необхідності вирішення завдання тотальної оптимізації всіх етапів життєвого циклу продукту - від формування концепції та проектування до виготовлення, експлуатації та навіть утилізації. Розглянемо характерні умови, в яких оперують сучасні підприємства і яким їм необхідно протистояти:

- малоактивний ринок;
- висока конкуренція;
- глобалізація, поглинання і об'єднання компаній;
- високі запити споживачів;
- зростаюча складність продукції;
- жорстке державне регулювання вимог до якості;
- зростаючі ціни на комплектуючі та матеріали.

Все це накладає особливі вимоги до засобів автоматизації процесу проектування і виробництва продуктів. У сучасних умовах підприємствам просто необхідно виконати наступні умови:

- бути постійно інноваційними;
- оперативно реагувати на виклики ринку;
- випускати необхідний ринком продукт;
- мінімізувати витрати.

Кінцева мета будь-якого підприємства - прибуток, ефективність бізнесу. Однією з характерних рис сучасного промислового виробництва є жорсткі вимоги до конкурентоспроможності продукції. Що, в свою чергу, вимагає і швидких темпів розробки і запуску продукції у виробництво і накладає високі вимоги на якість

продукту, його відповідність ринку. Говорячи інженерним мовою, виробництво працює в менших допуски щодо того, як це було двадцять-тридцять і навіть десять років тому. Це стало можливим багато в чому завдяки широкому впровадженню спочатку САПР, потім організації обміну даними між проектними і виробничими системами, а на сучасному етапі - створення систем, повністю описують життєвий цикл виробу від концепції до опису технологічних процесів його виготовлення та експлуатації.

Управління інноваціями, прискорення виведення нової продукції на ринок є важливою стратегічною складовою в діяльності будь-якого виробничого підприємства. Практично задача кожного підприємства полягає в реалізації досягнень науки в нові конструкції виробів і інноваційні технології. Вихід підприємств на ринок пов'язаний з жорсткою конкуренцією з боку провідних світових компаній, що використовують сучасні досягнення науки та інноваційні технології та постачають споживачам нові високотехнологічні товари, конкурентоспроможні за витратами і екологічно чисті. Підприємства поставлені перед необхідністю різко скоротити терміни освоєння та випуску нових виробів, забезпечити їх відповідність вимогам ринку до якості продукції, що виробляється і домогтися економічного зростання. Системи безперервного управління життєвим циклом виробу є найбільш ефективним засобом підвищення конкурентоспроможності підприємства на світовому ринку наукомістких виробів.

Концепція PLM розглядає весь життєвий цикл продукту починаючи з маркетингових досліджень, проектування виробів, планування і управління виробництвом, закінчуючи підтримкою і утилізацією продукту, і дозволяє координувати окремі етапи життєвого циклу продукту (PLM).

Можна зустріти різні визначення PLM. Згідно з визначенням IBM, PLM - це технологія, що дозволяє компанії управляти продуктами на всіх етапах його життєвого циклу, починаючи від стадії розробки концепції і закінчуючи виведенням з експлуатації. Аналітики компанії CIMdata, що спеціалізується на аналізі світового ринку PLM, визначають технологію як стратегічний підхід, який дозволяє за допомогою набору бізнес-рішень підтримувати спільну розробку, менеджмент, поширення і використання інформації про продукт, управління інформацією протягом усього життєвого циклу - від концепції до утилізації. PLM-системи забезпечують спільне



створення, управління, поширення і використання інформації і об'єднують персонал, процеси. Слід розуміти, що PLM - це не готове або настроюється програмне рішення, а якась сукупність технологій і методів інтеграції вже функціонуючих на підприємстві комп'ютерних систем із засобами колективної роботи з метою створення єдиного інформаційного простору підприємства, в якому співпрацюють конструктори майбутніх виробів, інженери, технологи, а також економісти і фахівці з систем управління, що займаються проектуванням і технічною підготовкою майбутнього виробництва і здійсненням реального виробництва.

## **7.2 Компоненти та складові PLM систем**

PLM - англійська аббревіатура від Product Lifecycle Management, в перекладі «управління життєвим циклом виробу». Існує поширена думка, що це «просто» нова назва для комплексу програмних засобів проектування (CAD), підготовки виробництва на ЧПУ (CAM) і інженерних розрахунків (CAE), об'єднаних в єдину системою управління документообігом (PDM). Частина істини, звичайно, в цьому є, всі ці компоненти - невід'ємна частина комплексу PLM, але лише частина, хоча і ключова.

Концепція PLM передбачає, що створюється єдина інформаційна база, яка описувала три наріжні компоненти: Продукт - Процеси - Ресурси і взаємозв'язку між ними. Наявність такої об'єднаної моделі забезпечує можливість швидко і ефективно пов'язувати всі ці три компоненти, оптимізуючі рішення під вимоги бізнесу.

PLM включає в себе кілька елементів:

- базові стандарти та інформаційні технології (наприклад, XML, засоби візуалізації, спільної роботи і інтеграції виробничих програм);
- системи автоматизованого проектування виробів, технологічного процесу, такі як CAD, CAM, CAE і т.д.;
- основні програми для управління інформацією, контент-менеджменту, документообігу і т.д.;
- додатки для управління конфігураціями; спеціалізовані галузеві рішення.

Робота всіх проектантів, конструкторів, технологів з єдиною моделлю забезпечує зниження витрат на численні узгодження, неминучі при традиційній технології роботи, і виключає наявність дублюючих або взаємовиключних документів. На практиці це

дозволяє значно скоротити матеріальні і тимчасові витрати на створення продукту і запуск його у виробництво, минаючи численні налагоджувальні варіанти, що втілюються в реальності, тобто отримати проект продукту, готового буквально з перших примірників до відправки споживачеві. Світова практика вже має приклади в навіть таких складних галузях, як, наприклад, авіабудування, коли найперший зібраний літак нового проекту після перевірочних випробувань був переданий в реальну експлуатацію. Звичайно, такі ідеальні випадки все-такі рідкісні, але кількість випробовуваних варіантів продукції в сучасній автомобільній, авіаційній, верстатобудівної промисловості скоротилося кардинально, а терміни на створення нових продуктів - буквально в рази. Існують цілі класи технічних об'єктів, в яких досвідчені зразки просто неможливі (наприклад, цілий завод) і «натурні експерименти» на доведення їх функціонування до оптимального рівня надзвичайно дороги.

Може здатися, що PLM - панацея, яка рятує від помилок в реальному виробі. Частково це дійсно так, ризик створити невдалий продукт при використанні PLM-технологій значно знижується, але за однієї дуже важливої умови. Ця умова - компетентність фахівців, зайнятих створенням продукту. PLM не замінює фахівців, але значно збільшує ефективність їх праці. Відповідно, маючи в руках такий потужний інструмент, некомпетентний конструктор здатний внести помилку, яка як сніжний ком викличе ланцюжок інших помилкових або неоптимальних рішень. Тому впровадження PLM - це аж ніяк не тільки закупівля відповідних програмних систем, це ще й обов'язкова ретельна підготовка кадрів, які працюватимуть з ними.

В цілому ж PLM - сукупність цих програмних систем, методики їх застосування, а головне - людей, що володіють належною компетентністю. Можна сказати, це ціла філософія життя виробництва, що спирається на програмні засоби. Давайте розберемося по порядку, як з'явився PLM, в чому його суть і що він дає сучасному виробництву. А так як інформаційна модель PLM охоплює виріб і його життя цілком, то ця підготовка обов'язкове для всієї ієрархії учасників створення продукту - від рядового техника до генерального директора підприємства.

