

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний університет «Запорізька політехніка»

ТЕКСТИ (конспект лекцій) з дисципліни

"Автоматизоване проектування елементів автотранспортних засобів та засобів їх діагностування"

для студентів спеціальності 133 "Галузеве машинобудування"

("Колісні та гусеничні транспортні засоби"),

усіх форм навчання

Частина 1 - змістовий модуль 1.

Загальні принципи створення твердотільних моделей деталей
та проведення інженерного аналізу проєктованих конструкцій у САПР

2019

ТЕКСТИ (конспект лекцій) з дисципліни "Автоматизоване проектування елементів автотранспортних засобів та засобів їх діагностування" для студентів спеціальності 133 "Талузеве машинобудування" ("Колісні та гусеничні транспортні засоби") усіх форм навчання. Частина 1 - змістовий модуль 1. Загальні принципи створення твердотільних моделей деталей та проведення інженерного аналізу проєктованих конструкцій у САПР / Укл. : О. М. Артюх, О. В. Дударенко, А. Ю. Сосик, А. В. Щербина. Запоріжжя : НУ "Запорізька політехніка", 2019. 90 с.

Укладачі: О.М. Артюх, доцент, канд.техн.наук;
О.В. Дударенко, доцент, канд.техн.наук;
А.Ю. Сосик, доцент, канд.техн.наук;
А.В. Щербина, доцент, канд.техн.наук

Рецензенти: О.С. Слюсаров, доцент, канд.техн.наук;
С.М. Турпак, професор, д-р.техн.наук

Відповідальний за випуск: А.Ю. Сосик, доцент, канд.техн.наук

Затверджено
на засіданні кафедри "Автомобілі"
Протокол № 2
від « 2 » грудня 2019.

Рекомендовано для видання
НМК Транспортного факультету
Протокол № 84
від « 12 » грудня 2019.

ЗМІСТ

Частина 1

Вступ	5
Тематичний план лекційних занять	7
Лекція № 1. Вступ до курсу	10
Лекція № 2. Функціональні можливості сучасних САПР використовуваних у машинобудуванні	41
Лекція № 3. Загальні принципи створення твердотільних моделей, ескізів та креслень у САПР	63
Рекомендована література	85
Базова.....	85
Допоміжна.....	85
Інформаційні ресурси.....	90

Частина 2

Вступ	94
Тематичний план лекційних занять	96
Лекція № 4. Загальні принципи проведення інженерного аналізу проєктованих конструкцій у САПР.....	99
Лекція № 5. Основні методи роботи у системі NX Siemens	120
Лекція № 6. Робота у системі SolidWorks. Створення ескізів	141
Лекція № 7. Загальні принципи створення деталей.....	166
Рекомендована література	203
Базова.....	203
Допоміжна.....	203
Інформаційні ресурси.....	208

Частина 3

Вступ	212
Тематичний план лекційних занять	214
Лекція № 8. Робота з конфігураціями деталей.....	217
Лекція № 9. Створення деталей з листового матеріалу	243
Рекомендована література	275
Базова.....	275
Допоміжна.....	275
Інформаційні ресурси.....	280

Частина 4

Вступ	284
Тематичний план лекційних занять	286
Лекція № 10. Робота зі зварними конструкціями	289
Лекція № 11. Створення складань деталей	317
Рекомендована література	367
Базова	367
Допоміжна	367
Інформаційні ресурси	372

Частина 5

Вступ	376
Тематичний план лекційних занять	378
Лекція № 12. Робота з ливарними формами	381
Лекція № 13. Оформлення креслень	425
Рекомендована література	469
Базова	469
Допоміжна	469
Інформаційні ресурси	474

Частина 6

Вступ	478
Тематичний план лекційних занять	480
Лекція № 14. Розробка зовнішніх форм кузова автомобіля	483
Лекція № 15. Аеродинамічні дослідження моделі кузова автомобіля	546
Рекомендована література	571
Базова	571
Допоміжна	571
Інформаційні ресурси	576

ВСТУП

Сьогодні визначальними факторами успіху в промисловому виробництві є зменшення часу виходу продукції на ринок, підвищення якості, зниження її вартості. Практична реалізація цих вимог вимагає модернізації проектно-технологічних і виробничих процесів. Проектування є не що інше, як перетворення вихідного опису об'єкта, сформульованого в технічному завданні, в остаточний опис. Остаточний опис являє собою комплект технічної документації, необхідний для виробництва необхідного об'єкта в заданих виробничих умовах. Таким чином, проектування - це перетворення вихідного опису об'єкта в остаточний опис, тобто процес перетворення інформації.

Для перетворення інформації давно почали застосовувати обчислювальну техніку. Найбільш потужним засобом перетворення інформації при проектуванні технічних об'єктів є системи автоматизованого проектування (САПР). Їхня інтеграція в єдину багатофункціональну систему, що охоплює всі цикли життя промислового виробу, дозволяє суттєво скоротити час перетворення інформації, відповідної до кожного циклу. До теперішнього часу системи САПР застосовували в машинобудуванні, базуються на самих складних програмно-методичних комплексах і потужних технічних засобах.

Даний лекційний курс присвячений питанням впровадження в навчальний процес САПР SolidWorks, оскільки протягом останніх десяти років саме ця система впевнено присутня серед найбільш затребуваних САПР у машинобудуванні. Сфера його застосування безупинно розширюється за рахунок суміжних галузей: приладобудування, будівництва, розробки товарів побутового призначення.

Головна причина такої популярності SolidWorks - розвинена базова функціональність у сукупності із простим і зручним інтерфейсом, простотою конфігурування, прийнятною ціною й невисокими вимогами до апаратної частини комп'ютерів. SolidWorks безупинно розбудовується, причому рух відбувається й за рахунок розвитку наявних можливостей, і через розширення кола розв'язуваних завдань: моделювання й проектування, оформлення документації, керування проектами, опис технологічних процесів, підготовка керуючих програм для устаткування із програмним керуванням тощо.

Про актуальність застосування в навчальному процесі саме САПР SolidWorks, говорить наявність у ній інтегрованих розрахункових

вих модулів сімейства Simulation: власне сам Simulation (раніше - CosmosWorks); Flow Simulation (раніше - CosmosFlowworks) і SolidWorks Motion (раніше CosmosMotion) - які дозволяють виконувати складні розрахунки й аналіз проєктованих систем на всіх етапах створення автомобіля. А застосування 3D-моделювання вже на початковому етапі проєктування, при проведенні проєктно-конструкторських і дослідницьких робіт, має незаперечні переваги перед плоским моделюванням (2D). Саме сприйняття інформації із тривимірного простору не тільки більш точне, але й значно полегшує розуміння студентом сутності проєктної роботи.

У даному курсі лекцій також розглянуті основні можливості сучасних систем проєктування й виконання розрахунків, застосовуваних у машинобудуванні. Описані методи роботи в SolidWorks у плані проєктування деталей, виконання складань і креслень.

У лекційному курсі спочатку розглянуте проєктування простих об'єктів, потім елементів складальних одиниць, на закінчення показані принципи створення складних поверхонь в SolidWorks, якими є поверхні кузова автомобіля, а також можливість використання розрахункових модулів SolidWorks для дослідження аеродинаміки автомобіля.

Завершальним етапом освоєння даного курсу є виконання курсової роботи, що дає студентові можливість самостійно застосувати отримані знання й навички при вирішенні конкретного проєктного завдання по реальній тематиці.

ТЕМАТИЧНИЙ ПЛАН ЛЕКЦІЙНИХ ЗАНЯТЬ

Загальний об'єм курсу становить 30 годин і складається з двох змістових модулів. Даний конспект лекцій дисципліни "Автоматизоване проектування елементів автотранспортних засобів та засобів їх діагностування" складається з чотирьох частин, і розроблений відповідно до:

Робоча програма з дисципліни "Автоматизоване проектування елементів автотранспортних засобів та засобів їх діагностування" для студентів за напрямом підготовки 6.050503 – "Машинобудування", спеціальністю 133 - Галузеве машинобудування (Колісні та гусеничні транспортні засоби), усіх форм навчання. Запоріжжя : НУ "Запорізька політехніка", 2019. 25 с.

Нижче наведено назву змістового модуля дисципліни "Автоматизоване проектування елементів автотранспортних засобів та засобів їх діагностування", найменування тем лекційних занять в модулі і вказано кількість годин аудиторних занять, для студентів денної форми навчання, окремо для кожної лекції.

Для кожної теми лекції вказано перелік питань які треба розглянути під час даної лекції. Слід враховувати те, що в даному конспекті лекцій приведено лише стислий огляд питань кожної лекції. Крім того навчальним планом дисципліни передбачено активну самостійну роботу студентів за вказаними темами курсу.

Вкінці кожної лекції наведено перелік питань для самоперевірки. Для самостійної роботи студенту слід користуватися рекомендованою літературою для вивчення дисципліни, перелік якої наведено в кінці даного конспекту лекцій, а також використовувати розроблені методичні вказівки:

Методичні вказівки з вивчення дисципліни "Автоматизоване проектування елементів автотранспортних засобів та засобів їх діагностування" та виконання контрольних завдань, для студентів спеціальності 133 "Галузеве машинобудування" ("Колісні та гусеничні транспортні засоби"), усіх форм навчання / Укл. : О. М. Артюх, О. В. Дударенко, А. Ю. Сосик, А. В. Щербина. Запоріжжя : НУ "Запорізька політехніка", 2019. 62 с.

Змістовий модуль 1. Загальні принципи створення твердотільних моделей деталей та проведення інженерного аналізу проєктованих конструкцій у САПР.

Тема 1. Вступ до курсу (2 год.)

Процес автоматизованого проєктування автомобіля. Формування вихідних даних. Розробка дизайн-проєкта. Конструювання та розробка конструкторської документації. Випробування та серійне виробництво.

Тема 2. Функціональні можливості сучасних САПР використовуваних у машинобудуванні (2 год.)

Загальні відомості про автоматизоване проєктування. Інтегровані CAD/CAE/CAM - системи. Твердотільне моделювання. Поверхневе й гібридне моделювання. Робота зі складаннями та в режимі креслення. Обмін графічною інформацією між програмами. Спеціалізовані програми 3D-моделювання.

Тема 3. Загальні принципи створення твердотільних моделей, ескізів та креслень у САПР (2 год.)

Обмеження двомірного проєктування. Перехід на тривимірне моделювання. Керування орієнтацією деталі. Відображення моделі в декількох вікнах. Загальні принципи 3D-моделювання деталей. Ескізи й операції. Створення елементів по перетинах. Створення кінематичних елементів. Створення 3D-моделі по її плоскому кресленню.

Тема 4. Загальні принципи проведення інженерного аналізу проєктованих конструкцій у САПР (2 год.)

Методи розв'язку рівнянь фізики в механічних САПР. Структурна механіка - лінійна та нелінійна задача. Аерогідродинаміка й теплопередача. Проєктування елементів механічних систем. Кінематика й динаміка. Листовий метал - розгорнення й заготовки. Світлотехнічний аналіз і проєктування.

Тема 5. Основні методи роботи у системі NX Siemens (2 год.)

Інтерфейс. Моделювання твердих тел. Моделювання поверхонь. Моделювання в контексті. Робота з листовим металом. Синхронна технологія. Робота зі складаннями. Основи NX Advanced Simulation. Виконання креслень. Робота із шаблонами. Візуалізація.

