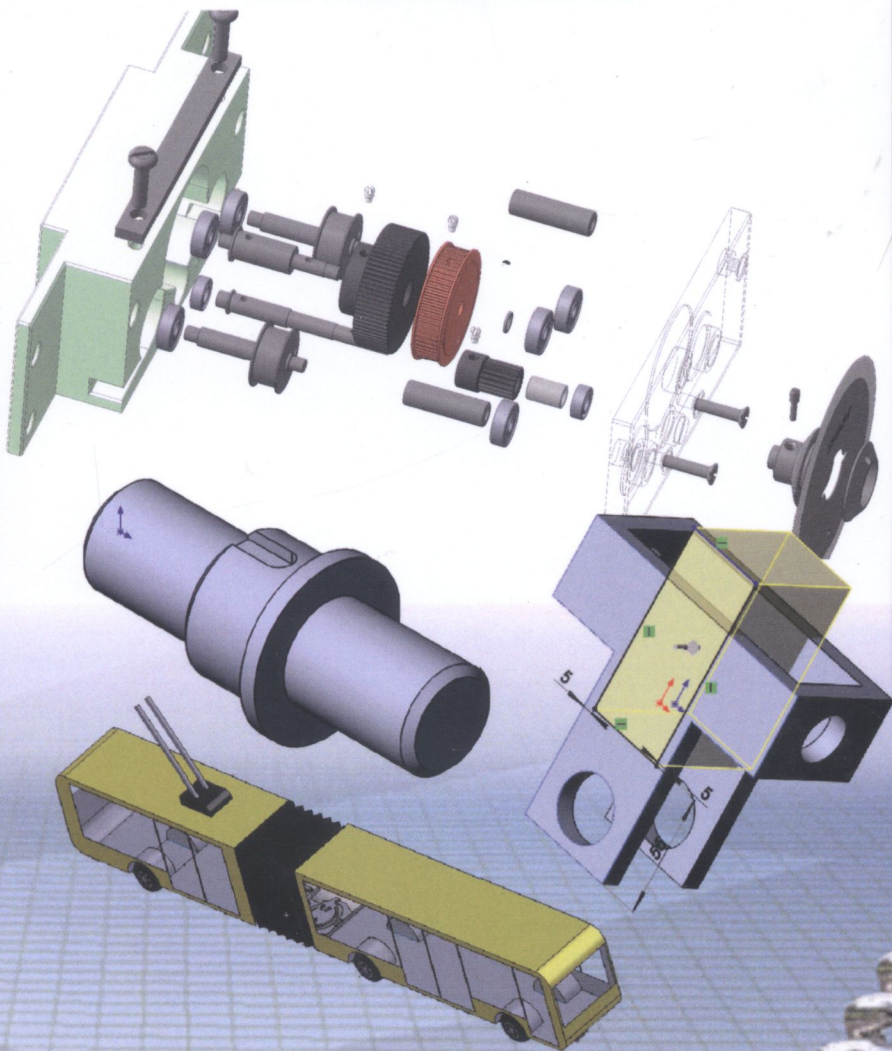


004.9(075.8)
3-63

Р. В. Зінько, В. Г. Топільницький

СИСТЕМИ 3D МОДЕЛЮВАННЯ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК



004.9(075.8)
3-63

Р. В. Зінько, В. Г. Топільницький

СИСТЕМИ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ

Навчальний посібник

НТБ ВНТУ



480596

004.9(075.8) 3-63 2017

Зінько Р.В. Системи 3D-моделювання

Львів – 2017

Галицька Видавнича Спілка



004.9464001.839(075,8)

УДК 004.94:62

3-636

Рецензенти:

Афтаназів І. С. — доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри нарисної геометрії та інженерної графіки Інституту прикладної математики та фундаментальних наук Національного університету «Львівська політехніка»;

Місяць В. П. — доктор технічних наук, професор кафедри прикладної механіки та машин Київського національного університету технологій та дизайну;

Болотов Б. О. — доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри зварювального виробництва та автоматизованого проектування будівельних конструкцій Чернігівського національного технічного університету.

Рекомендувала Науково-методична рада Національного університету «Львівська політехніка» як навчальний посібник для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» (Протокол № 30 від 22 червня 2017 року).

3-636 Зінько Р. В. **Системи 3D-моделювання**: навчальний посібник / Р. В. Зінько, В. Г. Топільницький. — Львів : Галицька Видавнича Спілка, 2017. — 150 с.

ISBN 978-617-7363-53-7

У посібнику висвітлено основні питання об'ємного проектування просторових об'єктів. Значну увагу приділено концепції використання 3D-моделювання в сучасних САПР, принципам сучасного 3D-моделювання у промисловому дизайні, особливостям його освоєння. Описано сучасні технології 3D-сканування, 3D-друку. Наведено практичні вправи з 3D-моделювання у середовищі САПР SolidWorks.

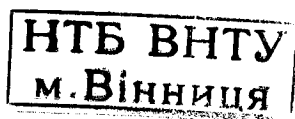
Посібник призначений для студентів, бакалаврів, магістрів технічних спеціальностей вищих навчальних закладів.

480596

УДК 004.94:62

ISBN 978-617-7363-53-7

© Зінько Р. В., Топільницький В. Г., 2017



ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ПРОЕКТУВАННЯ	6
Контрольні запитання.....	13
2. СТРУКТУРА ПРОЦЕСУ ПРОЕКТУВАННЯ.....	14
Контрольні запитання.....	24
3. САПР ТА ЇХ МІСЦЕ СЕРЕД ІНШИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ	25
Контрольні запитання.....	46
4. ПРИНЦИПИ СУЧАСНОГО 3D-МОДЕЛЮВАННЯ У ПРОМИСЛОВОМУ ДИЗАЙНІ	47
Контрольні запитання.....	65
5. ОСОБЛИВОСТІ ОСВОЄННЯ СИСТЕМ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ	67
Контрольні запитання.....	75
6. САПР SOLIDWORKS.....	76
Контрольні запитання.....	81
7. ОЗНАЙОМЛЕННЯ ІЗ 3D-СКАНУВАННЯМ	82
Контрольні запитання.....	85
8. ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ	86
Контрольні запитання.....	98
9. ПРАКТИЧНЕ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ В САПР SOLIDWORKS.....	100
Контрольні запитання.....	146
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	147

ВСТУП

Сучасні технології створення машин вимагають автоматизації проектування і широкого використання інформаційних технологій.

Так, серед інших сучасних інформаційних технологій при проектуванні дедалі ширше використовують обчислювальні мережі й телекомунікаційні технології, які є основою для технічного забезпечення систем автоматизованого проектування (САПР). Прикладом можуть слугувати персональні комп'ютери і робочі станції, застосування мейнфреймів. До основних блоків середовищ проектування входять програмні модулі, які використовують методи обчислювальної математики, статистики, математичного програмування, дискретної математики, штучного інтелекту. Для середовищ проектування використовують операційні системи Unix, Windows, Mac OS X, проводять розробки для хмарних операційних систем. Набувають спеціалізації мови програмування C++, LISP, Python та інші, сучасні CASE-технології, реляційні й об'єктно-орієнтовані системи управління базами даних.

Змінилися й принципи проектування. Зараз дедалі ширше використовують методології структурного аналізу та проектування (SADT) і концептуальне АВАН-проекування. Тому знання основ автоматизації проектування й уміння працювати із засобами САПР потрібні будь-якому інженерові-розробнику. Проектні підрозділи, конструкторські бюро, що ведуть розробки без САПР або лише з незначним їх використанням, виявляються неконкурентоздатними як через великі матеріальні й часові витрати на проектування, так і через невисоку якість проектів.

Наступним етапом розвитку САПР є чимраз ширше використання 3D-моделювання. Створена 3D-модель проектованої машини дає візуальне уявлення конструкції як окремих деталей, так і виробу в цілому, а також надає можливість проводити різноманітні розрахунки. Важливою перевагою 3D-моделювання є поверхневе моделювання. Побудова поверхонь за

допомогою набору простих інструментів містить величезний потенціал для редагування форми створюваних об'єктів. Користувач може самостійно задати необхідний йому спосіб і параметри побудови.

Розроблено інструменти, які дають змогу змінювати дизайн виробу однією операцією, замінюючи дуже тривалий і трудомісткий процес почергової модифікації потрібних елементів виробу. При проектуванні використовують блочно-ієрархічний підхід, коли уявлення про спроектовану систему розділяють на ієрархічні рівні певних предметних областей [1].

Навіть порівняно із системами 2D-моделювання, твердотільні системи проектування дають можливість значно зменшити неоднозначність при ухваленні рішень, підвищити точність розрахунків, оптимізувати для більшості варіантів проекту технічні, технологічні й економічні характеристики виробництва та експлуатації спроектованого об'єкта. Системи 3D-моделювання сприяють скороченню термінів проектування і передання конструкторської документації у виробництво, в якій у повному обсязі використовуються не тільки уніфіковані вироби й стандартні компоненти, але й усі застарілі елементи діючих пристроїв, властивості яких не погіршали за час їх експлуатації.

Навчальний посібник орієнтований на студентів різних інженерних спеціальностей з базовою підготовкою в області САПР. Він призначений для розвитку у студентів навичок оптимізації механічних систем та конструкцій машин за допомогою комп'ютерної техніки, використання сучасних інженерних методик проектування, чисельних методів механіки, математики та моделювання, а також для підвищення обізнаності студентів у галузі сучасних комп'ютерних технологій.

1. СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ПРОЕКТУВАННЯ

Поняття інженерного проектування. Проектування технічного об'єкту – це створення, перетворення і представлення набутої форми образу ще не існуючого об'єкту. Образ об'єкту або його складових частин може бути створений в уяві людини в результаті творчого процесу або може бути згенерований відповідно до певних алгоритмів у процесі взаємодії людини та ЕОМ. У будь-якому випадку інженерне проектування починається за наявності вираженої потреби суспільства в деяких технічних об'єктах, якими можуть бути об'єкти будівництва, промислові виробництва або процеси. Проектування включає розробку технічної пропозиції і (чи) технічного завдання (ТЗ), що відбивають ці потреби, і реалізацію ТЗ у вигляді проектної документації [2].

Зазвичай ТЗ представляють у вигляді певних документів, і воно є початковим первинним описом об'єкту. Результатом проектування зазвичай є повний комплект документації, що містить достатні відомості для виготовлення об'єкту в заданих умовах. Ця документація і є проектом, точніше кінцевим описом об'єкту. Коротше кажучи, проектування – процес, що полягає в отриманні та перетворенні початкового опису об'єкту в остаточний опис на основі виконання комплексу робіт дослідницького, розрахункового і конструкторського характерів.

Перетворення початкового опису в остаточний породжує низку проміжних описів, що підводять підсумки рішення деяких завдань і використовуються для обговорення й ухвалення проектних рішень для закінчення або продовження проектування.

Проектування, при якому всі проектні рішення або їх частину отримують шляхом взаємодії людини та ЕОМ, називають автоматизованим, на відміну від ручного (без використання ЕОМ) або автоматичного (без участі людини на проміжних етапах). Система, що реалізує автоматизоване проектування, є системою автоматизованого проектування (в англійському написанні CAD System – Computer Aided Design System).

Автоматичне проектування можливе лише в окремих випадках для порівняно нескладних об'єктів. Нині переважає автоматизоване проектування.

Проектування складних об'єктів базоване на застосуванні ідей і принципів, викладених у низці теорій та підходів. Найбільш загальним є системний підхід, ідеями якого пронизані різні методики проектування складних систем.

Принципи системного підходу. Основні ідеї і принципи проектування складних систем виражені в системному підході. Для фахівця в області системотехніки вони є очевидними і природними, проте їх дотримання і реалізація часто пов'язані з певними труднощами, зумовленими особливостями проектування. Як і більшість дорослих освічених людей, що правильно використовують рідну мову без залучення правил граматики, інженери використовують системний підхід без звернення до посібників із системного аналізу. Проте інтуїтивний підхід без застосування правил системного аналізу може виявитися недостатнім для вирішення завдань інженерної діяльності, що чимраз більш ускладнюються [3].

Основний загальний принцип системного підходу полягає в розгляді частин явища або складної системи з урахуванням їх взаємодії. Системний підхід включає виявлення структури системи, типізацію зв'язків, визначення атрибутів, аналіз впливу середовища.

Системний підхід розглядають як напрям наукового пізнання і соціальної політики. Він є базою для узагальнювальної дисципліни "Теорія систем" (інша використовувана назва – "Системний аналіз"). Теорія систем – дисципліна, в якій конкретизуються положення системного підходу; вона присвячена дослідженню і проектуванню складних економічних, соціальних, технічних систем, найчастіше слабо структурованих. Характерними прикладами таких систем є виробничі системи. При проектуванні систем мети досягають у багатокрокових процесах прийняття рішень. Методи ухвалення рішень часто

виділяють у самостійну дисципліну, яку називають "Теорія прийняття рішень".

У техніці дисципліну, в якій досліджують складні технічні системи, їх проектування, і яка аналогічна теорії систем, часто називають системотехнікою. Предметом системотехніки є, по-перше, організація процесу створення, використання і розвитку технічних систем, по-друге, методи і принципи їх проектування і дослідження. У системотехніці важливо вміти сформулювати цілі системи і організувати її розгляд з позицій поставлених цілей. Тоді можна відкинути зайві і малозначущі частини при проектуванні й моделюванні, перейти до постановки оптимізаційних завдань. Системи автоматизованого проектування і управління належать до найбільш складних сучасних штучних систем. Їх проектування і супровід неможливі без системного підходу. Тому ідеї і положення системотехніки входять складовою частиною в дисципліни, присвячені вивченню сучасних автоматизованих систем і технологій їх застосування. Інтерпретація і конкретизація системного підходу мають місце у низці відомих підходів з іншими назвами, які також можна розглядати як компоненти системотехніки. Такими є структурний, блочно-ієрархічний, об'єктно-орієнтований підходи [4].

При структурному підході, як різновиді системного, вимагають синтезувати варіанти системи з компонентів (блоків) і оцінювати варіанти при їх частковому переборі з попереднім прогнозуванням характеристик компонентів.

Блочно-ієрархічний підхід до проектування використовує ідеї декомпозиції складних описів об'єктів і відповідно засобів їх створення на ієрархічні рівні й аспекти, вводить поняття стилю проектування (висхідне і низхідне), встановлює зв'язок між параметрами сусідніх ієрархічних рівнів [5].

Низка важливих структурних принципів, використовуваних при розробці інформаційних систем, передусім їх програмного забезпечення (ПЗ), виражена в об'єктно-орієнтованому підході до

проектування (ООП). Цей підхід має такі переваги у вирішенні проблем управління складністю і інтеграції ПЗ:

1) вносить у моделі додатків велику структурну визначеність, розподіляючи представлені в додатку дані і процедури між класами об'єктів;

2) скорочує об'єм специфікацій, завдяки введенню в описи ієрархії об'єктів і стосунків наслідування між властивостями об'єктів різних рівнів ієрархії;

3) зменшує вірогідність спотворення даних унаслідок помилкових дій за рахунок обмеження доступу до певних категорій даних в об'єктах. Опис у кожному класі об'єктів допустимих звернень до них і прийнятих форматів повідомлень полегшує узгодження й інтеграцію ПЗ.

Для усіх підходів до проектування складних систем характерні також такі особливості.

1. Структуризація процесу проектування, що виражається декомпозицією проектних завдань і документації, виділенням стадій, етапів, проектних процедур. Ця структуризація є суттю блочно-ієрархічного підходу до проектування.

2. Ітераційний характер проектування.

3. Типізація й уніфікація проектних рішень і засобів проектування.

Основні поняття системотехніки. У теорії систем і системотехніці введена низка термінів, серед них до базових слід віднести такі поняття.

Система – множина елементів, що перебувають у стосунках і зв'язках між собою.

Елемент – така частина системи, уявлення про яку недоцільно піддавати при проектуванні подальшому розчленовуванню.

Складна система – система, що характеризується великим числом елементів і, що найбільш важливо, великим числом взаємозв'язків елементів. Складність системи визначається також видом взаємозв'язків елементів, властивостями цілеспрямованості,

цілісності, розчленовування, ієрархічності, багатоаспектності. Очевидно, що сучасні автоматизовані інформаційні системи і, зокрема, системи автоматизованого проектування є складними в силу наявності у них перерахованих властивостей і ознак.

Підсистема – частина системи (підмножина елементів і їх взаємозв'язків), яка має властивості системи.

Надсистема – система, стосовно якої певна система є підсистемою.

Структура – відображення сукупності елементів системи і їх взаємозв'язків; поняття структури відрізняється від поняття самої системи також тим, що при описі структури беруть до уваги лише типи елементів і зв'язків без конкретизації значень їх параметрів.

Параметр – величина, що виражає властивість або системи, або її частини, або середовища, що впливає на систему. Зазвичай у моделях систем параметрами вважають величини, що не змінюються в процесі дослідження системи. Параметри розділяють на зовнішні, внутрішні та вихідні, що виражають властивості елементів системи, самої системи, зовнішнього середовища відповідно. Вектори внутрішніх, вихідних і зовнішніх параметрів далі позначаються $X(x_1, x_2 \dots x_n)$, $Y(y_1, y_2 \dots y_m)$, $Q(q_1, q_2, \dots q_k)$ відповідно.

Фазова змінна – величина, що характеризує енергетичне або інформаційне наповнення елемента або підсистеми.

Стан – сукупність значень фазових змінних, зафіксованих в одній часовій точці процесу функціонування.

Поведінка (динаміка) системи – зміна стану системи в процесі функціонування.

Система без наслідку – її поведінка при $t > t_0$ визначається завданням стану в момент t_0 і вектором зовнішніх дій $Q(t)$. У системах з післядією, крім того, треба знати передісторію поведінки, тобто стани системи в моменти, попередні щодо t_0 .

Вектор змінних V ; що характеризують стан (вектор змінних стану) – ненадмірна множина фазових змінних, задання

їх значень у певний момент часу повністю визначає поведінку системи надалі (в автономних системах без післядії).

Простір станів – множина можливих значень вектору змінних стану.

Фазова траєкторія – представлення процесу (залежності $V(t)$) у вигляді послідовності точок у просторі станів.

До характеристик складних систем, як сказано вище, часто відносять такі поняття:

Цілеспрямованість – властивість штучної системи, що виражає призначення системи. Ця властивість потрібна для оцінки ефективності варіантів системи.

Цілісність – властивість системи, що характеризує взаємопов'язаність елементів і наявність залежності вихідних параметрів від параметрів елементів, при цьому більшість вихідних параметрів не є простим повторенням або сумою параметрів елементів.

Ієрархічність – властивість складної системи, що виражає можливість і доцільність її ієрархічного опису, тобто представлення у вигляді декількох рівнів, між компонентами яких є відносини ціле–частина.

Складовими частинами системотехніки є такі основні розділи:

- ієрархічна структура систем, організація їх проектування;
- аналіз і моделювання систем;
- синтез і оптимізація систем.

Моделювання має два чітко визначені завдання: 1 – створення моделей складних систем (в англійському написанні – modeling); 2 – аналіз властивостей систем на основі дослідження їх моделей (simulation).

Синтез також поділяють на два завдання: 1 – синтез структури проєктованих систем (структурний синтез); 2 – вибір чисельних значень параметрів елементів систем (параметричний синтез). Ці завдання належать до області ухвалення проектних рішень.

Моделювання й оптимізацію бажано виконувати з урахуванням статистичної природи систем. Детермінована – лише окремих випадок. При проєктуванні характерні нестача достовірних початкових даних, невизначеність умов прийняття рішень. Облік статистичного характеру даних при моделюванні значною мірою заснований на методі статистичних випробувань (методі Монте-Карло), а прийняття рішень – на використанні нечітких великих множин, експертних систем, еволюційних обчислень.

Приклад 1. Комп'ютер є складною системою через наявність у нього великого числа елементів, різноманітних зв'язків між елементами і підсистемами, властивостей цілеспрямованості, цілісності. Надсистемою можуть бути обчислювальна мережа, автоматизована і (чи) організаційна система, до яких належить комп'ютер; внутрішні параметри – терміни виконання арифметичних операцій, читання (записи) в накопичувачах, пропускну спроможність шин тощо; вихідні параметри – продуктивність комп'ютера, місткість оперативної й зовнішньої пам'яті, собівартість, час напрацювання на відмову тощо; зовнішні параметри – напруга живлення мережі і його стабільність, температура довкілля тощо.

Приклад 2. Для двигуна внутрішнього згорання підсистемами є колінчастий вал, механізм газорозподілу, поршнева група, система мащення та охолодження; внутрішні параметри – число циліндрів, об'єм камери згорання тощо; вихідні параметри – потужність двигуна, ККД, витрата палива тощо; зовнішні параметри – характеристики палива, температура повітря, навантаження на вихідному валу.

Приклад 3. Підсистеми електронного підсилювача – підсилювальні каскади; внутрішні параметри – опори резисторів, місткості конденсаторів, параметри транзисторів; вихідні параметри – коефіцієнт посилення на середніх частотах, смуга пропускання, вхідний опір; зовнішні параметри – температура довкілля, напруги джерел живлення, опір навантаження.

Контрольні запитання

1. Що означає проектування технічного об'єкту?
2. Що таке технічне завдання?
3. Які основні принципи системного підходу?
4. Які основні структурні принципи використовують при розробці інформаційних систем?
5. Які основні поняття системотехніки?
6. Що таке система?
7. Що таке елемент?
8. Що таке складна система?
9. Що таке підсистема?
10. Що таке надсистема?
11. Що таке структура?
12. Що таке параметр?
13. Що таке фазова змінна?
14. Що таке стан?
15. Що таке поведінка (динаміка) системи?
16. Що таке система без наслідку?
17. Що таке вектор змінних V , які характеризують стан (вектор змінних стану)?
18. Що таке простір станів?
19. Що таке фазова траєкторія?
20. Які основні розділи є складовими частинами системотехніки?

2. СТРУКТУРА ПРОЦЕСУ ПРОЕКТУВАННЯ

Ієрархічна структура проектних специфікацій та ієрархічні рівні проектування. При використанні блочно-ієрархічного підходу до проектування уявлення про проектувану систему розчленовують на ієрархічні рівні. На верхньому рівні використовують найменш деталізоване уявлення, що відображає тільки найзагальніші риси й особливості проектуваної системи. На наступних рівнях ступінь подрібнення опису зростає, при цьому розглядають уже окремі блоки системи, але з урахуванням дії на кожного з них його сусідів. Такий підхід дозволяє на кожному ієрархічному рівні формулювати завдання прийнятої складності, що піддаються рішенню за допомогою наявних засобів проектування. Розбиття на рівні має бути таким, щоб документація на блок будь-якого рівня сприймалася однією людиною [6].

Іншими словами, блочно-ієрархічний підхід є декомпозиційним підходом (його можна назвати також діакоптичним), який заснований на розбитті складного завдання великої розмірності на послідовно і (чи) паралельно вирішувані групи завдань малої розмірності, що істотно скорочує вимоги до використовуваних обчислювальних ресурсів або час рішення завдань.

Можна говорити не лише про ієрархічні рівні специфікацій, але і про ієрархічні рівні проектування, розуміючи під кожним з них сукупність специфікацій певного ієрархічного рівня спільно з поставленнями завдань, методами отримання описів і рішеннями проектних завдань, що виникають.

Список ієрархічних рівнів у кожному застосуванні може бути специфічним, але для більшості додатків характерне таке найбільш значне виділення рівнів:

- системний рівень, на якому вирішують найбільш загальні завдання проектування систем, машин і процесів; результати проектування представляють у вигляді структурних схем,

генеральних планів, схем розміщення устаткування, діаграм потоків даних тощо;

- макрорівень, на якому проектують окремі пристрої, вузли машин і приладів; результати представляють у вигляді функціональних, принципівих і кінематичних схем, складальних креслень тощо;

- мікрорівень, на якому проектують окремі деталі й елементи машин і приладів.

У кожному застосуванні число рівнів, що виділяються, і їх найменування можуть бути різними. Так, у радіоелектроніці мікрорівень часто називають компонентним, макрорівень – схемотехнікою. Між схемотехнікою і системними рівнями вводять рівень, який називають функціонально-логічним. В обчислювальній техніці системний рівень поділяють на рівні проектування ЕОМ (обчислювальних систем) і обчислювальних мереж. У машинобудуванні є рівні деталей, вузлів, машин, комплексів.

Залежно від послідовності рішення завдань ієрархічних рівнів розрізняють низхідне, висхідне і змішане проектування (стилі проектування). Послідовність рішення завдань від нижніх рівнів до верхніх характеризує висхідне проектування, зворотна послідовність призводить до низхідного проектування, у змішаному стилі є елементи як висхідного, так і низхідного проектування. У більшості випадків для складних систем віддають перевагу низхідному проектуванню. Відзначимо проте, що за наявності заздалегідь спроектованих складених блоків (пристроїв) можна говорити про змішане проектування.

Невизначеність і нечіткість початкових даних при низхідному проектуванні (оскільки ще не спроектовані компоненти) або початкових вимог при висхідному проектуванні (оскільки ТЗ є на усю систему, а не на її частини) зумовлюють необхідність прогнозування відсутніх даних з подальшим їх уточненням, тобто послідовного наближення до остаточного рішення (ітераційність проектування).

Разом з декомпозицією описів на ієрархічні рівні застосовують розділення уявлень про проєктовані об'єкти на аспекти.

Аспект опису (страта) – опис системи або її частини з деякої обумовленої точки зору, визначуваної функціональними, фізичними або іншого типу відносинами між властивостями й елементами.

Розрізняють такі аспекти: функціональний, інформаційний, структурний, поведінковий (процесний). Функціональний опис відносять до функцій системи і найчастіше представляють його функціональними схемами. Інформаційний опис включає основні поняття предметної області (сутності), словесне пояснення або числові значення характеристик (атрибутів) використовуваних об'єктів, а також опис зв'язків між цими поняттями і характеристиками. Інформаційні моделі можна представляти графічно (графи, діаграми суть-відношення), у вигляді таблиць або списків. Структурний опис належить до морфології системи, характеризує складові частини системи та їх взаємозв'язки і може бути представлений структурними схемами, а також різного роду конструкторською документацією. Поведінковий опис характеризує процеси функціонування (алгоритми) системи і (чи) технологічні процеси створення системи. Іноді аспекти описів зв'язують з підсистемами, функціонування яких засноване на різних фізичних процесах.

Відзначимо, що в загальному випадку виділення страт може бути неоднозначним, окрім вказаного підходу. Очевидна доцільність виділення таких аспектів, як функціональне (розробка принципів дії, структурних, функціональних, принципових схем), конструкторське (визначення форм і просторового розташування компонентів виробів), алгоритмічне (розробка алгоритмів і програмного забезпечення) і технологічне (розробка технологічних процесів) проєктування систем. Прикладами страт у випадку САПР можуть слугувати види забезпечення автоматизованого проєктування, розглянуті далі.

Стадії проектування. Стадії проектування – найбільш значні частини проектування як процесу, що розвивається в часі. У загальному випадку виділяють стадії науково-дослідних робіт (НДР), ескізного проекту або дослідно-конструкторських робіт (ДКР), технічного, робочого проектів, випробувань дослідних зразків або дослідних партій. Стадію НДР іноді називають передпроектними дослідженнями або стадією технічної пропозиції. Очевидно, що у міру переходу від стадії до стадії подробиці і ретельності опрацювання проекту зростають, і робочий проект уже має бути цілком достатнім для виготовлення дослідних або серійних зразків. Близьким до визначення стадії, але менш чітко обумовленим, є поняття етапу проектування [7].

Стадії (етапи) проектування поділяють на складові частини, які називають проектними процедурами. Прикладами проектних процедур можуть слугувати підготовка детальних креслень, аналіз кінематики, моделювання перехідного процесу, оптимізація параметрів та інші проектні завдання. У свою чергу, проектні процедури можна розчленувати на дрібніші компоненти, які називають проектними операціями, наприклад, при аналізі міцності деталі сітковими методами операціями можуть бути побудова сітки, вибір або розрахунок зовнішніх дій, власне моделювання полів напруги і деформацій, представлення результатів моделювання у графічній і текстовій формах. Проектування зводиться до виконання деяких послідовностей проектних процедур – маршрутів проектування.

Іноді розробку ТЗ на проектування називають зовнішнім проектуванням, а реалізацію ТЗ – внутрішнім проектуванням.

Зміст ТЗ на проектування. У ТЗ на проектування об'єкту вказують, як мінімум, такі дані:

- призначення об'єкту;
- умови експлуатації.

Разом з якісними характеристиками (представленими у вербальній формі) є числові параметри, які називають зовнішніми параметрами, і для яких вказані області допустимих значень.

Приклади зовнішніх параметрів: температура довкілля, зовнішні сили, електрична напруга, навантаження тощо.

3. Вимоги до вихідних параметрів, тобто до величин, які характеризують властивості об'єкту, що цікавлять споживача.

Приклади працездатності: витрата палива на 100 км пробігу автомобіля < 8 л;

- коефіцієнт посилення підсилювача на середніх частотах > 300 ;
- швидкодія процесора > 40 Мфлопс.

Класифікація моделей і параметрів, використовуваних при автоматизованому проектуванні. В автоматизованих проектних процедурах замість ще не існуючого проектного об'єкту оперують квазіоб'єктом – моделлю, яка відбиває певні властивості об'єкту, що цікавлять дослідника. Модель може бути фізичним об'єктом (макет, стенд) або специфікацією. Серед моделей-специфікацій розрізняють згадані вище функціональні, поведінкові, інформаційні, структурні моделі (описи). Ці моделі називають математичними, якщо вони формалізовані засобами апарату і мови математики [8].

У свою чергу, математичні моделі можуть бути геометричними, топологічними, динамічними, логічними тощо, якщо вони відображають відповідні властивості об'єктів. Разом з математичними моделями при проектуванні використовують функціональні IDEF0-моделі, розглянуті нижче, інформаційні моделі у вигляді діаграм суть-відношення, геометричні моделі-креслення. Надалі, якщо немає спеціальної примітки, під словом "модель" матимемо на увазі математичну модель.

Математична модель у загальному випадку є алгоритмом обчислення вектору вихідних параметрів Y при заданих векторах параметрів елементів X і зовнішніх параметрів Q . Математичні

моделі можуть бути символічними і чисельними. При використанні символічних моделей оперують не значеннями величин, а їх символічними позначеннями (ідентифікаторами). Чисельні моделі можуть бути аналітичними, тобто їх можна представити у вигляді явно виражених залежностей вихідних параметрів Y від параметрів внутрішніх X і зовнішніх Q , або алгоритмічними, у яких зв'язок Y , X і Q заданий неявно у вигляді алгоритму моделювання. Найважливіший окремий випадок алгоритмічних моделей – імітаційні, вони відображають процеси в системі за наявності зовнішніх дій на систему. Іншими словами, імітаційна модель – це алгоритмічна поведінкова модель.

Класифікацію математичних моделей виконують також за низкою інших ознак.

Так, залежно від приналежності до того чи іншого ієрархічного рівня виділяють моделі рівнів системного, функціонально-логічного, макрорівня (зосередженого) і мікрорівня (розподіленого).

За характером використовуюваного для опису математичного апарату розрізняють моделі лінгвістичні, теоретико-множинні, абстрактно-алгебраїчні, нечіткі, автоматні тощо.

Наприклад, на системному рівні переважно застосовують моделі систем масового обслуговування і мережі Петрі, на функціонально-логічному рівні – автоматні моделі на основі апарату передатних функцій або кінцевих автоматів, на макрорівні – системи алгебро-диференціальних рівнянь, на мікрорівні – диференціальні рівняння в часткових похідних. Особливе місце займають геометричні моделі, використовувани в системах конструювання.

Крім того, введені поняття повних моделей і макромоделей, моделей статичних і динамічних, детермінованих і стохастичних, аналогових і дискретних, символічних і чисельних.

Повна модель об'єкту, на відміну від макромоделі, описує не лише процеси на зовнішніх виводах модельованого об'єкту, але і внутрішні для об'єкту процеси.

Статичні моделі описують статичні стани, в них відсутній час як незалежна змінна.

Динамічні моделі відбивають поведінку системи, тобто в них обов'язково використано час.

Стохастичні й детерміновані моделі розрізняють залежно від обліку або неврахування випадкових чинників.

В аналогових моделях фазові змінні – безперервні величини, в дискретних – дискретні, в окремому випадку дискретні моделі є логічними (булевими), в них стан системи та її елементів описують булевими величинами.

У деяких випадках корисним є застосування змішаних моделей, у яких одна частина підсистем характеризується аналоговими моделями, інша – логічними.

Інформаційні моделі належать до інформаційних страт автоматизованих систем, їх використовують передусім при інфологічному проектуванні баз даних (БД) для опису зв'язків між одиницями інформації. Найбільші труднощі виникають при створенні моделей слабо структурованих систем, що характерне передусім для системного рівня проектування. Тут значна увага приділяється експертним методам. У теорії систем сформульовані загальні рекомендації щодо підбору експертів при розробці моделі, організації експертизи, обробки отриманих результатів. Досить загальний підхід до побудови моделей складних слабо структурованих систем виражений у методиках IDEF.

Зазвичай в імітаційних моделях фігурують фазові змінні. Так, на макрорівні імітаційні моделі є системами алгебро-диференціальних рівнянь.

До прикладів фазових змінних можна віднести струми і напругу в електричних системах, сили і швидкості – в механічних, тиски і витрати – в гідравлічних.

Вихідні параметри систем можуть бути двох типів. По-перше, це параметри-функціонали. Приклади таких параметрів: амплітуди сигналів, тимчасові затримки, потужності розсіювання тощо. По-друге, це параметри, що характеризують здатність

проектованого об'єкту працювати за певних зовнішніх умов. Ці вихідні параметри є граничними значеннями діапазонів зовнішніх змінних, у яких зберігається працездатність об'єкту.

Типові проектні процедури. Створити проект об'єкту (виробу або процесу) означає вибрати структуру об'єкту, визначити значення усіх його параметрів і представити результати у встановленій формі. Результати (проектна документація) можуть бути виражені у вигляді креслень, схем, пояснювальних записок, програм для програмно-керованого технологічного устаткування та інших документів на папері або на машинних носіях інформації.

Розробка (чи вибір) структури об'єкту є проектною процедурою, яку називають структурним синтезом, а розрахунок (чи вибір) значень параметрів елементів X є процедурою параметричного синтезу.

Завдання структурного синтезу в системотехніці – прийняття рішень (ЗПР). Його суть полягає у визначенні мети, множини можливих рішень і обмежувальних умов. Класифікацію ЗПР здійснюють за низкою ознак. За кількістю критеріїв розрізняють завдання одно- і багатокритерійні. За ступенем невизначеності розрізняють ЗПР детерміновані, ЗПР в умовах ризику – за наявності у формулюванні завдання випадкових параметрів, ЗПР в умовах невизначеності, тобто при неповноті або недостовірності початкової інформації.

Реальні завдання проектування, зазвичай, є багатокритерійними. Одна з основних проблем ставлення багатокритерійних завдань – встановлення правил переваги варіантів. Способи зведення багатокритерійних завдань до однокритерійних і подальші шляхи рішення вивчають у дисциплінах, присвячених методам оптимізації й математичному програмуванню.

Наявність випадкових чинників ускладнює рішення ЗПР. Основні підходи до рішення ЗПР в умовах ризику полягають або в рішенні "для найгіршого випадку", або в обліку у цільовій функції

математичного очікування і дисперсії вихідних параметрів. У першому випадку завдання вирішують як детерміноване при завищених вимогах до якості рішення, що є головним недоліком підходу. У другому випадку достовірність результатів рішення набагато вища, але виникають труднощі з оцінкою цільової функції. Застосування методу Монте-Карло у разі алгоритмічних моделей стає єдиною альтернативою, і отже, для вирішення потрібні значні обчислювальні ресурси.

Існують дві групи ЗПР в умовах невизначеності. Одну з них вирішують за наявності протидії розумного супротивника. Такі завдання вивчають в теорії ігор, для завдань проектування в техніці вони не характерні. У другій групі досягненню мети протидію роблять сили природи. Для їх вирішення корисно використати теорію й методи нечітких великих множин.