Використання інформації про виріб на кожному етапі його життєвого циклу дає можливість компаніям виробляти інноваційну продукцію високої якості за рахунок впровадження тотальної системи менеджменту якості) на всіх рівнях виробничої ієрархії.

## 7.3 Головні процеси PLM

Впровадження і використання PLM покликане забезпечити вирішення цих завдань шляхом виконання семи головних макропроцесів.

Природно, немає необхідності кожного вивчати абсолютно всі елементи системи, але ті, які відносяться до рівня його компетенції, а бажано і суміжні - просто необхідно. Адже внесок кожного в створюваний проект негайно відбивається на роботі інших учасників.

Про більшість цих процесів детально розповідалося в попередніх розділах. Зараз стоїть трохи докладніше зупинитися на системі накопичення і перевикористання знань (КВЕ, Knowledge Based Engineering), що становлять інтелектуальну власність підприємства. Це один з новітніх напрямків у розвитку САПР.

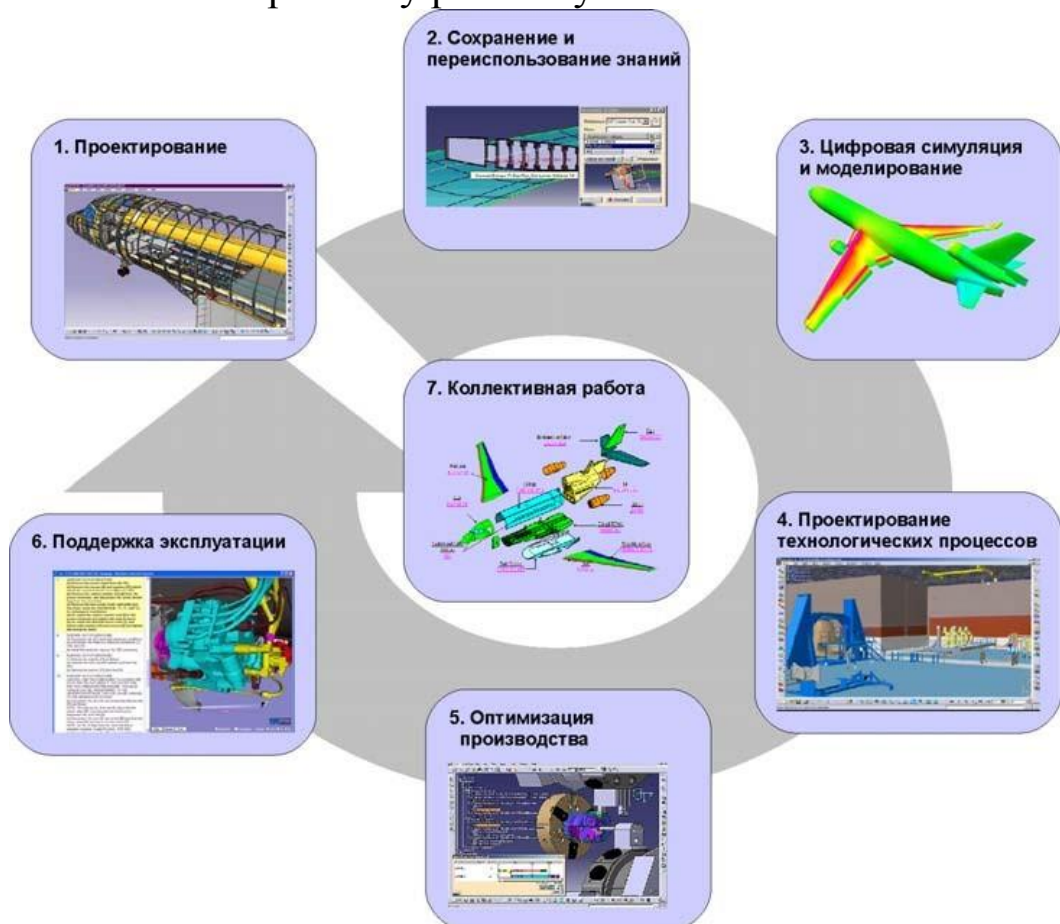


Рис. 2. Основні макропроцеси, здійснювані PLM-системою

Засоби КВЕ з метою зменшення часу проектування і виготовлення виробу забезпечують можливість за рахунок автоматизації повторюваних процесів і накладення певних правил під час проектування поліпшення якості проектування завдяки застосуванню інженерних знань, закладених в систему. Програмні

реалізації КВЕ зазвичай містять середу для програмування на мові інженерних знань і інтегруються безпосередньо в CAD/CAM-додатку, таким чином, конструктори і дизайнери можуть займатися безпосередньо проектуванням виробу, не займаючись трансляцією даних між системами КВЕ і MCAD.

Засоби КВЕ забезпечують не тільки перевикористання накопичених елементів для типових конструкцій, але і створення інноваційних рішень шляхом використання раніше відпрацьованих варіантів:

Використовуючи типові конструктивні схеми окремих агрегатів планера, можна створити принципово нові, які раніше не опрацьовується компонувальні рішення. При цьому власне конструктивна і технологічна опрацювання агрегатів залишається стандартною, освоєної в проектній і виробничій практиці.

Повертаючись до загальної схеми взаємодії макропроцесів PLM, слід особливо відзначити сполучну роль процесу колективного доступу до даних і взаємодії учасників проекту на всіх етапах його реалізації. На ранніх етапах розвитку PLM технічну функцію взаємодії забезпечували системи управління документообігом (PDM), проте у міру розширення вимог до управління колективною роботою їм на зміну приходять концепція і продукти управління віртуальною розробкою (VPDM, Virtual Product Development Management) або спільного управління визначенням виробу (cPDM, Collaborative Product Development).

Системи VPDM охоплюють більш широке коло завдань - не тільки збереження проектної та технологічної документації, а й взаємодія з партнерами і суміжниками, управління процесом верифікації та оптимізації конфігурації виробу і технологічних і експлуатаційних процесів, стратегічне планування на етапі опрацювання концепцій та ін.

У процесі спільного проектування створюється електронна модель виробу. Інформація про продукт, що міститься в PLM-системі, є цифровим макетом цього виробу і основою для прийняття рішення по всіх етапах життєвого циклу продукту, починаючи від вироблення технічних вимог до виробу та обґрунтування техніко-експлуатаційних показників виробництва нового високотехнологічного продукту.

Цифровий макет - сукупність електронних документів, що описують виріб, його створення і обслуговування, містить електронні

креслення і (або) тривимірні моделі виробу і його компонентів, креслення і (або) моделі необхідного оснащення для виготовлення компонентів виробу, різну атрибутивну інформацію по компонентам (номенклатура, вага, довжина, особливі параметри), технічні вимоги, директивні документи, технічну, експлуатаційну та іншу документацію.

Електронна модель виробу використовується в цілях:

- інтерпретації всього становить модель набору даних (або його частини) в автоматизованих системах;
- візуального відображення конструкції виробу за допомогою 3D-макетів в процесі виконання проектних робіт, виробничих та інших операцій;
- виготовлення креслярської конструкторської документації в електронній та (або) паперовій формі.

Наявність електронної моделі виробництва виробів повинно включати в себе не тільки технічні параметри виробів, а й технологічні та економічні параметри, пов'язані з підготовкою їх виробництва і виробництвом. Необхідно формувати комплексну цифрову модель проєктованого виробу, яка містить конструкторську (електронну модель виробу), технологічну (інженерну цифрову модель відпрацювання технологій збирання та виробництва) і техніко-економічну модель виробництва і експлуатації виробу. Таким чином, формується єдине джерело знань про виріб і процесах його виготовлення.