Тема 6. Робота у системі SolidWorks. Створення ескізів (2 год.)

Основні принципи побудови ескізів. Створення простого ескізу. Використання дзеркального відображення об'єктів. Створення складного ескізу. Додавання округлень і фасок. Використання команд побудови масивів. Використання сплайнів в ескізах. Тривимірні ескізи.

Тема 7. Загальні принципи створення деталей (2 год.)

Основні способи побудови деталей. Додаткові можливості. Призматичні деталі. Деталі - тіла обертання. Деталі типу трубопроводів. Деталі складної конфігурації. Деталі на основі поверхонь.

ЛЕКЦІЯ № 1. ВСТУП ДО КУРСУ

План лекції. Процес автоматизованого проектування автомобіля. Формування вихідних даних. Розробка дизайн-проекта. Конструювання та розробка конструкторської документації. Випробування та серійне виробництво.

Література: [7], с. 180-255.

Ідеологія розробки автомобіля обумовлена простою логічною схемою «формування замовлення – аналіз досяжності замовлення – реалізація технічних рішень – перевірка технічних рішень – виготовлення виробу – реалізація виробу».

Згідно із цією ідеологією процес розробки автомобіля умовно можна розділити на функціональні етапи, опис яких наведений нижче.

1. Етап «Формування вихідних даних». Здійснюють маркетингові дослідження, спрямовані на вивчення запитів споживачів, оцінку економічної доцільності розробки нової моделі автомобіля.

2. Етап «Технічний опис продукту». Забезпечують переклад запитів споживачів та інших вимог на мову технічних вимог до автомобіля, матеріалів, технології, ремонту, технічного обслуговування, утилізації.

3. Етап «Розробка дизайн-проекту». Виробляють принципові проектні рішення відносно компонування автомобіля, компоновальних схем його вузлів, ведуть пошук стилю дизайну екстер'єру та інтер'єру.

4. Етап «Формування детально-вузлового складу конструкції». Визначають перелік компонентів конструкції, встановлюють чіткі взаємопов'язані цілі проектно-конструкторських робіт для кожного з учасників процесу розробки на підставі вимог технічного завдання й загального компонування автомобіля.

5. Етап «Розробка конструкторської документації». Розробляють об'ємну віртуальну модель автомобіля та відповідний комплект конструкторської документації, які необхідні для відтворення віртуальних прототипів, а також виготовлення реальних прототипів, застосовуючи технології швидкого прототипування. Під об'ємною віртуальною моделлю об'єкта (об'єкт - це як автомобіль у зборі, так і вузли й деталі що входять у нього) мається на увазі його просторове графічне

зображення, розроблене за допомогою комп'ютерних програм для теоретичної перевірки проектних рішень.

6. Етап «Випробування конструкції». Проводять розрахункову оптимізацію по об'ємній віртуальній моделі автомобіля, випробовують виготовлені зразки з метою приведення конструкції автомобіля і його елементів до відповідності вимогам технічного завдання.

7. Етап «Затвердження конструкції». Документують за результатами приймальних випробувань повну відповідність автомобіля вимогам технічного завдання, даючи цим старт серійному виробництву готової продукції.

8. Етап «Серійне виробництво». Роблять готову продукцію; організують контрольні випробування першої партії автомобілів і комплектуючих виробів на відповідність технічним умовам і законодавчим вимогам; проводять передпродажну підготовку, технічне обслуговування й ремонт автомобілів у гарантійний та післягарантійний період експлуатації.

9. Етап «Припинення виробництва». Ухвалюють рішення щодо припинення виробництва автомобілів або переносу виробництва на інше підприємство; вказують строки й обсяги виробництва запасних частин; проводять заходи, пов'язані з утилізацією автомобілів.

На кожному етапі враховують вхідні дані, після проведення необхідного комплексу робіт формують вихідну інформацію, яка є вхідною інформацією для наступного етапу, і так до останнього етапу.

У свою чергу, усі етапи розробки автомобіля можна згрупувати по чотирьом основним фазам, що загалом описують увесь життєвий цикл автомобіля: *концептування, проектування, конструювання, реалізація* (рис. 1.1).

Концептування – пошук образу й технічного опису автомобіля, що задовольняють потреби потенційного споживача; добір автомобілів-аналогів; складання технічних вимог. Включає етапи «Формування вихідних даних» і «Технічний опис продукту».

Проектування – створення ескізного компоновання (схеми місткості й схеми шасі); пророблення дизайну екстер'єру й інтер'єру; створення робочих макетів вузлів і демонстраційного макета автомобіля; виконання розрахункових робіт; розробка загального компоновання; складання технічного завдання, що групує технічні вимоги до автомобіля й технічні пропозиції по конструкції та складу. Включає етапи «Розробка дизайн-проекту» і «Формування детально-вузлового

складу конструкції».



Рисунок 1.1 - Схема процесу розробки легкового автомобіля

Конструювання – розробка повного комплексу конструкторської документації та об'ємної віртуальної моделі автомобіля; виготовлення й випробування прототипів вузлів і повнокомплектного автомобіля; заходи щодо коректування конструкції в ході випробувань; робота з технологічними службами по підготовці виробництва. Містить етапи «Розробка конструкторської документації», «Випробування конструкції» і «Затвердження конструкції».

Реалізація – виробництво автомобілів на конвеєрі; просування готової продукції на автомобільному ринку; передпродажне й гарантійне обслуговування; зняття автомобіля з виробництва; утилізація автомобілів що відпрацювали термін експлуатації. Включає етапи «Серійне виробництво» і «Припинення виробництва».

Наведена на рис. 1.1 схема поділу процесу розробки легкового автомобіля на етапи носить досить загальний і умовний характер. Послідовність дій усередині цієї загальної схеми залежить багато в чому від системи організації праці на підприємстві, системи керування підприємством, установлених схем взаємодії між проектними й технологічними підрозділами, схем взаємодії з постачальниками комплектуючих виробів та ін.

Перераховані вище фактори в чималому ступені визначають строки постановки на виробництво готової продукції, її якість і конкурентоспроможність.

Розглянемо більш детально перераховані вище функціональні етапи процесу розробки нового автомобіля.

Етап «Формування вихідних даних».

Перед тим як ухвалити рішення щодо створення нового автомобіля, необхідно провести кропітку роботу з пошуку образу автомобіля, по підготовці техніко-економічних матеріалів, що підтверджують необхідність розробки нового автомобіля, який відповідатиме запитам споживачів.

У цій частині підготовчих робіт маркетингові й економічні дослідження превалюють над технічними. Економісти й маркетологи насамперед повинні з'ясувати, які ніші ринку треба заповнити, визначити обсяг попиту й конкурентну кон'юнктуру, купівельну спроможність майбутнього споживача, розташовувані ресурси в області необхідних стандартних і спеціальних матеріалів, розміри капіталовкладень, необхідних для організації нових видів виробництва або розширення старих, очікуваний прибуток і т.п.

Після таких розрахунків інженери можуть вивести приблизні технічні показники, які будуть основою майбутнього рішення про виробництво нової моделі автомобіля.

В умовах ринкової економіки будь-яке підприємство самостійно визначає свою маркетингову політику. В основному від цієї політики залежить позиціонування підприємства на тому або іншому ринку. Інакше кажучи, автомобільний завод визначає для себе коло ринків збуту, де він здатний (у силу своїх можливостей) здійснювати реалізацію своєї продукції й виживати в умовах конкурентної боротьби. Як показує практика, у сучасному світі конкуренція в автомобілебудуванні дуже жорстка, монополістів у цій області практично немає.

Сучасний споживач при покупці автомобіля орієнтується не тільки на доступну ціну, але й на якість, дизайн, безпеку, комфортабельність, практичність, надійність, простоту обслуговування й багато інших характеристик. Завдання будь-якого підприємства – створення автомобіля, який максимально враховує всілякі критерії, що задовольняють функціональним і естетичним потребам покупця.

Запорукою успішної реалізації проекту по виробництву й впро-

вадженню на ринок нової моделі автомобіля можуть стати грамотні маркетингові дослідження, результатом яких в остаточному підсумку буде отриманий прибуток від продажу вироблених автомобілів.

Маркетинг – це сукупність стратегічних, фінансових, організаційно-технічних і комерційних функцій по керуванню підприємством, вивченню ринку, розробці й виробництву продукції з урахуванням ринкового попиту, просуванню товарів споживачеві.



Рисунок 1.2 - Схема етапу «Формування вихідних даних»

Основною вхідною інформацією маркетингових досліджень є інформаційно-аналітичні дані про передбачувані ринки збуту, про автомобілі-аналоги і тенденції їхнього розвитку, а також дані про технологічні можливості підприємства й оцінки економічної доцільності запуску виробництва нової моделі автомобіля (рис. 1.2).

Допустимо, для реалізації сімейства легкових автомобілів заплановані такі ринки збуту, у яких основним середовищем експлуатації будуть не тільки дороги з якісним асфальтовим покриттям, але й сільська труднопрохідна місцевість. Тоді виробник може включити в сімейство автомобілів повноприводний варіант автомобіля 4x4 на базі, наприклад, передньопривідного варіанта 4x2. Фактично прийдеться вирішувати завдання по уніфікації цих двох варіантів при розробці конструкції автомобіля. На рис. 1.3 показаний приклад подібної уніфікації, коли установкою додаткових вузлів трансмісії (карданна передача, передній і задній редуктори) отриманий повноприводний варіант автомобіля з передньопривідного варіанта.

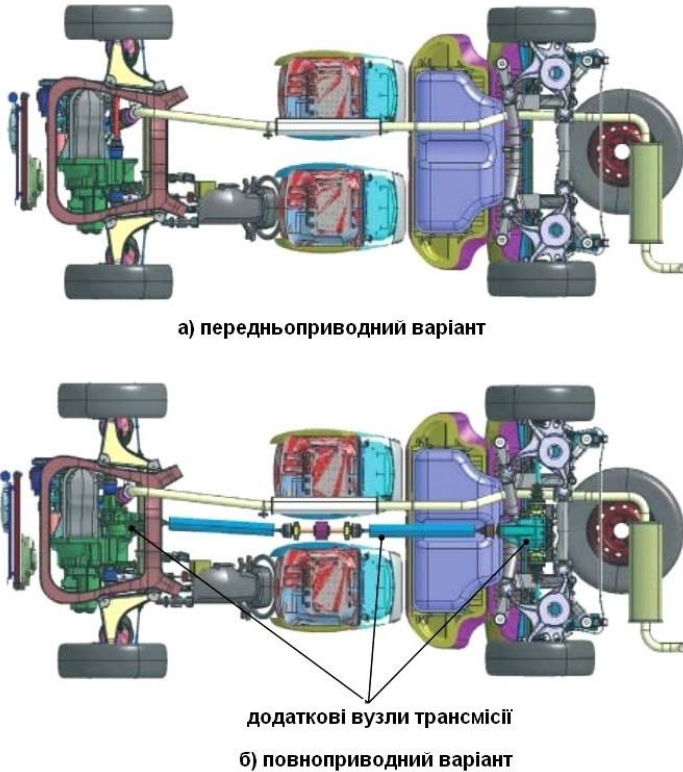


Рисунок 1.3 - Приклад уніфікації переднеприводного й повнопривідного варіантів легкового автомобіля

Етап «Технічний опис продукту».