Наприклад, при синтезі структури автоматизованої системи ставлення завдання повинне включати як початкові дані такі відомості:

- множина виконуваних системою функцій (іншими словами, множина робіт, кожна з яких може складатися з однієї або більше операцій); можливо, що в цій множині є часткова впорядкованість робіт, що може бути представлене у вигляді орієнтованого графа, в якому вершини відповідають роботам, а дуги – відносини порядку;

- типи допустимих для використання серверів (машин), що виконують функції системи;

- множина зовнішніх джерел і споживачів інформації;

- у багатьох випадках задають також певну початкову структуру системи у вигляді взаємозв'язаної сукупності серверів певних типів; ця структура може розглядатися як узагальнена надмірна або як варіант першого наближення;

- різного роду обмеження, зокрема, обмеження на витрати матеріальних ресурсів і (чи) на терміни виконання функцій системи.

Завдання полягає в синтезі (чи корекції) структури, визначенні типів серверів (програмно-апаратних засобів), розподілі функцій за серверами так, щоб був досягнутий екстремум цільової функції при виконанні заданих обмежень.

Конструювання, розробка технологічних процесів, оформлення проектної документації – окремі випадки структурного синтезу.

Завдання параметричного синтезу називають параметричною оптимізацією (чи оптимізацією), якщо його вирішують як завдання математичного програмування.

Приклад. Електронний підсилювач: керовані параметри X (параметри резисторів, конденсаторів, транзисторів); вихідні параметри Y (f_b і f_n – граничні частоти смуги пропускання; K – коефіцієнт посилення на середніх частотах; $R_{вх}$ – вхідний опір). Цільовою функцією $F(X)$ можна вибрати параметр f_b , а умови працездатності інших вихідних параметрів можна віднести до функцій-обмежень.

Наступна після синтезу група проектних процедур – процедури аналізу. Мета аналізу – отримання інформації про характер функціонування і значення вихідних параметрів Y при заданій структурі об'єкту, відомостях про зовнішні параметри Q і параметрах елементів N . Якщо задані фіксовані значення параметрів N і Q , то має місце процедура одноваріантного аналізу, яка зводиться до рішення рівнянь відповідної математичної моделі. Якщо задані статистичні відомості про параметри N і потрібно отримати оцінки числових характеристик розподілів вихідних параметрів (наприклад, оцінки математичних очікувань і дисперсій), то це процедура статистичного аналізу. Якщо вимагається розрахувати матриці абсолютною A і (чи) відносною V чутливості, то це завдання аналізу чутливості.

Елемент A_{ji} матриці A називають абсолютним коефіцієнтом чутливості, він є частковою похідною j -го вихідного параметра y_j по i -ому параметру x_i . Іншими словами, A_{ji} є елементом вектору градієнта j -го вихідного параметра. На практиці зручніше

використати безрозмірні відносні коефіцієнти чутливості B_{j_i} , впливи змін.

У процедурах багатоваріантного аналізу визначається вплив зовнішніх параметрів, розкиду і нестабільності параметрів елементів на вихідні параметри. Процедури статистичного аналізу й аналізу чутливості – характерні приклади процедур багатоваріантного аналізу.

Контрольні запитання

1. Що означає проектування технічного об'єкту?
2. Що таке ієрархічна структура проектних специфікацій?
3. Які є ієрархічні рівні проектування?
4. Які розрізняють аспекти опису (страти)?
5. Які виділяють стадії проектування?
6. Яка класифікація моделей і параметрів, використовуваних при автоматизованому проектуванні?
7. Яка класифікація моделей залежно від приналежності до того чи іншого ієрархічного рівня?
8. Як розрізняють моделі за характером використовуюваного для опису математичного апарату?
9. Що описує повна модель об'єкту?
10. Що описують статичні моделі?
11. Що описують динамічні моделі?
12. Що описують стохастичні й детерміновані моделі?
13. Що описують аналогові моделі?
14. Що описують інформаційні моделі?
15. Які є типові проектні процедури?
16. Що повинно включати ставлення завдання при синтезі структури автоматизованої системи?
17. Що таке процедура синтезу?
18. Що таке процедура аналізу?

3. САПР ТА ЇХ МІСЦЕ СЕРЕД ІНШИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ

Структура САПР. Як і будь-яка складна система, САПР складається з підсистем (рис. 1.1). Розрізняють підсистеми проектувальні та обслуговувальні [9].

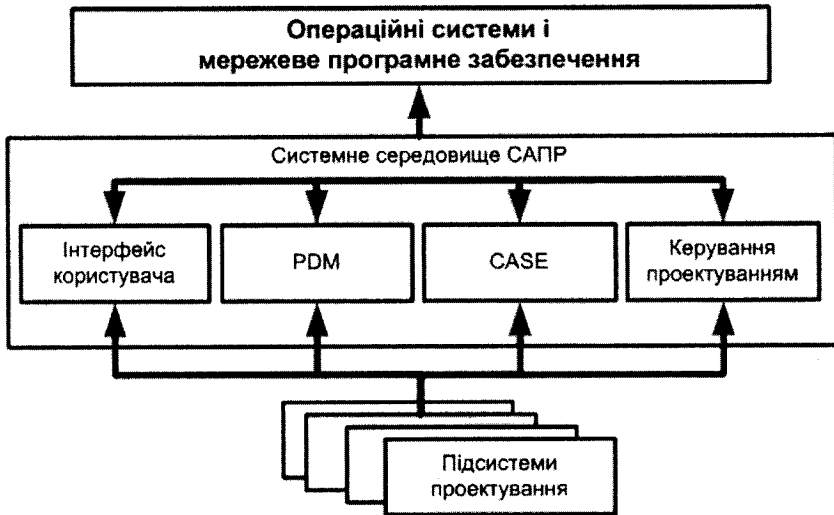


Рис. 1.1. Структура програмного забезпечення САПР

Проектувальні підсистеми безпосередньо виконують проектні процедури. Прикладами проектувальних підсистем можуть слугувати підсистеми геометричного тривимірного моделювання механічних об'єктів, виготовлення конструкторської документації, аналізу схемотехніки, трасування з'єднань у друкованих платах.

Обслуговувальні підсистеми забезпечують функціонування проектувальних підсистем. Їх сукупність часто називають системним середовищем (чи оболонкою) САПР. Типовими обслуговувальними підсистемами є підсистеми управління проектними даними (PDM – Product Data Management), управління процесом проектування (DesPM – Design Process

Management), призначеного для користувача інтерфейсу, що забезпечує зв'язок розробників з ЕОМ, CASE (Computer Aided Software Engineering) для розробки і супроводу програмного забезпечення САПР, навчальні підсистеми для освоєння користувачами технологій, реалізованих у САПР.

Структуризація САПР за різними аспектами зумовлює появу видів забезпечення САПР. Виділяють сім видів забезпечення:

- технічне (ТЕ), що містить різні апаратні засоби (ЕОМ, периферійні пристрої, мережеве комутаційне устаткування, лінії зв'язку, вимірювальні засоби);

- математичне (МЗ), що об'єднує математичні методи, моделі й алгоритми для виконання проектування;

- програмне (ПЗ), представлене комп'ютерними програмами САПР;

- інформаційне (ІЗ), що складається з баз даних (БД), систем управління базами даних (СУБД), а також інших даних, використовуваних при проектуванні. Відзначимо, що усю сукупність використовуваних при проектуванні даних називають інформаційним фондом САПР, а БД разом з СУБД називають банком даних (БнД);

- лінгвістичне (ЛЗ), представлене мовами спілкування між проектувальниками та ЕОМ, мовами програмування і мовами обміну даними між технічними засобами САПР;

- методичне (Мето), яке містить різні методики проектування. Іноді до Мето відносять також математичне забезпечення;

- організаційне (ОЗ), представлене штатними розписами, посадовими інструкціями та іншими документами, що регламентують роботу проектного підприємства.

Різновиди САПР. Класифікацію САПР здійснюють за низкою ознак, наприклад, за використанням, цільовим призначенням, масштабами (комплексністю вирішуваних завдань), характером базової підсистеми – ядра САПР [10].

За використання найбільш використовуваними є такі групи САПР.

1. САПР для застосування в галузях загального машинобудування. Їх часто називають машинобудівними САПР або MCAD (Mechanical CAD) системами.

2. САПР для радіоелектроніки. Їх назви – ECAD (Electronic CAD) або EDA (Electronic Design Automation) системи.

3. САПР в області архітектури і будівництва.

Крім того, відома велика кількість більш спеціалізованих САПР – виділених у межах вказаних груп або в самостійних гілках у класифікації. Прикладами таких систем є САПР великих інтегральних схем (ВІС); САПР літальних апаратів; САПР електричних машин тощо.

За цільовим призначенням розрізняють САПР або підсистеми САПР, що забезпечують різні аспекти (страги) проектування. Так, у складі MCAD з'являються CAE/CAD/CAM-системи:

1. САПР функціонального проектування, інакше САПР-Ф або CAE (Computer Aided Engineering) системи.

2. Конструкторські САПР загального машинобудування – САПР-К, їх часто називають просто CAD-системами.

3. Технологічні САПР загального машинобудування – САПР-Т, їх ще називають автоматизованими системами технологічної підготовки виробництва АСТПП або системами САМ (Computer Aided Manufacturing).

За масштабами розрізняють окремі програмно-методичні комплекси (ПМК) САПР, наприклад, комплекс аналізу міцності механічних виробів відповідно до методу кінцевих елементів (МКЕ) або комплекс аналізу електронних схем; системи ПМК; системи з унікальною архітектурою не лише програмного (software), але і технічного (hardware) забезпечення.

За характером базової підсистеми розрізняють такі різновиди САПР.

1. САПР на базі підсистеми машинної графіки і геометричного моделювання. Ці САПР орієнтовані на додатки, де основною процедурою проектування є конструювання, тобто визначення просторових форм і взаємного розташування об'єктів. Тому до цієї групи систем належить більшість графічних ядер САПР в області машинобудування.

Нині з'явилися уніфіковані графічні ядра, вживані більш ніж в одній САПР – це ядра Parasolid фірми EDS Unigraphics і ACIS фірми Intergraph.

2. САПР на базі СУБД. Вони орієнтовані на використання, коли при порівняно нескладних математичних розрахунках переробляється великий об'єм даних. Такі САПР переважно трапляються в техніко-економічних застосуваннях, наприклад, при проектуванні бізнес-планів, але мають місце також при проектуванні об'єктів, подібних до щитів управління в системах автоматики.

3. САПР на базі конкретного прикладного пакету. Фактично це автономно використовувані програмно-методичні комплекси, наприклад, імітаційного моделювання виробничих процесів, розрахунку міцності за методом кінцевих елементів, синтезу та аналізу систем автоматичного управління тощо. Часто такі САПР належать до систем САЕ. Прикладами можуть слугувати програми логічного проектування на базі мови VHDL, математичні пакети типу MathCAD.

4. Комплексні (інтегровані) САПР, що складаються з сукупності підсистем попередніх видів. Характерними прикладами комплексних САПР є САЕ/CAD/CAM-системи в машинобудуванні або САПР ВІС. Так, САПР ВІС включає СУБД і підсистеми проектування компонентів, принципів, логічних і функціональних схем, топології кристалів, тестів для перевірки придатності виробів. Для управління такими складними системами застосовують спеціалізовані системні середовища.

Функції, характеристики і приклади CAE/CAD/CAM-систем. Функції CAD-систем у машинобудуванні поділяють на функції двовимірного (2D) і тривимірного (3D) моделювання. До функцій 2D належать креслення, оформлення конструкторської документації; до функцій 3D – отримання тривимірних моделей, метричні розрахунки, реалістична візуалізація, взаємне перетворення 2D- і 3D-моделей. Серед CAD-систем розрізняють "легкі" та "важкі" системи. Перші з них орієнтовані переважно на 2D-графіку, порівняно дешеві й менш вимогливі щодо обчислювальних ресурсів. Другі орієнтовані на геометричне моделювання (3D), більш універсальні, дорогі, оформлення креслярської документації в них зазвичай здійснюється за допомогою попередньої розробки тривимірних геометричних моделей.

Основні функції CAM-систем: розробка технологічних процесів, синтез програм, що управляють, для технологічного устаткування з числовим програмним управлінням (ЧПУ), моделювання процесів обробки, в тому числі побудова траєкторій відносного руху інструменту і заготівки в процесі обробки, генерація постпроцесорів для конкретних типів устаткування з ЧПУ (NC – Numerical Control), розрахунок норм часу обробки.

Найбільш відомі (до 1999 р.) такі CAE/CAD/CAM-системи, призначені для машинобудування. "Важкі" системи (у дужках вказана фірма, що розробила або поширює продукт): Unigraphics (EDS Unigraphics), Solid Edge (Intergraph), Pro/Engineer (PTC – Parametric Technology Corp.), CATIA (Dassault Systemes), EUCLID (MatraDatavision), CADD5.5 (Computervision, нині входить у PTC) та ін.

"Легкі" системи: AutoCAD (Autodesk), АДЕМ, bCAD (ПроПро Група, Новосибірськ), Caddy (Ziegler Informatics), Компас (Аскон, С.-Петербург), Спрут (Sprut Technology, Набережні Човни), Кредо (НИВЦ АСК, Москва).

Системи, що займають проміжне положення (середньомасштабні): Cimatron, Microstation (Bentley), Euclid

Prelude (Matra Datavision), T-FlexCAD (Топ Системи, Москва) та ін. Із зростанням можливостей персональних ЕОМ грані між "важкими" і "легкими" CAD/CAM-системами поступово стираються.

Функції CAE-систем досить різноманітні, оскільки пов'язані з проектними процедурами аналізу, моделювання, оптимізації проектних рішень. До складу машинобудівних CAE-систем передусім включають програми для таких процедур:

- моделювання полів фізичних величин, у тому числі аналіз міцності, який найчастіше здійснюється відповідно до МСЕ;
- розрахунок станів і перехідних процесів на макрорівні;
- імітаційне моделювання складних виробничих систем на основі моделей масового обслуговування і мереж Петрі.

Приклади систем моделювання полів фізичних величин відповідно до МСЕ: Nastran, Ansys, Cosmos, Nisa, Moldflow. Приклади систем моделювання динамічних процесів на макрорівні: Adams і Dyna – в механічних системах, Spice – в електронних схемах, ПА9 – для багатоаспектного моделювання, тобто для моделювання систем, принципи дії яких засновані на взаємовпливі фізичних процесів різної природи.

Для зручності адаптації САПР до потреб конкретних застосувань, для її розвитку доцільно мати в складі САПР інструментальні засоби адаптації та розвитку. Ці засоби представлені тією чи іншою CASE-технологією, включаючи мови розширення. У деяких САПР застосовують оригінальні інструментальні середовища.

Прикладом може слугувати об'єктно-орієнтоване інтерактивне середовище CASCADE в системі EUCLID, що містить бібліотеку компонентів. У САПР T-Flex CAD 3D передбачена розробка доповнень у середовищах Visual C++ і Visual Basic.

Важливе значення для забезпечення відкритості САПР, її інтегрованості з іншими автоматизованими системами (АС) мають інтерфейси, реалізовані в системі форматами

міжпрограмних обмінів. Очевидно, що в першу чергу необхідно забезпечити зв'язки між CAE-, CAD- і CAM-підсистемами.

Як мови-формати міжпрограмних обмінів використовують IGES, DXF, Express (стандарт ISO 10303-11, входить у сукупність стандартів STEP), SAT (формат ядра ACIS) та ін.

Найбільш перспективними вважають діалекти мови Express, що пояснюється загальним характером стандартів STEP, їх спрямованістю на різні застосування, а також на використання в сучасних розподілених проектних і виробничих системах. Дійсно, такі формати, як IGES або DXF, описують тільки геометрію об'єктів, тоді як в обмінах між різними САПР і їх підсистемами фігурують дані про різні властивості й атрибути виробів.

Мова Express використовується у багатьох системах інтерфейсу між CAD/CAM-системами. Зокрема, в систему CAD++ STEP включене середовище SDAI (Standard Data Access Interface), у якому можливе уявлення даних про об'єкти з різних систем CAD і додатків (але описаних за правилами мови Express). CAD++ STEP забезпечує доступ до баз даних більшості відомих САПР з представленням витягуваних даних у вигляді STEP-файлів. Інтерфейс програміста дозволяє відкривати і закривати файли проектів у базах даних, робити читання й запис сутностей. Як об'єкти можуть використовуватися точки, криві, поверхні, текст, приклади проектних рішень, розміри, зв'язки, типові зображення, комплекси даних тощо.

Поняття про CALS-технології. CALS-технологія – це технологія комплексної комп'ютеризації сфер промислового виробництва, мета якої – уніфікація і стандартизація специфікацій промислової продукції на усіх етапах її життєвого циклу [11]. Основні специфікації представлені проектною, технологічною, виробничою, маркетинговою, експлуатаційною документацією. У CALS-системах передбачено зберігання, обробку і передачу інформації в комп'ютерних середовищах, оперативний доступ до даних у потрібний час і в потрібному місці. Відповідні системи автоматизації назвали автоматизованими логістичними системами

або CALS (Computer Aided Logistic Systems). Оскільки під логістикою зазвичай розуміють дисципліну, присвячену питанням постачання та управління запасами, а функції CALS набагато ширші й пов'язані з усіма етапами життєвого циклу промислових виробів, застосовують CALS – Continuous Acquisition and LifeCycle Support.

Застосування CALS дозволяє істотно скоротити об'єми проектних робіт, оскільки описи багатьох складових частин устаткування, машин і систем, що проектувалися раніше, зберігаються у базах цих мережевих серверів, доступних будь-якому користувачеві технології CALS. Істотно полегшується рішення проблем ремонтпридатності, інтеграції продукції в системи й середовища різного роду, адаптації до умов експлуатації, спеціалізації проектних організацій, які змінюються, тощо. Очікується, що успіх на ринку складної технічної продукції буде неможливий поза технологією CALS.

Розвиток CALS-технології повинен привести до появи так званих віртуальних виробництв, при яких процес створення специфікацій з інформацією для програмно керованого технологічного устаткування, достатньою для виготовлення виробу, може бути розподілений у часі й просторі між багатьма організаційно автономними проектними студіями. Серед безперечних досягнень CALS-технології слід зазначити легкість поширення передових проектних рішень, можливість багатократного відтворення частин проекту в нових розробках тощо. Побудова відкритих розподілених автоматизованих систем для проектування й управління в промисловості складає основу сучасної CALS-технології. Головна проблема їх побудови – забезпечення однакового опису та інтерпретації даних, незалежно від місця й часу їх отримання в загальній системі, що має масштаби аж до глобальних. Структура проектної, технологічної та експлуатаційної документації, мови її представлення мають бути стандартизованими. Тоді стає реальною успішна робота над загальним проектом різних колективів, розділених у часі та

просторі, таких, що використовують різні CAE/CAD/CAM-системи. Одна й та ж конструкторська документація може бути використана багаторазово в різних проектах, а одна й та ж технологічна документація адаптована до різних виробничих умов, що дозволяє істотно скоротити і здешевити загальний цикл проектування та виробництва. Крім того, спрощується експлуатація систем.

Отже, інформаційна інтеграція є невід'ємною властивістю CALS-систем. Тому в основу CALS-технології покладена низка стандартів, що забезпечують таку інтеграцію. Важливі проблеми, що вимагають рішення при створенні комплексних САПР – управління складністю проектів та інтеграція ПО. Ці проблеми включають питання декомпозиції проектів, розпаралелювання проектних робіт, цілісності цих міжпрограмних інтерфейсів тощо.

Комплексні автоматизовані системи. Відомо, що часткова автоматизація часто не дає очікуваного підвищення ефективності функціонування підприємств. Тому здебільшого впроваджують інтегровані САПР, що автоматизують усі основні етапи проектування виробів. Подальше підвищення ефективності виробництва і підвищення конкурентоспроможності продукції можливе за рахунок інтеграції систем проектування, управління і документообігу.

Така інтеграція лежить в основі створення комплексних систем автоматизації, у яких, крім функції власне САПР, реалізуються засоби для автоматизації функцій управління проектуванням, документообігу, планування виробництва, обліку тощо.

Проблеми інтеграції лежать в основі технології Юпітер, пропагованої фірмою Intergraph. Приклад зрощення деяких підсистем із САПР і АСУ – програмний продукт TechnODOCS (російська фірма Весть). Його функції:

- інтеграція програм документообігу з проектувальними пакетами (конкретно з AutoCAD, Microstation та іншими програмами, що працюють у Windows-середовищах і

підтримують взаємодію за технологіями DDE або OLE, розробленими фірмою Microsoft);

- ведення архіву технічної документації;
- маршрутизація робіт і проходження документації, контроль виконання;
- управління паралельним проектуванням, тобто координацією проектних робіт, виконуваних колективно.

Очевидно, що подібна інтеграція є невід'ємною рисою CALS-систем. В основу CALS-технології покладена низка стандартів, передусім це стандарти STEP, а також Parts Library, Mandate, SGML (Standard Generalized Markup Language), EDIFACT (Electronic Data Interchange For Administration, Commerce, Transport) та ін. Стандарт SGML встановлює способи уніфікованого оформлення документів певного призначення – звітів, каталогів, бюлетенів тощо, а стандарт EDIFACT – способи обміну подібними документами.

Одна з найбільш відомих реалізацій CALS-технології розроблена фірмою Computervision. Ця технологія названа EPD (Electronic Product Definition) і орієнтована на підтримку процесів проектування та експлуатації виробів машинобудування.

У CALS-системах на усіх етапах життєвого циклу виробів використовують документацію, отриману на етапі проектування. Тому природно, що вміст підсистем у CALS і комплексних САПР значною мірою співпадають.

Технологію EPD реалізують:

- CAD – система автоматизованого проектування;
- CAM – система автоматизованої технологічної підготовки виробництва (АСТПП);
- CAE – система моделювання і розрахунків;
- CAPE (Concurrent Art-to-Product Environment) – система підтримки паралельного проектування (concurrent engineering);
- PDM – система управління проектними даними, що є спеціалізованою СУБД (DBMS (Data Base Management System));
- 3D Viewer – система тривимірної візуалізації;

- CADD – система документування;
- CASE – система розробки і супроводу програмного забезпечення;
- методики обстеження і аналізу функціонування підприємств.

Оснoву EPD складають системи CAD і PDM, які використовуються CADD5 і Optegra відповідно. Значною мірою специфіку EPD визначає система Optegra. У ній відображається ієрархічна структура виробів, що включає усі складальні вузли і деталі. В Optegra можна отримати інформацію про атрибути будь-якого елемента структури, а також відповіді на типові для баз даних питання типу "Вкажіть деталі з матеріалу Р" або "У яких блоках використовуються деталі виробника Y?" тощо.

Важливою для користувачів особливістю Optegra є робота разом з багатовіконною системою візуалізації 3D Viewer. Користувач може одночасно стежити за інформацією в декількох типових вікнах:

- інформаційний браузер, у якому висвічуються дані, які запитує користувач, наприклад, з поштової скриньки, Internet, корпоративних ресурсів, його персональної БД;
- вікно структури виробу, представлене у вигляді дерева. Можна отримувати відповіді на запити підсвічуванням деталей Dj (листя дерева), які відповідають умовам запиту;
- 3D-візуалізація, у цьому вікні висвічується тривимірне зображення виробу, відповіді на запити даються колірним виділенням деталей Dj;
- вікно призначеного для користувача процесу, у якому в потрібній послідовності у вигляді іконок відображається перелік завдань, заданий користувачеві для вирішення.

У системі Optegra зв'язки між об'єктами задаються за протоколами стандартів STEP, зовнішній інтерфейс здійснюється через базу даних SDAI.

Математичне забезпечення підсистем машинної графіки і геометричного моделювання. Підсистеми машинної графіки і геометричного моделювання (МГіГМ) займають центральне місце в машинобудівних САПР-К. Конструювання виробів у них, зазвичай, проводиться в інтерактивному режимі при оперуванні геометричними моделями, тобто математичними об'єктами, що відображають форму деталей, склад складальних вузлів і, можливо, деякі додаткові параметри (маса, момент інерції, кольори поверхні тощо). У підсистемах МГіГМ типовий маршрут обробки даних включає отримання проектного рішення в застосовуваній програмі, його представлення у вигляді геометричної моделі (геометричне моделювання), підготовку проектного рішення до візуалізації, власне візуалізацію в апаратурі робочої станції і за необхідності коригування рішення в інтерактивному режимі. Дві останні операції реалізуються на базі апаратних засобів машинної графіки. Коли говорять про математичне забезпечення МГіГМ, мають на увазі передусім моделі, методи й алгоритми для геометричного моделювання і підготовки до візуалізації. При цьому часто саме математичне забезпечення підготовки до візуалізації називають математичним забезпеченням машинної графіки. Розрізняють математичне забезпечення двовимірного (2D) і тривимірного (3D) моделювання. Основні застосування 2D-графіків – підготовка креслярської документації в машинобудівних САПР, топологічне проектування друкованих плат і кристалів ВІС у САПР електронної промисловості. У розвинених машинобудівних САПР використовують як 2D-, так і 3D- моделювання для синтезу конструкцій, представлення траєкторій робочих органів верстатів при обробці заготовок, генерації сітки кінцевих елементів при аналізі міцності тощо. У 3D-моделюванні розрізняють моделі каркасні (дротяні), поверхневі, об'ємні (твердотільні).

3D-системи забезпечують таку дисципліну роботи з трьома координатами, при якій будь-яка зміна одного виду автоматично призводить до відповідних змін в усіх інших видах.

Послідовність побудов може бути такою: спочатку будується 3D-вигляд, а потім автоматично генеруються 2D-вигляди. Деякі системи здатні перетворювати складальні креслення механізму ортогональної проєкції у 3D-вигляд цього виробу в розібраному стані. 3D особливо успішно застосовують для створення складних креслень при проектуванні розміщення заводського устаткування, трубопроводів, різних будівельних споруд.

3D-моделювання ефективно там, де треба забезпечити адекватні проміжки між компонентами. Можливість генерувати траєкторії руху інструменту та імітація функціонування роботів робить 3D-моделювання невід'ємною частиною інтеграції САПР/АСТПП. У деяких 3D-системах є засоби автоматичного аналізу фізичних характеристик, таких як вага, моменти інерції, і засоби рішення геометричних проблем складних сполучень та інтерпретації [12]. Оскільки в 3D-системах існує автоматичний зв'язок між даними різних геометричних видів зображення, 3D-моделювання корисне в тих випадках, де потрібне багатократне редагування 3D-образу на усіх етапах процесу проектування.

Методи 3D-моделювання поділяють на три категорії:

1. Каркасні (дротяні).
2. Поверхневі (полігональні).
3. Твердотільні (суцільне, об'ємне моделювання).

Каркасні моделі. Каркасну модель повністю описують у термінах точок і ліній. Це моделювання найнижчого рівня.

Має низку серйозних обмежень, більшість з яких виникає через нестачу інформації про грані, пов'язані між лініями, і неможливість виділити внутрішню й зовнішню області зображення твердого об'ємного тіла. Проте каркасна модель вимагає менше пам'яті і цілком придатна для вирішення завдань, що належать до простих. Каркасне представлення часто використовують не при моделюванні, а при відображенні моделей як один з методів візуалізації. Широко використовують для імітації траєкторії руху інструменти, що виконують нескладні

операції обробки деталей по 2,5 або 3 осях. "2,5 осі" – простіші системи можуть моделювати форми тільки з постійним поперечним перерізом. Таку форму можна побудувати таким чином: спочатку вводять вигляд (X, Y), а потім будь-якій точці приписують третю координату, що характеризує глибину зображення. Такі форми належать до так званих "2,5 геометрії".

Обмеження каркасної моделі:

1. Неоднозначність. Цей ефект може привести до непередбачуваних результатів. Не можна відрізнити видимі грані від невидимих. Операцію з видалення невидимих ліній можна виконати тільки вручну із застосуванням команд редагування кожної окремої лінії, але результат цієї роботи рівносильний руйнуванню усієї створеної каркасної конструкції, оскільки лінії невидимі в одному вигляді і видимі в іншому.

2. Неможливість розпізнавання криволінійних граней.

Бічні поверхні циліндричної форми реально не мають ребер, хоча на зображенні є зображення деяких уявних ребер, які обмежують такі поверхні. Розташування цих уявних ребер змінюється залежно від напрямку вигляду, тому ці силуети не розпізнаються як елементи каркасної моделі і не відображаються на них.

Щоб представити криволінійні грані, проводять подовжні лінії, використовують низку умовностей (інтерпретуючи поверхню циліндра плоскими гранями). Формують умовне зображення об'єкту. Наявність несучих ліній може додати ще більше плутанини в креслення, яке й так уже містить багато неоднозначностей.

3. Неможливість виявити взаємний вплив компонентів. Каркасна модель не несе інформації про поверхні, що обмежують форму. Це зумовлює неможливість виявлення небажаних взаємодій між гранями об'єкту й істотно обмежує використання каркасної моделі в пакетах, що імітують траєкторію руху інструменту або функціонування робота, оскільки при такому

моделюванні не можуть бути виявлені на стадії проектування багато колізій, що з'являються при механічному складанні.

4. Труднощі при обчисленні фізичних характеристик.

5. Відсутність засобів виконання тонових зображень. Основним принципом техніки виконання тонових зображень, тобто забезпечення плавних переходів різних кольорів і нанесення світлотіні, є те, що загінюванню піддаються грані, а не ребра.

Поверхнєве моделювання. Поверхнева модель визначається за допомогою точок, ліній і поверхонь. При побудові поверхневої моделі передбачено, що технічні об'єкти обмежені поверхнями, які відділяють їх від довкілля. Така оболонка зображується графічними поверхнями. Поверхня технічного об'єкту знову стає обмежена контурами, але ці контури вже є результатом 2 поверхонь, дотичних або пересічних.

Точки об'єктів – вершини можуть бути задані перетином 3 поверхонь.

Поверхнєве моделювання має такі переваги порівняно з каркасним:

1. Здатність розпізнавання і відтворення складних криволінійних граней.

2. Здатність розпізнавання грані для отримання тонових зображень.

3. Здатність розпізнавання особливих побудов на поверхні (отвори).

4. Можливість отримання якісного зображення. Забезпечення ефективніших засобів для імітації функціонування роботів. В основу поверхні покладено 2 математичних положення:

- будь-яку поверхню можна апроксимувати многогранником, кожна грань якого є простим плоским багатокутником;

- додаткові поверхні другого порядку і аналітично не описувані поверхні, форму яких можна визначити за допомогою інтерпретації чи апроксимації.

Базові типи геометричних поверхонь:

1. *Плоскі поверхні*, які можна отримати накресливши спочатку відрізок прямої, а потім ввівши команду, що розгортає у 3D-просторі образ цього відрізка на задану відстань (виходить площина або двогранник). Так само розгорткою кіл або дуг можуть бути отримані циліндричні й канонічні поверхні. Области поверхонь також можуть бути розгорнуті у 3D-об'єкт (область усередині граней залишається порожньою).

2. *Поверхні обертання*. Їх можна отримати шляхом обертання замкнутої чи розімкнутої кривої навколо осі на кут від 0° до 360° .

3. *Поверхня сполучення і перетинів*, які можна отримати плавним сполученням однієї поверхні до іншої (часто вживано). Засоби визначень перетинів поверхонь є доступними. Можливість побудови плавного сполучення двох поверхонь є найбільш потужною і часто використовується на практиці за допомогою засобу поверхневого моделювання. Крім цього, може бути доступний засіб визначення перетину поверхні. Наприклад, можна побудувати плавне сполучення бічних поверхонь паралелепіпеда і циліндра. Проблема породження результуючої поверхні в цьому випадку зводиться до завдання побудови методом сплайн-інтерполяції особливих кривих у 3D-просторі, що виходять з квадрата і входять в автоматично генеровану криву на поверхні циліндра, по якій задані криві повинні перетинатися.

4. *Аналітичні поверхні*. Такі визначаються одним математичним рівнянням з невідомими X , Y , Z . Ці невідомі означають шукані координати поверхонь, тобто, щоб зображувати будь-яку аналітичну поверхню, необхідно знати математичне рівняння, яким це описано.

5. *Скульптурні поверхні (СП)*. Дуже складні. Поверхні вільних форм або довільні поверхні. Методи ГМ скульптурної поверхні складної форми застосовують в областях, де проектуються динамічні поверхні, тобто такі, до яких пред'являються підвищені естетичні вимоги. Використовують при

проектуванні корпусів машин, літаків. Динамічні поверхні поділяють на 2 класи:

- Омивані середовищем (зовні обід літаків, суден тощо);
- Трасуючі – напрямні середовища (повітряні гідравлічні канали).

СП використовують здебільшого каркасно-кінематичний метод, заснований на переміщенні деяких твірних каркасів уздовж напрямних або шляхом побудови сплайнів поздовжніх твірних кривих між 3D-точками. Каркас задається або множиною точок, або ламаними через ці точки.

При каркасному кінематичному методі каркас задається як множина характерних точок, так і ламаними лініями, що проходять через ці точки. Існують системи, в яких завдання побудови моделі поверхні вирішується на множині точок, координати яких обчислюються в прикладній програмі. При рішенні завдань представлення скульптурних поверхонь і гладких сплайнових кривих виникають завдання апроксимації, інтерполяції і згладжування початкових даних. Завдання апроксимації, тобто наближеного представлення, виникають при заміні кривої або поверхні, описуваної складними функціями, чи іншими об'єктами, описуваними простішими рівняннями без втрати необхідної точності. Завдання інтерполяції, тобто наближеного відновлення, пов'язане з пошуком гладких кривих-сплайнів або поверхонь, що проходить через множину заданих точок. Завдання згладжування виникають, коли необхідно, щоб шукана крива або поверхня були описані функцією, що забезпечує, наприклад, необхідну міру диференціювання. У системах автоматизації проектування найбільший інтерес становлять методи інтерполяції, що забезпечують необхідну точність завдання проєктованих поверхонь. Для інтерполяції кривих використовують різні методи, серед яких найбільше поширення отримали методи інтерполяції локальними сплайнами непарних ступенів і кубічними сплайнами, за допомогою B-сплайнів, апроксимація кривих методом Безьє. Перераховані способи базовані на припущенні, що є відомий набір функцій або

точок, що описують початкові дані про об'єкт проектування. Ці дані можуть бути сформовані евристично на основі досвіду проектувальника, отриманого в результаті фізичних експериментів, або можуть бути вичислені в результаті рішення проміжних завдань.

Методи відображення скульптурних поверхонь значною мірою пов'язані з можливостями графічних пристроїв. Слід зазначити, що відображення самої поверхні не грає істотної ролі, оскільки основне призначення цих методів – візуальна перевірка коректності, гладкості, естетичності отриманої поверхні. Нині моделі скульптурних поверхонь широко використовують при проектуванні і виробництві корпусів автомобілів, літаків, предметів домашнього ужитку.

6. Складені поверхні. У розвинутих системах поверхневого моделювання складену поверхню можна повністю визначити, покривши її сіткою чотирикутних шматків, тобто ділянками, обмеженими подовжніми і поперечними лініями на поверхні. Кожен шматок має геометричну форму топологічного прямокутника, який відрізняється від звичайного тим, що його сторони не обов'язково прямі і попарно перпендикулярні. Межі шматків є безперервними кривими, що забезпечує гладкість поверхні, натягнутої на сітку. Внутрішня область кожного шматка визначається методом інтерполяції. Зображення складеної поверхні, реалізоване вказаним способом, може бути отримане на екрані дисплея або в результаті побудови за точками сплайнових кривих, або шляхом створення багатогранного каркаса, на який система автоматично апроксимуватиме натягнення гладкої криволінійної поверхні.

Твердотільне моделювання. Твердотільне моделювання – єдиний засіб, який забезпечує повний однозначний опис 3D-геометричної форми твердотільних моделей:

- повне визначення об'ємної форми з можливістю розмежовувати внутрішні і зовнішні області об'єкту, що необхідно для взаємовпливу компонентів;

- забезпечення автоматичного видалення прихованих ліній;
- автоматична побудова 3D-розрізів компонентів, що особливо важливо при аналізі складних складальних виробів;
- застосування методів аналізу з автоматичним отриманням зображення точних вагових характеристик методом кінцевих елементів;
- отримання тонових ефектів, маніпуляції з джерелами світла.