Технологічні дані про виріб, що формуються в процесі проєктування, необхідні як в системах управління виробничими процесами (MES), так і в системах планування і управління ресурсами підприємства (ERP), за допомогою яких здійснюється управління реальним виробництвом на основі замовлень, що поступають.

Термін Relational Generative Design (RGD) поки не має термінологічного аналога в українській мові. Цю методологію можна визначити як «Паралельне розділене по стадіях проєктування з використанням і накопиченням знань».

Основні принципи методології RGD полягають в наступному:

- Процес проєктування поділяється на стадії.
- Кожній стадії відповідає спеціалізація користувачів за ролями, за поданнями даних, тобто за видами моделей (деталі або збірки), з прав доступу.

- При переході до наступної стадії моделі успадковують тільки ті дані, які необхідні для роботи на цій стадії.
- Обмеження по ролям забезпечує для кожного користувача рольової групи видимість тільки тих даних попередніх стадій, які спеціально визначені як необхідні на даній стадії.
- Разом з тим зберігається асоціативний зв'язок з даними попередніх стадій проектування.

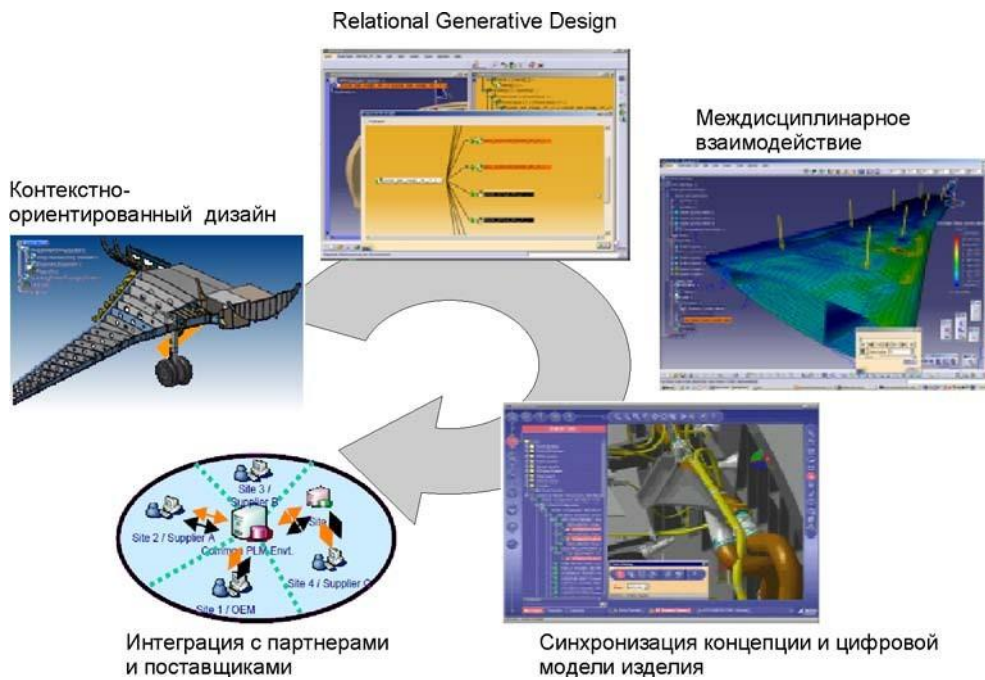


Рис. 3. Основні функції VPDM

Таким чином, забезпечуються можливість відстеження будь-яких змін, виконаних на попередніх стадіях, конфіденційність інформації і можливість роботи з максимально полегшеним поданням моделей на кожній стадії. При цьому гарантується цілісність проекту в цілому, так як всі зв'язки відслідковуються по асоціативним посиланням.

В даний час в світовому промисловому виробництві спостерігається бурхливий процес впровадження і освоєння концепції і рішень PLM, в першу чергу в таких галузях, як автомобілебудування, авіабудування, суднобудування. Практично неможливо втриматися на світовому ринку на конкурентоспроможному рівні без використання технологій PLM. Ці рішення широко застосовують в своїй практиці провідні промислові корпорації, такі як Boeing, Airbus, BMW, Daimler, Toyota і ін.

На жаль, в нашій країні з різних об'єктивних і суб'єктивних причин поява і впровадження цих технологій помітно відстало по часу від «Заходу». Більшість поки обмежуються простими засобами

автоматизації випуску конструкторської та технологічної документації, вважаючи це достатнім. Проте час підтискає, якщо підприємство має намір успішно конкурувати на сучасному, по суті міжнародному ринку, варто задуматися про використання сучасних засобів створення продуктів. Приклади таких успішних підходів вже є. Звичайно, робота з освоєння нових технологій доведеться виконати чималу, але дорогу здолає той, хто йде, а досвід тих, хто вже пройшов цей шлях, говорить, що ефект, в першу чергу економічний, в кінцевому підсумку значний.

### **Питання для самоконтролю**

1. Дайте поняття життєвого циклу виробу.
2. Назвіть три ключові складові PLM-системи.
3. Яка програмна компонента є сполучною ланкою PLM-системи?
4. Назвіть основні процеси управління життєвим циклом виробу.
5. У чому відмінність VPDM від традиційних систем управління документообігом?
6. Опишіть перспективи використання PLM-систем на виробництві.
7. У чому полягають основні принципи методології RGD?
8. Охарактеризуйте системи накопичення і перевикористання знань.
9. Вкажіть компоненти PLM систем.
10. У чому полягають переваги використання PLM систем?

## ТЕМА 8

### СПЕЦІАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ

8.1 Сучасні плотери

8.2 Інструменти для виконання швидкого прототипування

8.3 Пристрої вводу та вказівок

8.4 Відповідність відеоадаптерів сучасним САПР

#### 8.1 Сучасні плотери

В силу особливостей завдань, що вирішуються САПР, для їх ефективного використання застосовується досить широкий спектр специфічного обладнання, як правило, не має аналонів в інших галузях використання комп'ютерів. Специфіка САПР накладає свої особливості навіть на вибір стандартних компонент устаткування.

**Плотер, або графічний пристрій,** - пристрій для автоматичного креслення з великою точністю рисунків, схем, складних креслеників, карт та іншої графічної інформації на папері.

Плотери з'явилися як необхідне доповнення до 2D САD-систем, так як традиційно кресленики виконуються на аркушах великого розміру, які неможливо віддрукувати на традиційному принтері.

Перші плотери працювали на принципі пересування паперу за допомогою ролика, забезпечуючи тим самим координату X, а Y забезпечувалася поперечним рухом каретки. Раніше для побудови використовувалися пір'я різних типів, які конструктивно нагадують фломастери або чорнильні ручки.

Другим типом є планшетні (плоскі) графопобудувачі. У них папір або плівка розташовується на площині і нерухома. Над площиною встановлюється конструкція, що дозволяє переміщати пише блок одночасно по двох координатах уздовж площини. Недолік цього методу полягав в тому, що для його роботи потрібно багато простору. Але перевагою цього рішення є висока точність позиціонування пера і відповідно точність самого кресленика, що наноситься на папір.

З широким поширенням технології струминного друку з високою роздільною здатністю, здешевленням комп'ютерної пам'яті і швидкістю обробки растрових кольорових зображень плотери з пером практично зникли.

В сучасних плотерах часто комбінують друкуючу і скануючу головки, встановлені на одній каретці. Такий багатофункціональний пристрій дозволяє не тільки виводити на друк електронні кресленики



і схеми, а й сканувати раніше створені документи (наприклад, виконані вручну кресленики), а також створювати копії документів без їх введення в CAD-системи.