В основі технічного опису продукту лежить визначення шляхів досягнення цільових показників, установлених маркетинговим замовленням. Ціль технічного опису – перевести загальні вимоги замовника (маркетингової служби) у формалізовані технічні вимоги до автомобіля, до системи виробництва, системи збуту, обслуговування й ремонту, системи утилізації (рис. 1.4).

Технічні вимоги до автомобіля встановлюють конструктивні параметри й показники експлуатаційних властивостей, що характеризують у сукупності технічні особливості як автомобіля в цілому, так його вузлів і систем.



Рисунок 1.4 - Схема етапу «Технічний опис продукту»

Технічні вимоги до системи виробництва встановлюють показники, які стосуються заходів щодо підготовки виробництва нового автомобіля, розробки технологічного устаткування, організації й охорони праці, забезпеченню екологічної безпеки виробництва.

Технічні вимоги до системи збуту, обслуговування й ремонту автомобілів встановлюють показники, що стосуються правил реалізації готової продукції, модернізації системи передпродажного й гарантійного обслуговування, розвитку мереж станцій технічного обслуговування (СТО).

Технічні вимоги до системи утилізації автомобілів стосуються показників розвитку мереж пунктів приймання непридатних до експлуатації автомобілів, нормативів розбирання автомобілів, якості сортування матеріалів для вторинної переробки, екологічної безпеки утилізації матеріалів із вмістом шкідливих речовин.

Етап «Розробка дизайн-проекту».

На етапі «Розробка дизайн-проекту» (рис. 1.5) послідовно роблять наступне:

- виконують ескізне компонування автомобіля, створюючи схему місткості й схему шасі, причому обидві схеми необхідно розробляти одночасно, щоб забезпечити погодженість усіх геометричних параметрів автомобіля;

- паралельно роблять ескізні компоновання знову розроблювальних вузлів для нового автомобіля;
- ґрунтуючись на результатах ескізного компоновання автомобіля, оформляють стильове рішення образу екстер'єру та інтер'єру;
- затверджують стиль дизайну на основі ескізних замальовок або віртуальних моделей;
- створюють реальний макет зовнішньої форми автомобіля й посадковий макет внутрішнього простору в натуральну величину для оцінки ергономіки й загального сприйняття дизайну;
- виготовляють робочі макети окремих вузлів, технічні показники яких оцінюють на так званих ходових макетах автомобіля;
- виготовляють демонстраційний макет, що сполучає елементи екстер'єру, інтер'єру й робочі макети вузлів як для реальної візуальної оцінки результатів дизайн-проекту, так і для перевірки спільної працездатності оригінальних і діючих вузлів.



Рисунок 1.5 - Схема етапу «Розробка дизайн-проекту»

Ескізне компонування – це первинне графічне пророблення конструкції автомобіля з дотриманням масштабних геометричних пропорцій. По її результатах видають перші графічно оформлені документи, які служать вихідною інформацією для наступних проектних робіт.

У роботі над компонуванням автомобіля конструктор враховує безліч обмежуючих факторів, у результаті чого створюється ряд компонувальних схем з різними комбінаціями положень вузлів і систем автомобіля вкупі з різними варіантами посадки водія й пасажирів.

По суті, у процесі ескізного компонування необхідно встановити, яка з можливих компонувальних схем є найбільш підходящою, яка забезпечить при позначених межах габаритних розмірів автомобіля досягнення заданих рівнів споживчих властивостей.

Для повноцінної роботи над компонуванням конструктор повинен з достатнім ступенем точності змодельовати геометричну конфігурацію необхідних вузлів і деталей, чітко позначаючи місця їх взаємного з'єднання.

Якщо необхідні вузли й деталі є вже діючими виробами, або раніше спроектованими, то робота з ескізного компонування автомобіля значно полегшується. Якщо ж цих компонентів немає ні в тому, ні в іншому виді (передбачається оригінальна розробка), то потрібно проводити паралельне ескізне компонування по складанню їх власних компонувальних схем, базуючись на наявних аналогах.

У наш час, завдяки широкому розвитку комп'ютерних технологій, процес розробки автомобіля вже не обходиться без використання сучасних САПР (систем автоматизованого проектування).

Сучасні виробники автомобілів і автокомпонентів, за допомогою САПР вже охоплюють весь комплекс проектно-конструкторських робіт а також процеси підготовки виробництва.

Велика кількість програмних продуктів з елементами САПР використовуваних у сучасному автомобілебудуванні, тісно пов'язані з використанням технологій віртуальної та доповненої реальності, заснованих на об'ємній графіці (3D), яка в свою чергу має значні переваги перед плоскою графікою (2D):

- сприйняття інформації у тривимірному зображенні більш точне (особливо це важливо при візуальному контролі компонування автомобіля, зокрема для виключення неприпустимого геометричного контакту різних вузлів і деталей);

- проектувати вироби зі складними формами (зовнішні панелі кузова, панель приладів рис. 1.6, оббивку інтер'єру тощо) вдається робити набагато швидше, легше та якісніше, а в кінцевому рахунку – значно дешевше.

Раніше домогтися такого рівня було майже неможливо, і все через недоліки сприйняття плоскої інформації. Всі такі трансформаційні процеси у сучасному проектуванні та наступному виробництві, можна помігати по тенденціях розвитку дизайну сучасних автомобілів.

Варто сказати й про спеціальні додатки САПР, які дозволяють:

- відтворювати кінематичне переміщення віртуального механізму для оцінки його працездатності, аналізу траєкторії руху входних деталей у процесі роботи механізму;
- проводити комплексний аналіз міцності виробів у статичній, динамічній й вирішувати інші інженерно-прикладні завдання, ґрунтуючись лише на віртуальній моделі без фізичного виготовлення зразків;
- вирішувати завдання, пов'язані із проектуванням технологічного оснащення, виготовленням макетів на основі віртуальної моделі виробу та ін.

Однак говорити про повну відмову від двомірного зображення не доводиться. Наприклад, це стосується створення креслень із використанням плоских видів і перетинів. 3D графічні програмні продукти містять креслярські додатки, що дозволяють проектувати тривимірне зображення на площину, для документального оформлення виробу (рис. 1.7).

Раніше, до впровадження комп'ютерних технологій, компоновання розроблялися вручну на паперових носіях. Для зручності робіт використовувалася прозора калька. Різні вузли й деталі вручну наносили на окремі кальки, які взаємно розташовували в потрібному положенні й копіювали на кальку основного компоновання. При цьому будь-які зміни, які неминуче супроводжували компоновальний процес, вимагали значного часу на виправлення через застосування ручної праці.

Зараз же, завдяки САПР, досить змінити в програмі необхідний параметр, і вона сама в лічені секунди перебудовує будь-які схеми, що дає можливість розглянути велику кількість варіантів одночасно й вибрати з них найбільш оптимальний.

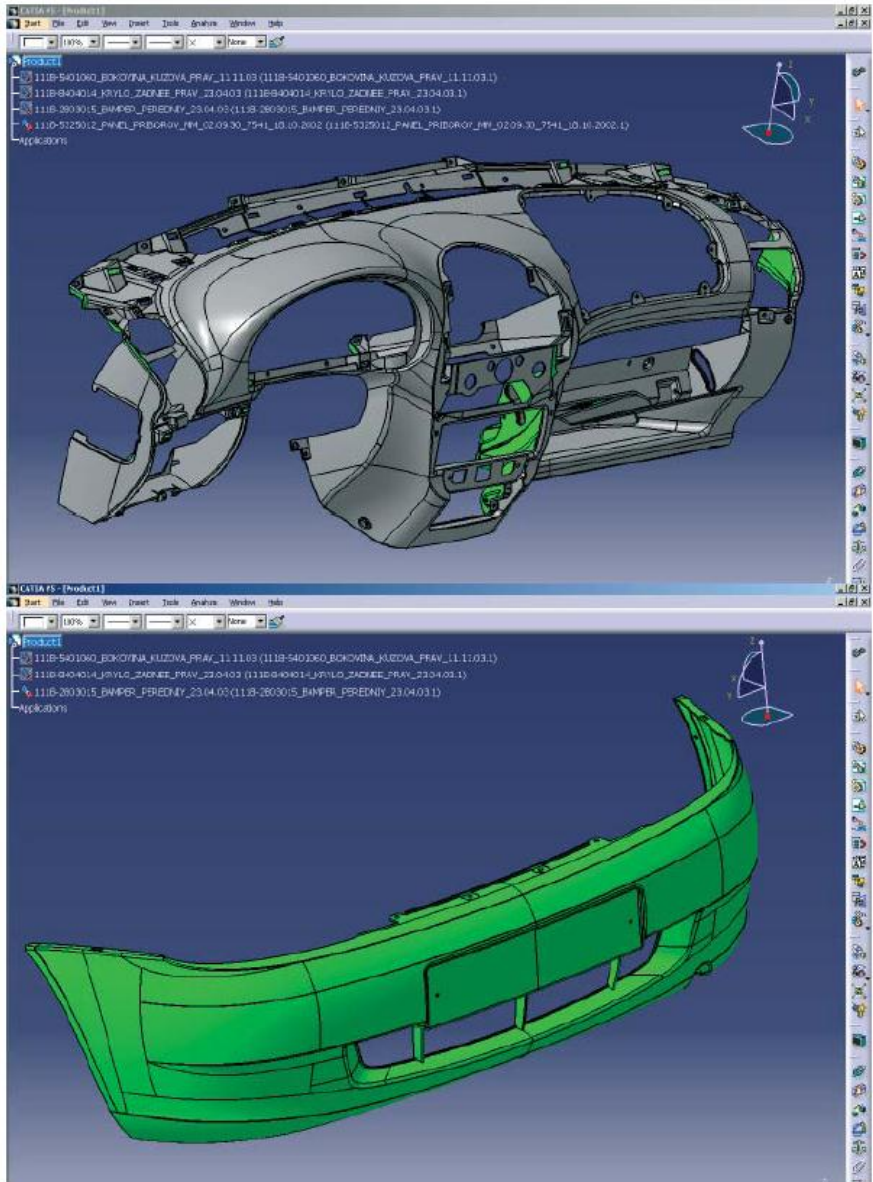


Рисунок 1.6 - Об'ємні віртуальні моделі панелі приладів і бампера автомобіля, розроблені за допомогою 3D-програмного продукту