Методи твердотільного моделювання, які зазвичай використовують у прикладних системах, поділяють на:

- метод конструктивного представлення (C-REP);
- метод граничного представлення (B-REP).

Вони близькі, але відрізняються способами зберігання даних у пам'яті комп'ютера.

C-REP. Цей метод полягає в побудові твердотільних моделей з базових складових елементів, які називаються твердотільними примітивами і визначаються формою, розмірами, точкою прив'язки й орієнтацією. Типові приклади: паралелепіпеди, сфери.

Булеві операції – чинний інструментарій для побудови моделі C-REP при визначенні взаємовідносин між сусідніми примітивами. Булеві операції базовані на поняттях теорії алгебри великих множин і мають звичайний сенс, коли застосовуються до твердотільних об'єктів. Найчастіше відбуваються такі операції: перетин, об'єднання і різниця.

Моделлю конструктивної геометрії є бінарний деревовидний граф.

B-REP. Опис тіла за допомогою представлення меж або точного аналітичного завдання граней, що обмежують тіло. Цей метод дозволяє створювати точне, а не наближене представлення геометричного твердого тіла. B-REP вимагає, щоб користувач задав контури або межі об'єкту, а також ескізи різних видів об'єкту, вказавши лінії зв'язку між ними, щоб можна було встановити взаємно-однозначну відповідність.

Будь-який з двох названих методів має свої переваги і недоліки порівняно з іншими. Системи в C-REP-представленні мають значні процедурні переваги при початковому формуванні моделей. Оскільки побудувати точну об'ємну модель з об'ємних примітивів правильної форми за допомогою булевих операцій порівняно нескладно, цей метод забезпечує також компактніший опис моделі у БД. Одночасно системи з B-REP-представлення мають свої переваги. Одна з них очевидна, коли стикаються незвичайні форми, які не перекриваються наявним набором примітивів методу C-REP. Прикладом ситуації такого роду може слугувати форма фюзеляжу і крил літака. Друга відмінність полягає у такому: в C-REP-методі модель зберігається у вигляді комбінації даних і логічних процедур. При цьому потрібно менше пам'яті, але більше виявляється об'єм обчислень при відтворенні моделі та її зображенні. Система з B-REP-представленням зберігає точний опис меж моделі. Тут і більше пам'яті, але не потрібно майже ніяких обчислень для створення зображення.

Відносно перевагою систем з B-REP є порівняна простота перетворення граничного представлення у відповідну каркасну модель і назад. Причина такої простоти полягає в тому, що опис меж подібний до опису каркасної моделі, а це полегшує перетворення моделі з однієї форми в інші, що робить системи в B-REP-представленні сумісними з уже наявними системами.

Прикладами пакетів 3D-моделювання є: Power Shape, Solid Edge.

З причини відносного характеру переваг та недоліків C-REP і B-REP були розроблені гібридні системи, які поєднують у собі обидва методи (CADDSS5, UnitGraph/Solid Modeling, Euclid, CATIA). Ці системи дозволяють поєднувати каркасну, поверхневу й твердотільну геометрію і використати комбінації жорстко розмірного моделювання, тобто використати гібридне моделювання.

Краще було б шукати стратегію моделювання для всіх продуктів, але:

1. Часто доводиться використати раніше напрацьовані дані, або дані, введені з інших систем, а вони можуть мати різне походження.

2. Деколи ефективніше працювати з дротяними моделями або 3D-геометрією, описаною поверхнею.

3. Часто простіше мати різні представлення для різних компонентів.

Тепер застосовують такі підходи до побудови геометричних моделей.

1. Завдання граничних елементів – граней, ребер, вершин.

2. Кінематичний метод, згідно з яким задають двовимірний контур і траєкторію його переміщення; слід від переміщення контуру приймають як поверхню деталі.

3. Позиційний підхід, відповідно до якого простір розбивають на осередки (позиції) і деталь задають вказівкою осередків, до яких належать деталі; очевидна громіздкість цього підходу.

4. Представлення складної деталі у вигляді сукупностей базових елементів форми (БЕФ) і виконуваних над ними теоретико-множинних операцій. До БЕФ належать заздалегідь розроблені моделі простих тіл – це, в першу чергу, моделі паралелепіпеда, циліндра, сфери, призми. Типовими теоретико-множинними операціями є об'єднання, перетин, різниця. Наприклад, модель плити з отвором у ній може бути отримана відніманням циліндра з паралелепіпеда.

Метод на основі БЕФ часто називають методом конструктивної геометрії. Це основний спосіб конструювання складальних вузлів у сучасних САПР-К.

У пам'яті ЕОМ розглянуті моделі зазвичай зберігаються у векторній формі, тобто у вигляді координат сукупності точок, що задають елементи моделі. Операції конструювання також здійснюються над моделями у векторній формі. Найбільш компактна модель у вигляді сукупності пов'язаних БЕФ, яка

переважно й використовується для зберігання та обробки інформації про вироби в системах конструктивної геометрії.

Проте для візуалізації в сучасних робочих станціях у зв'язку з використанням у них растрових дисплеїв потрібне rasterизування – перетворення моделі в растрову форму. Зворотну операцію переходу до векторної форми, яка характеризується меншими витратами пам'яті, називають векторизацією. Зокрема, векторизація повинна здійснюватися стосовно даних, яких отримують скануванням зображень в облаштуваннях автоматичного введення.

Контрольні запитання

1. Яка структура програмного забезпечення САПР?
2. Які виділяють види забезпечення САПР?
3. Які є групи САПР?
4. Які розрізняють САПР за цільовим призначенням?
5. Які розрізняють САПР за характером базової підсистеми?
6. На які функції підрозділяють САД-системи?
7. На що орієнтовані "легкі" САД-системи?
8. На що орієнтовані "важкі" САД-системи?
9. Які основні функції САМ-систем?
10. Які основні функції САЕ-систем?
11. Що таке САЛС-технологія?
12. Що дає застосування САЛС-технології?
13. Для чого потрібне математичне забезпечення підсистем машинної графіки?
14. Які розрізняють математичні забезпечення?
15. На які категорії поділяють методи 3D-моделювання?
16. Що таке каркасна модель?
17. Що таке поверхневі (полігональні) моделі?
18. Які є базові геометричні поверхні?
19. На які класи поділяють методи твердотілого моделювання?

4. ПРИНЦИПИ СУЧАСНОГО 3D-МОДЕЛЮВАННЯ У ПРОМИСЛОВОМУ ДИЗАЙНІ

Загальні принципи створення 3D-об'єктів. За своєю формою всі об'єкти поділяються на складні і прості. Прикладом простого об'єкту може бути лампочка. Складним об'єктом можна вважати, наприклад, дерево. Як відомо, існує два підходи до створення об'єктів [13]:

- створення об'єктів із примітивів – найбільш простий і зрозумілий метод, що не вимагає особливих навичок;
- створення об'єктів за допомогою моделінгу, з використанням лофтингу та інших прийомів.

Рисування об'єктів за допомогою примітивів. Цей метод застосовують, коли можна подумки розбити об'єкт на декілька примітивів, які можуть накладатися один на одного, перетинатися тощо. Для того, щоб проробляти подібні операції з об'єктом, необхідно мати хороше просторове мислення, постійно уявляти собі об'єкт у всіх його основних деталях. Зате процес моделювання значно спрощується. На основі примітивів можна зображувати практично будь-який об'єкт, єдине обмеження в тому, що після певної межі зображення примітивами втрачає сенс. За бажанням можна зображувати об'єкт за допомогою маленьких кубів або сфер, які, по суті, будуть чимось подібним до точок.

Сам процес створення об'єктів на основі примітивів можна розбити на такі етапи:

- уявне розбиття початкового об'єкту на примітиви;
- рисування цих примітивів;
- розташування їх за формою об'єкту (на основі уявного розбиття, зробленого раніше);
- підгонка розмірів і розташування об'єктів;
- накладення матеріалу.

Отже, ми з'ясували, що примітивами найдоцільніше користуватися при зображенні відносно простих, регулярних

об'єктів. Застосування їх для відображення складних нерегулярних об'єктів небажане.

Створення складних об'єктів нерегулярної форми. Основна проблема при створенні подібних об'єктів – постійне "бачення" об'єкту. Можна використати деякі початкові нариси об'єкту, ще краще мати перед очима його модель.

Після вибору предмета моделювання і детального вивчення його форми можна починати моделювання. Для створення цих об'єктів краще скористатися засобами візуального проектування: системами моделювання 3D Studio MAX, Maya, LightWave, RayDream Studio і подібними до них. При створенні треба приділяти велику увагу рівновазі між деталізацією об'єкту і кількістю вершин та граней (перелічені системи моделювання дозволяють перевіряти кількість використаних вершин). В ідеалі кількість вершин і граней має бути мінімальна, тоді розмір вихідного файлу буде меншим, і швидкість скачування та відображення зросте. Крім того, в міру можливості намагайтеся використати і примітиви.

Ще однією складною проблемою є розташування і зв'язок частин складного об'єкту, розв'язанням якої є використання системи автоматичної генерації зовнішнього вигляду таких об'єктів, як людське тіло, дерево, різні ландшафти. При генерації найчастіше вимагається ввести декілька характерних параметрів (наприклад, зріст, вага, стать). Переважно в цих програмах використані різні алгоритми, що дозволяють створювати відносно різні об'єкти. Так, при створенні ландшафтів і дерев використовують фрактали, з їх допомогою найпростіше і швидко досягається потрібний результат. Недоліком подібних систем є усереднення отримуваних результатів. Перевагою – значний вииграш у швидкості моделювання.

Отже, для створення об'єктів складної форми необхідно мати розвинену тривимірну уяву або модель об'єкту, якого моделюють. Окрім того, бажано мати систему візуального моделювання, яка має можливості створення подібних об'єктів.

Електронне 3D-моделювання в сучасному дизайн-проектванні є основним засобом реалізації художнього задуму форми об'єкту, від ескізів художнього образу до інженерних креслень. Нині електронне тривимірне моделювання класифікується за наявністю історії побудови об'єкту (табл. 4.1) і за елементами побудови моделі: каркасне, полігональне, поверхневе, твердотільне, звичайно-елементне, генеративне (табл. 4.2) [14-17]. Кожен з видів моделювання знайшов застосування у дизайн-проектванні промислових виробів.

Таблиця 4.1. Види 3D-моделювання за наявністю історії побудови об'єкту

Види	Опис	Приклад програми
Параметричне моделювання	Моделювання за набором заданих варійованих параметрів операцій	CATIA
Непараметричне моделювання	Моделювання без збереження параметрів побудови (історії побудови)	Rhinoceros
Комбіноване моделювання	Історію побудови у будь-який момент можна видалити/відключити	Alias Studio Tools, Rhinoceros + Grasshopper

В індустрії дизайну існує постійна потреба в оновленні форм, переосмисленні взаємодії, організації об'єктів і простору. Актуальним залишається зниження термінів моделювання майбутнього виробу. Ці задачі дозволяє вирішити впровадження міждисциплінарних принципів тривимірного моделювання у процес проектування.

Метою дослідження є розробка принципів моделювання, виявлення міждисциплінарних зв'язків у вивченні сучасного

вигляду моделювання для вирішення завдань стійкого дизайну і пошуку нових рішень форм об'єктів, дослідження нових видів моделювання. Впровадження принципів у процес проектування дозволить придбавати знання про моделювання не як про окрему дисципліну, а як про цілісний процес: від створення ескізів до прототипування і виробництва.

Таблиця 4.2. Види 3D-моделювання за елементами побудови

№	Види	Елементи побудови	Програми	Модель
1.	Полігональне моделювання	Полігон, крива (poly, nurbs, mesh)	Alias, 3ds Max, Maya, Rhino	Полігональна
2.	Каркасне моделювання	Точка і лінія (line & point)	Alias ST, AutoCAD CATIA, IsemSurf	Каркасна
3.	Поверхневе моделювання	Точка, лінія, поверхня (surface)	Alias ST, AutoCAD CATIA, IsemSurf SolidWorks	Поверхнева
4.	Твердотільне моделювання	Solid (тверде тіло)	Alias ST, AutoCAD CATIA, IsemSurf SolidWorks	Твердотільна
5.	Звичайно-елементне моделювання	Вузол, кінцевий елемент, сітка (point, lines, mesh)	Ansys, Rhino + Kangaroo	Звичайно-елементна
6.	Генеративне моделювання	Компоненти, зв'язки між компонентами	Rhino + Grasshopper	Генеративна

З появою умовно-безкоштовних 3D-сканерів, недорогих 3D-принтерів реалізація наведених нижче принципів стала можливою не лише для дорогих дизайн-студій, але й для приватних

дизайнерів, студентів у будь-яких умовах (удом, в університеті, в офісі тощо).

Освоєння і розуміння розроблених нижче принципів електронного тривимірного моделювання дозволяє грамотно вибирати раціональний спосіб моделювання в конкретній проектній ситуації, шукати нові способи втілення ідей, розвивати нове мислення та інноваційний підхід до моделювання як засобу проектування.

У практиці дизайн-проекування види моделювання використовують у синтезі, формуючи певний принцип для створення форми об'єкту. В результаті аналізу застосування видів моделювання сформульовані і розроблені чотири принципи 3D-моделювання: традиційний, інверсійний, генеративний, інтерактивний.

Традиційний принцип включає 4 етапи (рис. 4.1): творче (Sketch modeling), або полігональне, моделювання ---> поверхневе моделювання класу «А»/«В»/«С» ---> твердотільне моделювання - --> прототипування (Prototyping).

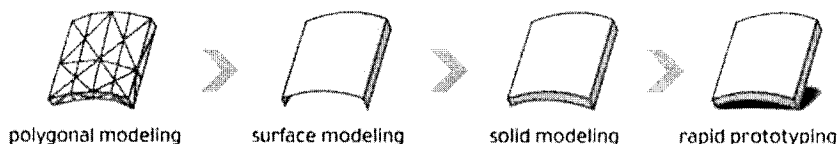


Рис. 4.1. Алгоритм традиційного принципу

Знання цього принципу дозволяє дизайнерові реалізовувати концепції на комп'ютері в тривимірному просторі, вивчати формоутворення і просто виводити об'єкт на установки швидкого прототипування. Цей поширений спосіб дає змогу в короткі терміни створювати різноманітні форми моделей за кресленнями, електронними і рукотворними ескізами. Добре підходить для моделювання концепт-артів і концептів автомобілів, концепцій і підсумкових форм промислових виробів з простої, середньої форми й форми з геометрією підвищеної складності.

Етап творчого моделювання (полігонального або рукотворного) полягає у створенні графічної двовимірної (рукотворні нариси, креслення, перерізи або ескізи) або тривимірної (ескізна електронна полігональна модель) інформації про об'єкт. Графічна інформація слугує основою для подальшого поверхневого моделювання. Якісна поверхнева модель слугує основою для подальшого опрацювання твердотільної моделі. Твердотільне моделювання відбувається на основі утвореної поверхневої моделі: створюється товщина матеріалу, додаються конструктивні й технологічні елементи. Для розрахунку в САМ- і САЕ-системах можна використати і твердотільну, і поверхневу модель, залежно від виду розрахунку й вимог для конкретного програмного забезпечення. Отриману твердотільну модель можна відправляти в друк, наприклад, на 3D-принтері, верстаті з ЧПУ тощо. В протилежній послідовності, але схожі за типом етапи лежать в основі інверсійного принципу моделювання.

Вимоги до поверхневого моделювання постійно зростають одночасно із здешевленням технологій швидкого прототипування, застосуванням системного дизайну (де одна модель одночасно йде на створення реклами, виставки, на виробництво), збільшенням продажів продукції через інтернет (де виставляють ще не випущені об'єкти, а фотореалістичні 3D-моделі). У процесі дизайн-проектування необхідно прагнути до зниження терміну проектування, зменшення кількості матеріальних ресурсів (комп'ютерний аналіз на міцність, аеродинаміку тощо), щоб досягти важливої мети – зниження вартості кінцевого виробу. Ці задачі сьогодні вирішують за допомогою високоякісних поверхневих моделей.

Поверхні класу «А» нині найбільш затребувані в процесі моделювання об'єктів дизайну. Їх використовують при наскрізному дизайн-проектуванні: у створенні моделі й виготовленні її методами швидкого прототипування; у створенні високореалістичної візуалізації, відеоролика і презентації; у нюансному опрацюванні деталей і подальшій візуалізації.

Особливе місце займає дизайн транспортних засобів, де кузов автомобіля неодмінно створюють за допомогою поверхонь класу «А», щоб досягти високої якості відблисків і світлотіні. Нині відсутні сформульовані вимоги і наукове обґрунтування моделювання поверхонь класу «А» (поверхонь різної якості).

У ході дослідження не було виявлено єдиного терміну поверхні класу «А», також як і критеріїв оцінки, принципів побудови поверхонь, розділення на будь-які класи. На рис. 4.2 представлений аналіз і диференціація поліскладових поверхонь за візуальною якістю і наведено три класи поверхонь «А», «В» і «С».

Класи характеризовані кількісними показниками: наявністю або відсутністю певних типів сполучень (рис. 4.3): G0 (ребро), G1 (скруглення, залежність за тангенсом, першою похідною), G2 (згладжування, залежність за кривизною, другою похідною); цілісністю поверхні (відсутність неумисних розривів) і якісним показником (матеріалом – глясовий/матовий).

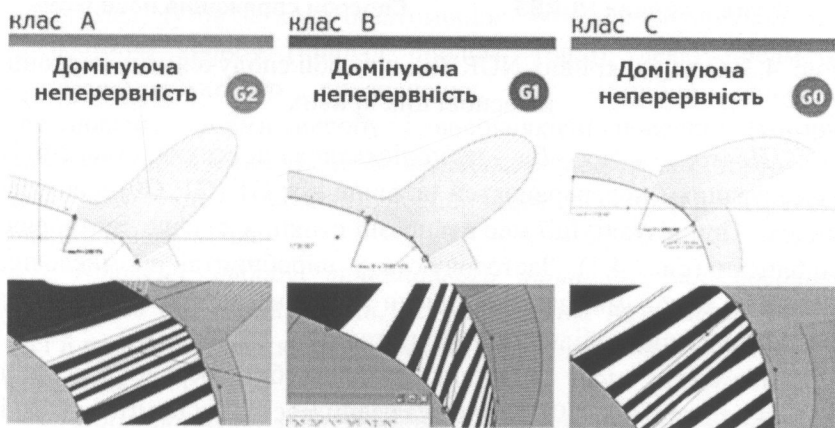


Рис. 4.2. Класи поліскладових поверхонь

Поверхня класу «А» – це поліскладова поверхня, створена із застосуванням неперервностей високого порядку G2, G3 у місцях плавного переходу і G0 для моделювання ребер. При візуалізації має невиразні стики і плавні цілісні відблиски на усій своїй

поверхні (рис. 4.1, 4.2). Застосовують для моделювання об'єктів із глясовими видовими поверхнями, об'єктів із складної оболонкової форми, для виробів преміум-сегменту.

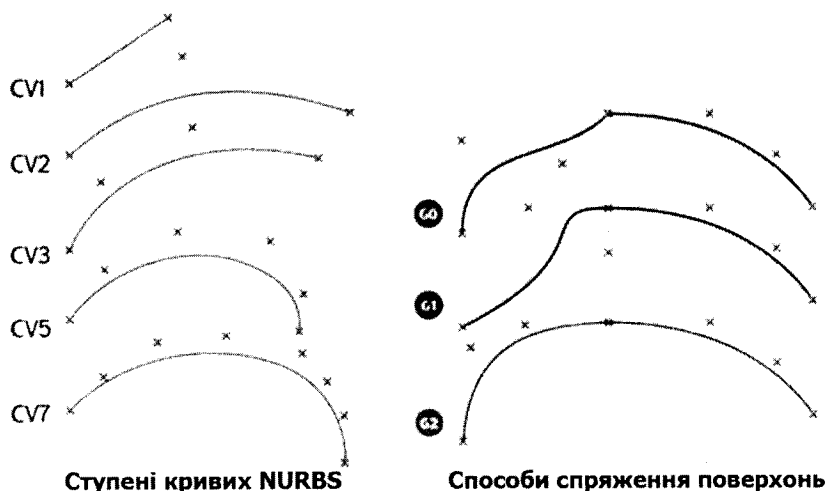


Рис. 4.3. Ступені кривих NURBS і способи сполучення поверхонь на основі цих кривих

Поверхня класу «В» – це поліскладова поверхня, створена із застосуванням неперервностей не вище ніж $G1$ ($G1$, $G0$) для усієї моделі. При візуалізації має невизначні стики, але дещо спотворює відблиски (рис. 4.1). Застосовують у виробництві промислових виробів з матовими, напівматовими поверхнями будь-якого типу: пілососи, фени, мобільні телефони тощо.

Поверхня класу «С» (використання безперервності в усій моделі не вище ніж $G0$). При візуалізації має трохи помітні стики і ламані відблиски. Використовують у найменш значущих місцях моделі і практично завжди при проектуванні різних деталей, таких як двигун, коробка передач тощо. Основне застосування – в моделюванні деталей, де дизайн не має великого значення. Використовують також у зв'язі з класами «В» і «А» для створення характерної, агресивної форми об'єкту. Використання

виключно поверхні класу «С» призводить до технічного моделювання.

У складній глясовій видовій поверхні, наприклад, кузова легкового автомобіля, трапляються усі види безперервностей G0, G1, G2. Застосування кожного з них залежить від поставлених завдань перед дизайнером і того, як буде розбита складна поверхня на прості. Завдання дизайнера при моделюванні складної поверхні в класі «А» – дробити модель на прості поверхні і домагатися візуального ефекту цілісної оболонки, тобто коли відблиск переходить від однієї частини поліскладової поверхні до іншої гладко, змінюючи свій напрям і характер відповідно до художнього завдання, а не через проблеми моделювання.

Доцільними об'єктами моделювання поверхонь класу «А» є об'єкти з видовими площинами із закритою оболонковою об'ємно-просторовою структурою і складною увігнуто-опуклою формою. Наприклад, кузов легкового автомобіля, літака, корпус складного за формою виробу (прилад, шолом, тощо), деякі предмети культурно-побутового призначення, де потрібне нюансне опрацювання форми виробу і високоякісні поверхні (товари сегменту «преміум»). В інших випадках моделювання поверхонь класу «А» буде економічно недоцільним у зв'язку з витратою значної кількості часу.

Критерії вибору традиційного принципу моделювання: оболонкова структура форми, не фрактальна, не вимагає змін у часі й просторі; початковими даними для моделювання є скетчі та креслення.

Обґрунтування вибору моделювання поверхонь класу «А»: за ТЗ поставлене нюансне опрацювання форми об'єкту, оскільки криволінійні елементи, стики і фаски в цьому об'єкті є носіями смислового і художнього навантаження, а також, за ТЗ, потрібна фотореалістична візуалізація (рис. 4.4). Виділивши дві вимоги до моделі, можна зробити висновок про доцільність моделювання в поверхнях класу «А».

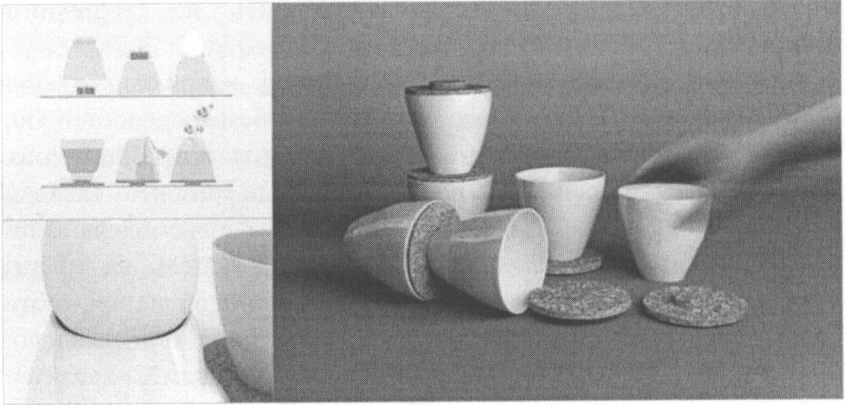


Рис. 4.4. Чайний набір Hills & Hollows [16]

Інверсійний (зворотний) принцип (рис. 4.5): традиційне макетування ---> об'ємне сканування ---> поверхневе моделювання класу «А»/«В» ---> твердотільне моделювання ---> прототипування (Prototyping).

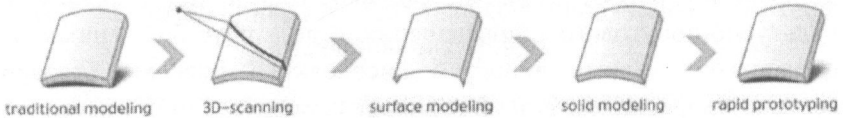


Рис. 4.5. Алгоритм інверсійного принципу

Інверсійний принцип моделювання за етапами має подібності з традиційним, проте для створення поверхневої моделі використовують дані, отримані скануванням рукотворного макету або прототипу виробу на 3D-сканері. Цей принцип дедалі частіше застосовують студенти і невеликі дизайн-студії через можливість зібрати недорогого 3D-сканер у домашніх умовах, використовуючи умовно-безкоштовне програмне забезпечення David [17].

Грунтуючись на даних, отриманих за допомогою об'ємного сканування, з'являється можливість моделювати форму об'єкту максимально точно, можна оперувати даними про кріпильні елементи. Формоутворення базоване на результатах сканування,

тобто початковими даними є поле точок або полігональна модель. Підходить для моделювання об'єктів, що наближаються до кінцевої стадії виробництва, для рестайлінгу існуючої форми об'єкту. Застосовують для створення об'єктів з частково уніфікованими елементами. Цей принцип більш трудомісткий, порівняно з традиційним, бо вимогами є створити макет або мати наявності готовий прототип, витратити час на сканування, проте досягається максимальна наближеність параметрів об'єкту до реального виробу або макету.

В інверсійному принципі моделювання найважливішу роль має етап поверхневого моделювання.

Критерії вибору інверсійного принципу моделювання: за ТЗ початковими даними для проектування є пластиліновий макет, форма нефрактальна, не вимагає змін у часі й просторі, але складна закрита оболонкова.

Обґрунтування вибору моделювання поверхонь класу «А»: складна оболонкова форма об'єкту, з видовими поверхнями, матеріал високоглянсовий, потрібне управління відблисками та подальша реалістична візуалізація.

Цей принцип був апробований на проекті легкового автомобіля Lancia Delta (рис. 4.6). Результатом пошукового макетування був пластиліновий макет (масштаб 1:100). На першому етапі збирали 3D-сканер із безкоштовним ПО David, робили сканування, далі – моделювання поверхонь класу «А».

Генеративний принцип складається з трьох етапів (рис. 4.7): інформаційне моделювання ---> геометричне моделювання --> прототипування (Prototyping).

Великої популярності серед архітекторів і дизайнерів набуває генеративне моделювання, яке сьогодні широко застосовують у параметричній і генеративній архітектурі, виставковому дизайні, інтерактивному дизайні. Актуальність застосування цього принципу виникає у разі потреби змінювати параметри предметної системи у просторі й часі або за наявності системи об'єктів із складною багаточастковою структурою, що не

повторюється. Застосування інтерактивного принципу в промисловому дизайні сьогодні є експериментальним. Продукт: форма зі складною структурою, що членується на сектори, візерунки, фрактали та ін.

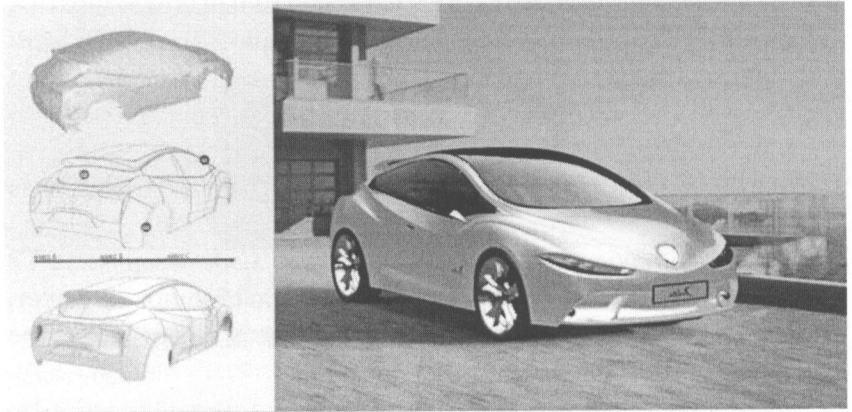


Рис. 4.6. Легковий автомобіль «Lancia»

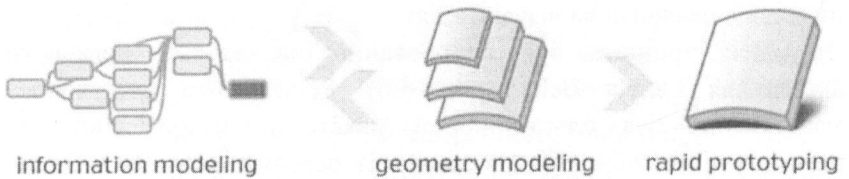


Рис. 4.7. Алгоритм генеративного принципу

Філософія генеративної архітектури і дизайну (параметризм) [18] ґрунтується на вивченні і створенні алгоритмів предметних систем, застосуванні фрактальних принципів геометрії, візуалізації фізичних, біологічних, математичних явищ. Так, наприклад, мінімальні поверхні, ще в недавньому минулому виведені у формі формул математиками, за допомогою програм з генеративним методом моделювання стали доступні дизайнерам. Об'єкти, засновані на мінімальних поверхнях (також мембранах і

поверхнях Гауді), максимально економлять матеріал, є жорсткими і в естетичному аспекті виразними [19].

Генеративний принцип ґрунтується на генеративному моделюванні, яке поєднує інформаційне і геометричне моделювання. На етапі інформаційного моделювання створюється смислова концепція об'єкту, відбита в інфографічних формах. Розроблену концепцію реалізують за допомогою генеративного методу моделювання (ПО Rhino+Grasshopper).

Інформаційна модель об'єкту дозволяє згодом вільно редагувати об'єкт на різних етапах дизайн-проекткування, робити винесення певних параметрів моделі в ряд тих, що змінюються при різних умовах експлуатації, довкілля тощо. Також дозволяє створювати системи об'єктів, засновані на складних принципах, що не повторюються: модульний, формоутворення (фрактальна геометрія, математичні послідовності, фізичні явища – мембрани). Розроблену інформаційну модель на третьому етапі можна згенерувати в лінійну, поверхневу і твердотільну модель, для подальшого швидкого прототипування (рис. 4.7). Сучасні програми генеративного моделювання дозволяють створювати схеми для розгортки об'ємних форм на площину, виведення на площину складних перерізів форми, нумерацію елементів. Ці можливості полегшують процес створення реального об'єкту на основі генеративної моделі.

З'ясовано, що адаптація генеративної моделі до різних способів виробництва або вимог до моделі для 3D-друку проходить швидше, ефективніше, оскільки багато параметрів (наприклад, товщина матеріалу, кількість секцій) можна змінювати в реальному часі. Це дозволяє скоротити терміни моделювання складних, багатоскладних, структурних об'єктів, а також редагувати будь-які параметри об'єкту на кінцевій стадії моделювання, коли геометрична модель уже змодельована. Ця особливість дає змогу здійснювати додатковий пошук форми в об'ємі, оптимізувати параметри системи під обстановку

середовища, створювати одночасно лінійки об'єктів зі схожими рисами, але різними пропорціями чи деякими параметрами.

Сьогодні промислові дизайнери рідко вивчають пакети генеративного моделювання, приділяючи увагу двом першим принципам.

Критерії вибору генеративного принципу моделювання: складна багаточасткова структура, можливість редагування об'єкту після інформаційного моделювання.

Концепт садово-паркової лавки (рис. 4.8, 4.9) був розроблений за генеративним принципом моделювання. 3D-модель має змінюваний комплекс параметрів для пристосування об'єкту проекту до довкілля і способів експлуатації. Змінювані параметри: довжина лавки, кількість сидячих місць, шлях для розміщення в просторі – прямою, дугою, хвилею, товщина фанери або дерева (залежно від вибраного виробництва), кількість сегментів або перерізи, що лежать в основі форми виробу.

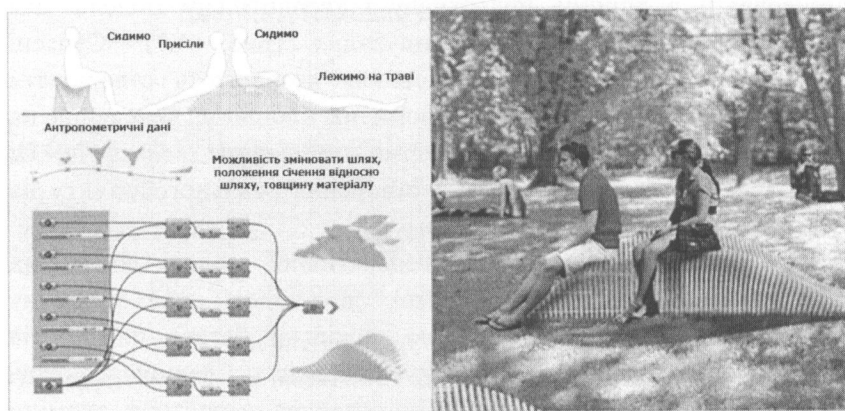


Рис. 4.8. Концепт садово-паркової лавки [16]

Усі дані про ці параметри зберігає генеративна модель і в реальному часі актуально змінює геометричну модель на веб-сайті дизайнера чи виробника, створюючи реальну взаємодію між споживачем і дизайнером.

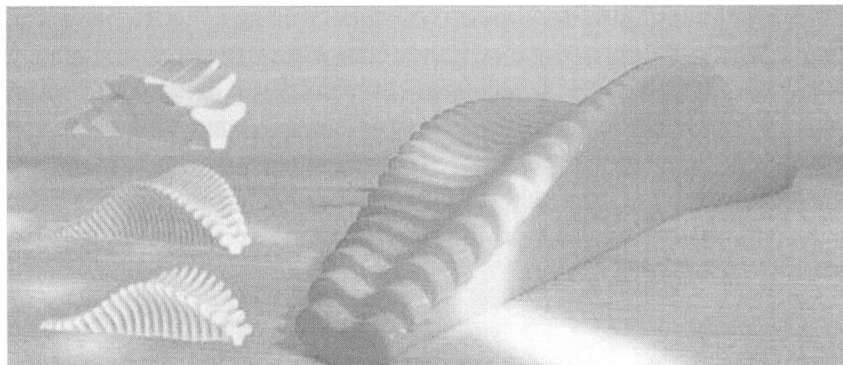


Рис. 4.9. Друк прототипів

Приклад майбутнього способу споживання: споживач заходить в електронний магазин для замовлення садової лавки. Будучи обмеженим у площі, він хоче володіти неповторним об'єктом на своїй ділянці. Він думає про свій дім, який схожий, наприклад, на «раковину морської тварини». Він знаходить вподобану йому за формою лавку, проте його не влаштовує заявлена виробником довжина, натискає кнопку «Змінити параметри» і вводить параметри: 3 особи, довжина 1,5 м, колір. Натискає «сплатити» і «зробити». Після цього індивідуальна модель поступає на FabLab і робиться машинами-роботами. Деякі процеси кінцевого складання і подібне залишаються за покупцем, або це за нього роблять збирачі. Розробка ринку таких виробів дозволить зробити революцію у способах споживання виробів.

Модель у цьому випадку є системою об'єктів, подібною до пристосовуваного трансформера, здатного міняти свій вигляд залежно від потреб споживача, ландшафту. Дизайнер, проектуючи одну модель, може отримувати на виході множини варіантів виробів. Таким чином, економляться засоби на розробку і час.