Рис. 1. Струменеві плотери-сканери

Незважаючи на те, що набирає популярність технологія публікації електронних креслеників і документів, широкоформатні плотери все ще залишаються досить затребуваними. Вони використовуються для друку креслеників, карт, результатів комп'ютерної візуалізації. Забезпечуючи максимальну точність, високу передачу кольору, широкий колірний обхват, плотери надають великі можливості для друку графічної інформації.

Основною їх перевагою залишається розмір одержуваного зображення - монітори розміром більше метра на метр навряд чи скоро стануть стандартним оснащенням робочих місць інженерів, конструкторів і картографів, а тому плотери доводиться використовувати для отримання «твердої копії» електронних даних - так ці дані простіше аналізувати. У ряді галузей паперовий кресленик не здає своїх позицій, наприклад на будівельному майданчику.

## **8.2 Інструменти для виконання швидкого прототипування**

Швидке прототипування (rapid prototyping) - технологія швидкого створення фізичних геометричних макетів деталей і збірок, що дозволяють оцінити зовнішній вигляд деталі, перевірити елементи конструкції, провести необхідні випробування, виготовити майстер-модель для подальшого лиття.

Ці технології почали розвиватися в 80-х роках ХХ століття і переважно засновані на принципі поступового нарощування (додавання) матеріалу або зміни фазового стану речовини в заданій області простору.

На даний момент значного прогресу досягли технології пошарового формування тривимірних об'єктів по їх комп'ютерним моделям. Побудова прототипу відбувається на основі твердотілої моделі з САД-систем або моделі з замкнутими поверхневими контурами. Більшість відомих САПР забезпечують експорт моделей у форматі STL, що є стандартом де-факто для швидкого прототипування. Модель, записана в цьому форматі, розбивається на тонкі шари в поперечному перерізі за допомогою спеціальної програми, причому товщина кожного шару дорівнює роздільній здатності устаткування по Z-координаті. Побудова деталі відбувається пошарово до тих пір, поки не буде отримано фізичний прототип.

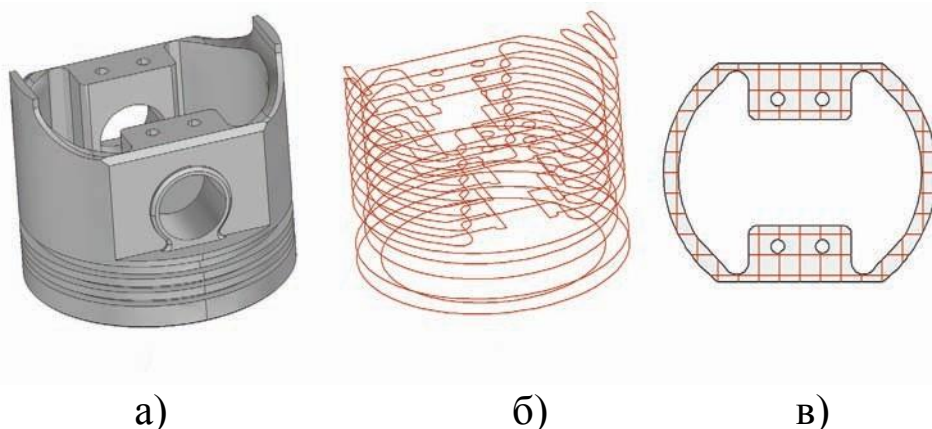


Рис. 2. Основні етапи підготовки даних для пошарового вирощування: а) 3D "модель; б) розбивка на тонкі шари з заданим кроком; в) формування траєкторії для заповнення шару

Принципова схема всіх пристроїв прототипування однакова: на робочий стіл наноситься тонкий шар матеріалу, що відтворює перший перетин виробу, потім стіл зміщується на крок вниз, і наноситься наступний шар. Таким чином, шар за шаром відтворюється повний набір перетинів моделі, реалізуючи необхідну форму.

Основною відмінністю між технологіями є використовуваний матеріал і спосіб його нанесення. Зупинимося на самих основних технологіях.

**Стереолітографія** (Stereo Lithography) є першим і найбільш поширеним методом прототипування. Принцип методу полягає в пошаровому затвердженні рідкого фотополімеру лазерним променем, які направляються скануючою системою. Стіл-елеватор знаходиться в ємності з рідким фото-полімером, крок вертикального переміщення варіюється в діапазоні 0,025-0,3 мм, що дозволяє отримувати достатньо хорошу якість поверхні.

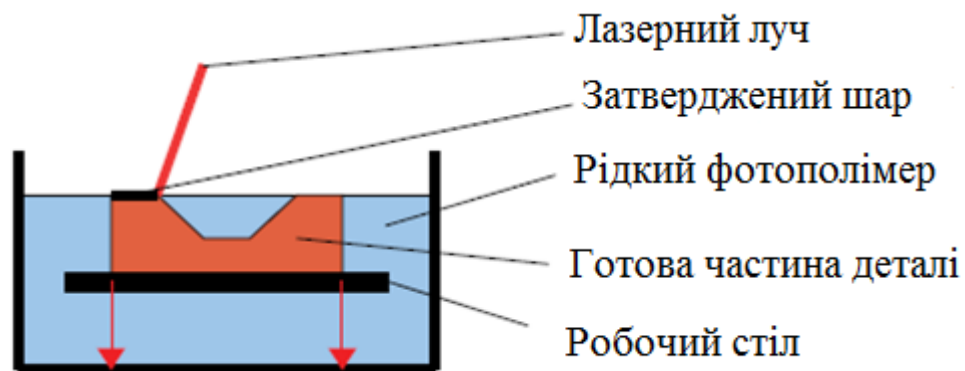


Рис. 3. Схема Стереолітографічного процесу

Після полімеризації виходить досить твердий, але крихкий напівпрозорий матеріал, схильний до викривлення під впливом атмосферної вологи. Матеріал легко обробляється, склеюється і фарбується.



Рис. 4. Приклади моделей, виконаних за технологією стереолітографії

В технології лазерного спікання порошкових матеріалів (Selective Laser Sintering, SLS) в якості робочого матеріалу використовується порошковий пластик, метал або кераміка, близькі за властивостями до конструкційних марок. На поверхню наноситься тонкий шар порошку, який потім спікається лазерним променем, формуючи

тверду масу, відповідну перетину 3D-моделі і визначальну геометрію деталі.

SLS - це єдина технологія, яка може бути застосована для виготовлення металевих деталей і формотворчих для пластмасового і металевого лиття. Прототипи з пластмас володіють хорошими механічними властивостями, можуть бути використані для створення повнофункціональних штучних виробів.

У технології ламінування листових матеріалів (Laminated Object Manufacturing, LOM) шари прототипу створюються за допомогою ламінування паперового листа. Контур шару вирізається лазером, а поверхня, яку потрібно потім видалити, ріжеться лазером на дрібні квадратики. Після видалення створеної деталі дрібно порізані надлишки матеріалу легко видаляються. Структура отриманого прототипу схожа на дерев'яну, боїться вологи.

В останні роки бурхливо розвивається метод струменевого моделювання (Ink Jet Modelling), в якому головка, яка містить від двох до десятків сопел, завдає модельний і підтримує матеріал на площину шару. Після нанесення шару можуть проводитися його фотополімеризація і механічне вирівнювання.