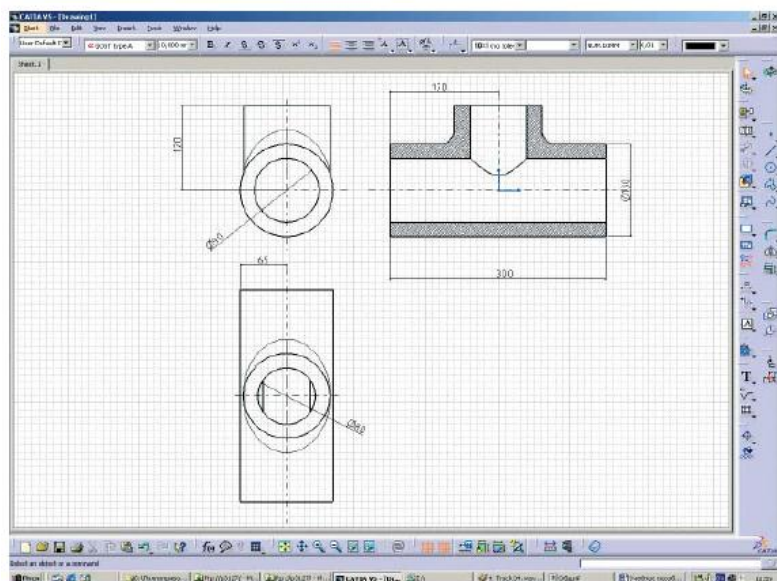
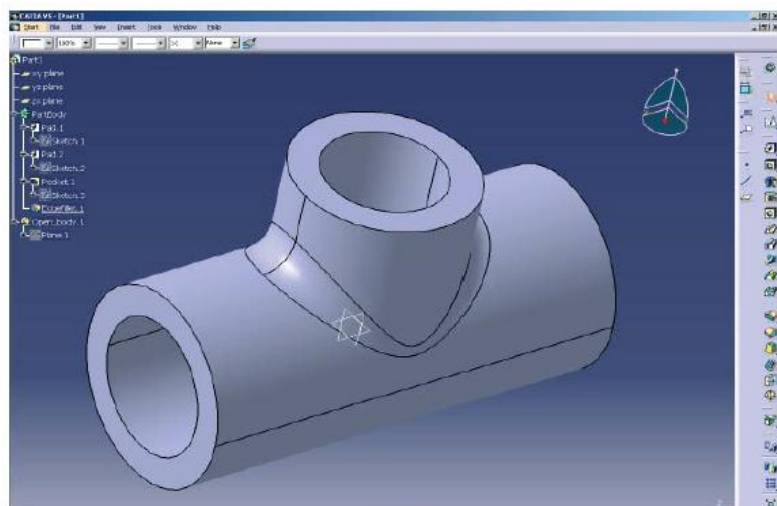


Рисунок 1.7 - Проектування об'ємної віртуальної моделі на площину креслення

Результатами ескізного компоунування є:

- схема місткості – це компоунування, яке визначає основні геометричні параметри автомобіля; розміщення в салоні людей різної репрезентативності; основні вимоги до оглядовості, досяжності; розташування передніх і задніх сидінь; положення кермового колеса та інших органів керування; розміщення паливного бака й запасного колеса; габарити моторного й багажного відділень;
- схема шасі – це компоунування, яке містить інформацію про розташування двигуна і його систем; трансмісію й привод на ведучі колеса; передню й задню підвіски, кермовий механізм та їхні кінематичні точки; робочий простір коліс.

Для загальної уяви про ескізне компоунування автомобіля на рис. 1.8 показані її результати у вигляді об'ємної віртуальної моделі. На рис. 1.9 і 1.10 зображені схеми місткості й шасі, оформлені на основі цієї моделі.

Усі розміри на схемах місткості й шасі проставляються щодо тривимірної системи координат при встановленому конструктивному навантаженню, за винятком розмірів, які вимірюються щодо спорядженої маси або повної маси.

Тривимірна система координат автомобіля представлена наступними трьома базовими площинами (якщо не зазначено інше):

- вертикальною поперечною площиною «X», що проходить через вісь передніх коліс автомобіля;
- вертикальною поздовжньою площиною «Y» симетрії, що проходить через вісь, автомобіля;
- горизонтальною площиною «Z», що проходить через вісь передніх коліс автомобіля.

Негативні координати відлічуються від площини «X» уперед по ходу руху, уліво від площини «Y» і вниз від площини «Z» (рис. 1.9 і 1.10). При конструктивній масі автомобіля рівень землі щодо системи координат зображується паралельно площини «Z».

Конструктивна маса автомобіля встановлюється розроблювачем. Як правило, це якесь проміжне значення маси між спорядженою й повною. Її вибирають виходячи із часткового завантаження автомобіля (найбільш частої в експлуатації), наприклад для п'ятимісного автомобіля може враховуватися маса водія, переднього й одного заднього пасажирів.

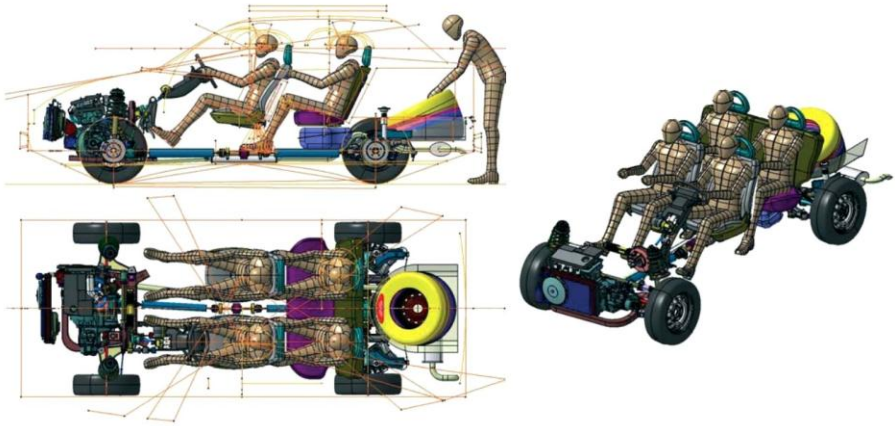


Рисунок 1.8 - Результати ескізного компонування, представлені у вигляді об'ємної віртуальної моделі

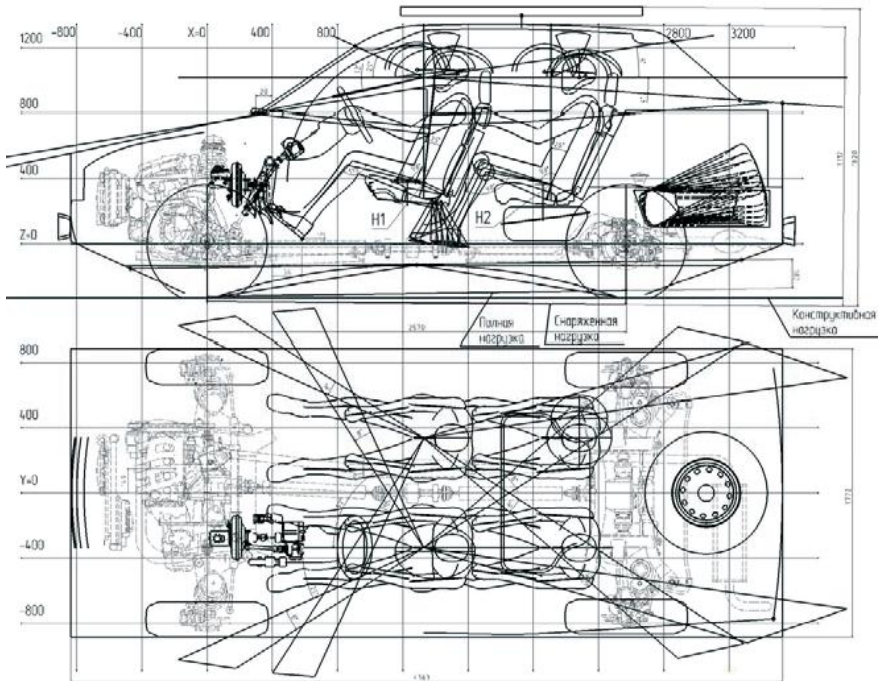


Рисунок 1.9 - Схема місткості автомобіля

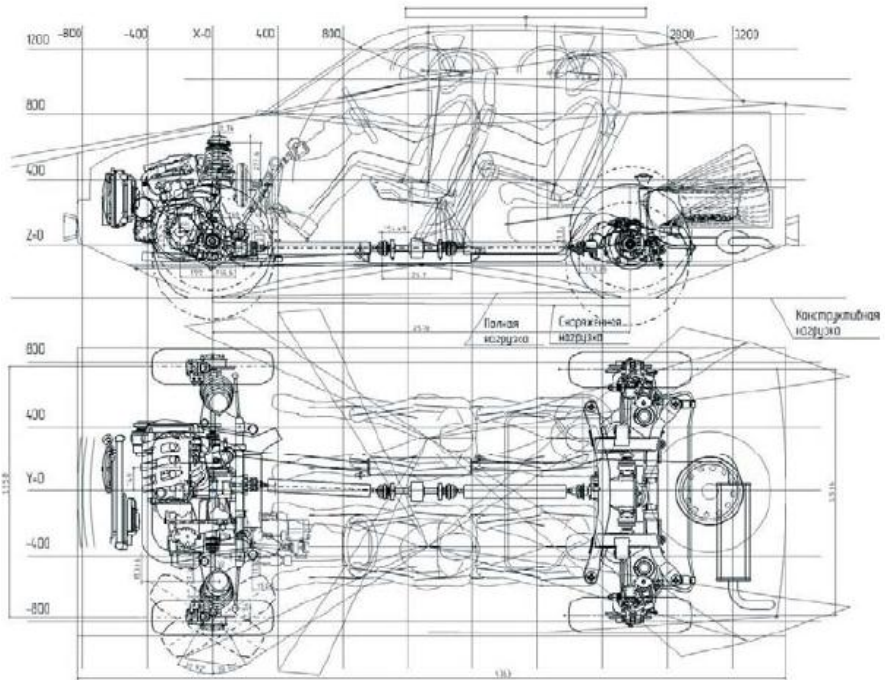


Рисунок 1.10 - Схема шасі автомобіля

Ескізне компонування автомобіля починають створювати з визначення положення людей для встановлення відповідних габаритів салону. Для цього служать моделі людини (манекени), що створюються по статистичних вимірах населення (рис. 1.11).

Результати вимірів населення ділять на перцентілі – рівні репрезентативності. До уваги звичайно приймають три стандартні групи зросту: малий – люди 5-го перцентіля (рівня репрезентативності), існує тільки 5% людей, зріст яких нижче цього значення; середній – люди 50-го перцентіля; великий – люди 95-го перцентіля, існує тільки 5% людей, зріст яких вище цього значення.

Модель манекена 95-го перцентіля повинна братися за основу для визначення пози водія при відсунутому назад до межі сидіння, а модель манекена 5-го перцентіля, відповідно, при висунутому максимально вперед положенні сидіння. У такий спосіб досягається мінімальна зона регулювання положення сидіння. Для визначення положен-

ня заднього сидіння за основу ухвалюють звичайно групи зросту 50-го або 95-го перцентіля.

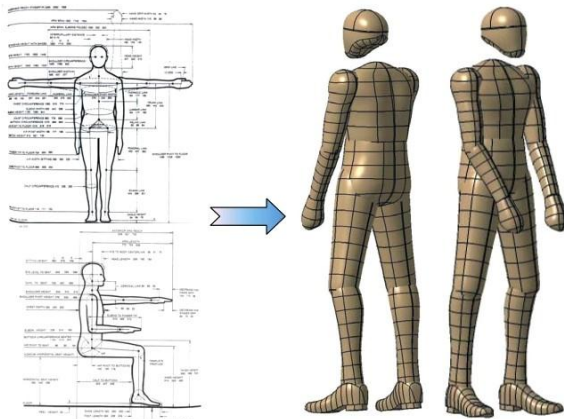


Рисунок 1.11 - Об'ємна віртуальна модель людини, створена по статистичних вимірах населення

Залежно від обраної посадки манекенів, що задовольняють ергономічним вимогам, вибудовуються різні зони оглядовості й досяжності водія й пасажирів, визначаються положення основних органів керування, наноситься обмежувальний контур автомобіля, задаються границі моторного й багажного відділень. Після чого в зазначених межах розміщуються двигун, системи й вузли шасі.