Такими можуть бути майбутні м'які й корпусні меблі для будинку, світильники, меблі для відкритих місць (дач, парків), малі архітектурні форми (альтанки, павільйони) і багато чого іншого.

Відповідно, нова структура проектування і моделювання також може створити нову структуру виробництва і споживання.

Інтерактивний принцип складається з трьох взаємопроникних етапів (рис. 4.10): генеративне моделювання (Generative modeling) <----> декодування інформаційної моделі в плагіні «Firefly» (Decoding) <----> відкрита платформа для прототипування «Arduino» / «Freduino» (Interactive prototyping).



Рис. 4.10. Алгоритм інтерактивного принципу

Інтерактивний принцип ґрунтується на інтеграції генеративної моделі з відкритою платформою для прототипування, за допомогою декодування інформаційної моделі (плагін «Firefly»). Подібні платформи дозволяють створювати електронні системи, що включають сенсори (датчик освітленості, положення у просторі тощо) для взаємодії з довкіллям, сервоприводи, мотори і багато чого іншого [20]. Цей спосіб моделювання дозволяє конструкторам створювати генеративні моделі, здатні взаємодіяти з довкіллям, з людиною за допомогою сенсорів. Можливе створення кінетичних прототипів, які змінюються в реальному часі зі зміною генеративної моделі на комп'ютері. Нині для створення прототипу конструкторам необхідно мати базові знання роботи з електричними схемами для підключення датчиків на мікропроцесор. Проте ця проблема вирішується наявністю в мережі великої кількості покрокових уроків і досить простим принципом застосування, розробленим компанією Arduino.

Експерименти конструкторів з подібними системами можуть створити абсолютно нові об'єкти з новим набором функцій (яскравий приклад: пральна машина, що сигналізує у

«Твіттер» господаря про закінчення прання), вплив яких конструктори можуть вивчати за допомогою цього принципу.

Застосування: створення взаємозв'язку об'єкту або 3D-моделі з доквіллям, вивчення реакції людей на об'єкти, їх форму, імітація реакції об'єкту на людей, імітація спілкування.

Прикладами інтерактивного принципу моделювання є проекти «Vertical Lake» австралійської студії «Urban Art Projects» [21], «Kinetic Pavilion» дизайнерів Yannick Bontinckx і Elise Vanden Elsacker [22] та ін.

Критерії вибору інтерактивного принципу моделювання: об'єкт проектування має сценарії освітлення, інтерактивний щодо середовища і людини. За ТЗ потрібно провести дослідження взаємодії об'єкт-людина-рослина, забезпечити тестування цієї взаємодії.

Апробація цього принципу моделювання відбувалася на основі створення проекту системи догляду за рослинами «TWIG» (рис. 4.11, 4.12).

Отже, можна зробити висновок, що сьогодні розроблені чотири принципи тривимірного моделювання в промисловому дизайні: традиційний, інверсійний, генеративний, інтерактивний.

Генеративний та інтерактивний принципи моделювання мають менше етапів, термінів моделювання і дозволяють моделювати максимально складні форми об'єкту, на відміну від традиційного та інверсійного принципів. При генеративному принципі моделювання можна оперувати окремо геометрією та інформацією про геометрію, остання дозволяє редагувати параметри форми об'єкту на будь-якому тимчасовому етапі моделювання.

Класифікують та диференціюють поліскладові поверхні за візуальною якістю; є три класи поверхонь: «А», «В» і «С». Проте моделювання класу «А» можливе сьогодні тільки для двох перших принципів.

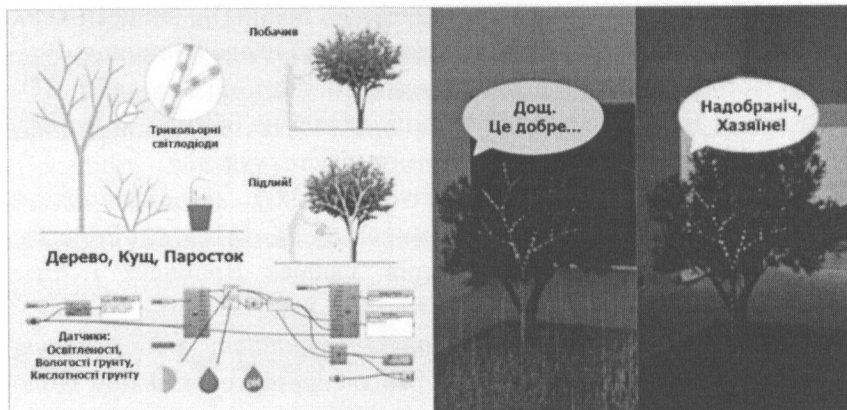


Рис. 4.11. Система догляду за рослинами «iTWIG» [16]

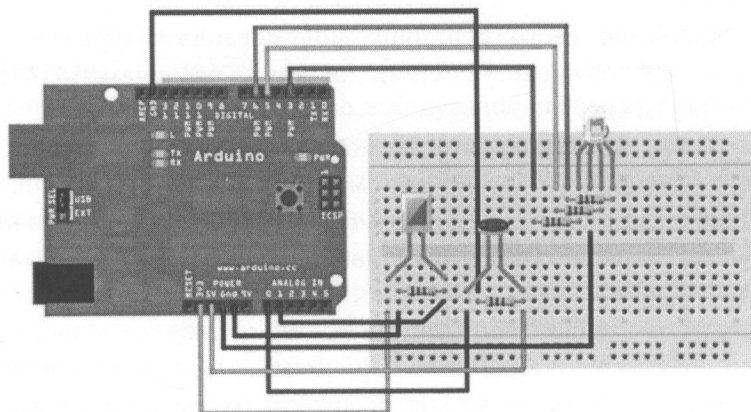


Рис. 4.12. Прототип

У перших двох принципах базою (осною для моделювання) є геометричне моделювання, у других двох – інформаційне моделювання. Це означає, що, приміром, у генеративному принципі значну частину часу конструктор працює не з кривими і поверхнями, як вони є, а з їх системами компонентів, що зберігають інформацію про ту чи іншу дію (вигини, переміщення, положення в просторі), і наборами вхідних та вихідних даних (параметрів). Більше того, відмінності у

принципах моделювання мають системний характер і зачіпають зміни у багатьох процесах проектування (табл. 4.3).

Табл. 4.3. Схема порівняння принципів моделювання

Порівняння принципів	Традиційний інверсійний	Інтерактивний генеративний
Збір інформації, пошук проблеми	Статистика роздрібних, оптових продажів	Статистика введених параметрів об'єкта
Сфери використання, об'єкти	Конструкції машин, об'єкти предметного світу	Конструкції машин, агрегати, деталі, шестерні, вали, корпуси
Формоутворення	Від найпростіших до найскладніших, оболонкові й каркасні	Багатоструктурні, частоповторювані, фрактальні структури
Моделювання	Геометричне	Інформаційне
Взаємодія зі споживачем	Візуальне повідомлення	Спілкування
Процес виробництва	Традиційні технології	SolidWorks, Inventor, Компас
Процес продажу	Традиційно	Гнучко, з можливістю модифікації форми
Процес споживання	Використання	Взаємодія користувач-проектант

Контрольні запитання

1. Які існують підходи до створення 3D-об'єктів?
2. У чому суть методу рисування об'єктів за допомогою примітивів?

3. Які є етапи процесу створення об'єктів на основі примітивів?
4. Як створюються складні об'єкти нерегулярної форми?
5. На які види поділяють 3D-моделювання за наявністю історії побудови об'єкту?
6. На які види поділяють 3D-моделювання за елементами побудови?
7. Які є принципи 3D-моделювання?
8. У чому суть традиційного принципу 3D-моделювання?
9. Яких класів бувають поверхневі моделі?
10. У чому суть інверсійного принципу 3D-моделювання?
11. Які критерії вибору інверсійного принципу моделювання?
12. У чому суть генеративного принципу 3D-моделювання?
13. Які критерії вибору генеративного принципу моделювання?
14. У чому суть інтерактивного принципу 3D-моделювання?
15. Які критерії вибору інтерактивного принципу моделювання?

5. ОСОБЛИВОСТІ ОСВОЄННЯ СИСТЕМ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ

Сучасний стан обчислювальної техніки і можливості фахівців накладають певний відбиток на тип операцій, здійснюваних при розв'язанні завдань проектування:

- кожен елементарний акт змін торкається не об'єкту в цілому, а лише деякої його частини;
- акти таких змін здійснюються послідовно – на кожному наступному кроці використовується певна інформація, що характеризує поточний стан процесу проектування.

Розвинені CAD-системи розширили уявлення конструктора про процеси проектування об'єкту і дозволили створювати складальні 3D-моделі, що містять декілька сотень деталей. Складальні моделі дозволили моделювати реальні механізми, що складаються з великої множини деталей, проводити аналіз механізмів у дії.

Слабка формалізація процесу побудови моделей спричиняє недоліки CAD-систем, а саме [23]:

- відсутність наочності процесу завдання об'єкту;
- відсутність зручної параметризації створеного раніше об'єкту;
- втрату інформації про сам об'єкт та його зв'язки з іншими об'єктами;
- постійні зміни умов середовища;
- постійні зміни після виправлення помилок.

Слід зазначити, що постійно відбувається усунення недоробок цих систем в цілому, які є, як зазначено вище, результатом слабкої формалізації вирішуваних проблем. Низка психологічних проблем при освоєнні CAD-систем викликана цими недоліками.

При переході від проектування на папері до електронного проектування у двовимірному середовищі на основі AutoCAD, Компас та інших систем конструктор має значно менше проблем,

ніж при переході на конструювання у 3D-середовищі. Як показує досвід використання сучасних систем – AutoCAD, Компас, Cimatron, Inventor, SolidWorks (SW), Solid Edge, Pro Engineer, у більшості випадків добре працюють у 2D-кресленні перші три – хоча ці програми дозволяють проводити моделювання в 3D-середовищі, але через низку недоліків редагування конструкторської моделі їх використовують рідше [24]. Хоча деякі спеціальні роботи у 3D-середовищі зручніше моделювати у спеціалізованих додатках Auto desk. Конструкторські програми останніх версій систем AutoCAD, Компас, Cimatron, Inventor, SolidWorks, Solid Edge, Pro Engineer мають 3D-модуль.

Але для завдань проектування з різних предметних областей використовують різні системи. У багатьох роботах, присвячених вирішенню завдань такого типу, можна, мабуть, виділити деякі основні напрями.

Системи геометричного 3D-моделювання умовно класифікують так:

- для проектування складних промислових виробів (наприклад, літаків, вертольотів, автомобілів тощо) застосовують Unigraphics та інші САПР «важкого» рівня;
- для проведення архітектурних робіт застосовують системи типу ArhiCAD;
- для геометричного моделювання машинобудівних виробів середньої складності, наприклад, металургійного устаткування, застосовують SolidWorks, Inventor Solid Edge, Pro Engineer.

Існує думка, що конструктор, користувач Windows, практично нічого не знаючи про програму SolidWorks, може відразу почати працювати в ній і отримувати готові креслення проєктованих деталей і виробів набагато швидше, ніж в AutoCAD [24]. Проте досвід показує, що переважна більшість користувачів системи вважають, що для реального проєктування складних вузлів і машин у 3D-середовищі такі системи, як SW, малопридатні, зважаючи на надмірну складність моделювання і, відповідно, велику кількість витраченого часу на проєктування й

випуск робочої конструкторської документації. Реальне моделювання використовують для створення моделей деталей і невеликих зборок складних геометричних форм, які у 2D-середовищі здійснюються досить складно.

Насправді, за цими твердженнями стоїть побоювання перед певними особливостями 3D-моделювання. Ці особливості зрозумілі досвідченим користувачам SW. На відміну від двовимірного, тривимірне моделювання створює безліч можливостей, правил робіт і, відповідно, безліч помилок, про які система повідомляє користувача червоними і жовтими виділеннями елементів у дереві побудови зборок/деталей і/або відмічас певним кольором невірно побудовані елементи на екрані монітора.

При роботі з комп'ютерною програмою користувач працює в інтерактивному режимі, і це є серйозним психологічним бар'єром для конструкторів, що реалізують раніше на папері або при 2D-моделюванні практично будь-які свої припущення, які часом розходяться з реальністю. Як наслідок, ці рішення часто не можуть бути повністю реалізовані в процесі виготовлення, що може привести до неузгодженості між виробниками, замовниками і проектувальниками, а це, у свою чергу, призводить до витрат ресурсів. Отже, 3D-користувач постійно відчуває присутність певного «контролера» в його роботі. Крім того, у разі «ручного» проектування на папері або 2D-моделювання на комп'ютері, при контролі робіт керівником групи, користувач завжди має можливість отримати консультацію керівника робіт і навести свою аргументацію.

Інтерактивність при електронному проектуванні викликає побоювання через кількість помилок моделювання, що з'являються, і через уявну неможливість їх виправити.

Існує загальна рекомендація для конструкторів – періодично зберігати файл у процесі моделювання, щоб у разі виникнення помилки закрити файл без збереження і почати наново

моделювати «проблемну» ділянку. Цей прийом застосовний, але він трудомісткий – збільшує час роботи із усунення помилок.

До цього додається й побоювання перед можливими змінами у процесі 3D-моделювання великих складок, вузлів і машин – перед можливими помилками, які виявляє система. У більшості випадків зміни в конструкції негайно відбиваються на взаємозв'язках елементів – у дереві складання відображаються червоним або жовтим кольором елементи і/або взаємозв'язки, які помилкові або не можуть бути накладені. Користувач одразу ж розгублюється – не знаючи, як вийти з цієї ситуації, як виправити її. Тому він інтуїтивно уникає моделювати великі зборки, оскільки у разі внесення змін йому доводиться наново моделювати раніше створений файл складання, починаючи зі змін у базовій деталі, і у процесі вносити необхідні зміни в усі похідні деталі, тобто практично повністю доводиться знову починати складання. Саме цей аргумент наводять противники комплексного впровадження 3D-середовищ у конструкторських відділах – стверджуючи, що 3D-моделювання призводить до зростання тимчасових витрат при розробці робочої конструкторської документації. А такі позитивні моменти моделювання в SW, як безпомилковість робочої конструкторської документації, зважаючи на постійний взаємозв'язок будь-якого креслення складання і деталі на будь-якому рівні з базовою моделлю, повна перевірка складання на сумісність і будь-якої деталі на безпомилковість геометрії, можливість виготовлення на верстатах з ЧПУ без побудови коду програми обробки та інші позитивні моменти, відходять на другий план.

У висококваліфікованих конструкторів, що добре уявляють собі процес реального виготовлення деталей і вузлів машин, перехід від 2D-моделювання до 3D-моделювання не викликає значних труднощів.

Переваги, які спричиняє перехід до 3D-моделювання, включаючи і створення повного комплексу робочої конструкторської документації машин різної складності в одному

програмному середовищі, для досвідчених фахівців не потребують додаткових підтверджень. Незважаючи на це, конструктор, незалежно від кваліфікації, стикається з помилками, які неминучі – для їх виправлення/недопущення існує методика роботи з помилками. Дати опис усіх помилок, що виникають у користувачів при 3D-моделюванні в SW, є неможливим через велике різноманіття завдань і різну кваліфікацію користувачів. Розглянемо особливості освоєння проектування складних машин і деталей складних геометричних форм у тривимірному середовищі та методи виправлення/недопущення помилок проектування. Слід зазначити, що інтерфейс програми SW і принципи її роботи є доброзичливими до користувача, налаштованого навчатися реальному моделюванню і створенню креслень [25].

Процес конструювання машини, її вузла є послідовністю таких трьох етапів:

1. Створення на основі попередньої інформації і попередніх ескізів майбутньої конструкції, тобто випробувальних моделей базових деталей і вузлів, що визначають усю подальшу конструкцію, або найбільш проблемних вузлів конструкції, для ухвалення раціональних конструкторських рішень. Інженерний аналіз моделей включає визначення схеми закріплення і навантажень на ці вузли, вантаження їх у відповідних додатках SW-COSMOS, Simulation, Motion та ін. [26]. Ці моделі мають бути максимально спрощені, бажано вузли складок об'єднати або виконати у вигляді деталей – нехай і складної геометричної форми. Зокрема, при випробуванні конструкцій, що представляють симетричні вироби (наприклад, тіла обертання), треба прагнути до того, щоб випробувальна модель була половиною або навіть чвертю реальної конструкції з необхідним коригуванням схеми закріплення і завантаження. Підсумком етапу є те, що базові елементи майбутньої конструкції випробувані в додатках SW, погоджені і конструктивно затверджені.

2. Створення конструкторської моделі. На цьому етапі відбувається облік усіх вимог стандартів, нормалей тощо.

Здійснюється остаточне узгодження конструкції з суміжними відділами (ВГТ, ВГС, ливарним відділом тощо) і/або організацією-виробником, а також, якщо можливо, з кінцевим замовником.

3. Створення робочої конструкторської документації. Задача робочої конструкторської документації у виробництво, кінцевому замовникові. У разі об'єднання проектування і виробництва в єдиний цикл, цей етап може бути перетворений в передачу моделі у вигляді даних для верстатів з ЧПУ (CAD Works, Gibbs CAM, cnc Cad), деталей штампів (Logo press), деталей прес-форм (Mold Works) та інших спеціалізованих програм.

У літературі з SW вказано, що геометричні елементи ескізів до повного визначення мають бути прив'язані до вихідних точок – у цьому випадку вони позначаються на екрані чорним кольором, а невизначені елементи – синім [27]. Іноді при побудові ескізів складних геометричних форм ніяк не вдається зробити усі елементи чорними – тоді допомагає функція системи «Повністю визначити ескіз». У цьому випадку SW іноді ставить додаткові зв'язки, розміри – вони допомагають користувачеві зрозуміти, як краще визначити взаємозв'язки, щоб повністю визначити ескіз, або автоматично накладають недостатній взаємозв'язок. У дереві побудови повністю ескіз відображається спеціальним способом. При створенні ескізу необхідно ретельно продумувати – як прив'язати елемент ескізу або його базову площину до вихідної точки або до вихідних площин. Цей простий прийом дозволяє надалі, при створенні зборки, значно полегшити процес накладення взаємозв'язків [25].

Незалежно від типу ситуації система вирішує задачу автоматичним додавання зв'язків. Такі зв'язки можуть бути двох видів:

- прив'язка геометричних примітивів один до одного;
- зв'язки, фіксувальні положення примітивів, орієнтація і розміри.

У деяких випадках SW не може автоматично накласти необхідний взаємозв'язок. Наприклад, торкання кругової кромки і радіальної поверхні. В цьому випадку можна зробити так. Визначити інтерференцію компонентів, знайти положення, при якому поверхні торкаються або практично торкаються, і зафіксувати рухливу деталь доступним взаємозв'язком – зазвичай, відстанню від базової площини до найближчої певної поверхні деталі у відповідь або до якоїсь з базових площин складання.

Іншим прийомом побудови зборок і деталей складних геометричних форм є введення певних залежностей у початковий ескіз, від побудови якого починається моделювання [27]. Цей принцип не завжди застосовний у проектуванні, оскільки не кожна конструкція заснована на початковому положенні, яке визначає подальші побудови. Але навіть якщо початковий ескіз не застосовують, потрібно при створенні деталей і складок ретельно проаналізувати його на початку – при найперших геометричних побудовах визначити можливі зміни в деталях і їх реалізацію в моделі без геометричних помилок і взаємозв'язків елементів. Рекомендовано фіксувати на папері пропозиції керівника, колег, замовника – можливо, у вигляді елементарного ескізу з коментарями. А потім треба продумати, як треба внести ці зміни в конструкцію з мінімумом помилок у геометрії/перебудові для отримання готового результату.

Ще один прийом роботи, який часто недооцінюють користувачі – вміння ефективно користуватися інструментом конфігурацій SW. Інструмент конфігурацій дозволяє зберегти зафіксовані елементи конструкції, наприклад, існуючі елементи або обстановку, і ввести в неї нові об'єкти, погасивши/приховавши низку непотрібних елементів для реалізації описаних зауважень/пропозицій. Це дозволяє одним файлом у декількох конфігураціях зберегти і початковий варіант, і змінений за пропозицією/вимогою, витративши на реконструкцію мінімум зусиль і часу.

Повністю уникнути помилок, виявлених системою, не вдається навіть досвідченим користувачам. Причина у високій складності й слабкій формалізації процесів проектування. Помилки, що виникають, бувають двох видів:

1. SW не може здійснити перебудову без помилок і повідомляє про це конструктора виділенням червоним і жовтим кольором елементів у дереві з виведенням на екран вікна попередження.

2. SW перебудовує елементи без повідомлень про помилки в дереві побудови, порушуючи при цьому природну геометрію взаємодії елементів – наприклад, отвори під болтові з'єднання змістилися при реконструкції.

При помилках 1-го виду SW підтверджує правильність геометрії моделі і взаємозв'язку елементів, але більшість елементів у дереві відображаються з помилками через причину локальності змін. Причому помилковими, зазвичай, є один або два взаємозв'язки, але SW висвічує усю множину залежних елементів і зв'язків. Рекомендація в цьому випадку найзагальніша – періодичний огляд моделей після перебудов, пов'язаних із зміною моделі, і відповідний аналіз проміжних моделей з виділенням помилок.

Помилки 2-го виду небезпечніші, оскільки при створенні складних моделей конструктор може пропустити геометричні порушення. Ці помилки стають помітні лише при отриманні робочої конструкторської документації. Рекомендація може бути такою. Перебудовуючи деталь у зборці і, відповідно, усю зборку в цілому, треба заздалегідь подивитися в дереві побудов, з якими деталями вона взаємозв'язана, які накладені обмеження, взаємозв'язки, і заздалегідь оцінити – як ці взаємозв'язки можуть бути порушені при перебудуванні. І, звичайно, краще заздалегідь створити нову конфігурацію складання і в ній здійснювати перебудування, погасивши ті взаємозв'язки, які SW уже не може виконати без помилки.

Якщо такого попереднього аналізу недостатньо, то для усунення помилок можна використати таке правило: погасити максимальну кількість елементів унизу дерева за правилом – чим нижче елемент у дереві, тим більше він схильний до накопиченої згори помилки. Якщо не вдасться знайти «проблемний» елемент унизу дерева, то потрібне послідовне редагування взаємозв'язків «згори» – від першого «проблемного» елемента, який підлягав зміні.

Контрольні запитання

1. Які є типи операцій, здійснюваних при розв'язанні завдань проектування?
2. Які недоліки CAD-систем?
3. Яка умовна класифікація систем геометричного 3D-моделювання?
4. Що є психологічним бар'єром для конструкторів при 3D-моделюванні?
5. Які позитивні моменти моделювання в SW?
6. Які є етапи процесу конструювання машини або її вузла?
7. У чому полягає створення випробувальних моделей базових деталей і вузлів?
8. У чому полягає створення конструкторської моделі?
9. У чому полягає створення робочої конструкторської документації?
10. Для чого SW іноді ставить додаткові зв'язки, розміри?
11. Яких видів бувають додаткові зв'язки?
12. Для чого потрібен інструмент конфігурацій у SW?
13. Які бувають види помилок, що виникають при моделюванні?

6. САПР SOLIDWORKS

SolidWorks – САПР, що дозволяє проектувати інженерні об'єкти у трьох вимірах, функціонує під управлінням системи Microsoft Windows. Через нескладний інтерфейс стала досить популярною, фактично вона є альтернативним рішенням двовимірних програмних забезпечень [28].

Програма була створена в 1993 році й стала конкурентоздатною з такими програмами, як AutoCad, Solid Erge, SDRC 1-DEAS, pro/ENGINEER та ін.

SolidWorks використовують для комерційних та освітніх цілей.

Комерційні версії програми:

- SolidWorks Mechanical;
- SolidWorks Office Professional;
- SolidWorks Office Premium.
- Освітні версії програми:
- SolidWorks Student Design Kit;
- SolidWorks Education Edition;
- SolidWorks Student Edition.

Програмне забезпечення SolidWorks містить інструменти для виконання тривимірного просторового моделювання, інженерних креслень і конструкторських складок, роботи зі зварними несучими конструкціями і листовими металевими продуктами, а також неоднорідними поверхнями різних довільних форм. Програма має можливість імпортування досить великого числа файлів 2D і 3D. З'явилася можливість програмування у Visual Basic і C++, а також передбачена програма аналізу за принципом кінцевих елементів початкового рівня CosmosXpress.

SolidWorks Office Professional – пакет, що включає основний програмний продукт і такі розширення:

- Animator (дозволяє створювати анімаційні моделі в русі);
- Design Checker (перевіряє креслення на предмет відповідності стандартним вимогам);

- eDrawings Professional (дає можливість перевірки і рецензування eDrawings);
- FeatureWorks (дає можливість редагувати імпортовані елементи);
- PDMWorks Workgroup (система PDM);
- PhotoWorks (створює фотореалістичні зображення об'єктів);
- Task Scheduler (дозволяє створювати об'ємний друк, експорт та імпорт різних файлів, а також створювати eDrawings);
- Toolbox (набір кріпильних і сполучних деталей);
- Utilities (дає можливість порівнювати деталі за елементами);
- 3D Instant Website (відображення файлів SolidWorks як у HTML-документації), використання eDrawings для перегляду й аналізу.

Пакет SolidWorks Office Premium – частина SolidWorks Office Professional, має низку додаткових інструментів:

- CosmosWorks Designer (дає можливість аналізу методом кінцевих елементів);
- Cosmos Motion (проводить аналіз рухомих об'єктів);
- Routing (потрібний при розробці проектів труб і трубопровідних маршрутів, а також електрокабелів);
- ScanTo3D (утиліта, призначена для конвертації інформації, отриманої з 3D-сканера);
- TolAnalyst (дозволяє зробити аналіз стану наявних інструментів);
- CircuitWorks (виконує проектування друкованих плат).
- SolidWorks Student Design Kit – це версія SolidWorks Education Edition, яка за задумом виробника обмежена в часі.

У свою чергу, продукт SolidWorks Education Edition – удосконалена версія SolidWorks Education Edition і призначена для навчальних закладів. Програма включає продукт CosmosXpress і містить методичний професійний навчальний курс.

SolidWorks Student Edition – універсальний продукт, створений і призначений для індивідуального користування поза навчальними установами. Це системне забезпечення містить функції програми SolidWorks Education Edition.

Поверхневе моделювання в SolidWorks

Розрізняють як мінімум три технології побудови геометричних моделей: твердотільне, поверхневе і каркасне моделювання. Кожна з цих технологій має свої переваги і недоліки, проте їх спільне використання дозволяє отримати хороший інструмент для вирішення більшості завдань, що трапляються в інженерній практиці.

Типи поверхонь у SolidWorks

Поверхні принципово відрізняються від твердих тіл тим, що мають нульову товщину, але водночас у них багато спільного з твердими тілами – наприклад, схожі способи побудови.

У SolidWorks можна створювати такі типи поверхонь:

- плоска поверхня – виходить заповненням плоского контуру (2D-ескіз або набір замкнутих кромок, що лежать в одній площині);
- поверхня витягу – утворюється в результаті плоскопаралельного витягування замкнутого або розімкненого 2D/3D-ескізу в напрямі, перпендикулярному площині ескізу, або під довільним кутом;
- поверхня обертання – виходить обертанням довільного профілю (2D-ескіз) відносно осі;
- поверхня за траєкторією – створюється рухом 2D/3D-ескізу вздовж кривої за певним законом;
- поверхня за перерізами – аналог поверхні за траєкторією; відрізняється тим, що будується не за одним, а за декількома поперечними перерізами з напрямними кривими;
- гранична поверхня – аналог поверхні за перерізами; відрізняється тим, що будується за декількома довільно зорієнтованими в просторі 3D-кромками інших поверхонь зі

збереженням дотичності до них і з дотриманням безперервності за другою похідною (гладке стикування); при побудові можуть бути використані напямні криві;

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

- ексвідстантна поверхня – виходить зміщенням на певну відстань від існуючих граней або поверхонь;

- поверхня роз'єму – використовується при проектуванні ливарних форм як допоміжна геометрія для розділення матриці й пуансона;

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

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

- імпортована поверхня – виходить імпортуванням із зовнішнього файлу у форматі IGES тощо.

Операції з поверхнями

Усі перелічені вище типи поверхонь є параметричними і можуть бути відредаговані шляхом зміни значень контрольних розмірів або за допомогою спеціальних операцій поверхневого моделювання.

З поверхнями можна виконувати такі операції:

- подовження – дає можливість нарощувати поверхню відносно зовнішніх кромок. Подовження можна виконувати зі збереженням закону побудови початкової поверхні або прямолінійно по дотичній за лініями контуру;

- обрізання – дає можливість відсікати від початкової поверхні її частини за допомогою інших поверхонь, допоміжних площин чи ескізів або виконувати взаємне обрізання поверхонь;

- заповнення – забезпечує встановлення «латочки» на отвір у поверхні з дотриманням дотичності до початкової поверхні за замкнутим контуром;

- нарощування – дозволяє добудувати, подовжити (відновити) зовнішні контури поверхні з дотриманням закону побудови. Функція нарощування особливо корисна для роботи з імпортованими поверхнями;

- зшивання – призначена для об'єднання декількох поверхонь в одну;

- скруглення (сполучення) – забезпечує побудову гладкого сполучення (залисини) між несполученими поверхнями або скруглення постійного/змінного радіусу між поверхнями, що мають загальну кромку; функція також застосовна до твердих тіл;

- переміщення/обертання/копіювання – дозволяє рухати, обертати і копіювати поверхні або тверді тіла;

- видалення – видаляє з моделі поверхню або тверде тіло.

Гібридне моделювання

Поверхнєве моделювання знаходить застосування в найрізноманітніших областях: автомобілебудуванні й аерокосмічній промисловості, кораблебудуванні, проектуванні технологічного оснащення, у сфері виробництва товарів народного споживання тощо. Поверхні відмінно працюють у поєднанні з твердотільними елементами, тому їх можна використати з метою:

- витягування твердотільного елемента або вирізу з граничною умовою «До поверхні» або «На відстані від поверхні»;

- створення твердотільного елемента шляхом надання поверхні товщини;

- заповнення замкнутого об'єму та отримання твердого тіла;

- вибору кромки і вершини поверхні, щоб використати їх як такі, що направляють твердотільний елемент по кривій і траєкторії;

- видалення грані твердого тіла, заміна грані поверхнею тощо.

Як твердотільне, так і поверхнєве моделювання мають свої переваги, проте використання поверхонь дозволяє гнучкіше

підходити до процесу проектування, оскільки поверхні при моделюванні можуть бути самостійно позиційовані в просторі моделі і не вимагають на початковому етапі точної взаємної ув'язки з навколишньою геометрією. Саме ці властивості зробили поверхневе моделювання в першу чергу інструментом дизайнера, що дозволяє швидко й водночас якісно опрацювати різні концепції майбутніх виробів і передавати концепт-моделі конструктору на детальне опрацювання.

Контрольні запитання

1. Коли була створена і для чого потрібна САПР SolidWorks?
2. Які є комерційні версії програми SolidWorks?
3. Які є освітні версії програми SolidWorks?
4. Які розширення включає пакет SolidWorks Office Professional?
5. Які додаткові інструменти має пакет SolidWorks Office Premium?
6. Які типи поверхонь використовуються в SolidWorks?
7. Що таке плоска поверхня?
8. Що таке поверхня витягу?
9. Що таке поверхня обертання?
10. Що таке поверхня за траскторією?
11. Що таке поверхня за перерізами?
12. Що таке гранична поверхня?
13. Що таке поверхня вільної форми?
14. Що таке еквідистантна поверхня?
15. Що таке поверхня роз'єму?
16. Що таке лінійчата поверхня?
17. Що таке імпортована поверхня?
18. Які операції можна виконувати з поверхнями в SolidWorks?
19. Для чого використовують гібридне моделювання?

7. ОЗНАЙОМЛЕННЯ ІЗ 3D-СКАНУВАННЯМ

3D-сканер є пристроєм, що дозволяє істотно спростити вимір об'єктів, які мають складну просторову форму. Тривимірні сканери дають можливість з високою ефективністю вирішувати завдання, що з'являються в області дизайну, в інженерній справі та виробництві, при реставрації пам'ятників культурної спадщини, в медицині та ігровій індустрії [29].

3D-сканер є спеціальним пристроєм, який аналізує певний фізичний об'єкт або ж простір, щоб отримати дані про форму предмета і, за можливості, про його зовнішній вигляд (наприклад, про колір). Зібрані дані згодом застосовують для створення цифрової тривимірної моделі цього об'єкту. Тривимірне зображення 3D-сканер зберігає переважно у форматах STL, OBJ, PLY і WRL.

Мета 3D-сканера в тому, щоб створити множину точок геометричних зразків на поверхні об'єкту. Надалі ці точки можуть бути екстрапольовані для відтворення форми предмета (процес, що називається реконструкцією). Якщо були отримані дані про колір, то й колір реконструйованої поверхні також можна визначити.

3D-сканери трохи схожі на звичайні камери. Зокрема, вони мають конусоподібне поле зору і можуть отримувати інформацію тільки з тих поверхонь, які не були затемнені. Відмінності між двома цими пристроями в тому, що камера передає тільки інформацію про колір поверхні, яка потрапила в її поле зору, а ось 3D-сканер збирає інформацію про відстані на поверхні, яка також перебуває в його полі зору. Таким чином, «картинка», отримана за допомогою 3D-сканера, описує відстань до поверхні в кожній точці зображення. Це дозволяє визначити положення кожної точки на картинці відразу в трьох площинах.

3D-сканери знаходять активне застосування у сфері 3D-друку, оскільки дозволяють у короткі терміни створювати досить точні 3D-моделі різних об'єктів і поверхонь, придатних для подальшого доопрацювання і друку.

Оцифрування об'єктів реального світу має величезне значення в різних сферах застосування. Дуже активно 3D-сканування застосовують у промисловості для забезпечення якості продукції, приміром, для виміру геометричної точності.

Існують два методи тривимірного сканування.

Контактне 3D-сканування. Для сканування пристрою необхідно бути у безпосередньому контакті з об'єктом сканування. Контактні 3D-сканери: прості у використанні; не залежать від рівня освітлення; створюють моделі високої точності; файл 3D-моделі невеликий за об'ємом.

Безконтактне 3D-сканування. Отримання 3D-моделі за його допомогою є найбільш перспективним методом 3D-сканування. 3D-сканер не контактує з об'єктом, що дозволяє проводити 3D-сканування важкодоступних об'єктів, пам'яток культури і архітектури, а також ювелірних виробів. Уже створені промислові 3D-сканери, які сканують будинки, насипи та інші великі об'єкти. Безконтактні 3D-сканери: енергоощадливі, не вимагають безпосереднього контакту з об'єктом; використовують технологію структурованого світла; не завдають шкоди фізичному об'єкту.

Активні безконтактні 3D-сканери – для вивчення об'єкту використовують структурований світловий або лазерний промінь, який, потрапляючи на об'єкт, відбивається, і на основі цього відображення 3D-сканер будує 3D-модель.

Пасивні безконтактні 3D-сканери – використовують уже існуюче відображення від об'єкту, здебільшого сонячне світло.

В основі роботи 3D-сканера лежить принцип стереобачення. Сканер, як і людське око, здатний визначити відстань до об'єкту і його розміри, за допомогою двох камер. Після отримання необхідної інформації 3D-сканер будує 3D-модель об'єкту. Для недопущення неточностей, 3D-сканер обладнаний підсвічуваннями для кожної з камер.

Створення 3D-моделі за допомогою сканування має такі переваги:

- підвищує ефективність роботи зі складними частинами та формами;
- сприяє проектуванню продуктів за необхідності додати частину, створену кимось іншим;
- якщо моделі застаріють, 3D-сканування забезпечить оновлену версію;
- заміщує пропущені або відсутні частини;
- максимально висока точність моделі – 3D-сканер відтворює навіть найбільш незначні, найдрібніші деталі фізичного об'єкту;
- висока швидкість роботи – об'ємне сканування займає всього декілька хвилин, а то й секунд, після чого потрібне доопрацювання побудованої сканером 3D-моделі в професійних програмах для роботи з 3D-графікою;
- сканер можна розмістити під різними кутами, залежно від складності об'єкту, при цьому сам об'єкт можна не чіпати, що особливо важливо при скануванні великих і величезних об'єктів (наприклад, будинків, пам'ятників і ландшафту).