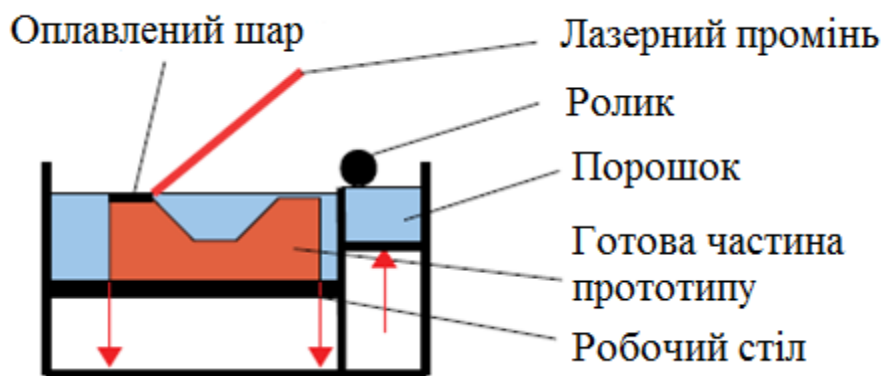


Рис. 5. Схема процесу струменевого 3D-друку

В якості підтримуючого матеріалу зазвичай використовується віск, а в якості модельного - широкий спектр матеріалів, дуже близьких за властивостями до конструкційних термопластів. Даний метод дозволяє отримувати прозорі і забарвлені прототипи з різними механічними властивостями - від еластичних, схожих на гуму, до твердих, схожих на пластики. Ця технологія, крім високої якості одержуваних моделей, досить просто реалізується в невеликих габаритах, буквально в вигляді 3D-принтерів, доступних багатьом.



Рис. 6. Приклад багатобарвної 3D-моделі яхти, створеної методом тривимірного струминного друку

### 8.3 Пристрої вводу та вказівок

Крім традиційних для персональних комп'ютерів клавіатури і миші, в САПР в силу особливостей їх застосування використовуються специфічні пристрої введення, в першу чергу - більш точної вказівки координат.

Так як початково в руки інженерів потрапили креслярські 2D САД, першими специфічними пристроями вказівки стали дигітайзери (або графічні планшети) - пристрої для перекладу паперових технічних креслеників і схем в цифрову форму.

Графічні планшети застосовуються як для створення зображень на комп'ютері способом, максимально наближеним до того, як створюються зображення на папері, так і для звичайної роботи з інтерфейсами, що не вимагають відносного введення. Хоча введення відносних переміщень за допомогою планшета і можливий, він часто незручний.

До складу дигітайзера, крім самого планшета, на якому розташовують креслення або карту, призначену для оцифрування, входить спеціальний покажчик (курсор або перо). Найчастіше на робочому полі дигітайзера мали і елементи інтерфейсу САД-програм, тим самим звільняючи додатковий робочий простір графічного дисплея для зображення креслення. Принцип дії дигітайзера заснований на фіксації місця розташування курсора за допомогою вбудованої в планшет сітки, що складається з дротяних або друкованих провідників. Курсор випромінює електромагнітні хвилі, а планшет служить приймачем.



Рис. 7. Дигітайзер, поєднаний з робочим екраном

Новий етап у використанні дигітайзерів в САПР настав з появою великоформатних тонких РКІ дисплеїв - їх поєднання з чутливою поверхнею планшета принципово змінило стиль роботи. Тепер точну вказівку позиції курсора можна здійснювати прямо на зображенні, тобто найбільш природним способом, аналогічним малювання на папері, але з використанням всіх можливостей комп'ютерних графічних редакторів: прив'язки до сітки і об'єктів, автоматичного вирівнювання, побудови перпендикулярів і дотичних.

Сучасні дигітайзери забезпечують не тільки точне введення координат, але і можуть визначати ступінь натиску пером на поверхню, що зробило їх надзвичайно популярними в системах створення художньої графіки та ілюстрацій.

З розвитком тривимірних систем геометричного моделювання з'явилися і засоби маніпулювання об'ємним зображенням (3D-маніпулятори) і введення тривимірних даних (3D-сканери).



Рис. 8. Робота з мишею і 3D-маніпулятором

3D-маніпулятори - пристрої, які забезпечують інтуїтивну навігацію в тривимірному просторі, можливість працювати обома руками: панорамування, зміна масштабу зображення і поворот виконуються одним плавним рухом джойстика, на відміну від роботи зі звичайною мишею, яка дозволяє одночасно виконувати лише одну дію, що тягне за собою численні зупинки для позиціонування моделі. При роботі обома руками управління видом здійснюється 3D-маніпулятором, а вказівка координат робочого курсора - мишею, що скорочує кількість перемикачів і прискорює роботу.

Незважаючи на наявність потужних редакторів, для створення 3D-моделей «з нуля» існує ряд завдань, в яких потрібно отримання повної електронної моделі якої інформації про її геометрії за існуючим фізичним об'єктом. Це можуть бути: контроль якості, реконструкція (відтворення продукції компанії-конкурента), оцифрування макета, створеного дизайнером вручну, використання геометрії зразка для подальшого швидкого виготовлення упаковки та ін. Для виконання таких робіт застосовуються 3D-сканери, які існують двох основних типів: контактні і безконтактні.

Контактні сканери побудовані за принципом обводу моделі спеціальним високочутливим щупом, за допомогою якого в комп'ютер передаються тривимірні координати моделі.

Перевагою контактних сканерів є простота сканування призматичних частин, незалежність від освітлення, простота сканування призматичних частин, точне визначення ребер. Однак контактна сканування вимагає значного часу, щуп повинен стосуватися об'єкта сканування, що не завжди прийнятно, тому все більш широке поширення знаходять безконтактні сканери. Принцип роботи безконтактного сканера заснований на проектуванні лазерного променя на об'єкт сканування. Все спотворення сприймаються вимірювальної камерою, яка відстежує фізичне положення лазера. За сукупністю цих даних обчислюються координати точок на поверхні. Для прив'язки до об'єкта на нього в довільному порядку, з відстанню від 20 до 100 мм один від одного, наклеюються світловідбиваючі круглі маркери. Це дозволяє сканувати об'єкт цілком, з усіх боків, як зсередини, так і зовні, не вдаючись до склейки сканів, що істотно заощаджує час. Більш того, процес сканування можна перервати, уточнити і детально розглянути вже відскановане.

Отримані методом сканування 3D-моделі в подальшому можуть бути оброблені засобами САПР і використані для розробки технології

виготовлення (САМ) і інженерних розрахунків (САЕ).

## 8.4 Відповідність відеоадаптерів сучасним САПР

Сучасні графічні робочі станції призначені для роботи з тривимірною графікою, будь то проектування деталей і вузлів різних установок, проектування будівель і споруд або візуалізація результатів проведених міцності або інших розрахунків.