Затверджене ескізне компоновання автомобіля передається у відділ художнього моделювання для розробки дизайну-проекту. На компоновання накладають різні варіанти виконання дизайну екстер'єру й інтер'єру, використовуючи елементи реалізму 3D-графіки за допомогою спеціалізованих комп'ютерних програм, як це показано на рис. 1.12. Із представлених варіантів затверджується найбільш підходящий і задовольняючий вимогам до дизайну й умовам, описаним у технічних вимогах.

Після затвердження стилю дизайну автомобіля приступають до розробки макета зовнішніх форм у масштабі 1:1 зі спеціального пластиліну. Цей макет використовується для перевірки загального враження від автомобіля, уточнення зовнішніх форм за результатами продувки в аеродинамічній трубі, обмірювання (сканування) зовнішніх поверхонь кузова.

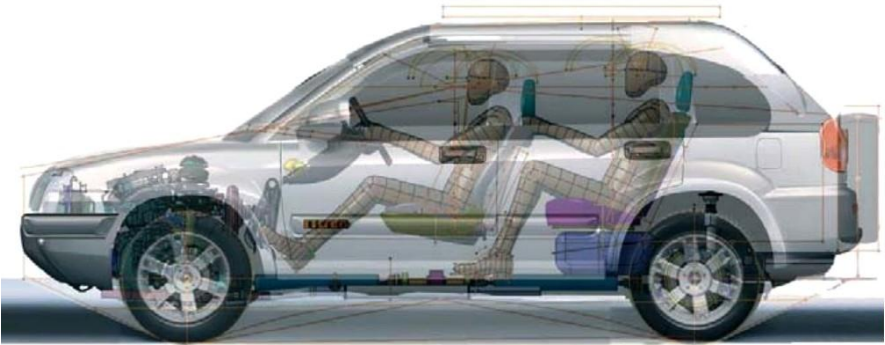


Рисунок 1.12 - Пошук форм дизайну екстер'єру автомобіля по ескізнюму компоунуванню

Зовнішня поверхня сканується за допомогою контрольно-вимірювальної машини у вигляді «хмари точок» (рис. 1.13) для відтворення віртуальної моделі в 3D-програмі, для роботи надалі над загальним компоунуванням і створенням віртуальних моделей кузовних деталей.

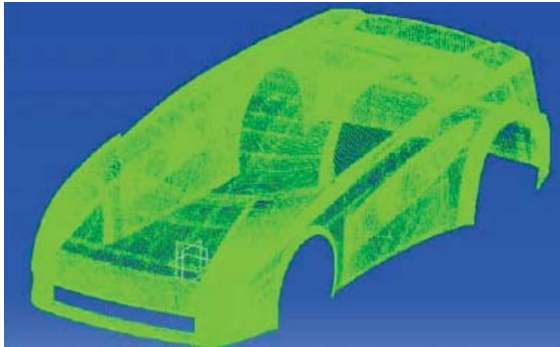


Рисунок 1.13 - Результат сканування макета в 3D-програмі

Варто відзначити, що сучасні технології дизайн-проектування можуть обходитися й без створення пластилінового макета, дозволяючи прямо розробляти поверхню в 3D-програмі, віртуальна модель якої також може аналізуватися й за аеродинамічними показниками із застосуванням відповідних програмних продуктів.

Одночасно з макетом зовнішніх форм розробляється модель інтер'єру (посадковий макет) у масштабі 1:1 на основі дерев'яного або

металевого каркаса салону, з установкою рульового керування, педалей, панелі приладів, важелів керування, сидінь, оббивок і т.п.

Для відтворення елементів структури салону використовують спеціальний пластилін, дерево, гіпс, тканини, поролон, частину існуючих вузлів, деталей та інші різні підручні матеріали. Усе це виконується відповідно до ескізного компонування.

Посадковий макет призначений для остаточної оцінки пози водія, пасажирів і розміщення елементів інтер'єру. Для цього найкраще залучити групу експертів і провести серед них анкетування (опитування). Анкетування бажано проводити серед експертів різного рівня репрезентативності.

Аналогічним чином, як і у випадку з екстер'єром, з поверхонь елементів інтер'єру також знімають виміри «хмари точок» для розробки їх об'ємних віртуальних моделей.

Для перевірки технічних показників робочих макетів оригінальних вузлів їх установлюють і випробовують на ходових макетах. Базаю для розробки ходових макетів можуть бути моделі автомобілів-аналогів, які найбільш близько підходять по геометричним параметрам і конструкції розроблюваному автомобілю.

На завершення дизайн-проекту створюють демонстраційний макет, на якому сполучають елементи екстер'єру та інтер'єру, а також макети оригінальних вузлів і агрегатів.

Демонстраційний макет також може бути виконаний на базі автомобіля-аналога. Для цього каркас кузова даного автомобіля приводять у відповідність із геометричними розмірами нового автомобіля. Потім на дороблений кузов поряд із запозиченими серійними деталями встановлюють робочі макети нових вузлів і агрегатів, накладають різні деталі екстер'єру та інтер'єру.

Для складання демонстраційного макета робочі макети вузлів, зовнішні панелі кузова, двері, фари, задні ліхтарі, панель приладів, оббивки, сидіння й т.п., тобто все те, що є знову розроблювальним і визначальним для дизайн-проекту нового автомобіля, виготовляють за допомогою так званої «обхідної технології», з використанням можливостей «швидкого прототипування».

Прототипування – це одержання виробів при відсутності основної технології їх виготовлення. Подібні вироби можуть створюватися в такий спосіб:

- доробкою існуючих підібраних по технічних характеристи-

- ках виробів;
- виготовлятися з використанням наявних універсальних пристосувань;
 - виготовлятися на технологічному устаткуванні з ЧПУ (числовими програмними управлінням).

Створений демонстраційний ходовий макет дає повну уяву про вигляд майбутнього автомобіля, дозволяє «відчути» автомобіль «зсередини», а також провести ряд попередніх дорожніх випробувань визначення зручності користування автомобілем (вхід-вихід, обслуговування, користування багажним відділенням тощо).

Етап «Формування детально-вузлового складу конструкції».

Отримані на попередньому етапі принципові технічні рішення по компонованню й дизайну автомобіля лягають в основу пропозицій по наповненню конструкції автомобіля деталями, вузлами та їхньому конструктивному виконанню (рис. 1.14). Вказані пропозиції включають у документ «Технічне завдання», який складається з раніше сформованого документа «Технічні вимоги до автомобіля» і розділу «Технічні пропозиції по конструкції автомобіля».



Рисунок 1.14 - Схема етапу «Формування детально-вузлового складу конструкції»

Технічне завдання – це основний інженерний документ, який повинен містити всі вихідні дані для конструкторських підрозділів та постачальників комплектуючих виробів. Затверджене технічне завдання має на увазі, що всі параметри в ньому взаємозалежні й підтверджена їхня технічна досяжність.

Технічні пропозиції по конструкції автомобіля – це складова частина технічного завдання, необхідна для проведення загального компоновання автомобіля, наступної розробки конструкції вузлів і деталей, функціонально-вартісного аналізу та інших техніко-економічних розрахунків. Нижче наведений зміст даних технічних пропозицій.

Етап «Розробка конструкторської документації».

На даному етапі (рис. 1.15) конструкторськими підрозділами розробляється повна й докладна об'ємна віртуальна модель автомобіля, а також відповідний комплект конструкторських документів.



Рисунок 1.15 - Схема етапу «Розробка конструкторської документації»

Об'ємна віртуальна модель автомобіля повинна включати об'ємні віртуальні моделі всього переліку використовуваних деталей і вузлів, при цьому, на відміну від попередніх компоновальних моделей,

вони повинні містити докладну геометрію конструкції з точним проробленням геометричних поверхонь, що враховують особливості технології виготовлення (рис. 1.16).

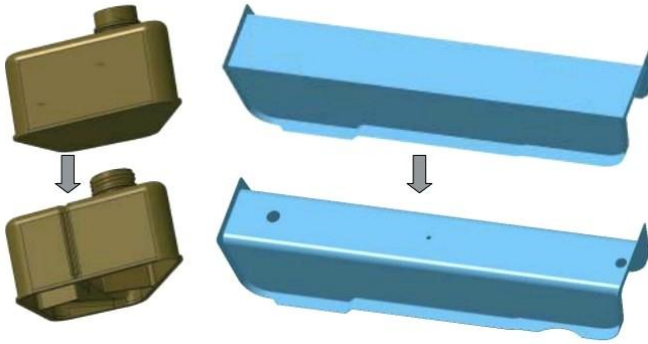


Рисунок 1.16 - Пророблення точної геометрії об'ємних віртуальних моделей деталей автомобіля

Розробка конструкції елементів автомобіля виконується строго у відповідності до виданих компонувальних паспортів і технічних завдань. Якщо постає питання про необхідність зміни параметрів і складу конструкції або геометрії вузлів і деталей (збільшення габаритних розмірів або зміна відносного положення, або введення додаткових елементів і т.п.), то проводяться заходи щодо контрольного компонування з метою перевірки й коректування займаного простору щодо навколишніх елементів в автомобілі. Після чого виносяться рішення про прийнятність (неприйнятність) пропонованих змін, вносяться відповідні виправлення в компонувальні паспорти й при необхідності в технічне завдання.

Для досягнення необхідних показників надійності, довговічності, якості, а також скорочення маси й собівартості виробу в цілому конструктор при створенні об'ємних віртуальних моделей елементів автомобіля повинен:

- виконувати всілякі розрахункові аналізи із застосуванням відповідних програмних додатків (на міцність, утому, твердість, зношування й т.п., рис. 1.17) для оптимізації конструкції й геометрії елементів;
- прагнути використовувати технічні рішення, що не ускладнюють технологію й трудомісткість виготовлення (складан-

- ня) у рамках наявного технологічного устаткування;
- уміти застосовувати сучасні досягнення науки й техніки для вирішення поставлених технічних завдань.

Паралельно зі створенням об'ємної віртуальної моделі автомобіля розробляється комплект конструкторських документів відповідно до норм ЄСКД (Єдиної Системи Конструкторської Документації).

Під комплектом конструкторської документації автомобіля мається на увазі чотири види документів:

- повний перелік креслень;
- комплект відповідних специфікацій;
- технічні вимоги до комплектуючих виробів;
- ремонтно-експлуатаційні документи.

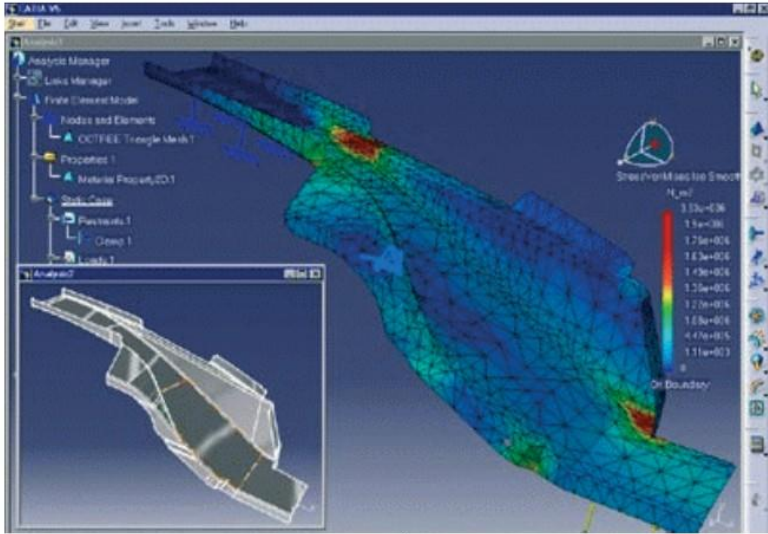
1. Креслення виконуються методом генерування проєкційних видів і перетинів з об'ємних віртуальних моделей складових частин автомобіля. При цьому розрізняють три основні типи креслень: креслення на деталь, складальне креслення, монтажне креслення.