Застосування 3D-сканера

Інженерний аналіз. 3D-сканер може швидко і якісно створити тривимірну модель об'єкту і прорахувати її фізичні пропорції в необхідних розмірах. За наявності фізичної моделі в єдиному екземплярі об'ємне сканування допоможе створити різнорозмірні копії і швидко налагодити дрібносерійне виробництво.

Цифровий аналіз. 3D-сканер допомагає візуалізувати усі технічні невідповідності виробів і деталей, тобто внести в них усі необхідні коригування ще до етапу виготовлення прототипу виробу.

Цифрова архівація. Тепер можна відмовитися від двомірних малюнків, креслень і навіть від 3D-моделювання застарілих деталей. 3D-сканер зчитає з об'єкта всю необхідну інформацію, побудує 3D-модель і заархівує її в потрібному для виготовлення

форматі. Це істотно економить час і не вимагає виділення місця під зберігання фізичних креслень.

Архітектура. За допомогою 3D-сканера можна створити модель цілого будинку, а також окремих елементів архітектури: емблем, колон і різного роду декорацій.

Медицина – саме 3D-принтер виступає чудовим помічником при 3D-скануванні кісток і навіть окремих органів із найвищим рівнем деталізації. Надалі, отримані 3D-моделі і створені прототипи можуть бути використані як навчальні матеріали у спеціалізованих ВНЗ або при створенні повноцінних біологічних протезів.

Контрольні запитання

1. Що таке 3D-сканер?
2. Яка мета 3D-сканера?
3. Які існують методи тривимірного сканування?
4. У чому суть контактного 3D-сканування?
5. У чому суть безконтактного 3D-сканування?
6. Який принцип роботи активного безконтактного 3D-сканера?
7. Який принцип роботи пасивного безконтактного 3D-сканера?
8. Який принцип лежить в основі роботи 3D-сканера?
9. Які переваги має створення 3D-моделі за допомогою сканування?
10. Де застосовують 3D-сканери?
11. Що дає інженерний аналіз за допомогою 3D-сканера?
12. Для чого потрібен цифровий аналіз за допомогою 3D-сканера?
13. Що таке цифрова архівація?

8. ТЕХНОЛОГІЇ 3D-ДРУКУ

3D-друк – це виконання низки операцій, що повторюються, пов'язаних зі створенням об'ємних моделей шляхом нанесення на робочий стіл установки тонкого шару витратних матеріалів, зміщенням робочого столу вниз на висоту сформованого шару і видаленням з поверхні робочого столу відпрацьованих відходів. Цикли друку безперервно слідують один за одним: на попередній шар матеріалів наноситься наступний шар, стіл знову опускається, і так повторюється доти, поки на елеваторі (так називають робочий стіл, яким оснащений 3D-принтер) не з'явиться готова модель [30].

Будова 3D-принтера і друк об'єктів

Існує значне різноманіття типів 3D-принтерів, які розрізняють за будовою і принципом роботи. Проте, усі ці прилади використовують один і той самий базовий принцип 3D-друку – побудова об'єкту з тонких горизонтальних шарів матеріалу.

На рис. 8.1 показано роботу друкувальної головки. Ця спрощена модель наочно демонструє базові принципи роботи 3D-принтера.

Друкувальна головка формує шари матеріалу, поступово вирощуючи з них об'єкт. Вона рухається тільки в горизонтальній площині (вздовж осей X і Y).

Робоча платформа слугує для розміщення об'єкту при друці, рухається згори-вниз (уздовж осі Z).

На початку робоча платформа перебуває у верхньому положенні, а друкувальна головка накладає на неї нижній шар об'єкту (рис. 8.2). Після того, як перший шар сформований, робоча платформа опускається на товщину шару, і друкувальна головка накладає новий шар матеріалу на попередній.

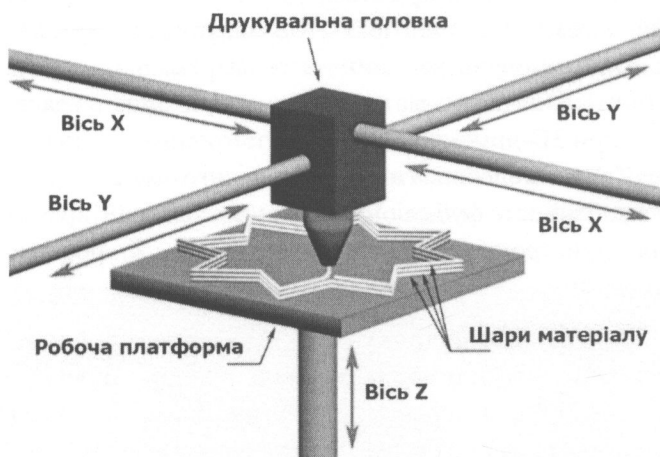


Рис. 8.1. Робота друкувальної головки

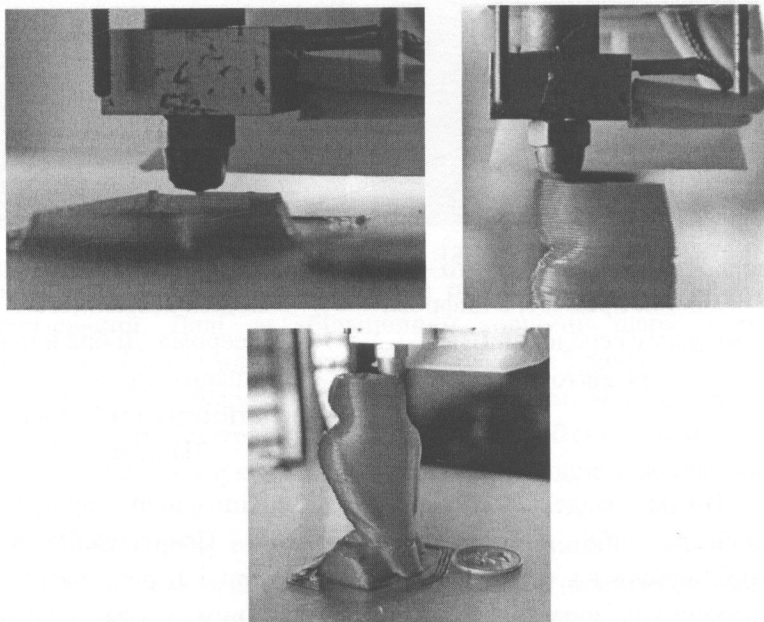


Рис. 8.2. Етапи друку об'єкту

Цей цикл повторюється доти, поки не буде побудований цілий об'єкт. На рис. 8.3. зображено, як приклад, цифрову тривимірну модель восьминога, а на рис. 8.4 добре видно тонкі горизонтальні шари матеріалу, з яких буде складатись даний об'єкт при 3D-друці.

Кожна модель і, тим більше, різні типи 3D-принтерів мають свої особливості функціонування. Але базовий принцип роботи і деталі пристрою (координатні осі X, Y, Z, робоча платформа тощо) один.

Підготовка до друку

3D-принтери створюють реальні, відчутні речі з віртуальних моделей. Тому, в першу чергу, у програмі для 3D-моделювання створюється цифрова версія майбутнього об'єкту.

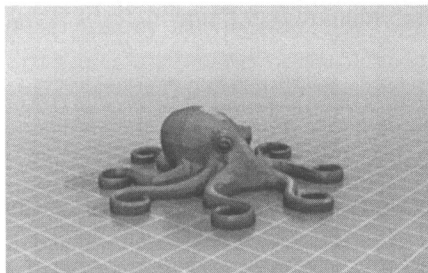


Рис. 8.3. Восьминіг на фото – це не реальний предмет, а цифрова модель у середовищі 3D-редактора

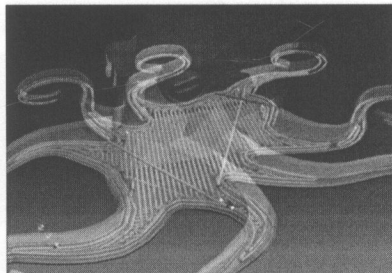


Рис. 8.4. Приклад обробки моделі восьминога «слайсером». Добре видно шари – саме так укладатиметься матеріал при 3D-друці

Потім модель обробляється спеціальною програмою («слайсер» або «генератор G-коду»). Початковий об'єкт «розрізається» на тонкі горизонтальні шари і перетворюється в цифровий код, зрозумілий 3D-принтеру. Іншими словами, слайсер створює набір команд, які вказують 3D-принтеру, як і куди треба наносити матеріал при 3D-друці цього об'єкту.

Дозвіл друку

Ключова характеристика будь-якого 3D-принтера – «дозвіл друку». Під цим параметром розуміють мінімально допустиму висоту шару матеріалу, з якою він може друкувати. Дозвіл друку прийнято позначати в мікрометрах (мкм, мікрон).

Очевидно, що чим тонші шари, тим менш помітний перехід між ними, відповідно, поверхня об'єкту гладкіша, а його деталі – виразніші.

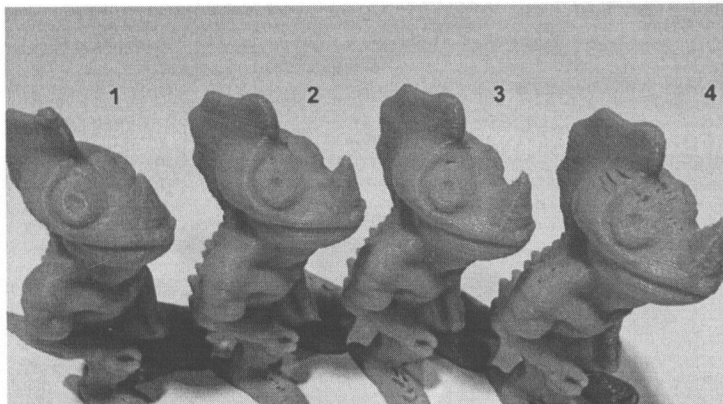


Рис. 8.5. Модель, надрукована з різним дозволом

На рис. 8.5 показана одна і та ж модель, надрукована з різним дозволом. Добре видно, що об'єкт номер 1 – найбільш деталізований. Далі, зі збільшенням товщини шару, помітно знижується якість моделі, аж до появи раковин і дірок.

З іншого боку, чим тонші шари, тим більше часу 3D-принтеру треба витратити на створення об'єкту, тим більше навантаження на друкувальні механізми, швидше відбувається їх знос.

Дозвіл друку залежить від багатьох чинників:

- від технології роботи 3D-принтера (наприклад, лазерні принтери друкують найбільш деталізовані моделі);
- від точності роботи друкувальних механізмів конкретної моделі;

- від вибраного матеріалу для 3D-друку;
- і, нарешті, від налаштувань програмного забезпечення.

Область друку

Ще однією важливою технічною характеристикою будь-якого 3D-принтера є його робочий об'єм («область друку», «зона друку» тощо). Саме він показує, якого розміру об'єкти може друкувати конкретна модель 3D-принтера (рис. 8.6).

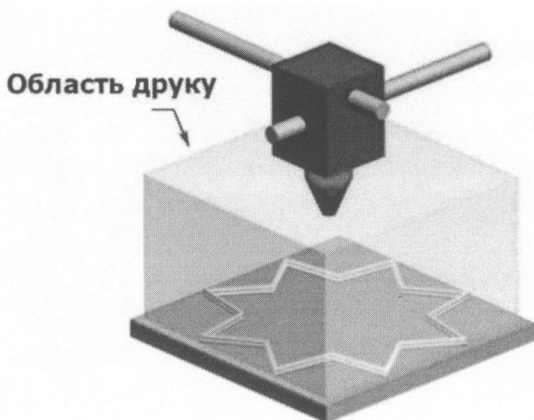


Рис. 8.6. Область друку схематичного 3D-принтера

По суті, цей параметр відображає зону досяжності (охоплення) друкувальної голівки принтера – в горизонтальній площині (вздовж осей X і Y) і за висотою (вісь Z). Тобто, об'єкти, що вміщуються в цю зону, принтер зможе надрукувати, а якщо їх розміри більше від області друку – ні.

Розмір області друку прийнято виражати трьома цифрами: довжина, ширина і висота уявного паралелепіпеда (приклад – 20x20x20 мм). Іноді, для деяких принтерів із специфічною схемою роботи механіки (наприклад, дельта-принтерів), область друку представляють у вигляді циліндра і вказують його діаметр і висоту. Як одиниці виміру, зазвичай, використовують міліметри.

Підтримувальні конструкції

Ще один термін, який досить часто трапляється в описах 3D-принтерів, це «структури підтримки» («підтримувальні конструкції», «конструкції підтримки» тощо).

3D-принтер починатиме друк знизу – із задніх копит, оскільки вони торкаються робочої платформи (рис. 8.7). Але для накладення шарів матеріалу, наприклад, передніх копит, принтеру потрібна якась основа – поверхня робочої платформи або попередні шари матеріалу. Тому додаються підтримувальні конструкції – стійки. Вони торкаються робочої платформи, що дає можливість 3D-принтеру їх надрукувати. Після закінчення друку об'єкту підтримувальні конструкції видаляються.

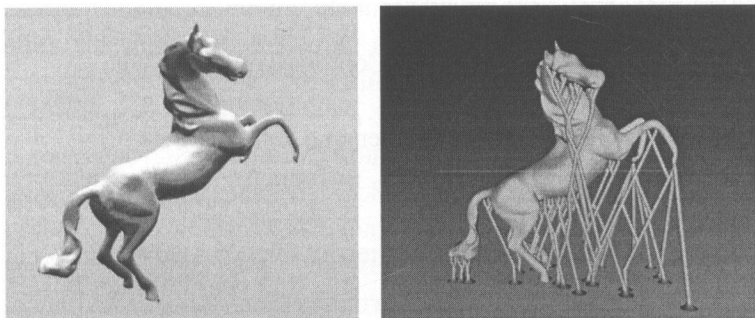


Рис. 8.7. Цифрова модель коня.
Створення підтримувальних конструкцій

3D-друк також відомий як комп'ютерне моделювання або альтернативне конструювання. Це процес відтворення реального об'єкту за зразком 3D-моделей. Цифрова 3D-модель зберігається у форматі файлу STL і передається на друк 3D-принтеру. Потім 3D-принтер, накладаючи шар за шаром, формує реальний об'єкт.

Технології 3D-друку

Існує декілька технологій 3D-друку, які відрізняються одна від одної за типом прототипного матеріалу і способами його нанесення. Нині найбільше поширення отримали такі технології 3D-друку:

- лазерна стереолітографія (Laser Stereolithography, SLA);
- селективне лазерне спікання (Selective Laser Sintering, SLS);
- пряме лазерне спікання металу (Direct Metal Selective Laser Melting, SLM);
- електронно-променева плавка (Electron Beam Melting, EBM);
- моделювання методом наплавлення (Fused Deposition Modeling, FDM);
- поліструмінна технологія (Poly Jet, PJET);
- технологія MJM (Multi-Jet-Modeling);
- технологія склеювання порошків (Binding powder by adhesives);
- контурне виготовлення (Contour Crafting, CC);
- моделювання методом напилення з подальшим фрезеруванням шару (Drop On Demand Jet, DODJet);
- ламінування листових матеріалів (Laminated Object Manufacturing, LOM);
- опромінення ультрафіолетом через фотомаску (Solid Ground Curing, SGC);
- технологія 3DP;
- 3D-друк від Moor Technologies.

Лазерна стереолітографія (Laser Stereolithography, SLA) – ця технологія використовує як модельний матеріал спеціальний фотополімер – світлочутливу смолу. Основою в цьому процесі є ультрафіолетовий лазер, який послідовно перекладає поперечні перерізи моделі на поверхню ємності зі світлочутливою смолою. Фотополімер твердне тільки в тому місці, де пройшов лазерний промінь. Потім новий шар смоли наноситься на затверділий шар, і новий контур намічається лазером. Процес повторюється до завершення побудови моделі. Стереолітографія – найбільш популярна RP-технологія для отримання високоточних моделей. Вона охоплює практично усі галузі матеріального виробництва

від медицини до важкого машинобудування. SLA-технологія дозволяє швидко і точно побудувати модель виробу практично будь-яких розмірів. Якість поверхонь залежить від кроку побудови. Сучасні машини забезпечують крок побудови 0,025-0,15 мм.

SLA-технологія дає найкращий результат при виготовленні мастер-моделей для подальшого виготовлення силіконових форм і литва в них полімерних смол, а також використовується для вирощування ювелірних мастер-моделей.

Селективне лазерне спікання (Selective Laser Sintering, SLS) – у технології SLS моделі створюються з порошкових матеріалів за рахунок ефекту спікання за допомогою енергії лазерного променя. В цьому випадку, на відміну від SLA-процесу, лазерний промінь є джерелом не світла, а тепла. Потрапляючи на тонкий шар порошку, лазерний промінь спікає його частки і формує тверду масу, у відповідності з геометрією деталі. Як матеріали використовуються поліамід, полістирол, пісок і порошки деяких металів. Істотною перевагою SLS-процесу є відсутність так званої підтримки при побудові моделі. У процесах SLA і MJM при побудові нависаючих елементів деталі використовують спеціальну підтримку, що оберігає свіжіше побудовані тонкі шари моделі від обвалення. У SLS-процесі в такій підтримці немає необхідності, оскільки побудова здійснюється в однорідній масі порошку. Після побудови модель витягається з масиву порошку і очищається.

Пряме лазерне спікання металу (Direct Metal Selective Laser Melting, SLM) – різновид технології SLS. Матеріалом слугують метали і сплави у вигляді порошку. Для друку доступні такі метали і сплави: сталь, нержавіюча сталь, інструментальна сталь, алюміній, сплав кобальт-хром, титан.

Електронно-променева плавка (Electron Beam Melting, EBM) – технологія, що є модифікацією SLS. Дозволяє отримувати прототипи з металевого порошку, за рахунок його пошарового плавлення. Плавка витратного матеріалу відбувається у вакуумі за

допомогою електронного променя. Моделі, «надруковані» за такою технологією, виходять міцнішими і довговічнішими.

Моделювання методом наплавлення (Fused Deposition Modeling, FDM) – у цій технології прототип створюється так само з будь-якого плавкого матеріалу (віск, пластик, метал тощо). Розхідний матеріал заздалегідь надходить в спеціальну голівку екструзії, в якій матеріал плавиться і у вигляді тонкого дроту видавлюється на холодну робочу площину. Велика різниця температур сприяє швидкому застиганню шару нового об'єкту. Після повного твердіння першого контуру, голівка наносить на платформу наступний шар.

Переваги технології FDM 3D-друку:

- швидкість і простота виготовлення моделей;
- безпека технологій. Екологічна чистота і нетоксичність моделювальних матеріалів;
- точність моделювання;
- простота використання та обслуговування;
- міцність деталей;
- простота утилізації.

Водночас ця технологія не позбавлена недоліків: між шарами утворюються шви; голівка екструдера повинна постійно рухатись, інакше матеріал захопоне і засмітить її; можливе розшарування у разі температурних коливань упродовж циклу обробки.

Поліструминна технологія (Poly Jet, PJET) – принцип роботи схожий на стереолітографію (SLA), оскільки модель створюється з фоточутливої смоли. Полімерна смола заздалегідь розплавляється і поступає в струминну голівку. Голівка, переміщуючись уздовж горизонтальної осі, напилує розплавлену смолу на робочу площину. Товщина такого шару складає всього 16 мікрон, що в п'ять разів менше, ніж товщина шару при стереолітографії. УФ-лампи, що йдуть за голівкою, прискорюють твердіння полімеру. Особливо складні моделі друкуються з

додаванням матеріалу підтримки у вигляді гелю, який видаляється після закінчення роботи за допомогою звичайної води.

Технологія MJM (Multi-Jet-Modeling) – в основі MJM-технології 3D-друку лежить пошаровий переріз CAD-файлу на горизонтальні шари, які послідовно вирушають на 3D-принтер. Кожен шар формується друкувальною голівкою, яка через групи сопел випускає на горизонтальну платформу, що рухається, розплавлений (температура близько 80°C) фотополімер або розплавлений віск. Фотополімер або віск розплавляються в системі подання матеріалу до того, як потрапляють у друкувальну голівку. Якщо 3D-друк здійснюється з фотополімеру, то після друку кожного шару, платформа, на якій вирощений шар, від'їжджає за друкувальну голівку під ультрафіолетову лампу. Спалах ультрафіолетової лампи викликає реакцію фотополімеру, внаслідок якої матеріал твердне. Після цього платформа від'їжджає знову під друкувальну голівку, і цикл формування шару повторюється. Друкувальна голівка утворює новий шар. Особливостями технології MJM є можливість відтворювати 3D-моделі з високою точністю. В процесі 3D-друку використовується матеріал підтримки: віск (поставляється окремими картриджами). Якщо 3D-друк здійснюється з фотополімеру, то матеріал підтримки видаляють за допомогою високої температури: деталь з підтримкою поміщають у піч з температурою ~60°C. Якщо 3D-друк здійснюється з воску, то підтримку видаляють за допомогою спеціального розчину.

Важливо і те, що в клей можна додавати фарбувальні речовини, а отже, є можливість отримати модель не лише об'ємну, але й різноколірну.

Технологія склеювання порошків (Binding powder by adhesives) – принтери з технологією Binding powder by adhesives використовують два види матеріалів: крохмально-целюлозний порошок, з якого формується модель, і рідкий клей на водній основі, що проклеює шари порошку. Клей надходить з друкувальної голівки 3D-принтера, зв'язуючи між собою частки

порошку і формуючи контур моделі. Після завершення друку надлишки порошку видаляють. Щоб надати моделі додаткову міцність, її порожнини заливають рідким воском.

Контурне виготовлення (Contour Crafting, CC) – це будівельна технологія, яка схожа на 3D-друк, але пристрій для друку подібний на великий козловий кран. У нього замість гаку знаходиться голівка, що розпиляє бетонну суміш, із вбудованими пневматичними формувачами поверхонь. Миттєво застигаючий бетонний розчин шар за шаром наноситься на основу будинку. Стіни разом з отворами для дверей та вікон «ростуть» на очах. На зведення порожнистої «коробки» одного котеджу площею 100 метрів квадратних йде приблизно вісім годин безперервної роботи.

Моделювання методом напилення з подальшим фрезеруванням шару (Drop On Demand Jet, DODJet) – у цій технології 3D-друку використовують два види матеріалів – модельний матеріал і матеріал підтримки. Друкувальна голівка одночасно розпиляє обидва типи «витратних матеріалів». Потім спеціальна фрезерувальна голівка робить охолодження розпорошеного шару і його механічну обробку. Технологія DODJet дозволяє будувати високоточні моделі з абсолютно гладкою поверхнею. Оскільки розпилення робочого шару відбувається за рахунок голівки, що рухається механічно, то швидкість виготовлення прототипу багато в чому залежить від складності друкарської моделі.

Ламінування листових матеріалів (Laminated Object Manufacturing, LOM) – у цій технології модель виготовляється з тонких шарів полімерної плівки. Заздалегідь кожен шар майбутнього виробу вирізується з робочого матеріалу лазером або механічним різачком. Готові форми шарів розміщуються в установленому порядку і склеюються. Пошарове з'єднання може відбуватися різними способами – за допомогою місцевого нагріву, пресуванням під тиском або звичайним хімічним склеюванням.

Опромінення ультрафіолетом через фотомаску (Solid Ground Curing, SGC) – опромінення ультрафіолетом через фотомаску – воно ж Solid Ground Curing, або SGC – дозволяє створення готових моделей з шарів розпиляного на робочу поверхню фоточутливого пластика. Після нанесення тонкого шару пластика, він через спеціальну фотомаску із зображенням чергового перерізу обробляється ультрафіолетовими променями. Невикористаний матеріал видаляється за допомогою вакууму, а затверділий матеріал, що залишився, повторно опромінюється жорстким ультрафіолетом. Порожнини готового виробу заповнюються розплавленим воском, який слугує для підтримки наступних шарів. Перед нанесенням наступного шару фоточутливого пластика попередній шар механічно вирівнюється.

Технологія 3DP (пошаровий розподіл склеювальної речовини по гіпсовому порошку) – робоча камера 3D-принтера, що працює за технологією 3DP, складається з подавальної камери, яка заповнюється модельним матеріалом, і камери побудови, де здійснюється безпосереднє вирощування моделі. В процесі 3D-друку друкувальний блок 3D-принтера спочатку рівномірним тонким шаром розподіляє будівельний матеріал моделі по усій площині платформи камери побудови, а потім склеює частки матеріалу між собою згідно з математичною 3D-моделлю, передаваною на принтер з програмного забезпечення. Після нанесення єдиної речовини платформа області побудови опускається вниз, а платформа подавальної камери піднімається вгору на однакову висоту, після чого друкувальна головка знову починає свій рух.

Технологія 3DP, порівняно з іншими технологіями, має низьку собівартість виробництва прототипу, забезпечуючи при цьому високу швидкість 3D-друку й високу якість моделей. Це досягається за рахунок низької вартості матеріалу і його безвідходного використання. Використовуваний матеріал слугує як для побудови моделі, так і для її підтримки під час процесу 3D-

друку. Також це єдина технологія, яка здатна передавати кольори палітри СМΥК.

3D-друк від Moor Technologies – технологія, яка дозволяє друкувати вироби із звичайного паперу формату А4. Різець із твердосплавної сталі вирізує кожен шар майбутньої моделі з аркуша паперу. Потім шари проклеюються звичайним канцелярським клеєм на водній основі.

Застосування технологій 3D-друку

Для **швидкого прототипування**, тобто швидкого виготовлення прототипів моделей і об'єктів для подальшого доведення. Вже на етапі проектування можна кардинальним чином змінити конструкцію вузла або об'єкту в цілому. В інженерії такий підхід здатний істотно знизити витрати у виробництві й освоєнні нової продукції.

Для **швидкого виробництва** – виготовлення готових деталей із матеріалів, підтримуваних 3D-принтерами. Це чудове рішення для малосерійного виробництва:

- виготовлення моделей і форм для ливарного виробництва;
- виробництво різних дрібниць у домашніх умовах;
- у медицині, при протезуванні та виробництві імплантатів (фрагменти скелета, черепа, кісток, хрящові тканини);
- проведення експериментів із друку донорських органів;
- будівництво будівель і споруд;
- створення зброї;
- виробництво корпусів експериментальної техніки (автомобілі, телефони, радіо-електронне устаткування);
- харчове виробництво.

Контрольні запитання

1. Що таке 3D-друк?
2. Яка будова 3D-принтера?
3. Як працює 3D-принтер?
4. Які існують технології 3D-друку?

5. У чому суть лазерної стереолітографії (Laser Stereolithography, SLA)?
6. У чому суть селективного лазерного спікання (Selective Laser Sintering, SLS)?
7. У чому суть прямого лазерного спікання металу?
8. У чому суть електронно-променевого плавлення (Electron Beam Melting, EBM)?
9. У чому суть моделювання методом наплавлення (Fused Deposition Modeling, FDM)?
10. У чому суть поліструмінної технології (Poly Jet, PJET)?
11. У чому суть технології MJM (Multi-Jet-Modeling)?
12. У чому суть технології склеювання порошків (Binding powder by adhesives)?
13. У чому суть контурного виготовлення (Contour Crafting, CC)?
14. У чому суть моделювання методом напилення з подальшим фрезеруванням шару?
15. У чому суть ламінування листових матеріалів (Laminated Object Manufacturing, LOM)?
16. У чому суть опромінення ультрафіолетом через фотомаску (Solid Ground Curing, SGC)?
17. У чому суть технології 3DP?
18. У чому суть 3D-друку від Moor Technologies?
19. Де застосовують технології 3D-друку?

9. ПРАКТИЧНЕ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ В SOLIDWORKS

У розділі наведено, як приклад, алгоритм (типовий сценарій) створення тривимірної твердотільної моделі черв'ячного редуктора відкритого типу. Ця складальна одиниця включає такі деталі – черв'ячне колесо, вал черв'ячного колеса, черв'як, корпус. Моделювання здійснене в середовищі CAD-системи SolidWorks. Перед описом процесу створення моделі редуктора – кілька слів про саму методику тривимірного твердотільного моделювання об'єктів у сучасних CAD-системах.

Незалежно від того, в якій системі відбувається процес 3D-моделювання (Компас, SolidWorks, AutoCad тощо), методика та принципи створення тривимірних об'єктів є дуже схожими. Системи відрізняються своїми інтерфейсами та потужністю математичного апарату тривимірного моделювання, що відображається, в кінцевому результаті, у складності 3D-об'єкту, який дає змогу отримати та чи інша система. Знаючи методику моделювання в одній системі та володіючи нею, користувач без особливих труднощів зможе створити модель засобами іншої системи. Таке моделювання можна порівняти з процесом керуванням автомобілем – знаючи принципи управління й складові елементи однієї автівки, можна сісти за кермо іншої та почати керувати нею, навіть якщо вона буде інших розмірів, потужності, класу, призначення та типу.

Отже, робочою зоною для створення 3D-моделі в будь-якій CAD-системі, очевидно, буде тривимірний простір. Користувач матиме початок координат та три вихідні взаємоперпендикулярні площини – горизонтальну, фронтальну та профільну. Насамперед створюється основа кожної майбутньої тривимірної моделі – геометричне тіло, яке максимально наближене (за можливості) до кінцевої моделі. Треба пам'ятати й усвідомлювати те, що CAD-система – це інструмент та хороший помічник людини, але керувати нею і ставити їй завдання повинна (на сьогоднішньому етапі розвитку техніки) все-таки людина. Тому перед початком

моделювання користувач повинен продумати алгоритм створення майбутньої тривимірної моделі потрібного об'єкту, продумати послідовність проведення та вибрати відповідні операції моделювання. Важливе значення на цьому етапі має вдалий вибір основи, що може як спростити, так і ускладнити процес моделювання, збільшивши чи зменшивши кількість форматворних операцій.

Кожна з форматворних операцій при створенні моделі здійснюється над ескізами – плоскими замкнутими чи розімкнутими контурами, які користувач імпортує з 2D-модуля CAD-системи чи безпосередньо генерує в 3D-модулі на відповідній площині (грані) створеної частини моделі, підключивши інструментарій 2D-модуля. Сама форматворна операція може бути однією з чотирьох типів – булевих операцій видавлювання, обертання, кінематичної операції, операції за перерізами. В результаті кожної операції CAD-система генерує тривимірне тіло, яке, за вибором користувача, додає (об'єднує) до готової частини майбутньої моделі або віднімає його від неї (так формуються, наприклад, отвори). Можливий також так званий варіант «перетину», коли, в результаті проведення форматворної операції, користувач отримує тіло, що є спільною частиною перетину об'ємів уже створеної попередньо моделі й тіла, що згенерувалось під час виконання останньої операції (однієї з наведених вище булевих операцій). Так і відбувається процес моделювання – крок за кроком користувач керує системою, як скульптор, генерує 3D-модель потрібного об'єкта: від основи (заготовки), яка формується шляхом проведення маніпуляцій (булевих операцій) над плоским ескізом, що розміщується у вихідних площинах системи чи на новостворених допоміжних площинах, до готової моделі потрібного об'єкту з максимально реалістичним його відтворенням у цифровому форматі.

Кілька слів про вимоги до ескізів, над якими проводять операції. Якщо ескіз виконаний неправильно чи з помилками,

жодна система не згенерує на основі такого ескізу тривимірне тіло. Знову ж таки, незалежно в якій системі проводиться процес моделювання чи для якої формотворної операції призначений ескіз, він має складатися з геометричних примітивів (відрізків, дуг, кривих тощо), які не мають перетинатися в кінцевих точках з'єднань чи розміщуватись із зазорами між собою. Іншими словами, точка закінчення одного елемента контуру має співпадати з точкою початку наступного. Елементи не повинні накладатись один на одного. Для деяких систем (наприклад, Компасу) ескізи формотворних операцій (окрім осей обертання) мають бути виконані «основним» типом лінії. Це спільні вимоги до ескізів. Якщо ескіз використовується для певної формотворної операції, то тут є свої додаткові особливості. Операція видавлювання – тіло генерується шляхом перенесення ескізу в просторі паралельно самому собі на задану користувачем відстань у заданому напрямі. Ескіз має бути плоским. Можливе вкладення всередину вихідного замкнутого контуру ескізу іншого замкнутого контуру (кількох контурів, які не перетинаються між собою та вихідним контуром). Тоді тіло на основі такого ескізу матиме готові отвори. Операція обертання – тіло генерується шляхом обертання певного плоского контуру навколо осі на кут від 0 до 360 градусів. Тут контур не повинен перетинати вісь (може лише дотикатись до неї). Вісь має бути створена осьовим типом лінії (наприклад, у системі Компас) чи вказана користувачем (наприклад, у SolidWorks вибрано відповідний задалегідь створений відрізок). Кінематична операція – тіло формується шляхом перенесення за певним законом плоского перерізу вздовж траєкторії (може бути просторовою кривою). Тут особливістю є те, що початок чи кінець траєкторії має обов'язково лежати в площині перерізу (наприклад, у системі Компас). При операції за перерізами користувач створює в просторі плоскі перерізи різної форми (замкнуті чи розімкнуті), система генерує

тривимірне тіло, що проходить через ці перерізи (послідовність та траєкторію проходження вказує користувач).

Тепер коротко про створення складань у сучасних CAD-системах. Сам процес побудови складань аналогічний у всіх системах тривимірного моделювання. Все описане вище стосувалося створення тривимірних деталей. У системах 3D-моделювання під деталлю розуміють об'єкт, який складається з монолітного шматка матеріалу певного типу (метал, неметал тощо). Наступним етапом після створення тривимірних деталей є їх складання у виробу (механізми, машини, пристрої, будинки – принципового значення немає). Кожна сучасна конструкторська CAD-система має кілька модулів – блоків. Ключовими є модуль для створення 2D-об'єктів, іншими словами, креслень, та два модулі тривимірного моделювання. Один для створення деталей, другий – для створення складань окремих деталей у виробу. Хоча в модулі складання теж можна генерувати деталі. Перед початком складання користувач має вибрати базову деталь, яка буде завантажуватись у файл складання першочергово та буде вважатись нерухомою. Наголошуємо – вибрати базову деталь має користувач виходячи зі свого практичного досвіду та здорового глузду. Так, наприклад, складаючи такі деталі, як вал, колесо зубчасте, шпонка, доцільним за базову деталь вибрати вал, а вже до нього приєднати шпонку та колесо. Коли будемо складати легковий автомобіль – то базовою деталлю для складання буде кузов. Решту деталей слід приєднати до нього. Аналогічно, як деталі, до основної базової деталі приєднуються й інші складальні одиниці. В автомобілі це буде двигун, коробка передач тощо. Для самої системи тривимірного моделювання немає принципового значення, яку деталь завантажувати першочергово. Вона може за базову деталь прийняти й колесо автомобіля, а решту автомобіля користувач буде приєднувати до цього колеса. Але тут виникає питання зручності та швидкості виготовлення складання. При нерациональному виборі базової деталі та послідовності

проведення складання (порядку завантаження деталей у складання та їх взаємного орієнтування) деякі деталі (завантажені пізніше) можуть «губитись» у складанні. Тоді, щоб знайти потрібну завантажену для її орієнтації деталь, треба буде користуватися «каркасным режимом» відображення моделі чи виділяти її в дереві побудови моделі системи. Проблематично буде вибирати площини, грані та поверхні для спряжень (про них сказано буде дещо нижче). Проілюструємо це на простому прикладі. Наприклад, потрібно змоделювати смартфон. Маємо основні деталі: корпус, кришка смартфона, складальні одиниці – дисплей та плата з радіодеталлями й мікросхемами. Логічний порядок складання – корпус, плата, дисплей, кришка. Якщо ж зробити дещо інакше – корпус, дисплей, кришка, то помістити плату всередину буде дещо проблематично. Доступ до потрібних поверхонь для проведення операцій спряжень, щоб зорієнтувати та помістити плату в корпус, буде утруднений.