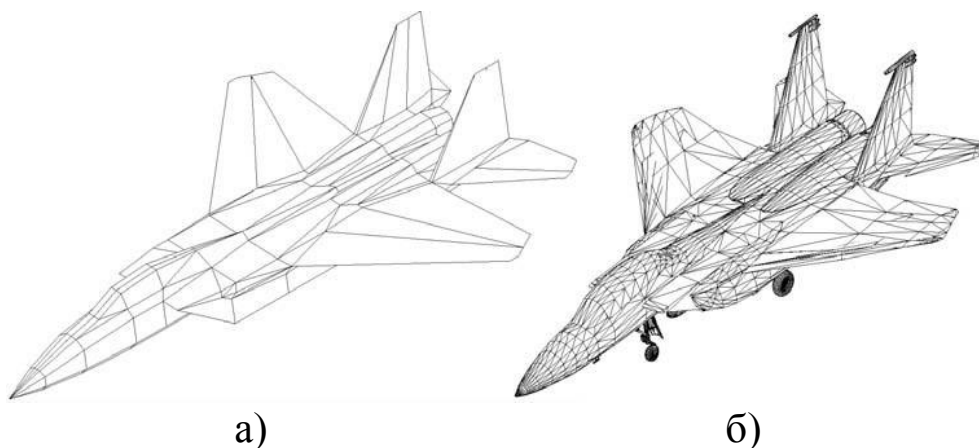


Рис. 9. Тривимірна модель літака для ігор (а) і компоновочна модель з САД-системи (б)

Істотний внесок в загальну продуктивність робочої станції вносить відеопідсистема. В даний час відеокарти поділяються на «ігрові» і «професійні». Перші розраховані на максимальну продуктивність в 3D-іграх, другі ж націлені на швидку роботу в системах САД / САМ / САЕ. Головною відмінністю є те, що вони оптимізовані для роботи з різними даними: для ігрових додатків характерна невелика кількість полігонів, що визначають геометрію і великий обсяг текстур для реалізації візуальних ефектів. Для додатків САПР, навпроти.

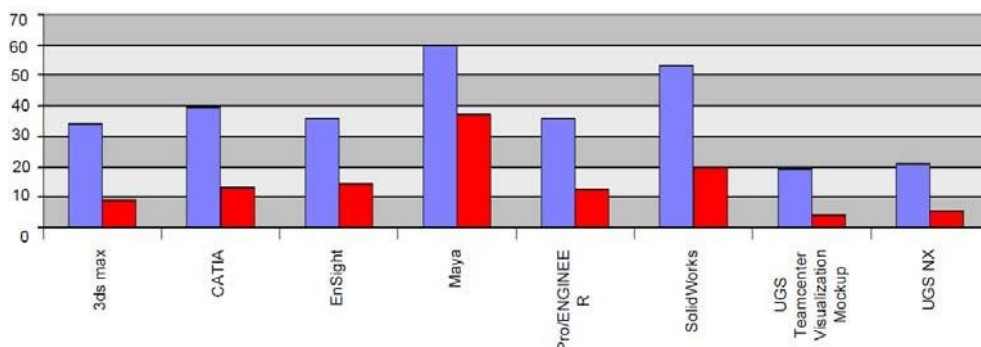


Рис. 10. Порівняння продуктивності ігрової і професійної відеокарт при роботі з додатками САПР



В результаті відеокарти для професійного застосування мають суттєві відмінності як на апаратному, так і на програмному рівні. При цьому, маючи перевагу при роботі з додатками САПР, професійні відеокарти можуть поступатися при роботі з іграми. Для ілюстрації наведемо результати ряду тестів.

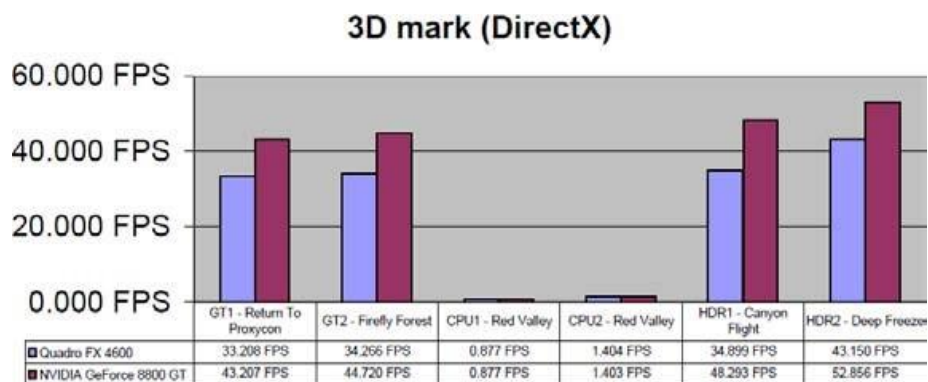


Рис. 11. Порівняння продуктивності ігрової і професійної відеокарт при роботі з іграми

За результатами видно перевага професійної відеокарти в тестах, що імітують роботу в додатках САПР, які використовують OpenGL. Однак в тесті 3D mark (тест, що імітує роботу в іграх, які використовують DirectX) перевагу має ігрова відеокарта.

### Питання для самоконтролю

1. У чому переваги і недоліки планшетних плотерів?
2. Для чого використовується метод швидкого прототипування?
3. Назвіть основні етапи підготовки даних для швидкого прототипування.
4. Порівняйте відомі вам види швидкого прототипування.
5. Які переваги дає поєднання графічного планшета з робочим екраном?
6. Які недоліки у контактних 3D-сканерів?
7. Чим відрізняються професійні відеокарти від ігрових?

## **ТЕМА 9**

### **ВИБІР СИСТЕМ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ**

- 9.1 Ініціація процесу вибору САПР
- 9.2 З'ясування потенційних переваг системи
- 9.3 Формалізація вимог до системи
- 9.4 Аналіз витрат на придбання САПР
- 9.5 Вибір системи САПР

#### **9.1 Ініціація процесу вибору САПР**

Вибір САПР - це непросте завдання як для невеликих компаній, так і для великих корпорацій. Для підприємств малого та середнього бізнесу ситуація ускладнюється тим, що, як правило, вони не мають у своєму розпорядженні істотних фінансових і людських ресурсів, що забезпечують ретельний аналіз передбачуваних до впровадження систем, якими володіють великі підприємства.

Процес вибору всіх компонент САПР - CAD, CAM, CAE, PDM часто характеризується невисоким рівнем аргументації, недостатньою глибиною аналізу стратегічних аспектів, слабким розумінням середовища розробки виробу і пропозицій, спрямованих на її поліпшення, дуже приблизною оцінкою коефіцієнта віддачі інвестицій (Return On Investment, ROI) та інших важливих критеріїв.

Чим більша компанія і чим складніше її структура, тим складнішим видається процес вироблення рішення. Це обумовлено тим, що в промисловості САПР є важливим інструментом розробки виробів, який може грати критично важливу роль при узгодженні організаційних цілей, але при всій своїй важливості це тільки один з багатьох інструментів, з якими також необхідно взаємодіяти.

Ще в недавньому минулому застосування САПР зводилося до схеми проектування, прийнятої при роботі з паперовими документами. Однак глобальні зміни у світовій економіці за останні десятиліття внесли нові чинники, які потрібно враховувати:

- необхідно забезпечувати швидкий вихід продукту на ринок;
- високі вимоги до якості виробу, яке має відповідати світовому рівню;
- діяльність в умовах глобальної економіки, коли клієнти, постачальники і розробники виробу можуть перебувати в будь-якій точці земної кулі;

- необхідність зниження витрат через високу цінової конкуренції світових виробників.

Найважливіша вимога - відповідність системи розробки виробів цілям і завданням компанії. Тому при виборі нового програмного продукту слід знайти відповіді на наступні питання:

Чи потрібна взагалі нова система? Чи відповідає наявна система поточним і перспективним цілям?

Чи забезпечує вона конкурентоспроможність? Чи можна вдосконалити поточну систему?

Які можливості нового продукту відсутні в поточній системі? Відповідаючи на це питання, доцільно сформулювати список цих додаткових функцій.

Яку економію можна очікувати? Нова система потребуватиме певного часу на освоєння і певної суми на придбання.

На який економічний ефект можна розраховувати? За який період?

Якими будуть витрати при використанні нової системи? Впровадження або оновлення програмних продуктів для розробки виробів варто розглядати як послідовність логічних етапів.