Креслення на деталь повинне містити повну інформацію про геометрію деталі й технологічні особливості її виготовлення, для того щоб технолог по ньому міг скласти технологічний маршрут операцій, а робітник виготовити готову деталь.

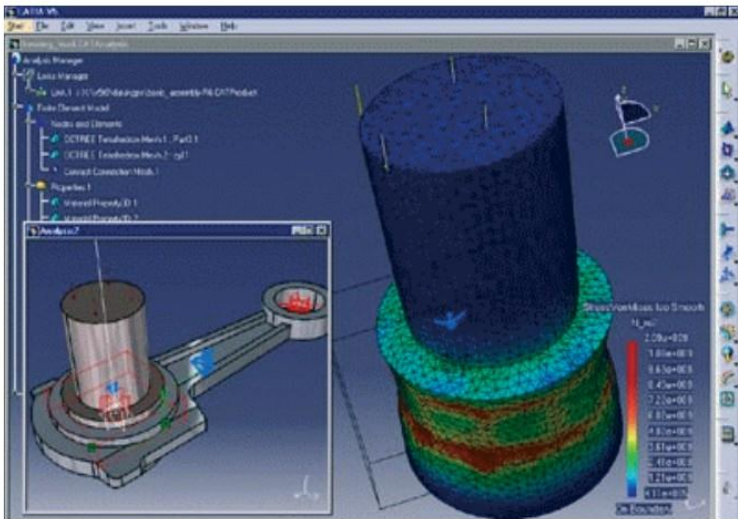
Інформація про геометрію деталі вважається повною, якщо на полі креслення наведена достатня кількість видів і перетинів, а також проставлені всі необхідні розміри, що дозволяють відтворити деталь із заданою точністю.

Технологічною інформацією, крім грамотно проставлених розмірних ланцюгів, є:

- допуски на розміри й геометричні взаємоположення (співвісність, паралельність, перпендикулярність і т.п.);
- розмірні й технологічні бази;
- значення припустимих штампувальних і ливарних кутів, облоя, виступів та ін.;
- маркування матеріалу деталі;
- значення шорсткості поверхонь із вказівкою на способи її досягнення (шліфування, полірування й т.п.);
- значення твердості із вказівкою на способи досягнення (цементация, загартування й т.п.);
- інші необхідні технологічні дані, що приводяться в технічних вимогах на полі креслення.



а)



б)

- а – визначення небезпечних напружених ділянок лонжерона;
 б – визначення небезпечних напружених і найбільш зношуваних ділянок шатунної шийки

Рисунок 1.17 - Розрахунковий аналіз методом кінцевих елементів

Складальне креслення виконується на вузли й складальні модулі з метою наочної уяви технології складання та її послідовності. Складальне креслення може виконуватися вже у випадку, коли як мінімум дві окремі деталі з'єднуються між собою за допомогою хоча б однієї технологічної складальної операції.

На полі креслення відображаються необхідна кількість видів і перетинів, номери позицій вхідних елементів, габаритні й складальні розміри, усілякі допуски й посадки на взаємне розташування вхідних елементів, різна технологічна інформація про процес складання. Наприкінці номера позначення складального виробу на кресленні проставляється буквене вираження «СБ».

Монтажне креслення містить вказівки по установці вузлів і систем автомобіля безпосередньо на його кузові або на каркасних елементах великих складальних модулів. Виконується аналогічно складальним кресленням. Але на відміну від складальних, на монтажних кресленнях графічна інформація повинна представлятися щодо системи координат автомобіля, а настановні розміри базуватися щодо відповідних координатних площин. Наприкінці номера позначення монтажного креслення проставляється буквене вираження «МК».

2. Специфікація повинна виконуватися на кожне монтажне й складальне креслення. У ній приводиться кількісний склад вхідних елементів. Під елементами тут маються на увазі складальні одиниці (дрібні підборки із двох і більше деталей, функціональні вузли, складальні модулі), деталі, стандартні вироби (болти, гайки, шайби й т.п.).

Крім того, у специфікації вказуються номери позицій елементів відповідно до проставлених позицій на монтажному або складальному кресленнях, формати креслень, цифрові позначення й найменування вхідних елементів.

Цифрове позначення деталей і складальних одиниць, кількість складальних і монтажних креслень, зміст інформації на кресленнях і специфікаціях – усе повинно відповідати структурній схемі описової специфікації автомобіля, що відбиває послідовність технології складання автомобіля за принципом знизу нагору – від окремих деталей до кінцевого виробу «Автомобіль у зборі» (рис. 1.18).

3. Технічні вимоги до комплектуючих виробів складаються для таких деталей і складальних одиниць, які планують виготовляти не на власних площах, а на виробничій базі іншої організації (постачальника). Комплект креслень і специфікацій на такі вироби може бути внут-

рішньою інформацією постачальника, що робить виріб, і може бути його комерційною таємницею. Тому в деяких випадках у якості графічної інформації для проведення проектно-конструкторських робіт підприємству–розроблювачеві автомобіля надається поверхнева математична модель без внутрішніх конструктивних подробиць.

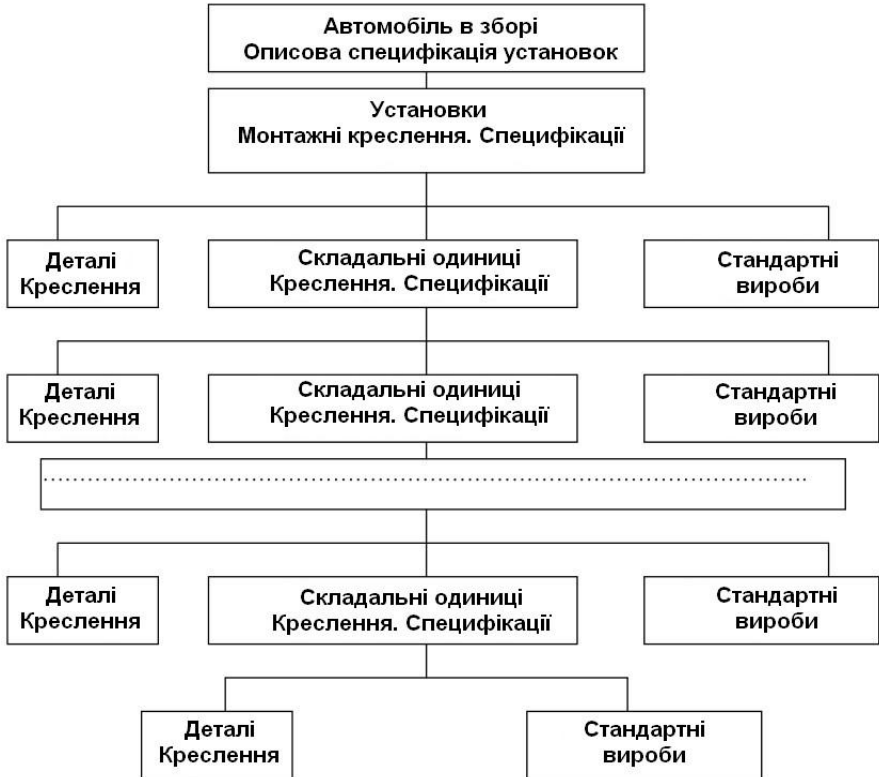


Рисунок 1.18 - Структурна схема рівнів виробів у складі описової специфікації «Автомобіль у зборі»

4. Ремонтно-експлуатаційні документи складаються як на автомобіль в цілому, так і на деякий перелік використовуваних вузлів і агрегатів для забезпечення високих показників довговічності й надійності в процесі експлуатації автомобіля. Тут приводяться технічні характеристики виробів, умови експлуатації, особливості технічного об-

слуговування й проведення ремонтних робіт, перелік рекомендованих до використання інструментів, експлуатаційних матеріалів та інша необхідна інформація, що стосується дотримання правил і вимог по обслуговуванню й експлуатації автомобіля.

Конструкторська документація може бути піддана коректуванню за результатами випробувань дослідних зразків автомобілів, проведених на наступних етапах робіт.

Етап «Випробування конструкцій».

В ідеалі передбачається, що знання й досвід інженера достатні для того, щоб сконструювати виріб, відповідно до вимог технічного завдання, а аналіз і перевірки покликані лише підтвердити безпомилковість проектних і конструкторських рішень.

На практиці досягти цього дуже складно, і нерідко виявляються які-небудь невідповідності, особливо на перших дослідних зразках. Тому у випадку виявлення в процесі випробувань розбіжностей з вимогами технічного завдання, невідповідності конструкції повинні бути усунуті (рис. 1.19 і 1.20).

Випробування – це визначення значень параметрів конструкції й властивостей автомобіля, агрегатів, вузлів, систем, на відповідність установленим вимогам.

Процес випробувань завжди супроводжується необхідними уточненнями й коректуваннями регламентуючих документів, загального компонування, об'ємної віртуальної моделі автомобіля й відповідного комплексу конструкторської документації.

Етап «Затвердження конструкцій».

Цей етап (рис. 1.21) характеризується проведенням приймальних випробувань. Дані випробування є заключними для конструкторських робіт, після чого відкоректовані об'ємна віртуальна модель автомобіля й комплект конструкторської документації, передаються в діюче виробництво, де приступають до початку складання автомобіля на конвеєрі. На час приймальних випробувань уже повинна бути проведена частина основних робіт по підготовці серійного виробництва, й завершені випробування дослідних зразків попередніх серій.

Але перед тим як запустити автомобіль у повномасштабне серійне виробництво, необхідно відробити процес складання автомобіля, вузлів, систем і деталей у дослідно-промисловому виробництві, де

реалізується (на наявному або закупленому устаткуванні) виготовлення автомобілів дрібносерійними партіями.



Рисунок 1.19 - Схема етапу «Випробування конструкції»



Рисунок 1.20 - Схема циклу усунення невідповідностей конструкції

Дослідно-промислове виробництво в мініатюрі повторює серійне виробництво, здійснюване на головному конвеєрі підприємства. Це і є відмінна риса дослідно-промислового виробництва від експериментального, де дослідні зразки (1-ї і 2-ї серії) в основному збираються й виготовляються фактично підручними засобами в одиничних екземплярах з використанням «обхідної технології» (швидкого прототипу-

вання).



Рисунок 1.21 - Схема етапу «Затвердження конструкції»

Дрібносерійна партія зразків, зроблена в дослідно-промисловому виробництві, – це так звана пілотна партія (дослідні зразки 3-ї серії), яку піддають приймальним випробуванням, проведеним для остаточного узгодження й затвердження конструкції автомобіля.

На цій серії проводяться в повному обсязі всі стендові й дорожні (функціональні й ресурсні) випробування, а також перевіірочні випробування на відповідність нормам законодавчих вимог.

На підставі актів і протоколів приймальних випробувань і технологічного узгодження вповноважена приймальна комісія на чолі з керівниками підприємства-розроблювача повинна затвердити готовність конструкції автомобіля для постановки на виробництво.

У випадку негативного рішення, відповідні конструкторські й

іспитові підрозділи виробляють програму коректувальних заходів і погоджують програму подальших випробувань.