Як відбувається сам процес складання? Відомо, що тіло в просторі має шість ступенів свободи. Деталь, яка завантажена у файл складання першочергово, є базовою та нерухомою (про це сказано вище). Інші завантажені деталі власне і будуть мати шість ступенів свободи відносно базової. Щоб повністю зорієнтувати іншу деталь відносно базової деталі або вже відносно зробленої частини складання та приєднати до неї, користувач має «забрати» в деталі три ступені свободи. Ця процедура відбувається за допомогою блоку команд, які називаються спряженнями. Користувач, знову ж таки, виходячи з практичного досвіду, вибирає потрібне спряження та накладає його на елементи вже готової частини складання і деталі, яку слід приєднати до неї. Переважно це грані (плоскі та криволінійні), можуть бути і ребра та вершини. Найпоширенішими спряженнями у всіх системах тривимірного моделювання є співпадиння поверхонь, їх перпендикулярність, паралельність, розташування під певним визначеним кутом чи на певній відстані (вид паралельного

спряження), співвісність (для поверхонь обертання). Деякі системи (наприклад, SolidWorks) мають так звані рухомі (механічні спряження). Вони накладаються на поверхні деталей, які в складанні (моделі виробу) повинні рухатись одна відносно одної – колесо автомобіля, поршень у циліндрі двигуна, гвинтова пара тощо. У цьому випадку користувач також повинен задати «закон руху» рухомих елементів складання через відповідні математичні співвідношення або числові значення в командному меню системи.

При створенні тривимірних складань слід мати на увазі, що деякі системи, будуючи складання, завантажують деталі як зовнішнє посилання. Тобто, файл деталі у файл складання фізично не завантажується. Файл складання пам'ятає, з якого файлу на диску береться деталь. Для чого це потрібно? Одна деталь може входити в кілька складань одночасно. Користувач зможе просто відредагувати файл деталі (модель деталі), а всі файли складань, куди вона вставлена, автоматично «підтягнуть» цю деталь у своє складання. Тоді не треба буде вручну замінити редаговану деталь у всіх складаннях. Ця опція системи тривимірного моделювання дуже важлива для конструкторських робіт на фірмах, де виробництво постійно модернізується та вдосконалюється або слугують прототипами.

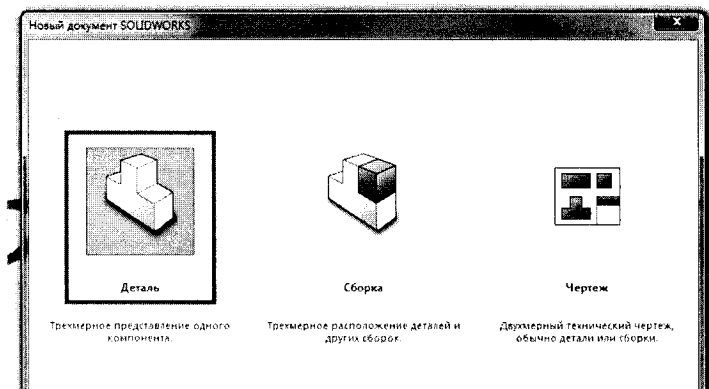
Маючи вже готові складання чи деталі, користувач може засобами системи обчислити їх мас-центрові характеристики, зробити фотореалістичне зображення моделі – майбутнього виробу, передати у 2D-модуль системи для автоматичного створення їх креслень. Для рухомих моделей можна провести анімацію та показати їх динаміку. Далі готові тривимірні моделі, залежно від поставленої задачі, імпортуються в CAE-системи для розрахунку, САМ-системи для виготовлення чи інші CAD-системи з іншими можливостями та функціями для подальшого доопрацювання. До речі, креслення виробу (проекції креслень) будуть інтерактивно пов'язані в системі з тривимірною

моделлю, з якої вони створені. Користувач зможе щось змінювати в тривимірній моделі, а САD-система самотужки відтворюватиме ці зміни на всіх 2D-проекціях моделі.

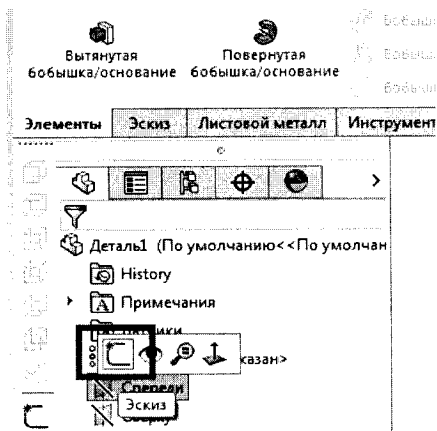
Нижче покроково наведено послідовність маніпуляцій із системою SolidWorks для створення тривимірної твердотільної моделі черв'ячного редуктора відкритого типу. Короткий опис кожного кроку супроводжується відповідним «скрінном» потрібної для візуалізації частини екрану персонального комп'ютера при роботі з системою. Виріб складатиметься з чотирьох нестандартних деталей певних заданих розмірів.

Створення черв'ячного колеса – деталі №1

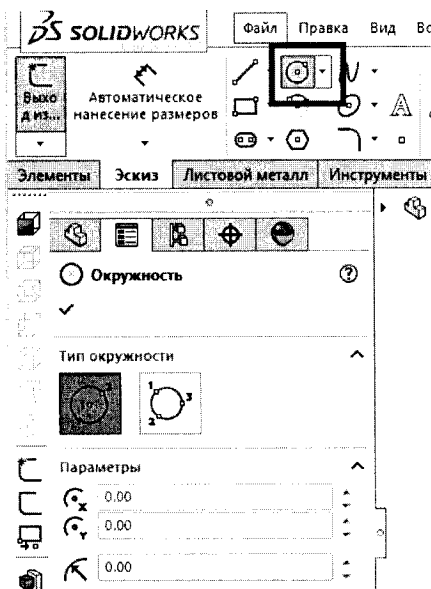
Насамперед створюємо новий файл (проект) у системі SolidWorks та вибираємо опцію зі створення тривимірної деталі.



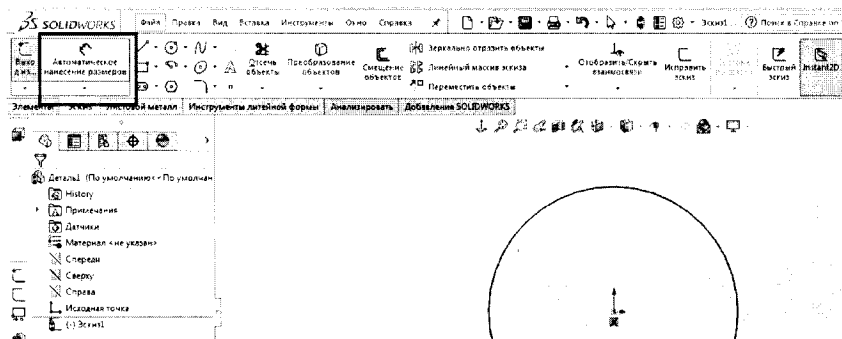
Задаємо площину розташування головного вигляду майбутньої деталі «Спереди» та вибираємо команду зі створення ескизу основи. Основою черв'ячного колеса буде плоский циліндр (диск).



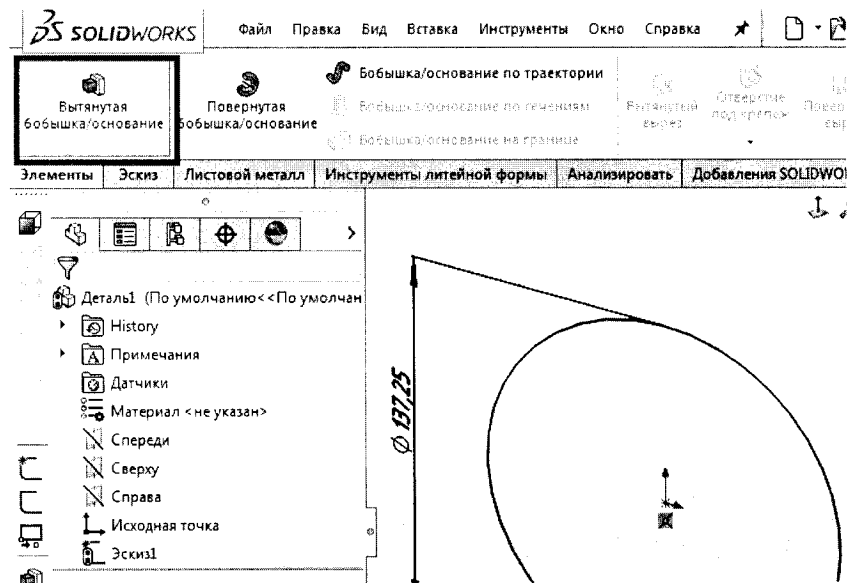
Наступним кроком є вибір команди зі створення кола – «Окружность» по центру й радіусу, за її допомогою у вибраній площині креслимо коло діаметром $D = 137,25$ мм. Усі розміри деталей редуктора будуть задані виходячи з проведених раніше конструкторських розрахунків.



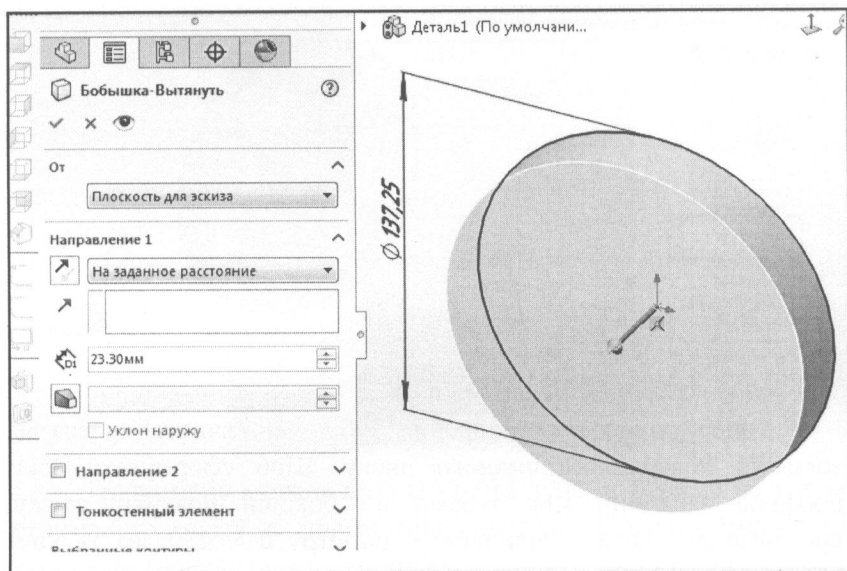
Вибираємо опцію з автоматичного проставляння системою розмірів на ескізах.



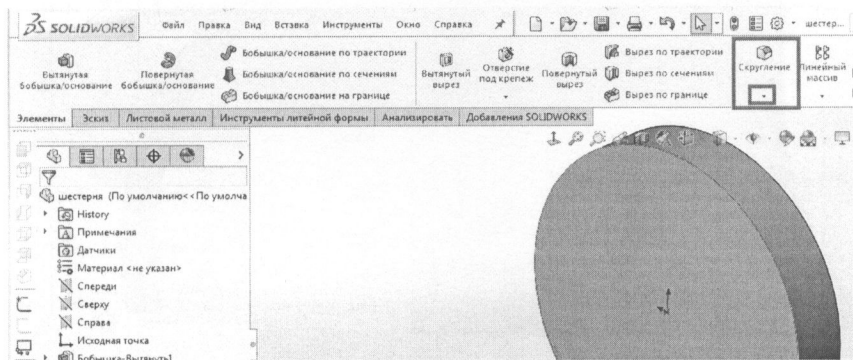
Створюємо основу колеса – плоский циліндр (диск) за допомогою булевої операції видавлювання. Для цього в панелі системи «Елементи» вибираємо команду «Витягнута бобышка/основание» та задаємо товщину видавлювання $H = 23,3$ мм.

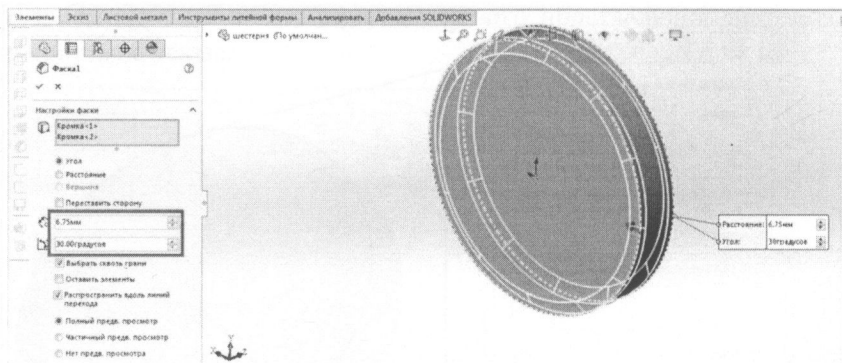


Фантом майбутньої основи має вигляд:

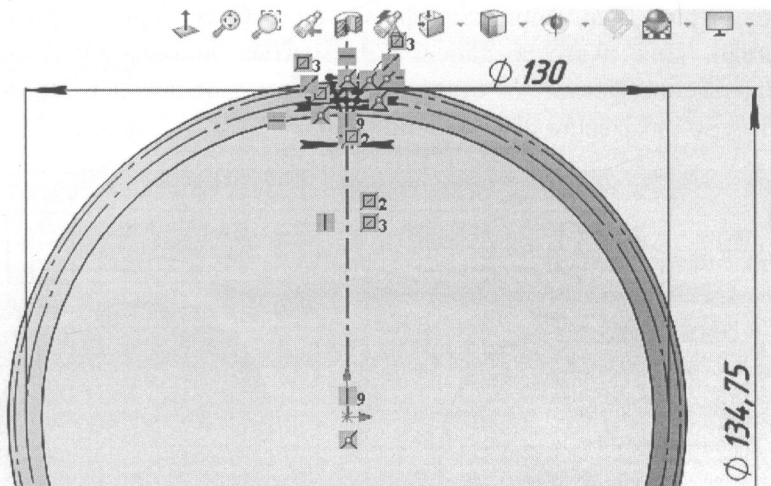


Створюємо основу, клікнувши в панелі введення параметрів. Далі формуємо фаску на ребрах торця отриманої основи. Для цього в панелі «Елементи» вибираємо команду «Скругление/Фаска» та створюємо фаску завдовжки 6,75 мм та кутом 30°, вказавши два потрібні ребра.

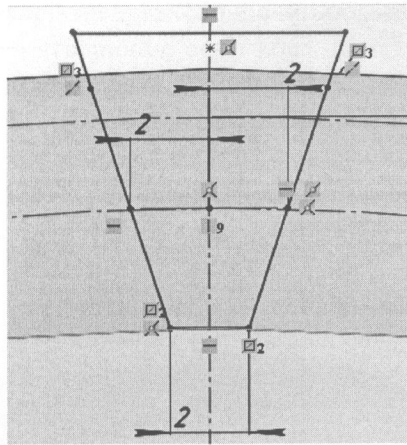




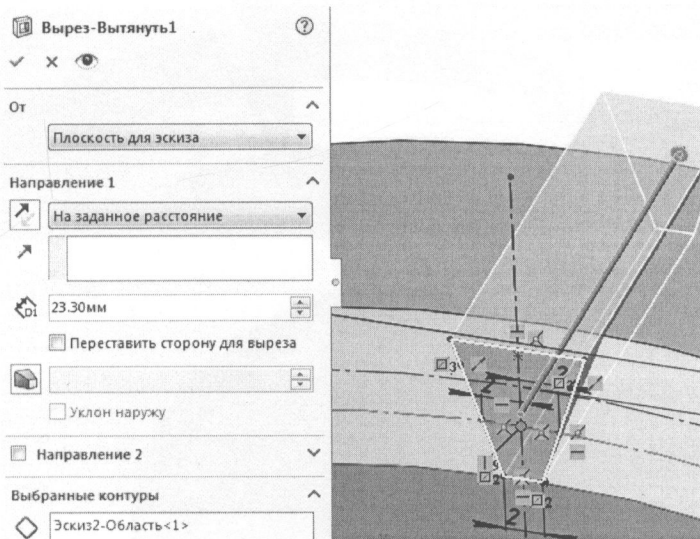
Тепер починаємо створення зубів черв'ячного колеса на торцевій поверхні отриманого диску. Щоб сформувати ескіз профілю западини між зубами на боковій поверхні диску, креслимо два кола – ділильного діаметру $d = 130$ мм та кола вершин $d_h = 134,75$ мм.



Ескіз профілю западини між зубами черв'ячного колеса буде таким:

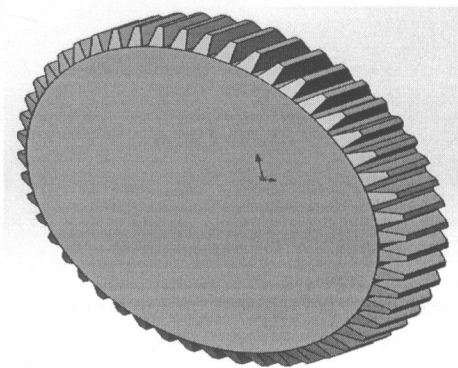
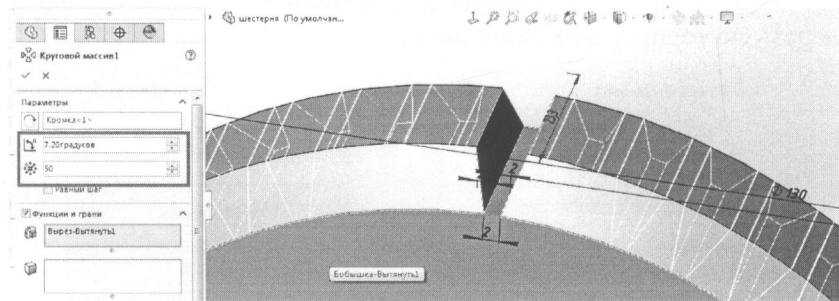
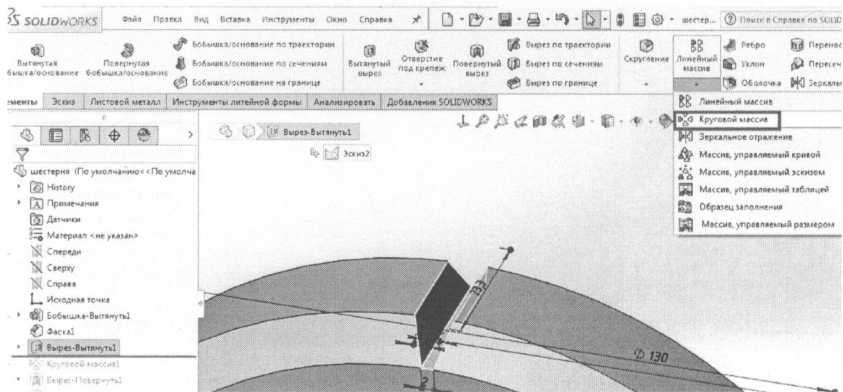


Тривимірну модель западини між зубами робимо на основі отриманого ескизу за допомогою команди «Вирез – Вытянуть» через усю торцеву поверхню диску.

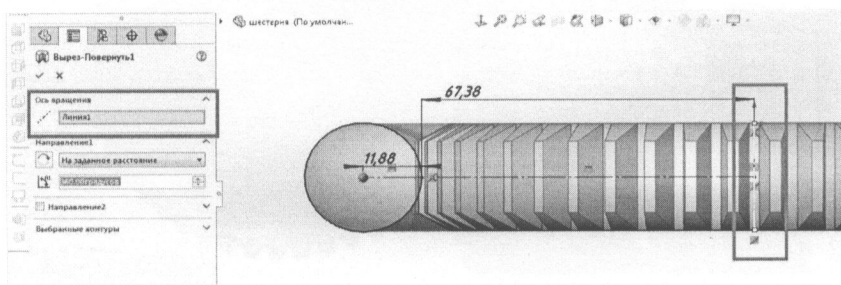
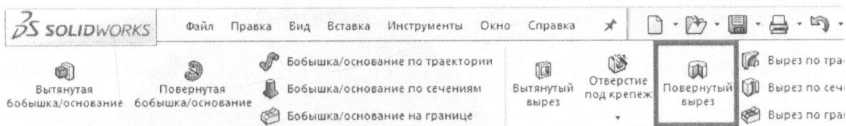
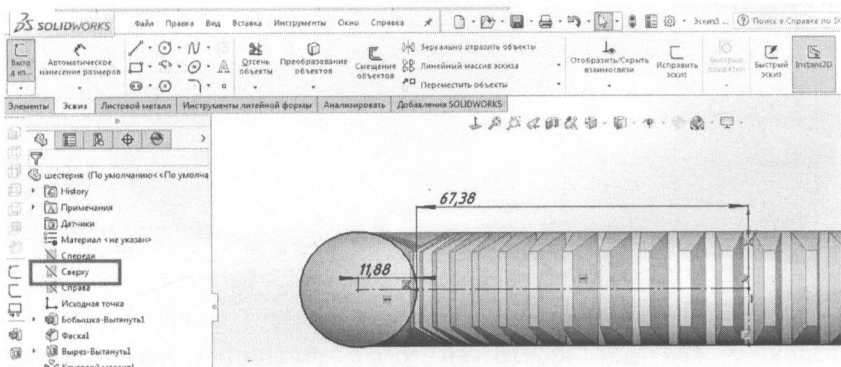


Далі створюємо зуби черв'ячного колеса. Для цього за допомогою команди «Круговой массив» копіюємо попередньо створену западину по колу. Кількість елементів – 50, кут між

элементами (кут повороту одного элемента відносно іншого по колу) $7,2^{\circ}$.

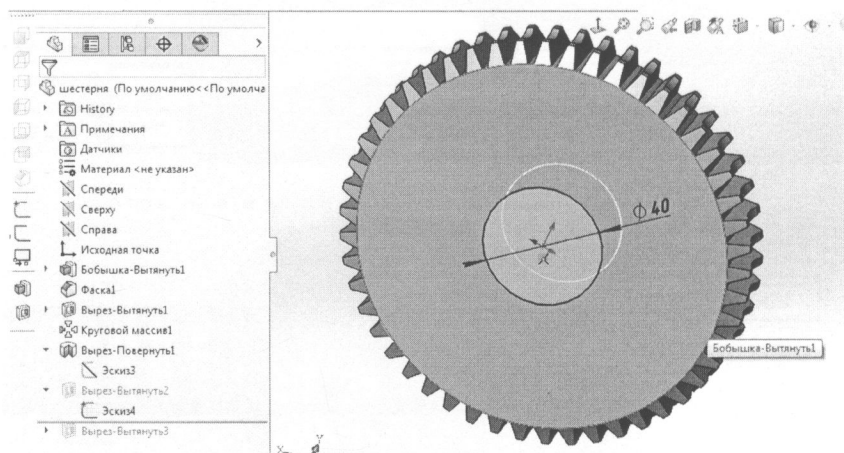
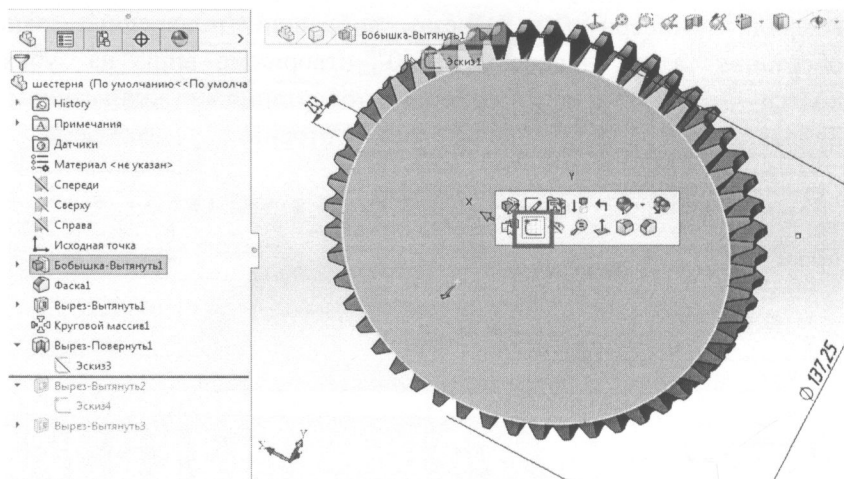


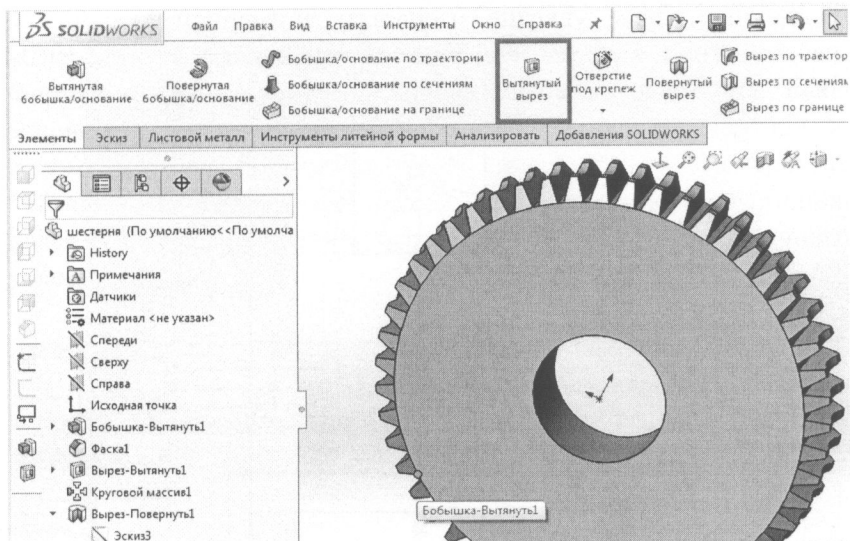
Формуємо виріз на зубах черв'ячного колеса під черв'як. На площині «Сверху» створюємо ескіз кола діаметром $D = 23,75$ мм на відстані від центру колеса завбільшки 67,38 мм. За допомогою команди «Повернутый вырез», вибравши попередньо вісь обертання та кут повороту в 360° , створюємо виріз на зубах колеса методом булевої операції обертання з відніманням. Зубчастий вінець черв'ячного колеса – готовий.



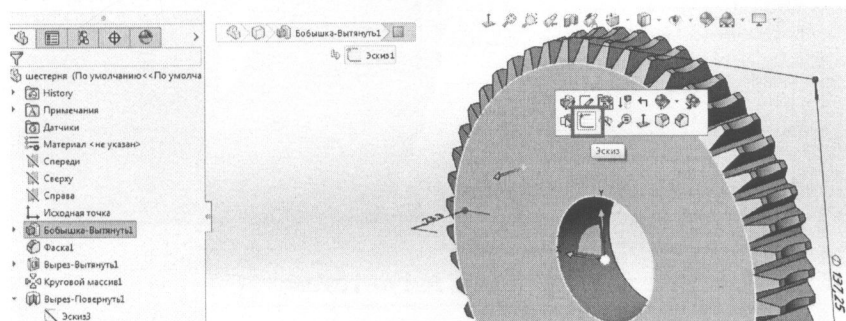
Наступний крок у створенні моделі деталі №1 – формування отвору під посадку колеса на вал. Для цього вибираємо бічну

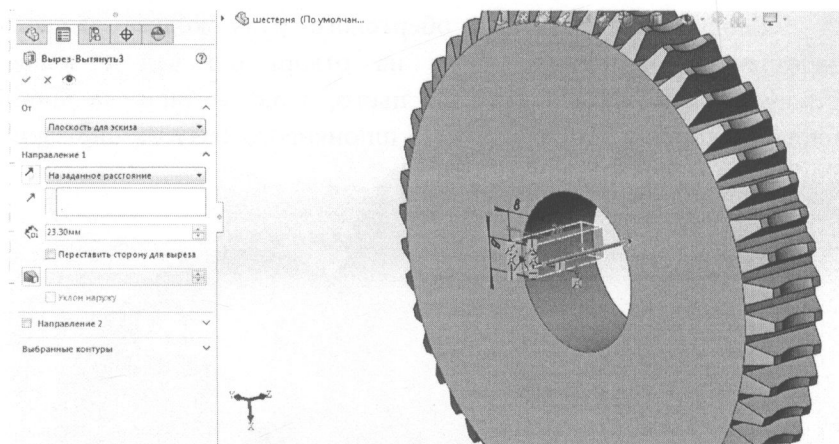
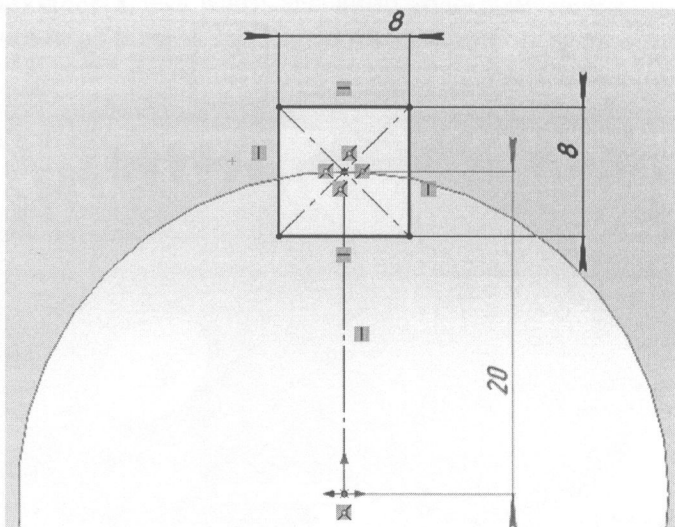
площину колеса та в ескізі креслимо коло діаметром $D = 40$ мм. Далі вирізаємо його за допомогою команди «Витянутый вырез».





Блокування взаємного обертового руху колеса та валу забезпечуємо шпонкою. Тому на отворі під вал у колесі створюємо шпонковий паз. Для цього, знову ж таки, на бічній площині колеса створюємо ескіз шпонкового пазу та вирізаємо його командою «Вытянутый вырез».



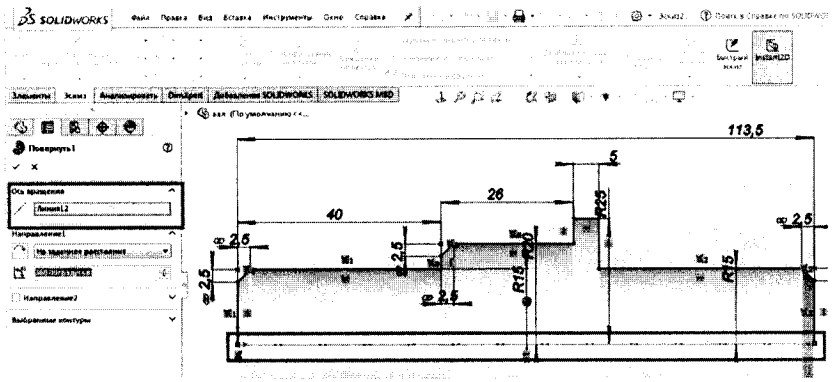
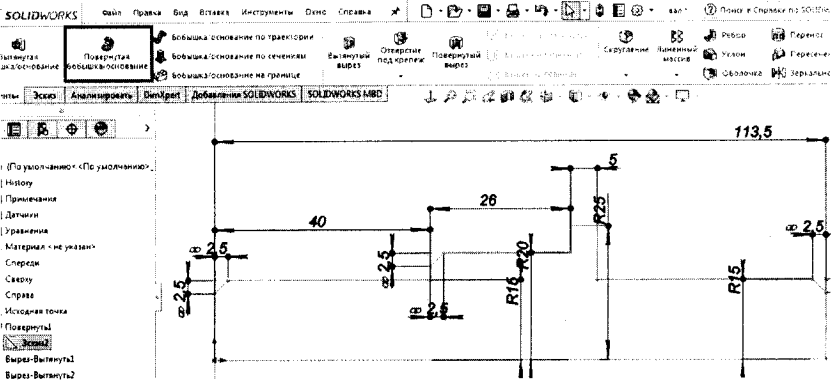


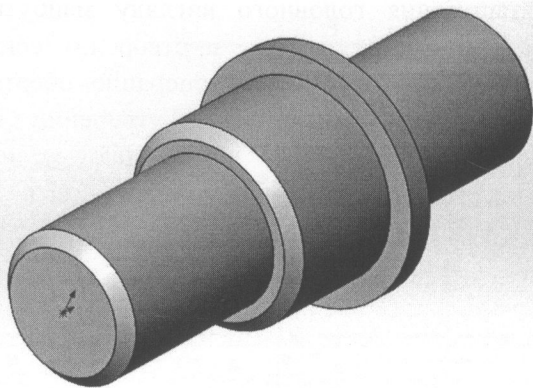
Черв'ячне колесо (деталь №1) – готове.

Створення валу черв'ячного колеса – деталі №2

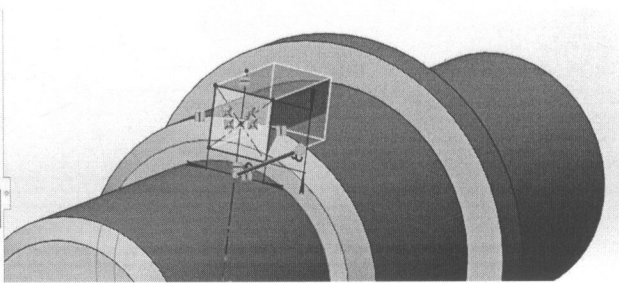
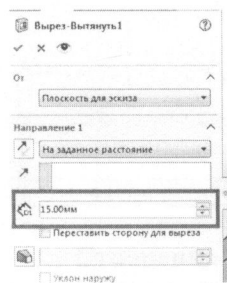
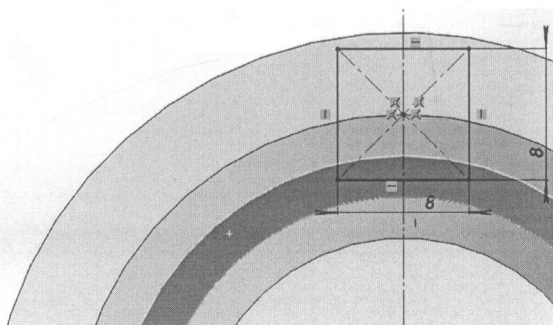
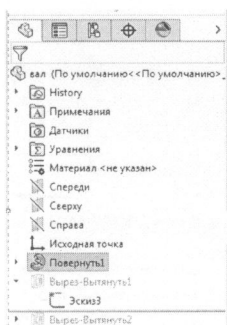
Генеруємо новий файл (проект) у системі SolidWorks та вибираємо опцію зі створення тривимірної деталі. Задасмо

площину розташування головного вигляду майбутньої деталі «Спереди» та виберасмо команду зі створення ескізу основи. Формуємо основу валу під булеву операцію обертання. Ескіз основи – ступінчастий замкнутий контур, утворений з відрізків. За допомогою формотворної операції «Повернута бобышка/основание», попередньо задавши вісь обертання, повертаємо ескіз на повний оберт – 360°. Основа валу черв'ячного колеса – готова.