Процес оновлення починається з прийняття рішення про необхідність удосконалення існуючої системи або заміни її новою системою. Для цього доведеться відповісти собі на цілий ряд досить простих питань:

Як давно оновлювалася система розробки виробів? Робилося це в останні 3-5 років?

Чи працюють ваші конструктори / розробники в 3D?

Чи задоволені ви якістю вашої продукції?

Чи задоволені ви термінами розробки виробів і термінами виведення виробів на ринок?

Наскільки високий відсоток своєчасних відповідей на заявки і пропозиції?

Наскільки конкурентоспроможним є ваше підприємство з точки зору витрат на розробку і виведення виробу на ринок?

Чи можете ви обмінюватися проектними даними з вашими замовниками і/або постачальниками, якщо виникає така необхідність? І якщо такий обмін має місце, то чи можете ви забезпечити необхідну безпеку процесу і збереження ключових даних про виріб?

Чи підтримується синхронність змін в специфікаціях, які

використовуються на етапі розробки виробу і на етапі його виробництва?

Чи є у вас ефективний доступ до фрагментів раніше виконаних проектів і можливість їх використання в нових виробках?

Якщо хоча б на одне з цих питань відповідь негативна - можна вважати, що підприємство використовує середовище розробки, що не задовольняє сучасним цілям і задачам підприємства, і необхідно або її модифікувати, або вибрати нову систему.

## **9.2 З'ясування потенційних переваг системи**

На цьому етапі потрібно визначити удосконалення, які необхідно зробити для поліпшення роботи підприємства, і переконатися, що за допомогою нової системи розробки можна домогтися такого поліпшення.

В першу чергу потрібно оцінити потенціал модернізації поточної системи. Якщо підприємство працює з просто застарілим програмним забезпеченням, тобто система розрахована тільки на 2D, або постачальник більше не підтримує цей продукт, то доцільно замінити програмне забезпечення на нове. І навпаки, якщо використовується сучасне програмне забезпечення, але не вдається досягти очікуваних переваг - можливо, система неякісно налаштована, або ж потрібні зміни в бізнес-процесах і методах роботи, в цьому випадку придбання нового програмного рішення не допоможе.

При оцінці потенційних переваг нової системи CAD / CAM / CAE / PDM необхідно осмислити, яким чином можуть бути вдосконалені бізнес-процеси, пов'язані з життєвим циклом виробу, на конкретному підприємстві. Для цього потрібно відповісти на наступні питання:

Чи достатньо висока рентабельність підприємства?

Чи не занадто велика собівартість виробів?

Чи достатні ресурси, що направляються на розробки?

Чи достатньо конкурентоздатні вироби?

Чи є якість ваших виробів досить високою протягом всього життєвого циклу?

Чи не занадто довгий цикл розробки виробів?

Чи достатньо швидко підприємство реагує на зміни потреб ринку або на пропозиції клієнтів?

Отримавши відповіді на ці питання, слід з'ясувати, чи досяжні необхідні поліпшення іншими методами, ніж впровадження нового

програмного забезпечення САПР, наприклад вдосконаленням бізнес-процесів, модернізацією обладнання, поліпшенням постачання і контролю якості, зміною конструкції виробів?

### **9.3 Формалізація вимог до системи**

У разі отримання на попередньому етапі висновку про доцільність впровадження нової САПР необхідно сформулювати набір технічних вимог до неї, визначити, які функції повинна включати нова система і скільки це повинно коштувати. Потім, вибираючи найбільш важливі позиції, можна розробити поетапний план впровадження. Зразковий набір вимог може бути таким:

- можливість створення і управління комплексною інформацією про виріб (твердотілі моделі, кресленики, технологічні дані та ін.);
- перехід на 3D-моделювання;
- можливість роботи з даними, напрацьованими раніше в інших системах, в тому числі на папері;
- забезпечення перевірки даних;
- можливість управління процесами;
- спільна робота розробників як всередині підприємства, так і із суміжниками;
- інтеграція з виробничими системами;
- інтерфейс з іншими ІТ-системами, наприклад ERP.

Приймаючи рішення про важливість вимоги до системи, необхідно розглядати їх з позиції потенційного ефекту, оцінюючи внесок кожного удосконалення в досягнення загального результату. Найбільш важливими є ті вимоги, які дозволяють отримати найбільший ефект.

### **9.4 Аналіз витрат на придбання САПР**

Домогтися економічного ефекту неможливо без аналізу витрат. Наведемо перелік основних завдань, що вирішуються при переході або впровадженні нової системи розробки:

- придбання програмного забезпечення для проектування виробів, підготовки виробництва, інженерного аналізу, управління даними;
- навчання персоналу;
- налаштування нового програмного забезпечення під завдання співробітників;

- конвертація існуючих даних;
- придбання нового апаратного забезпечення;
- оновлення системного і офісного програмного забезпечення;
- оновлення комунікацій - більш швидкісні локальні мережі та доступ в Інтернет;
- установка серверів для зберігання загальнодоступних даних;
- перегляд і реорганізація бізнес-процесів, інформаційних потоків і технологічних маршрутів виробів, для того щоб скористатися перевагами нової системи;
- перегляд процедур затвердження паперових документів і процедур внесення змін;
- забезпечення доступу до проектних даних не тільки для авторів САД-даних, а й, можливо в спрощеному варіанті, для співробітників, які перевіряють і затверджують документи.

Витрати на консультаційні послуги та навчання персоналу безпосередньо залежать від числа тих, хто навчається і від рівня їх поточної кваліфікації. При цьому необхідно врахувати можливі втрати часу і уповільнення темпу робіт, поки співробітники не навчаться швидко працювати в новій системі. Доцільно, щоб на кожному напрямку впроваджуваного нового функціоналу був лідер з числа просунутих користувачів або висококваліфікований консультант, здатний допомогти і порадити іншим співробітникам, - це істотно заощадить час і витрати.

Окремо варто зупинитися на конвертації напрацьованих даних. Це слід робити тільки в разі безумовної необхідності або явної користі. Не потрібно перетворювати відразу всі наявні дані, а тільки ті, які дійсно необхідні на поточний момент.

Дуже обережно слід ставитися до так званих «дешевих альтернатив» програмного забезпечення САПР. Робочі місця співробітників, які безпосередньо проектують або вносять зміни, доцільно оснащувати повноцінними ліцензіями. Дешевші альтернативи існують, проте в цьому випадку функціонал, як правило, має обмеження, що призведе до меншої ефективності роботи.

Істотним чинником, що впливає на бюджет проекту, є можливість масштабування програмних рішень. При складанні кошторису важливо визначитися, які компоненти програмного забезпечення повинні бути придбані і впроваджені відразу, а які можуть бути докуплені пізніше, в якості додатків.

## 9.5 Вибір системи САПР

В процесі вибору необхідно визначити найбільш підходящу для підприємства CAD / CAM / CAE / PDM-систему і переконатися в правильності вибору. До цього етапу повинні бути чітко виділені основні проблеми, що перешкоджають підвищенню ефективності роботи підприємства, і сформульовані основні цілі проведених удосконалень. Обрана система повинна бути масштабованою на всіх етапах впровадження, так як її функціональність і сфера застосування можуть розширюватися.