У випадку позитивного рішення, привласнюється літера схвалення «Д₄», після чого конструкторська документація та об'ємна віртуальна модель автомобіля, передаються в діюче виробництво.

Крім того, затверджуються й узгоджуються технічні умови на автомобіль. Варто відзначити, що до цього часу сторонні підприємства-виготовлювачі також повинні бути готові до випуску комплектуючих виробів для забезпечення заданої програми випуску автомобілів.

Технічні умови – це документ, що містить основні показники з технічного завдання, підтверджені й перевірені за результатами раніше проведених циклів випробувань. Є регламентуючим документом технічної відповідності конструкції автомобіля, на підставі якого підприємству-виготовлювачеві можуть бути пред'явлені претензії у випадку невідповідності виробленої продукції, тим або іншим функціональним характеристикам і параметрам.

Етап «Серійне виробництво».

За результатами контрольних кваліфікаційних випробувань вносяться зміни в конструкторську документацію, якій привласнюється літера стадії розробки «А».

У випадку виявлення невідповідностей автомобіля в процесі заключних випробувань (невідповідності вже не допускаються), припиняють виробництво й проводять додаткові коригувальні дії по спеціальних програмах, у яких позначають причини виявлених недоліків, необхідні коректувальні заходи щодо усунення дефектів, заходи щодо модернізації або освоєння нового оснащення й устаткування, джерел фінансування робіт та ін.

Омологация – це процедура перевірки конструкції транспортного засобу на відповідність внутрішнім вимогам країни-виготовлювача, міжнародним вимогам, національним вимогам країн експорту, а також оформлення документів по присвоєнню знака офіційного затвердження й одержання сертифікатів омологатії, що дають право на продаж конкретного типу автомобіля на ринку якої-небудь однієї країни або ряду країн.

У процесі серійного виробництва автомобілів, підприємство здійснює політику просування свого товару на заплановані ринки збуту: проводить рекламні кампанії; укладає договори з дилерами на пос-

тавку; розширює мережу пунктів продажу; проводить маркетингові дослідження з розширення попиту; веде аналітичні огляди по реалізації своєї продукції й продукції автомобілів-конкурентів (автомобілів-аналогів), а також їх порівняння за ціною, якістю й технічним рівнем тощо. На підставі звітів по аналітичних оглядах і одержуваного прибутку, підприємство може коректувати обсяг автомобілів, що випускаються, аж до припинення виробництва.

Етап «Припинення виробництва».

Даний етап (рис. 1.22) визначає заключну стадію життєвого циклу автомобіля (сімейства автомобілів), коли підприємство закінчує його виробництво й реалізацію. Цьому рішенням передують процедура маркетингових досліджень, аналогічних тим, які представлені на першому етапі фази концептування.

По суті, маркетингові дослідження не припиняються протягом усього процесу розробки автомобіля. Маркетингові служби постійно відслідковують можливість і доцільність існування виробу в умовах сучасного світового розвитку автомобільної промисловості.

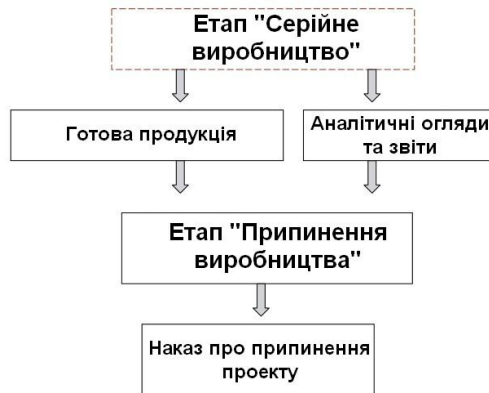


Рисунок 1.22 - Схема етапу «Припинення виробництва»

Варто відзначити, що на підставі маркетингових досліджень може бути припинена також розробка конструкції ще до початку серійного виробництва по тим же перерахованим причинам.

Також можливе альтернативне рішення припиненню виробництва на підприємстві-розроблювачі – перенос виробництва на інше під-

приємство у випадку стійкого попиту на автомобілі. По досягнутих домовленостях підприємство-розроблювач може продовжувати виготовлення й поставку комплектуючих на підприємство, де буде здійснюватися виробництво готових партій автомобілів.

Наказ про припинення (перенос) виробництва автомобілів випускається керівником підприємства, у ньому також вказують обсяги й строки виготовлення запасних частин для продажу й належного забезпечення ними вповноважених організацій технічного обслуговування й ремонту вже проданих автомобілів. На той час може бути розроблена конструкція й завершена підготовка технології складання вже нового сімейства автомобілів, яке займе місце знятого з виробництва сімейства.

Питання для самоперевірки

1. Назвіть функціональні етапи розробки нового автомобіля.
2. В чому полягає основне завдання дизайнера при розробці зовнішньої форми нового автомобіля?
3. Які функції бюро компоновання?
4. Навіщо потрібна база даних автомобілів - аналогів?
5. Що таке технічні умови?
6. Які роботи виконуються на етапі доведення конструкції?
7. Що таке омологация і навіщо вона потрібна?
8. Які роботи виконують на етапі випробування конструкції?
9. Яка інформація є вхідною для маркетингових досліджень?
10. З яких робіт складається розробка дизайн-проекту?
11. Що таке ескізне компоновання?
12. В чому переваги об'ємної графіки (3D) над плоскою (2D)?
13. Які роботи дозволяють робити спеціалізовані додатки САПР?
14. Що є результатом ескізного компоновання?
15. Навіщо роблять макет зовнішніх форм автомобіля у масштабі 1:1?
16. З чого складається об'ємна віртуальна модель автомобіля?
17. Які види документів входять до складу конструкторської документації автомобіля?
18. Що таке швидке прототипування?
19. Навіщо потрібен етап випробування розробленої конструкції?
20. Коли може бути прийняте рішення про припинення виробництва?

ЛЕКЦІЯ № 2. ФУНКЦІОНАЛЬНІ МОЖЛИВОСТІ СУЧАСНИХ САПР ВИКОРИСТОВУВАНИХ У МАШИНОБУДУВАННІ

План лекції. Загальні відомості про автоматизоване проектування. Інтегровані CAD/CAE/CAM - системи. Твердотільне моделювання. Поверхневе й гібридне моделювання. Робота зі складаннями та в режимі креслення. Обмін графічною інформацією між програмами. Спеціалізовані програми 3D-моделювання.

Література: [4], [5], [11], [16] - [22], [32], [75]-[82].

Автоматизувати виробництво людство прагнуло завжди. Але до середини 20-го століття це були спроби вдосконалення механізмів і технологій. Перші спроби використання систем автоматизації почалися після Другої Світової Війни. Назвати проривом застосування електронних пристроїв для потреб ВПК у США наприкінці 1940-х, початку 1950-х не можна. Потужності обчислювальних машин були тоді недостатні. Серйозні успіхи прийшли тільки в 1970-ті роки, коли з'явилися електронні пристрої, здатні працювати з великим масивом інформації. Цей період прийнято називати першим етапом розвитку автоматизованих систем проектування. Була доведена ефективність використання ЕОМ у вирішенні виробничих завдань.

В 1980-ті почався другий етап електронної революції. До цього часу розмір обчислювальних пристроїв помітно зменшився, а швидкість роботи суттєво зросла. Серйозною причиною вибухового росту став випуск персональних комп'ютерів, за допомогою яких збільшилося коло користувачів.

Серед безлічі шляхів розвитку й декількох великих виробників став вимальовуватися лідер - компанія ІВМ. Архітектура пристроїв з мікропроцесором Intel x86 виявилася найбільш вдалою для використання в автоматизації проектування. Тоді ж почали зароджуватися CAD і CAM системи в машинобудуванні, наукомістких виробництвах.

Методи просторового моделювання дозволили прораховувати складні процеси, створювати основу технології програмування для верстатів з ЧПУ. До середини 1980-х намітився спад у розвитку попу-

лярності продуктів Apple, Motorola. Однак графічні станції під керуванням ОС Unix утримували лідерські позиції. Але вже на початку 1990-х програми на платформі Windows обігнали конкурентів. Пропоновані системи для верстатів, устаткування були зручніші, продуктивніші й головне дешевші. Методи просторового проектування виявилися затребувані в енергетиці, виробництві побутової техніки, автомобілебудуванні, космонавтиці.

Активніше стала використовуватися технологія в машинобудуванні. Програми для токарських верстатів, підвищили якість продукції, скоротили час виробництва. Виникла необхідність створення окремих напрямків у цифровій графіці. Остаточного оформилися терміни CAD, CAM, CAE, їхнє призначення й особливості.

Існує *кілька тлумачень терміна САПР*, які можна зустріти в різній літературі. САПР – це система автоматичного проектування. Поняття «автоматичний» тут має на увазі, що система функціонує самостійно, без участі людини. Однак це не так: у САПР частина функцій виконує людина, а автоматичними є тільки окремі проектні операції й процедури. Термін «автоматизація» лише підкреслює обмежену участь людини в процесі проектування, а не повну його відсутність. Тому таке тлумачення САПР є невірним.

Сам термін САПР "Система автоматичного проектування" (в англійській нотації - CAD) з'явився наприкінці п'ятдесятих років XX ст. А вже перші CAD-системи з'явилися лише через десять років.

Прийняте на сьогодні у вітчизняній інженерній практиці визначення САПР (Система Автоматизованого Проектування) – означає комплекс засобів автоматизації проектування, взаємозалежних з необхідними підрозділами проектної організації або колективом фахівців (користувачем системи), що виконує автоматизоване проектування; тобто більш коротко й зрозуміло - поняття САПР містить у собі всі можливості програмного проектування.

Проектування - це процес створення опису, необхідного для побудови в заданих умовах ще не існуючого об'єкта.

Основна функція САПР – виконання автоматизованого проектування на всіх або окремих стадіях проектування об'єктів та їх складових частин. САПР поєднує технічні засоби, різні види забезпечення, параметри й характеристики яких вибирають, враховуючи особливості завдання інженерного проектування об'єктів.

Функціонування САПР визначає нову прогресивну технологію

проектування, засновану на взаємодії людини та ЕОМ. Залежно від ступеня участі людини й використання ЕОМ розрізняють режими проектування. Однак все-таки зручніше користуватися англomовними версіями, що описують види й технології виконуваних робіт більш детально. Найбільш популярні терміни означають:

CAD системи - означає комп'ютерну підтримку проектування (Computer Aided Design). Програми з пакетом модулів для створення тривимірних об'єктів з деталізацією їх особливостей та можливістю одержання повного комплексу конструкторсько-проектної документації.

CAM системи - переводиться як комп'ютерна підтримка виробництва (Computer Aided Manufacturing). Це прикладні програми за допомогою яких прописують алгоритми роботи верстатів з ЧПУ. При цьому в якості основи використовується тривимірна модель (3D), зроблена у CAD-системі.

CAE системи - клас продуктів для комп'ютерної підтримки розрахунків та інженерного аналізу (Computer Aided Engineering). Поява можливості створювати твердотільну модель вимагала детального її опису, прогнозування експлуатаційних навантажень, включаючи вплив температури, опору середовища. Тому були розроблені спеціалізовані програми CAE, які сьогодні використовуються або як окремі вбудовані CAE-модулі у САПР, або як окремі розрахункові комплекси, такі як ANSYS, IDEA StatiCa, CalculiX, OpenFOAM, ELCUT тощо.