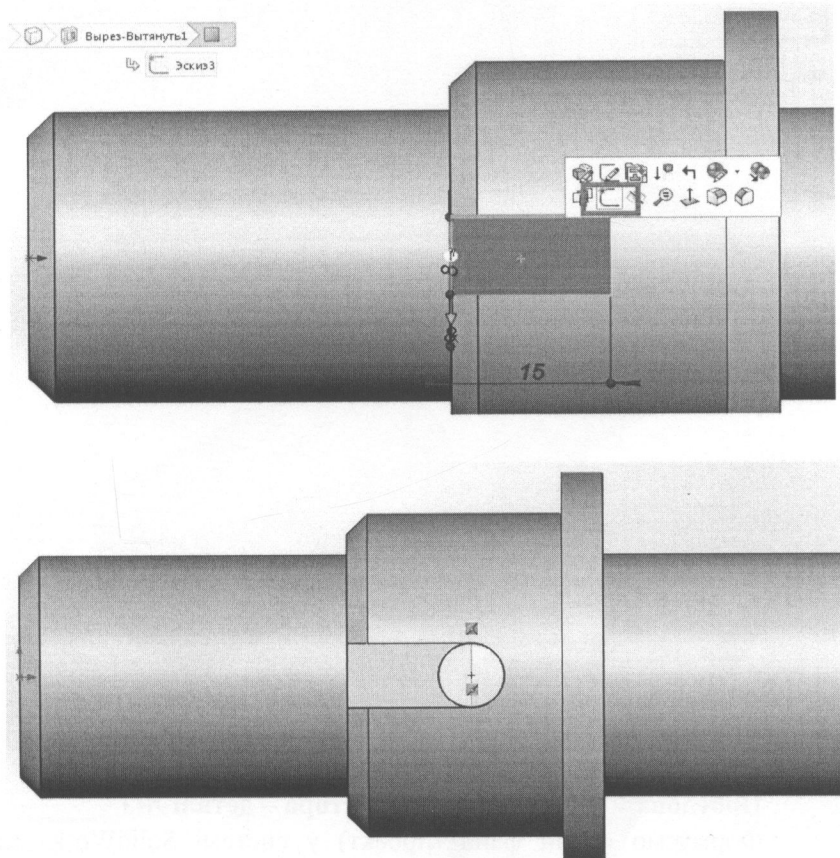


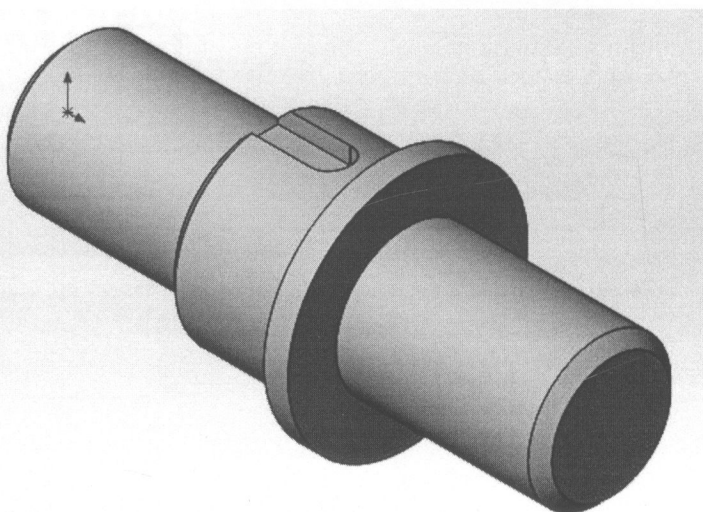
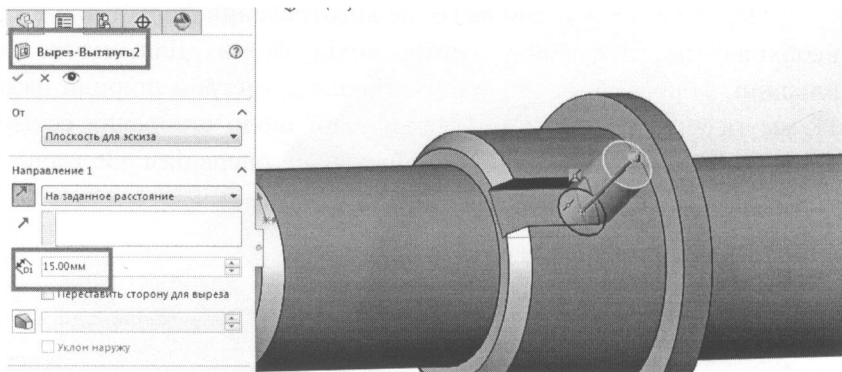


Далі моделюємо шпонковий паз у валі черв'ячного колеса.
Ескіз профілю пазу робимо аналогічно до того, як на колесі.



Оскільки шпонковий паз буде виготовлений фрезеруванням, необхідно передбачити у ньому вихід фрези. Для цього на площині, утвореній пазом, малюємо коло діаметром ширини паза 15 мм та видавлюємо його. Маніпуляції щодо створення ескізу кола та його вирізання у валі аналогічні операціям вирізання, описаним в алгоритмі створення деталі №1.



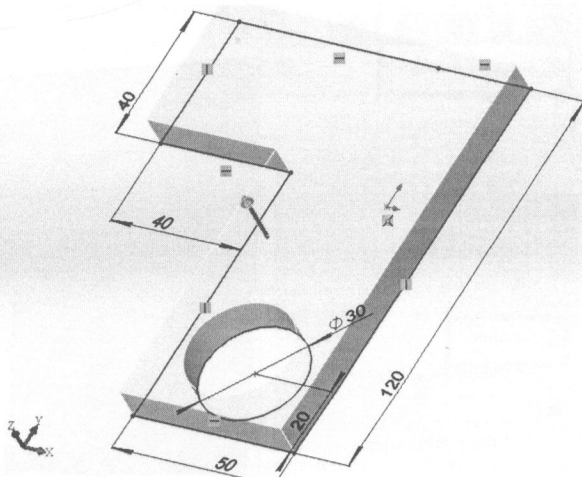
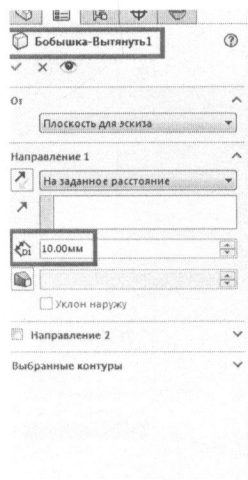
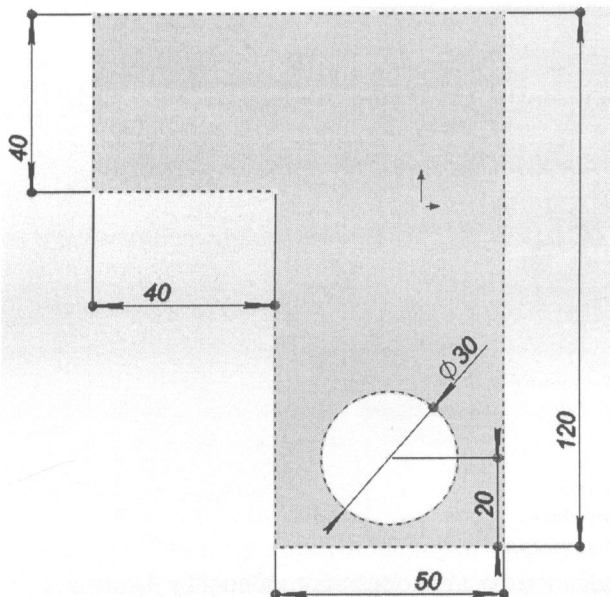


Деталь №2 – 3D-модель вала черв'ячного колеса готова.

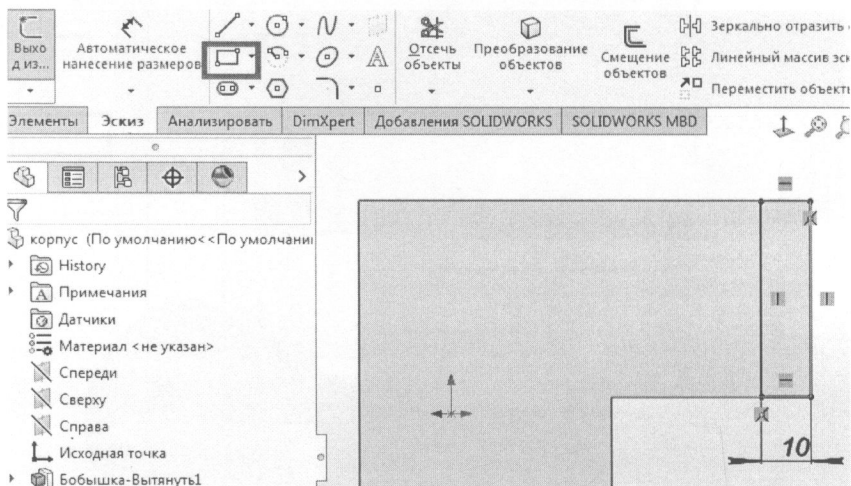
Побудова моделі корпусу редуктора – деталі №3

Формуємо новий файл (проект) у системі SolidWorks та вибираємо опцію зі створення тривимірної деталі. Задаємо площину розташування головного вигляду майбутньої деталі «Спереди» та вибираємо команду з побудови ескізу основи

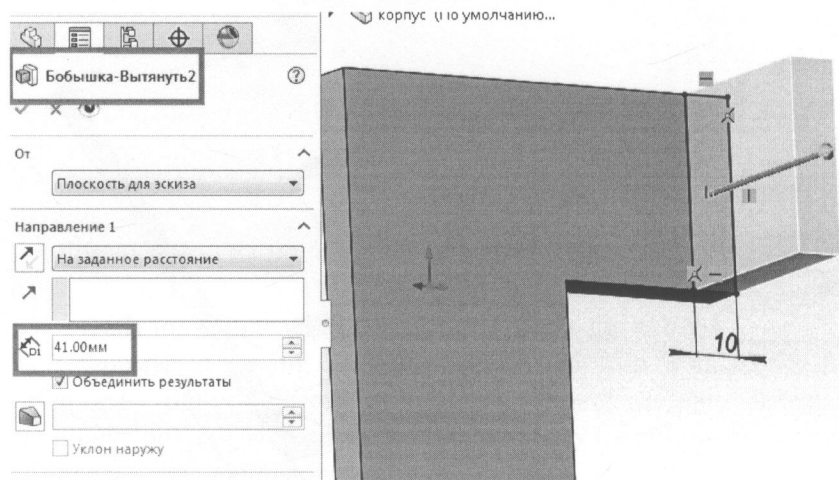
боковини корпусу. Креслимо ескіз боковини корпусу та видавлюємо його на висоту 10 мм.



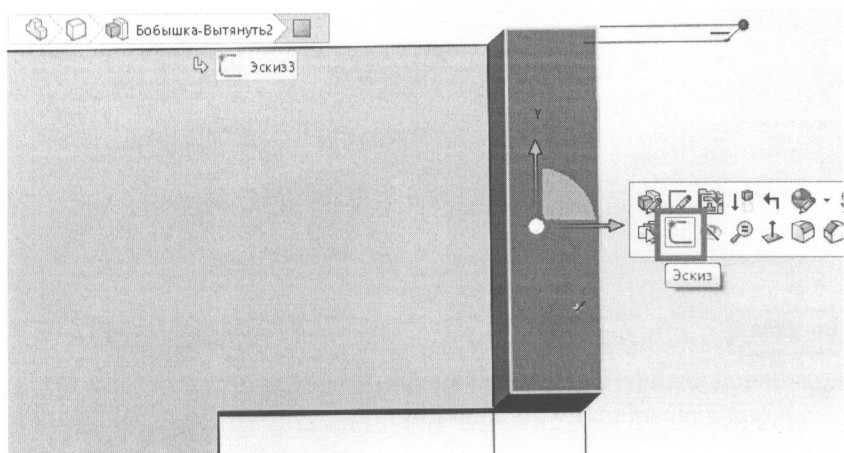
Корпус редуктора виготовлено з двох однакових боковин та поперечок. Тому в площині боковини корпусу креслимо прямокутник – ескіз поперечки.



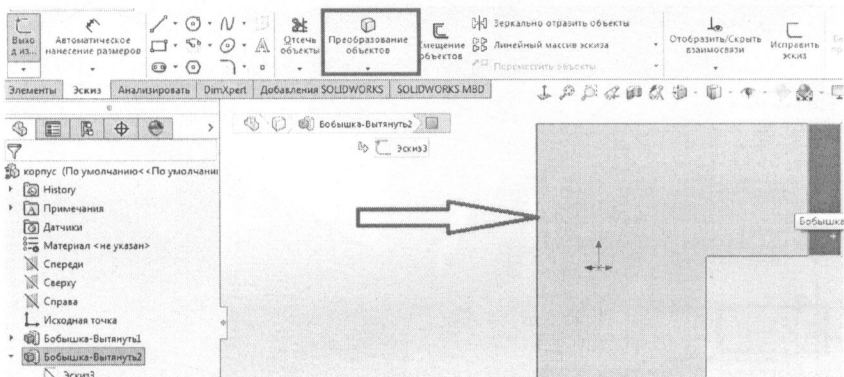
Далі видавлюємо ескіз поперечки на висоту 41 мм.



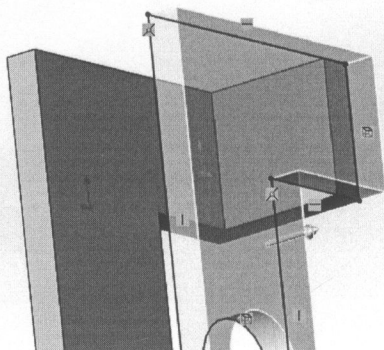
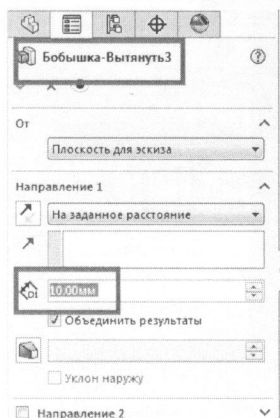
Наступним кроком є копіювання ескізу попередньо створеної боковини та розміщення його на вільному торці поперечки.



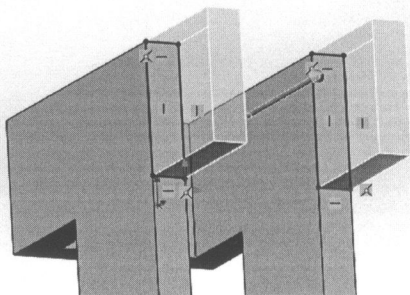
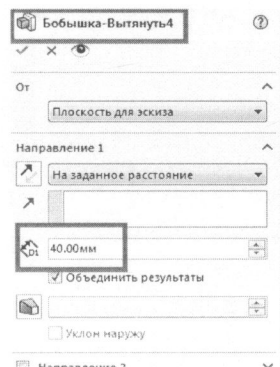
Для цього на вільному торці поперечки формуємо ескіз та вибираємо команду «Преобразование объектов». Далі лівою кнопкою миші клікаємо на контурі попередньо створеної боковини.

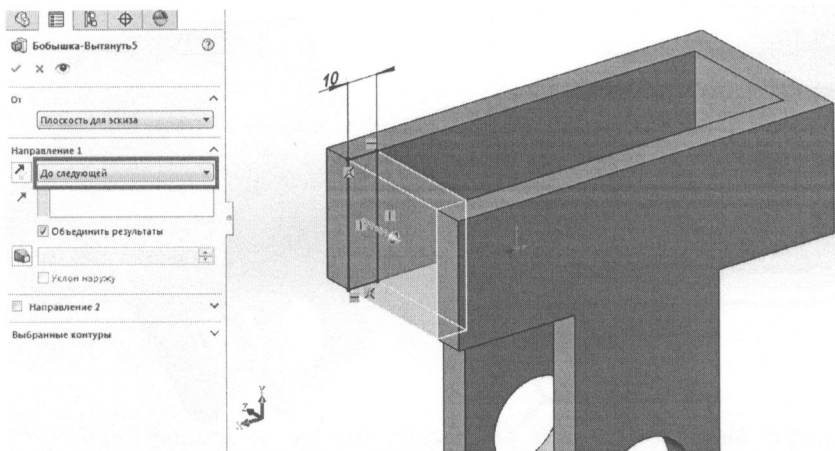


У результаті проведених маніпуляцій контур боковини скопійовано у площину вільного торця поперечки корпусу. Далі видавлюємо цей контур на висоту 10 мм та отримуємо другу боковину.

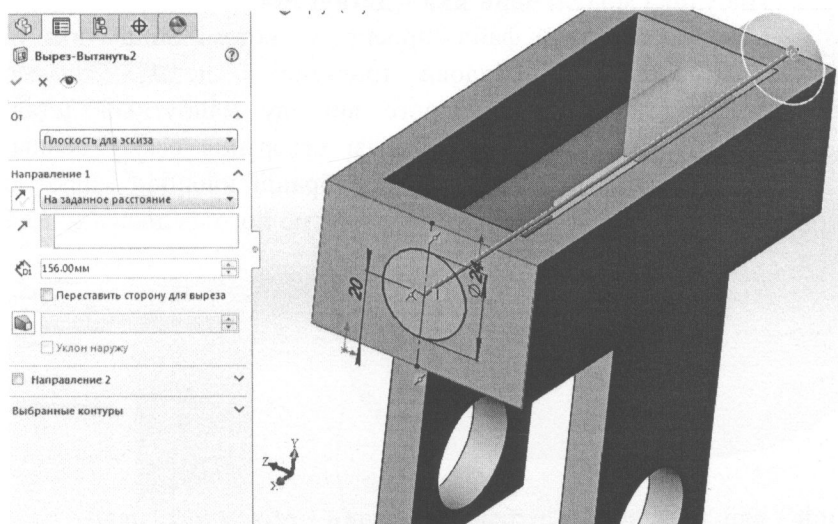


Наступним кроком у побудові моделі корпусу черв'ячного редуктора є одночасна добудова двох боковин та другої поперечки. Знову ж таки, робимо ці побудови формотворною командою видавлювання, згенерувавши попередньо плоскі замкнуті прямокутні контури ескізів на відповідних площинах корпусу редуктора.

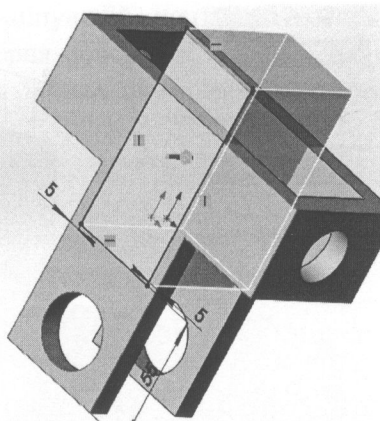
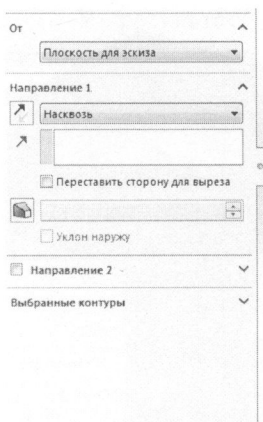




Далі за допомогою булевої операції видавлювання з відніманням формуюмо отвори під черв'як у поперечках корпусу.



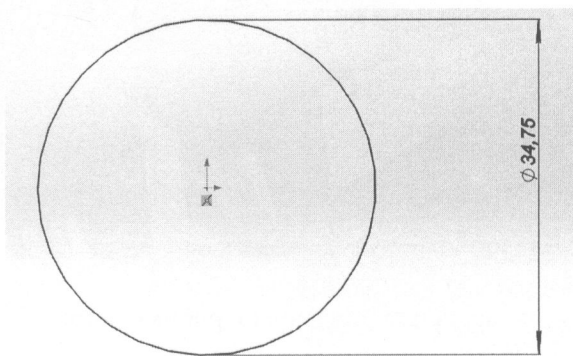
Потім аналогічною операцією робимо вирізи у боковинах корпусу.

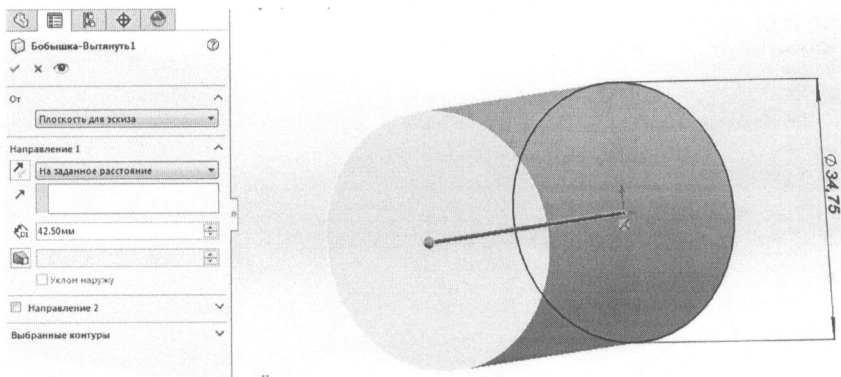


У результаті проведених операцій отримаємо модель корпусу черв'ячного редуктора – деталь №3.

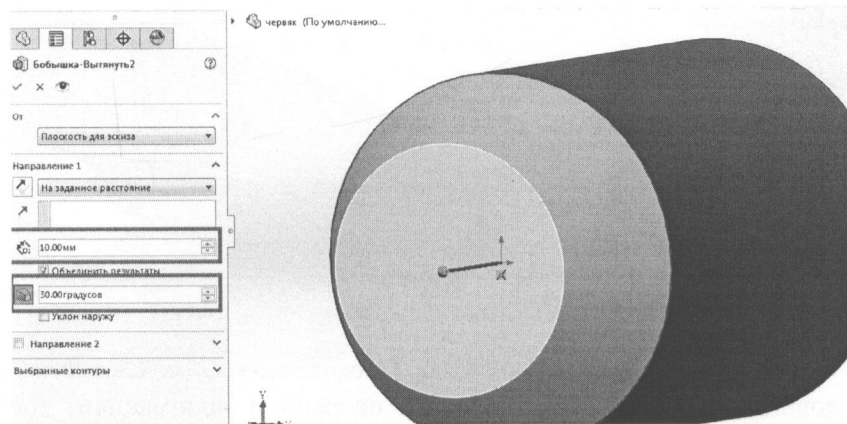
Побудова моделі черв'яка – деталі №4

Створюємо новий файл (проект) у системі SolidWorks та вибираємо опцію з побудови тривимірної деталі. Задасмо площину розташування головного вигляду майбутньої деталі «Спереди» та вибираємо команду зі створення ескізу основи черв'яка (його тіла) – циліндра. У вибраній площині малюємо коло діаметром $D = 34,75$ мм та видавлюємо його на довжину 42,5 мм.

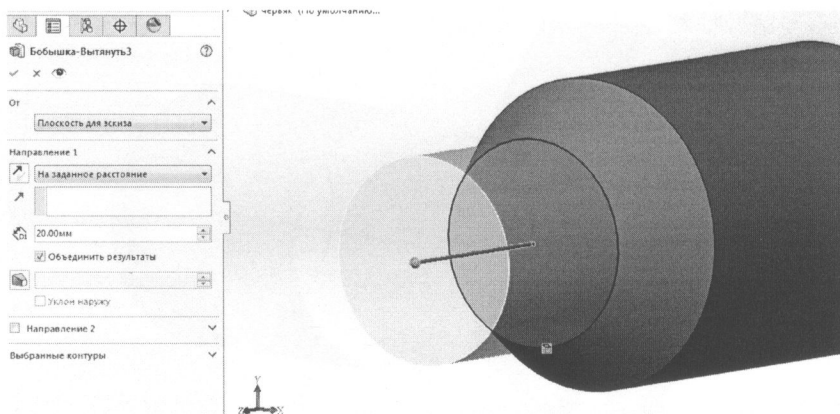




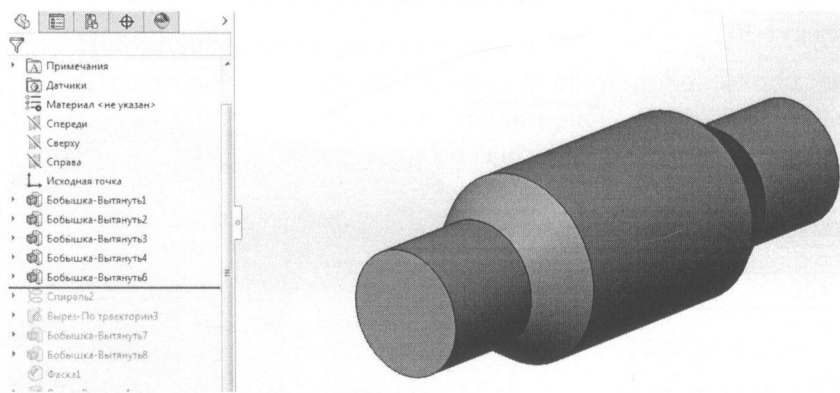
Далі формуємо зрізані конуси на тілі черв'яка (на торцях отриманого циліндра). Для цього малюємо ескізи співрозмірних кіл на торцях циліндру. Використовуючи команду «Преобразование объектов», видавлюємо кола на довжину 10 мм та кут 30° .



Далі формуємо опорні поверхні черв'яка для його розміщення в корпусі редуктора (операція видавлювання на торцях тіла черв'яка).

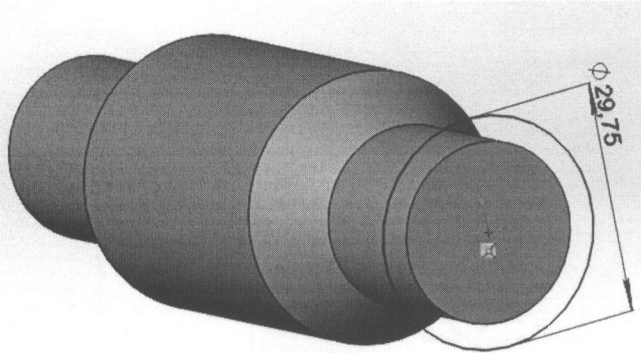


У результаті отримаємо заготовку черв'яка без гвинтового профілю.

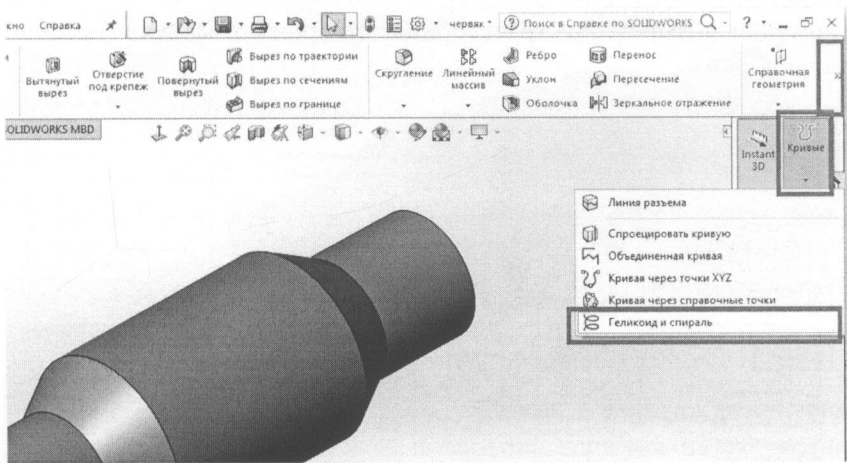


Побудова профілю черв'яка. Профіль можна змоделювати за допомогою булевої кінематичної операції з відніманням. Для цього необхідно створити траєкторію руху перерізу профілю вздовж тіла черв'яка та сам переріз. Утворене тіло потрібно відокремити від тіла черв'яка.

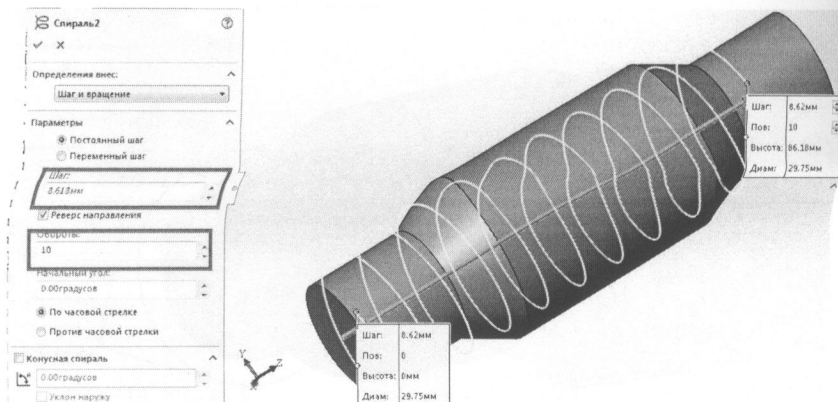
Спочатку побудуємо гвинтову траєкторію для проведення кінематичної операції. На одному із торців отриманого валу (тіла черв'яка) створюємо коло діаметром $D = 29,75$ мм.



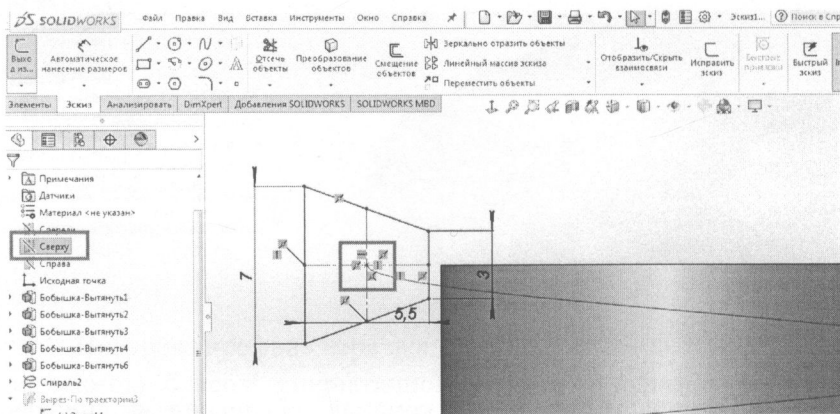
На панелі елементів вибираємо команду «Кривые», а в ній команду «Геликоид и спираль».

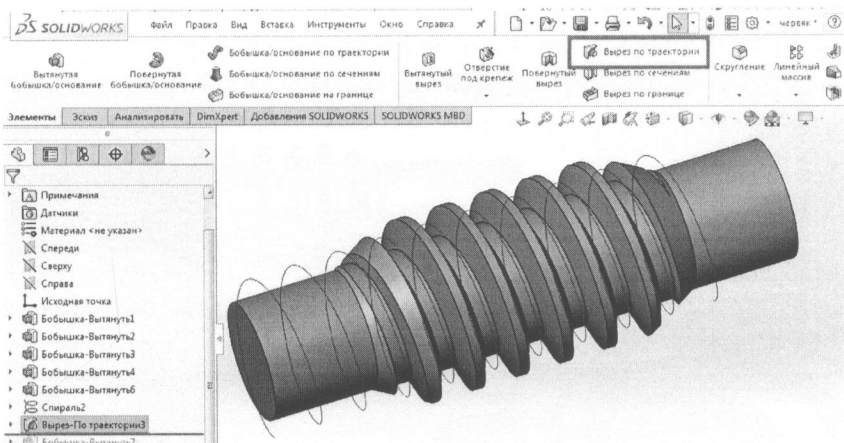
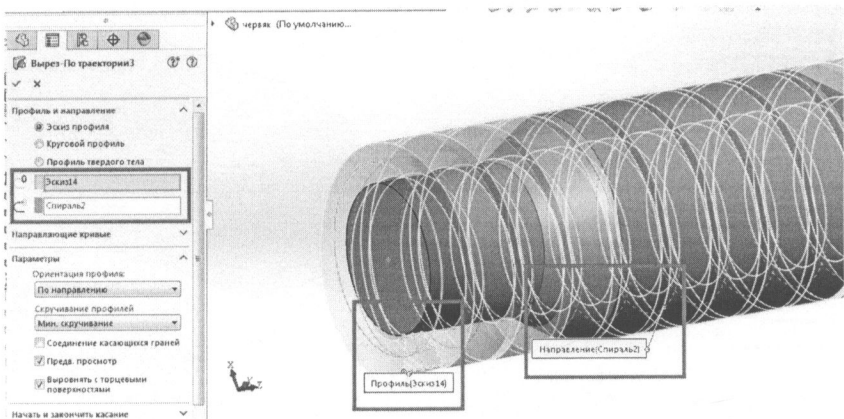


У контекстному меню команди «Геликоид и спираль» вводимо крок між витками спіралі 8,618 та кількість обертів спіралі 10. У результаті отримуємо траєкторію профілю черв'яка.

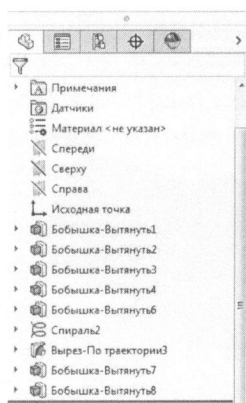
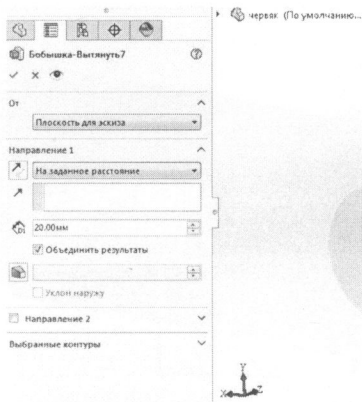


Далі починаємо побудову перерізу профілю черв'яка. На площині «Сверху» створюємо ескіз контуру впадини профілю черв'яка. Центр ескізу з'єднуємо зі спіраллю. За допомогою команди «Вырез по траектории» створюємо модель профілю черв'яка.

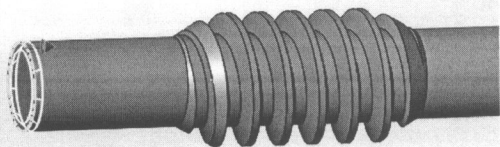
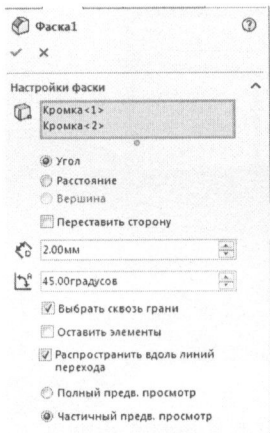




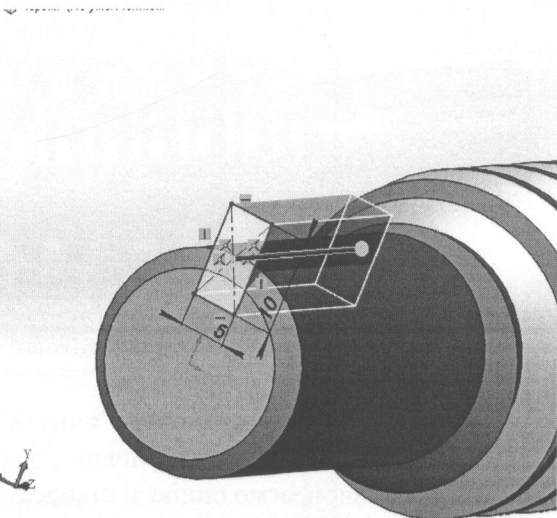
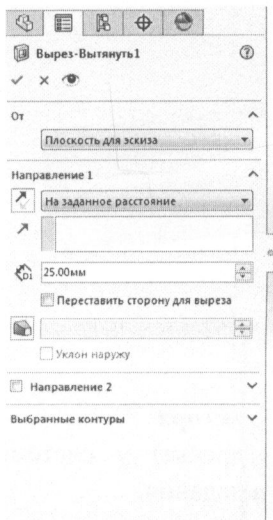
З міркувань компоновання черв'яка в корпусі редуктора збільшуємо довжину опорних поверхонь черв'яка на 20 мм за допомогою формотворної операції видавлювання.

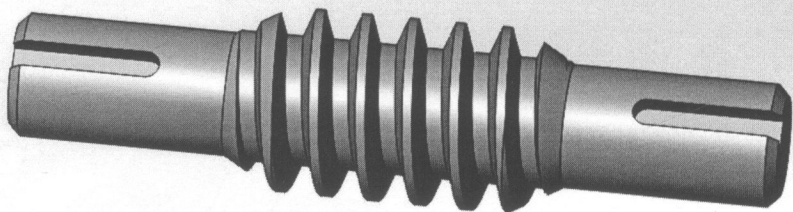
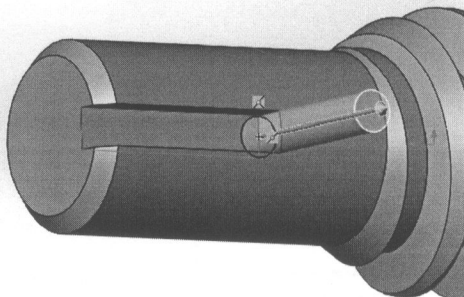
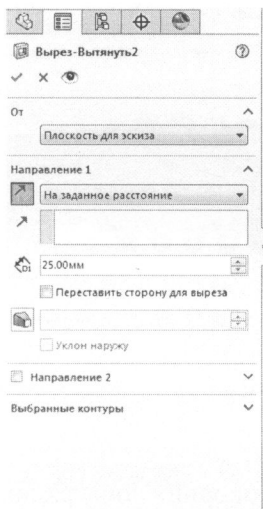


На завершальном етапі моделювання черв'яка редуктора створюємо фаски на його торцях розміром 2 мм на 45° .