Для здійснення вибору рекомендується провести наступні заходи:

- організувати групу співробітників, які будуть вирішувати ці проблеми, створити план їх роботи і механізм контролю його виконання;

- остаточно уточнити набір вимог до системи, як технічних, так і управлінських;

- для кожної позиції в списку вимог визначити конкретну очікувану користь. Якщо для якоїсь позиції це не вдається, вона не є значущою і повинна бути видалена. Рекомендується обмежити список не більше ніж двома десятками вимог;

- впорядкувати вимоги, яким повинна відповідати система, за очікуваною користь, наприклад в чотири категорії: обов'язкові; досить важливі, що враховуються і необов'язкові;

- визначити бюджет;

- звернутися до декільком постачальникам різних систем;

- перевірити пропоновані системи на відповідність сформульованим вимоги шляхом порівняння систем за наданими описами, порівняння характеристик систем за результатами виконання тестових завдань або дослідної експлуатації системи на підприємстві;

- оцінити відповідність всіх систем обраним вимогам;

- вибрати того постачальника, який запропонував систему, найкращим чином задовольняє вимогам.

Безумовно, вибір істотно залежить від набору вимог, слід окремо сформулювати управлінські та технічні вимоги.

Консалтингові компанії пропонують готові набори вимог і методики їх оцінки. Розглянемо їх на прикладі досвіду американської компанії TechniCom, яка рекомендує наступний набір вимог з точки зору управління підприємством:

- вигоди від пропонованого рішення повинні відповідати цілям бізнесу, а витрати на впровадження - бути економічно ефективними на кожному його етапі;

- керівництво має бути впевнено, що співробітники підприємства зможуть в доступні терміни впровадити обране рішення. Важлива наявність кваліфікованих користувачів і консультантів, які зможуть допомогти в навчанні співробітників. Система повинна успішно використовуватися в разі заміни персоналу і найму нових співробітників;

- система забезпечує обмін даними в процесі організації взаємодії підприємства із суміжниками і постачальниками. Проектні дані повинні бути доступні для використання протягом довгого терміну. Система повинна володіти гнучкістю на випадок зміни характеру діяльності підприємства;

- розробник програмної системи повинен бути надійний у фінансовому плані, а його продукти повинні займати лідируючі позиції на ринку, повинен бути досвід ефективного використання аналогічних програмних засобів у підприємств-конкурентів. Повинні бути встановлені довгострокові відносини з постачальником програмного забезпечення, здатним надати технічну підтримку.

З точки зору технічних вимог рекомендується керуватися таким набором:

- система повинна забезпечувати можливість нарощування функціоналу і розширення області застосування без необхідності її заміни, тобто бути масштабованою;

- система повинна забезпечувати можливість створення і модифікації необхідної геометрії. Геометрія повинна містити всю необхідну для виробництва інформацію (форма, топологія, розміри, їх точність, чистота поверхонь та інші технічні вимоги);

- кресленики повинні бути повністю асоціативними, тобто повинна забезпечуватися можливість їх створення і підтримки їх відповідності 3D-моделі. Оформлення креслеників повинно відповідати стандартам, прийнятим на підприємстві;

- повинна бути забезпечена можливість проектування всієї необхідної оснастки, проектування і аналіз роботи пресформ і штампів, автоматизоване створення КП для обробки на верстатах з ЧПК, планування виробництва без необхідності конвертувати 3D-моделі в інші формати;

- повинні існувати кошти для проведення інженерного аналізу і



отримання результатів розрахунків;

- система повинна містити широкий набір власних додатків або добре інтегрованих програм, розроблених сторонніми виробниками;

- система повинна підтримувати всі необхідні промислові стандарти - як для трансляції створених в ній даних в інші формати, так і для читання даних, створених в інших системах;

- засоби управління даними про виріб (PDM) повинні легко інсталюватися і налаштовуватися, підтримувати задачу і вибір даних з архіву, а також контроль за їх зміною. PDM-система повинна підтримувати відносини між усіма файлами CAD / CAM / CAE-системи, зберігання і звернення до даних, не пов'язаних з CAD-геометрією;

- графічне відображення геометрії і креслеників повинно здійснюватися з високою якістю і продуктивністю для будь-яких 3D-моделей, що використовуються на підприємстві;

- інтерфейс користувача повинен бути інтуїтивно зрозумілим, простим в освоєнні і легким для запам'ятовування. Необхідна можливість налаштування інтерфейсу користувачем. Повинні існувати докладна документація і вбудовані засоби навчання;

- розробник системи повинен забезпечувати якісну підтримку програмного забезпечення, виправлення помилок і вирішення виникаючих проблем, а також консультації з питань, що стосуються використання його продукту.

## **Питання для самоконтролю**

1. Яка головна вимога стоїть перед вибором САПР?
2. Назвіть основні етапи вибору САПР.
3. Назвіть основні джерела витрат при впровадженні САПР.
4. В чому полягає суть матричного методу оцінки САПР?
5. Які переваги дає використання матричного методу оцінки?
6. Назвіть заходи, які необхідно провести перед вибором САПР.
7. Яким вимогам має відповідати САПР с точки зору управління підприємством?
8. Яким технічним вимогам має відповідати САПР?

## ЛІТЕРАТУРА

1. Веселовська Г.В. Комп'ютерна графіка / Веселовська Г.В., Ходаков В.Є, Веселовський В.М. - Херсон.: ОЛДІ - плюс, 2008. – 584 с.
2. Гардан И. Машинная графика и автоматизация конструирования / И. Гардан, М. Люка. – М.: Мир, 1987. – 281 с.
3. Гельмерих Р. Ш. Введение в автоматизированное проектирование Р.Ш. Гельмерих. – М.: Машиностроение, 1990. – 252 с.
4. Гувер М. САПР и автоматизация производства / М. Гуливер, Є. Зиммерс. – М.: Мир, 1987. – 406 с.
5. Джонс Дж.К. Методы проектирования / Дж. К. Джонс. – М.: Мир, 1986. – 389 с.
6. Ли Кунву Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / Кунву Ли. - СПб.: Питер, 1996. - 559 с.
7. Малюх В.Н. Введение в современные САПР: Курс лекций / Малюх В.Н. - М.: ДМК Пресс, 2010. -192 с.
8. Норенков И.П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем / И.П. Норенков. – М.: Высшая школа, 1986. – 348 с.
9. Райан Д. Инженерная графика в САПР / Д. Райан. – М.: Мир, 1989. – 316 с.
10. Ушаков Д. М. Введение в математические основы САПР: курс лекций / Ушаков Д. М. - М.: ДМК Пресс, 2011. - 208 с.
11. Хилл П. Наука и искусство проектирования / пер. под ред. В.Ф. Венды. – М.: Мир, 1973. – 216 с.
12. Хокс Б. Автоматизированное проектирование и производство / Б. Хокс. – М.: Мир, 1991. – 384 с.
13. Цветков В.Н. Математическая теория эксперимента / В.Н. Цветков // ДГУ–Д.– 1979. – 115 с.
14. Черепашков А.А. Компьютерные технологии, моделирование и автоматизированные системы в машиностроении / А.А.Черепашков, В.В. Носов. - Волгоград.: Издательский дом «Инфолио», 2009. – 312 с.



*Навчальне видання*

**Холодняк Юлія Володимирівна**

***КОМП'ЮТЕРНЕ ПРОЕКТУВАННЯ  
ПРОМИСЛОВИХ ВИРОБІВ***

*Конспект лекцій*

Надруковано з оригіналів макетів замовника  
Підписано до друку 26.05.2021 р. формат 60x84 1/16  
Папір офсетний. Наклад 100 примірників.  
Замовлення №

Видано ПП Верескун В.М.  
Видавничо – поліграфічний центр «Люкс»  
м. Мелітополь, вул. М. Грушевського, 10 тел.: т. 0619 (44-45-11)  
свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виробників  
і розповсюджувачів видавничої продукції від 11.06.2002 р.  
серія ДК №1125