Також вирізаємо шпонкові пази на опорних поверхнях черв'яка для його фіксації в корпусі редуктора. Методика побудови пазів аналогічна до тієї, що у валі черв'ячного колеса.

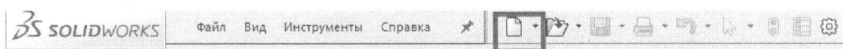


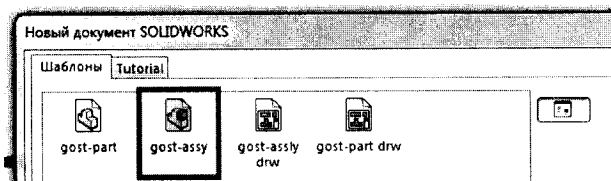


Деталь №4 – модель черв'яка готова.

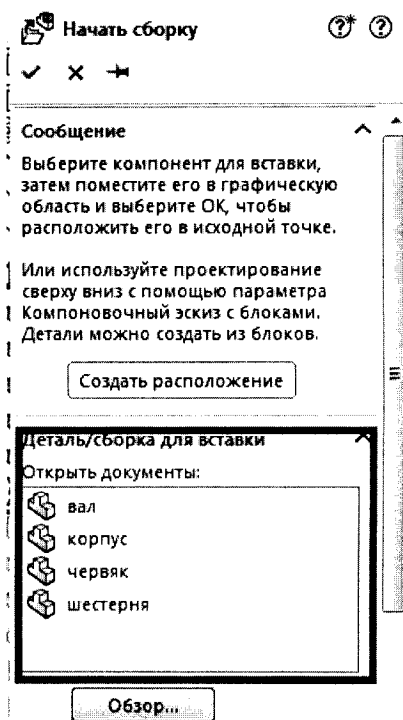
Виконання складання черв'ячного редуктора

Насамперед створюємо новий файл (проект) у системі SolidWorks та вибираємо опцію зі створення складання.

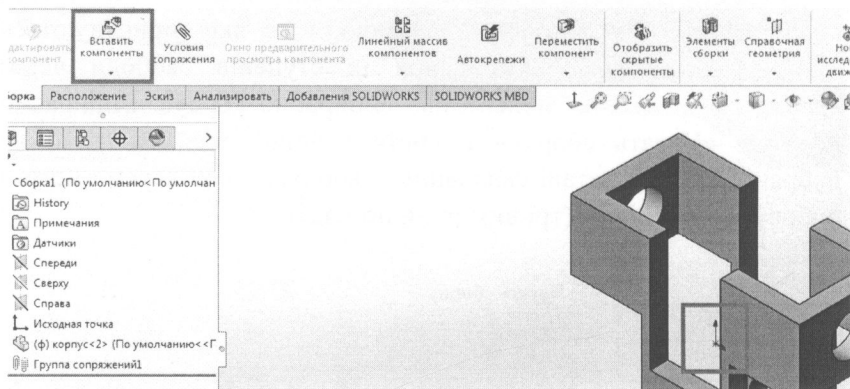




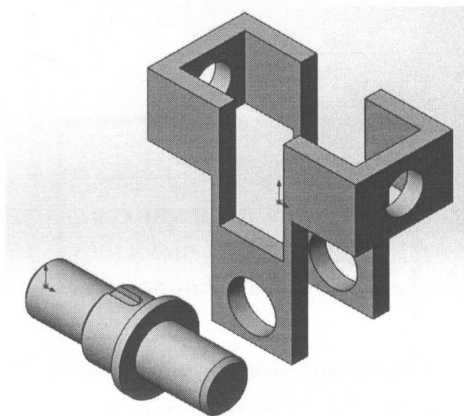
За базу для деталі складання (деталь, яка завантажується першочергово, вважається нерухомою, і до якої приєднуються інші деталі, шляхом зменшення їх ступенів свободи через спряження їх граней) попередньо вибираємо корпус. Вибираємо команду «Начать сборку» в системі SolidWorks, клікаємо на вибраній базовій деталі складання – корпусі, перетягуємо його в робочу зону системи (тривимірний простір).



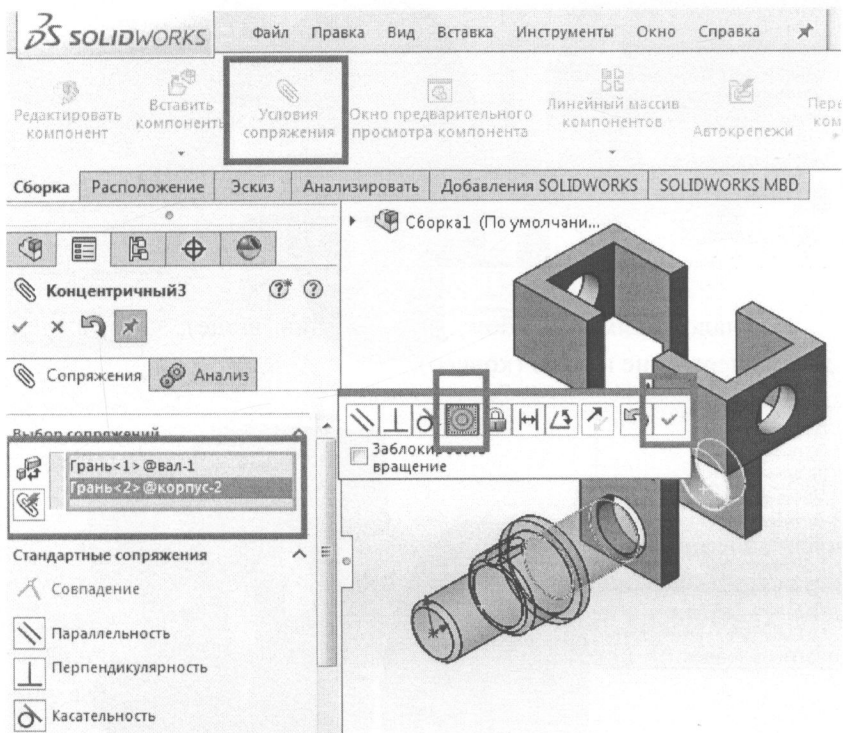
Після цього наводимо курсор миші на центр осей координат робочої зони. Після проведення вказаних маніпуляцій базова деталь завантажена. У вікні дерева побудови складання навпроти значка деталі корпус з'явилась літера «ф» – фіксована деталь у просторі. Далі вибираємо команду «Вставити компоненти» для завантаження наступної деталі – валу черв'ячного колеса.



Аналогічно, як і з корпусом – вибираємо з меню, що з'явилось, деталь вал (вал черв'ячного колеса), та переміщаємо його в робочу зону системи.

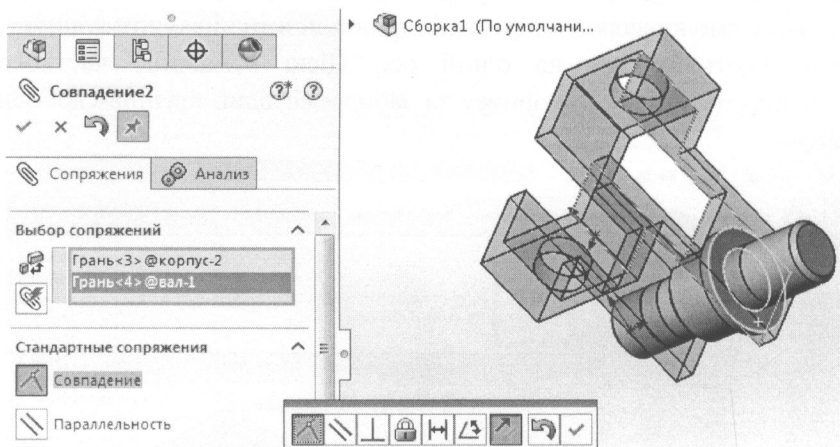


Тепер необхідно зорієнтувати вал відносно корпусу та приєднати його у відповідних місцях. Для цього вибираємо команду «Условия сопряжения». З'являється меню спряжень (обмежень), які можна накласти на грані завантаженого фіксованого корпусу та валу. Вибираємо спряження «Соосность» та вказуємо курсором миші циліндричні поверхні валу та корпусу, які мають лежати на одній осі. Цією командою частково орієнтуємо вал щодо корпусу та забираємо один ступінь свободи валу.

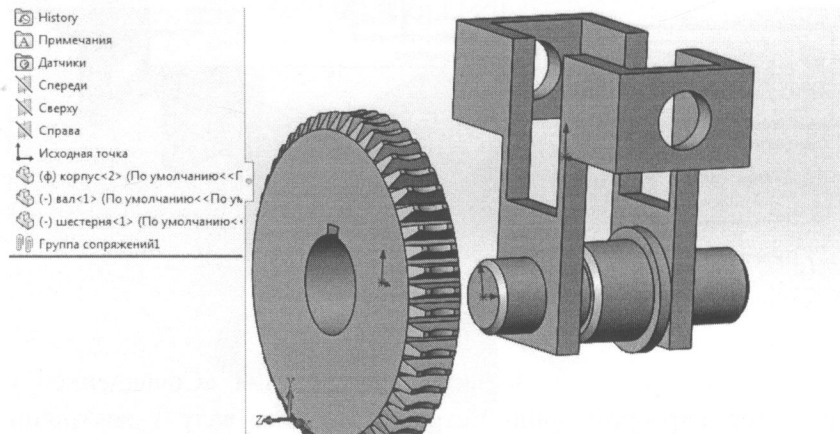


З цього ж меню вибираємо спряження «Совпадение» та вказуємо курсором миші потрібний торець валу і внутрішню поверхню корпусу, які мають дотикатись. Цією командою

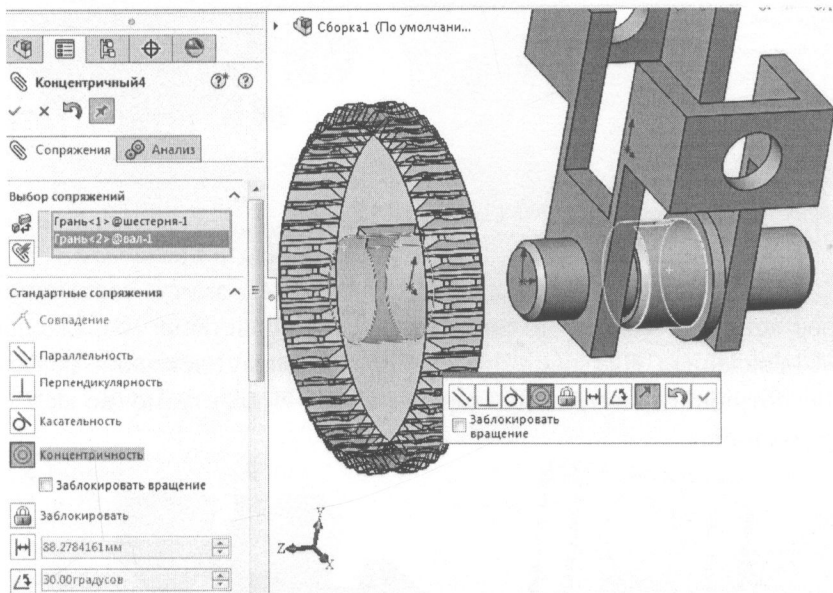
остаточно орієнтуємо вал у корпусі та забираємо ще один ступінь свободи валу. Тепер він може лише обертатись у корпусі редуктора (залишився один ступінь свободи відносно фіксованої деталі), що є логічним, виходячи з умов роботи редуктора.



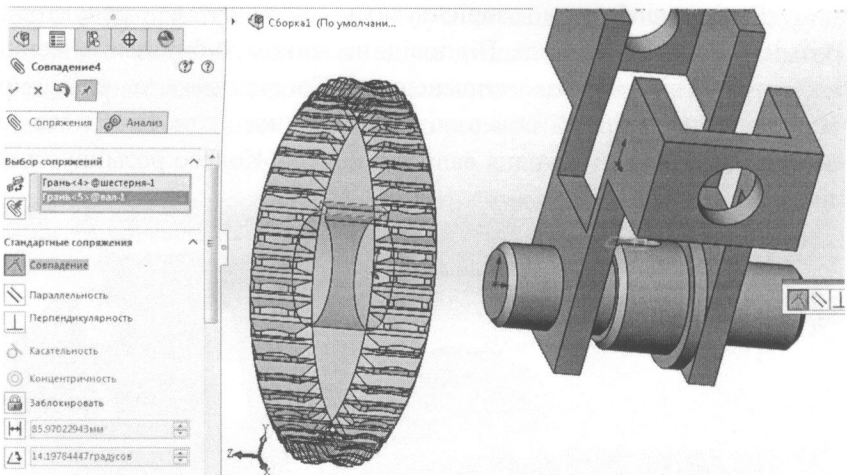
Аналогічним способом, як і вал (див. вище), завантажуюмо деталь черв'ячне колесо (колесо).



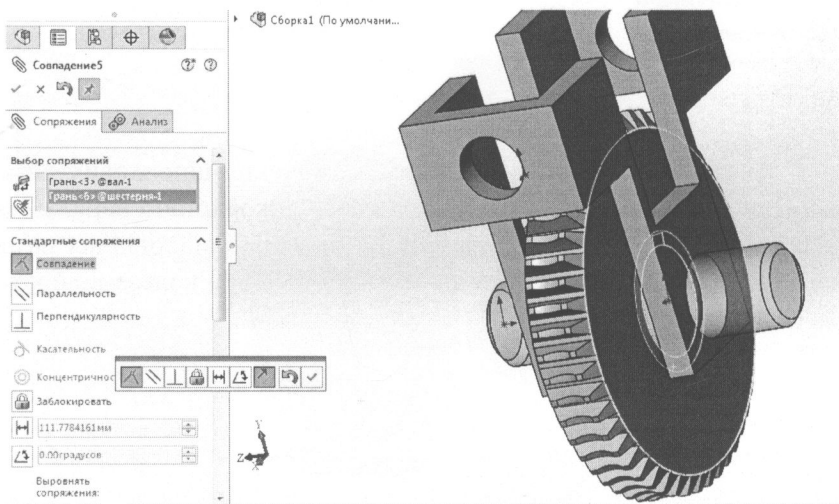
Далі необхідно зорієнтувати колесо в редукторі, розмістивши його на валі. Відповідним чином вибираємо в меню «Условия сопряжения» спряження «Соосность» та клікаємо мишею на внутрішній поверхні циліндричного отвору колеса та зовнішній поверхні ступеня валу під колесо. Колесо розміщується на одній осі з валом.

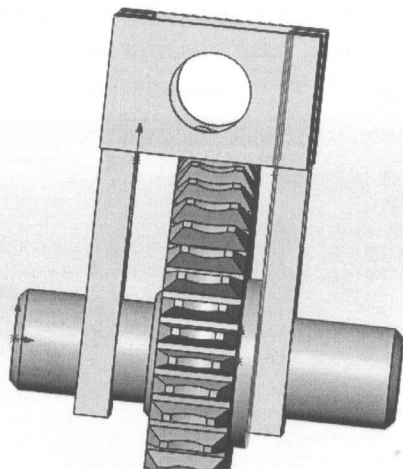
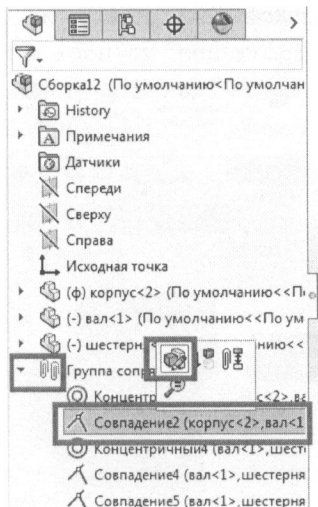


Наступним кроком є взаємне розміщення шпонкових пазів на черв'ячному колесі та валі. Для цього використано спряження «Параллельность» та вказано внутрішні поверхні відповідних пазів на валі та колесі. Отже, вже два ступені свободи колеса відносно валу зв'язано.

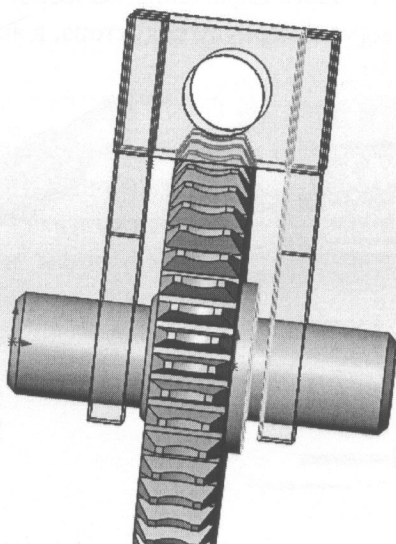
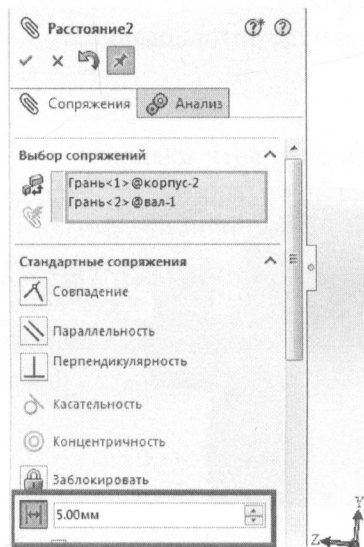


Останньою маніпуляцією, яка дає змогу остаточно розташувати колесо в редукторі, є використання сопряження «Совпадение». Вказавши мишею бічну (торцеву) поверхню колеса та потрібний внутрішній торець валу – орієтуємо колесо в редукторі.

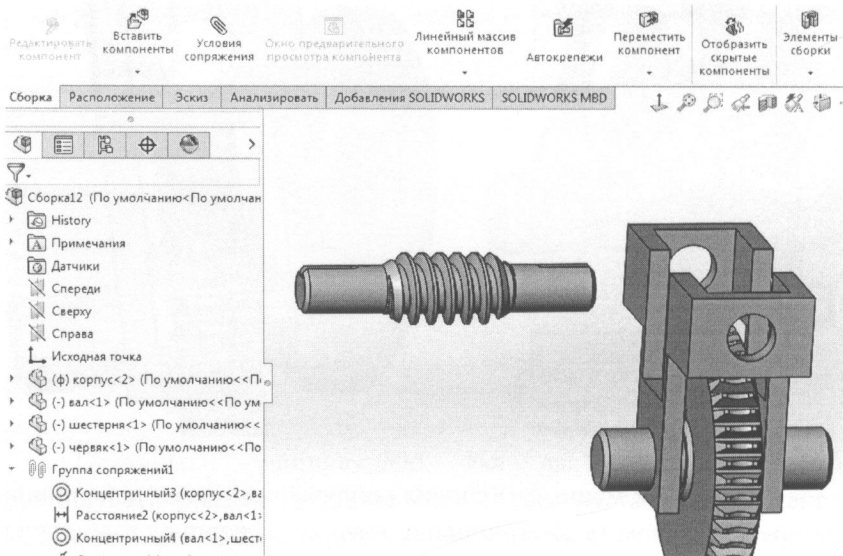




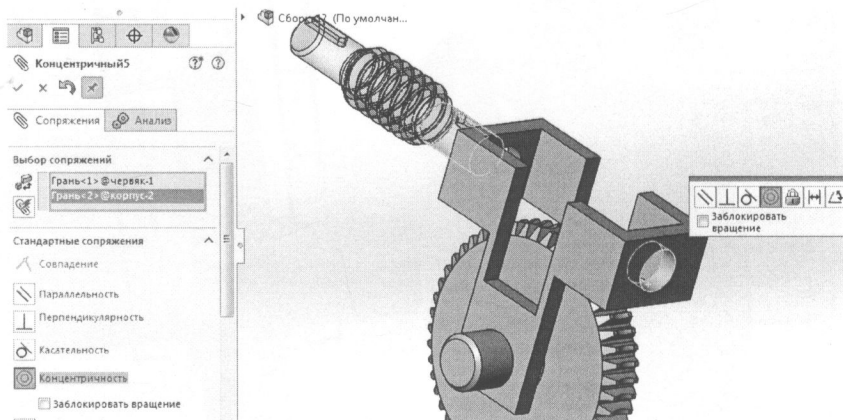
У цьому ж меню – «Условия сопряжения» задаємо величину зазору між валом та внутрішньою поверхнею корпусу завбільшки 5 мм. Тепер уже три деталі складання повністю взаємоорієнтовані.



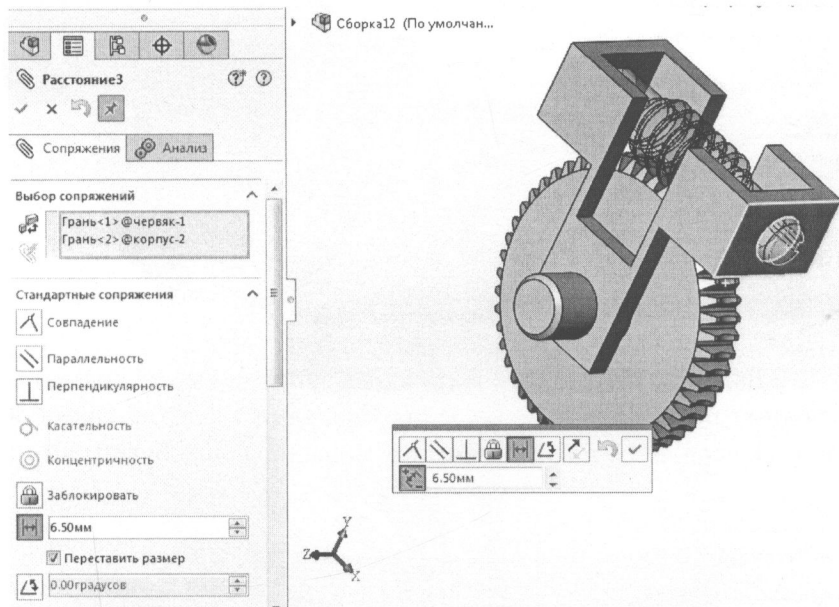
Аналогічним чином, як вал і колесо, завантажуюмо черв'як.



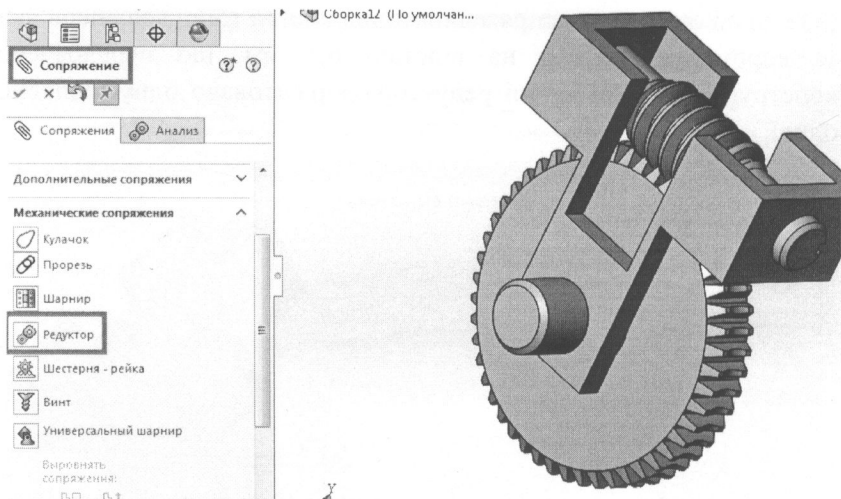
Через спряження «Соосность» орієтуємо його вздовж осі з отворами корпусу редуктора, в яких він буде розташований.



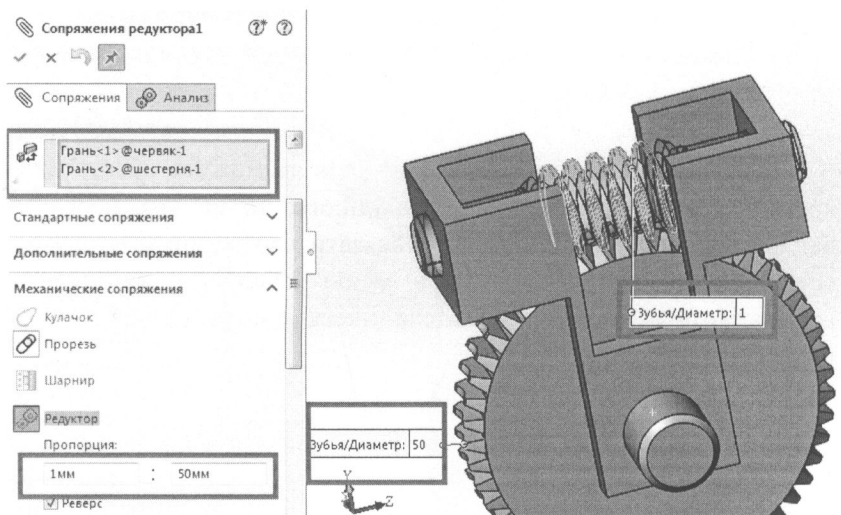
Далі орієнтуємо спряженнями відповідні торці валу черв'яка та корпусу редуктора на відстані 6,5 мм, що передбачено конструктивно. Всі деталі редуктора зорієнтовано одну відносно одної.



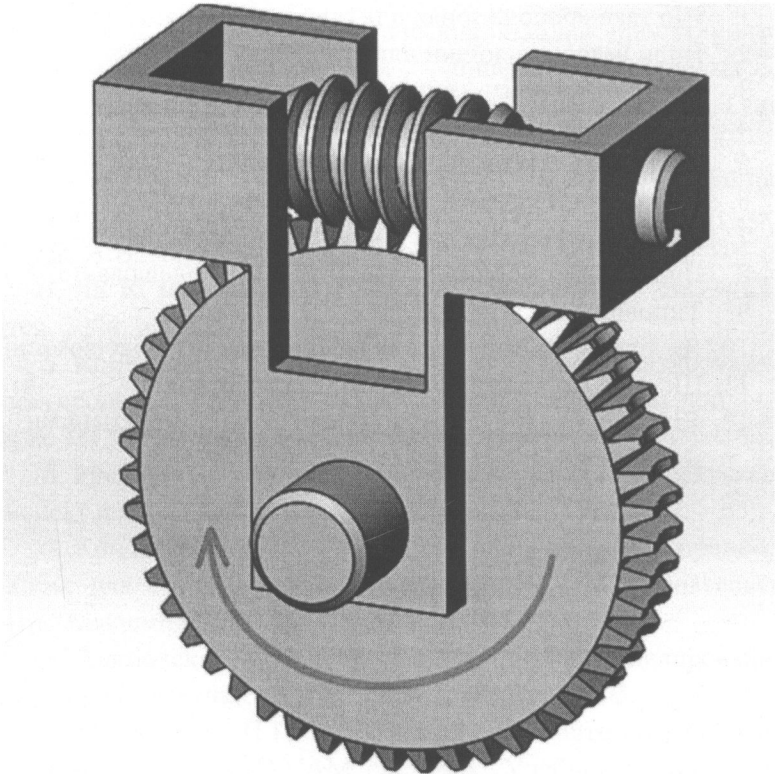
Оскільки черв'ячне колесо та черв'як можуть обертатись у корпусі редуктора один відносно одного, то на них необхідно накласти механічні спряження – вказати параметри їх взаємного обертального руху. Для цього в меню «Условия сопряжения» вибираємо вкладку команд «Механические сопряжения», а в ній команду «Редуктор».



Далі вказуємо поверхні тіл взаємодії (черв'яка та колеса) та вводимо передавальне відношення черв'ячної пари (на колесі 50 зубів, а черв'як є однозахідним, тож співвідношення буде 1:50).



Отже, складання «Редуктора черв'ячного» з рухомими елементами готове. Можна перевірити взаємодію елементів черв'ячного колеса та черв'яка (реверсивний обертовий рух), натиснувши на колесо лівою кнопкою миші та обертаючи його.



Цим прикладом проілюстровано методику 3D-моделювання в середовищі CAD-системи при створенні тривимірної моделі об'єкту – виробу на прикладі черв'ячного редуктора та системи SolidWorks. Наведений приклад, а саме методику моделювання, підібрано з тих міркувань, щоб максимально охопити кількість команд системи та формотворних тривимірних операцій.

Пропрацювавши приклад самостійно в системі, можна отримати базові навички з практичного 3D-моделювання, а далі розвивати їх самотужки.

Контрольні запитання

1. Що таке «робоча зона» для створення 3D-моделі?
2. Види базових площин для створення 3D-моделі?
3. Що таке «основа» тривимірної моделі?
4. Що таке «ескіз» форматворної операції?
5. Вимоги до ескізів при 3D-моделюванні?
6. Особливості ескізу для операції обертання?
7. Особливості ескізу для кінематичної операції?
8. Види форматворних операцій при 3D-моделюванні?
9. Типовий алгоритм побудови 3D-моделі?
10. Як відбувається процес складання при 3D-моделюванні?
11. Що таке «спряження» при 3D-моделюванні?
12. Які маніпуляції можна проводити з отриманими 3D-моделями?

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Малахов Е.В. Элементарные объекты как базис объектных ядер предметных областей [Текст] / Е.В. Малахов, В.М. Тонконогий // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – К.: Техніка, 2010. – № 01 (77). – С. 139–141.
2. Прейс В.В. Методологические основы проектирования технологических машин и аппаратов пищевых и перерабатывающих производств / В.В. Прейс. – Тула: ТулГУ, 2010. – 156 с.
3. Разработка САПР. В 10 кн. Кн. 1. Проблемы и принципы создания САПР: Практ. пособие /А.В. Петров, В.М. Черненко; Под ред. А.В. Петрова. – М.: Высш. шк., 1990. – 143 с.
4. Ли К. Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / К. Ли. – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.
5. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: учеб. для вузов: 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Е. Баумана, 2002. – 336 с.
6. Русанов С.А. Введення в автоматизоване проектування. Конспект лекцій / С.А. Русанов. – Херсон: ХНТУ6, 2009. – 63 с.
7. Кондаков А.И. САПР технологических процессов: учебник для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издательский центр “Академия”, 2007. – 272 с.
8. Алямовский А.А. и др. Компьютерное моделирование в инженерной практике. – СПб: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.
9. Мазин П.Г. Сквозное автоматизированное проектирование в CAD/CAM системах: Учебное пособие / П.Г. Мазин, А.В. Шаламов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. – 83с.
10. Гуменюк Л.О. Основы систем автоматизованого проектування. Конспект лекцій / Л.О. Гуменюк. – Луцьк: ЛНТУ, 2009. – 91 с.
11. Автоматизация производства: Учебник / В.Н. Брюханов, А.Г. Схиртладзе, В.П. Вороненко; Под ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Высш.шк., 2005. – 367 с.

12. Бабічева О.Ф. Комп'ютерне проектування електромеханічних пристроїв: Навчальний посібник / О.Ф. Бабічева, С.М. Єсаулов. – Харків: ХНАМГ, 2009. – 281 с.

13. Ившин К.С. Принципы современного трехмерного моделирования в промышленном дизайне. / К.С. Ившин, А.Ф. Башарова // Архитектон: известия вузов №39 / 2012. – С. 101-113.

14. Russo M. Polygonal Modeling: Basic and Advanced Techniques (Wordware Game and Graphics Library) / M. Russo. – SudBury: Jones & Bartlett Learning, 2005. – 412 p.

15. Lombard M. Solid Works 2011 Bible. / M. Lombard. – Indianapolis: Wiley, 2005. – 832 p.

16. Krüger R. Three Dimensional Finite Element Analysis of Multidirectional Composite DCB, SLB and ENF Specimens / R. Krüger // ISD-Report – 1994. – No.2. – pp. 53-61.

17. Khabazi M. Algorithmic modeling with Grasshopper, 2009 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://proquest.safaribooksonline.com/1587050773>

18. Basharova A. Bishenka design [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://cargocollective.com/bishenka>

19. DAVID Vision Systems GmbH. David 3.x user manual pages [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.david-laserscanner.com/wiki/david_3_user_manual/overview

20. Shumacher P. Parametricism as Style-Parametricist Manifesto, 2008 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.patrikschumacher.com/Texts/Parametricism%20as%20Style.htm>

21. Brakke K. Triply Periodic Minimal Surfaces, 2000 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.susqu.edu/brakke/evolver/examples/periodic/periodic.html>

22. Geenen B. Gaudi Stool [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.studiogeenen.com/projects>

23. Концепція підготовки інженерів у віртуальних технологіях. Електронний методичний посібник / [Пивняк Г.Г., Франчук В.П., Заболотний К.С., Панченко Е.В.]. – Дніпропетровськ: Нац. гірський ун-т, 2008.

24. Прохоренко В.П. Solid Works. Практичне керівництво / В.П. Прохоренко. – М.: Біном-прес, 2004. – 448 с.
25. Щекин И.В. Работа з великими складками в Solid Works. / И.В. Щекин // «RM-Magazine». – 2006. – №11. – С. 23-27.
26. Алямовский А.А. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике [Електронний ресурс] / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов. – СПб: БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с.
27. Дударева Н.Ю. SolidWorks в примерах / Н.Ю. Дударева, С.А. Загайко. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 544 с.
28. Основные элементы SolidWorks 2010. – Concord: DS SolidWorks, 2009. – 550 с.
29. 3D сканер: 3D-сканування об'єктів та тривимірне моделювання [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://koloro.ua/3d-skaner-3d-skanuvannja-objektsv-ta-tryvumirne-modeljuvannja.html>
30. Принцип роботи 3D-принтерів. Що таке 3D друк? Як працює 3D принтер? [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://xn--3--klcb4a9av.xn--j1amh/>

Навчальне видання

Роман Володимирович Зінко
Володимир Григорович Топільницький

СИСТЕМИ 3D-МОДЕЛЮВАННЯ

Навчальний посібник

Літературний редактор *Козуб Б. Б.*

Комп'ютерне верстання *Топільницький В. Г., Зінко Р. В.*

Художник-дизайнер *Жовнірович М. Ю.*

Підписано до друку 11.07.2017 р.

Формат 60×84/16. Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman. Друк цифровий.

Умовн. друк. арк. 8,72. Обл.-вид. арк. 6,62.

Наклад 300 прим. Зам. №2232.

ТЗОВ «Галицька видавнича спілка»

вул. Тугана-Барановського, 24, м. Львів, 79005,

тел. (032) 276-37-99

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 198.

Друк: ТЗОВ «Компанія “Манускрипт”»

вул. Руська, 16/3, м. Львів, 79008; тел./факс: (032) 235-51-40

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів
видавничої продукції серія ДК № 3628 від 19.11.2009 р.



Зінко Роман Володимирович — кандидат технічних наук, доцент кафедри «Проектування та експлуатація машин» Інституту інженерної механіки та транспорту Національного університету «Львівська політехніка».

Сфера наукових зацікавлень — наукові основи створення та експериментальні дослідження енергоощадних машин і механізмів та їх ефективне функціонування в змінних умовах експлуатації. Серед досліджуваних об'єктів: транспортні засоби, мобільні роботи, подрібнювальні машини, тихохідні вітроенергетичні установки.

Автор понад 110 наукових, науково-методичних праць, серед яких 9 навчальних посібників, монографія, 14 патентів.

Email: rzinko@gmail.com

Web site: www.zinko.lviv.ua



Топільницький Володимир Григорович — кандидат технічних наук, доцент кафедри «Проектування та експлуатація машин» Інституту інженерної механіки та транспорту Національного університету «Львівська політехніка».

Сфера наукових зацікавлень — дослідження динамічних процесів вібраційних технологічних систем оброблення виробів та транспортування.

Автор понад 100 наукових та науково-методичних праць.

Email: topilnvol@gmail.com