Автоматизовані системи проектування в процесі еволюції розділилася на окремі напрямки, у рамках яких вирішувалися вузькоспеціалізовані завдання. Розширювався й арсенал інструментів для досягнення мети. Тому сьогодні можна на кожному етапі виробництва вибрати систему, найбільш підходящу в конкретному випадку.

По традиційній класифікації всі САПР підрозділяють на три рівні:

- **нижній, або легкий рівень.** Представниками цього рівня є такі САПР, як AutoCAD, Caddy, CADMECH Desktop, Mastercam, T-flex, OmniCAD, Компас. Ціновий діапазон цих САПР становить 500-2000 доларів за робоче місце;
- **середній рівень.** Представниками цього рівня є такі САПР, як Solid Edge, SolidWorks, Autodesk Inventor, Cimatron, Form-Z, CAD Solidmaster і, що усе ще продовжує розбудовуватися,

Mechanical Desktop, Designspace. Ціновий діапазон цих САПР становить 2000-20 000 доларів за робоче місце;

- **верхній, або важкий рівень.** Представниками цього рівня є такі САПР, як ADAMS, ANSYS, CATIA, EUCLID3, Steo (Pro/ENGINEER), NX (Unigraphics). Ціна цих САПР становить більше 20 000 доларів за робоче місце.

Легкі САПР.

Програми даної категорії служать для двовимірної креслення, тому їх звичайно називають електронною креслярською дошкою. До теперішнього часу вони поповнилися деякими тривимірними можливостями, але не мають засобів параметричного моделювання, які мають важкі й середні САПР. Ці програми дозволяють скоротити час проектування й поліпшити якість документації тільки за рахунок усунення ручної праці. При цьому вони не захищають від помилок, характерних для ручного проектування - за допомогою кульмана, олівця й ластику. Відносно невисока й вартість таких програм, тому вони користуються попитом, незважаючи на нинішню економічну кризу. Саме через їхню простоту й дешевину, "легкі" системи стали найпоширенішим продуктом автоматизації проектування, свого роду "робочою конячкою" світу САПР. І якщо ви не виконуєте складних проектів і вас не "підтискають" строки, то ваш вибір можна обмежити такими програмами.

AutoCAD - найпоширеніший продукт, виготовлений компанією Autodesk. Він являє собою автоматичну систему універсального проектування, яка містить у собі необхідні елементи двовимірної креслення й тривимірного моделювання. Розроблена в 1982 році, автоматизована система AutoCAD заслужено одержала найширше поширення й популярність серед проектувальників всіляких галузей промислової індустрії. Одержавши безперечну перевагу перед іншими автоматизованими системами через порівняно невисоку ціну, цей програмний продукт досить швидко одержав заслужену популярність.

AutoCAD не тільки впливає на час інженерно-проектних робіт, але й на якість цих робіт у плані неухильної точності. На основі проектних обстежуваних моделей можна швидко виконувати проекції, місцеві розрізи, а також створювати взаємозалежні блоки креслень і цілеспрямовано залежно від виконуваних завдань дистанційно ними управляти й групувати по відповідних до категорій, розділів основно-

го проекту, архівувати інженерно-проектну документацію, а також вчасно організовувати співробітництво різних категорій фахівців. Крім того, програма унікальна тим, що на самих ранніх етапах проектних робіт може встановити неточності й вади, запобігаючи тим самим можливі наступні помилки.

У програмі AutoCAD використовується формат DWG, який сьогодні є стандартом при інженерному проектуванні в будь-якій галузі промисловості, але це - не єдино можливий варіант. Файловий формат pdf, наприклад, успішно використовується різними фахівцями при необхідності обміну даними.

Можливості програми AutoCAD, що постійно розширюються, свідчать про її актуальність і популярність. Зокрема з'явилася можливість виявляти й позначати параметричні внутрішні зв'язки між об'єктами, створювати, змінювати й редагувати об'єкти довільної форми. Крім того, для деяких галузей промисловості створені спецпрограми AutoCAD: для дорожнього будівництва, галузі машинобудування, землевпорядження, будівельної архітектури, електротехніки. Для виконання інженерно-конструкторських робіт, не пов'язаних з 3D графікою, створена полегшена версія програмного продукту, яка використовується при створенні двовірних креслень (версія AutoCAD LT).

Програма Autodesk дозволяє організувати результативне співробітництво різних фахівців: інженерів, конструкторів, дизайнерів, технологів на самому першій етапі процесу проектування, оскільки автоматизований продукт надає можливість працювати із цифровими прототипами.

AutoCAD Mechanical - системний продукт, заснований на платформі AutoCAD, застосовується в промисловому виробництві і являє собою частину цифрових характеристик програми Autodesk. Зберігаючи отриманий раніше досвід і корисні наробітки з підготовленої раніше програми AutoCAD, цей системний продукт дозволяє суттєво прискорити процес виконання проектних робіт. Крім того, він є найбільш точним, оскільки містить у своїй бібліотеці всі необхідні параметри, задані вимогами ДСТУ.

САПР середнього рівня.

Програми даної категорії дозволяють не тільки виключити помилки, можливі при проектуванні за допомогою програм "нижнього" рівня, але й виконати різні перевірочні розрахунки деталей і складань

виробу, порахувати їх вагові характеристики та ін., що характерно для програм "важкого" рівня. Усе це стає можливим завдяки переходу від двовимірного проектування до тривимірного, "об'ємного" моделювання. Застосування таких програм при розробці виробів середньої складності дозволяє значно скоротити час розробки й зменшити кількість помилок у конструкторській документації.

Такі пакети з'явилися у світі САПР зовсім недавно — у середині 1990-х років. До цього існувало тільки два полюси — на одному потужні (читай, "важкі") системи, що працюють на Unix-станціях (втім, тоді їх було набагато більше, чим зараз), а на іншому - прості (читай, "легкі") програми двовимірного креслення для персонального комп'ютера. Але як тільки персональний комп'ютер здобув достатню потужність, а Windows стала багатозадачною і більш стійкою операційною системою, розроблювачі змогли створити системи автоматизованого проектування, які зайняли проміжне положення між "важкими" і "легкими" продуктами. Від перших вони успадкували можливості тривимірного твердотілого й поверхневого моделювання, а від других — невисоку ціну, зручний графічний інтерфейс і орієнтацію на платформу Windows. Новинки зробили справжній переворот у світі САПР, дозволивши багатьом конструкторським і проектним організаціям перейти на тривимірне моделювання.

Важливу роль у становленні середнього класу зіграли два ядра твердотілого параметричного моделювання - ACIS і Parasolid, які з'явилися на початку 90-х років і зараз використовуються в багатьох ведучих САПР. Геометричне ядро служить для точного математичного представлення тривимірної форми виробу й керування цією моделлю. Отримані з його допомогою геометричні дані використовуються системами CAD, CAM і CAE для розробки конструктивних елементів, складань і виробів. У цей час Parasolid належить фірмі EDS, а ACIS — компанії Dassault, які продають ліцензії на їхнє використання всім бажаючим. Таких бажаючих чимало — ці ядра складають основу більше сотні САПР, а число проданих ліцензій перевищило за мільйон. Успіх зрозумілий — адже використання готового ядра рятує розроблювачів системи від вирішення трудомістких завдань твердотілого моделювання й дозволяє зосередитися на користувацькому інтерфейсі та інших функціях. Втім, це не означає, що всі САПР середнього класу побудовані на базі цих механізмів. Багато компаній цінують незалежність і воліють розробляти власні "движки".

У числі лідерів "середнього" сегмента — система SolidWorks однойменної компанії (у цей час — вона підрозділ Dassault Systemes), пакет Solid Edge (розроблений фірмою Intergraph, тепер належить EDS), а також програма Inventor від Autodesk. Крім них у даному сегменті працює безліч компаній, у тому числі й російських. Їхня популярність серед користувачів постійно росте, і завдяки цьому дана область динамічно розбудовується. У результаті по функціональних можливостях середній клас поступово доганяє своїх більш дорогих конкурентів. Наприклад, будучи початково засобами твердотільного моделювання, ці системи в ході еволюції здобули функції поверхневого моделювання, підготовки виробництва, інженерного аналізу й навіть керування інженерними даними. Однак далеко не всім користувачам потрібна така різноманітність можливостей. Очевидно, саме цим пояснюється те, що перехід із двовимірних систем на тривимірні ще не завершився, і багато користувачів дотепер віддають перевагу програмам легкого класу.

Solid Edge - це автоматизована система, призначена для геометричного проектування й моделювання деталей і збірних вузлових комплексів. Ця система дозволяє використовувати засоби й базові операції в самому широкому спектрі (на відміну від традиційних автоматичних систем CAD, які орієнтовані на розробку й проектування окремих деталей).

SolidWorks - це САПР, яка дозволяє проектувати інженерні об'єкти в трьох вимірах, функціонує під управлінням програми Microsoft Windows. Через свій простий інтерфейс програма стала досить популярною, фактично ця програма є альтернативним рішенням двовимірних програмних забезпечень.

Вперше ця програма була створена в 1993 році й стала конкурентоспроможною в порівнянні з такими програмами, як AutoCAD, Solid Edge, SDRC I-DEAS, Pro/ENGINEER та ін.

Програмне забезпечення SolidWorks має інструменти для виконання тривимірного просторового моделювання, для виконання інженерних креслень і конструкторських складань, роботи зі звареними несучими конструкціями й листовими металевими продуктами, а також неоднорідними поверхнями різних довільних форм. Програма має у своєму розпорядженні можливість імпортування досить великого числа файлів 2D і 3D. З'явилася можливість програмування в Visual Basic і C++, а також передбачена програма аналізу за принципом кін-

цевих елементів початкового рівня Cosmos.

Важкі САПР.

Програми даної категорії дозволяють реалізувати проект складного технічного пристрою, виконати необхідні розрахунки й перевірки й одержати на виході конструкторську, технологічну документацію й програми для верстатів із числовим програмним управлінням для виготовлення деталей. Такі програми є великоваговими й у ціновій категорії.

У цей час на ринку залишилися лише три САПР верхнього цінового класу — NX компанії Siemens, CATIA французької фірми Dassault Systemes (яка просуває її разом з IBM) і Creo (Pro/Engineer) від PTC (Parametric Technology Corp.). Раніше потужних системи було більше, але після низки злиттів і поглинань компаній, кількість систем скоротилася. Головна особливість "важких" САПР — великі функціональні можливості, висока продуктивність і стабільність роботи — усе це результат тривалого розвитку.

Усі названі програми включають засоби тривимірного твердотілого й поверхневого моделювання, а також модулі структурного аналізу й підготовки до виробництва, тобто є інтегрованими пакетами CAD/CAM/CAE. Крім того, усі три постачальники пропонують для своїх САПР системи керування інженерними даними (PDM - Product Data Management), що дозволяють управляти всією конструкторсько-технологічною документацією й надавати додаткові дані, експортовані з інших корпоративних систем, з довідників і нормативних джерел. Незважаючи на те, що важкі системи коштують значно дорожче своїх більш "легких" побратимів, витрати на їхнє придбання окупаються швидко, особливо коли мова йде про складне виробництво, наприклад, машинобудування, двигунобудування, авіаційної й аерокосмічної промисловості.

NX Siemens - це дуже потужна комплексна CAD/ CAM/ CAE/ PLM система, сьогодні широко використовується в автомобільній і авіаційній промисловості. Архітектура програмного забезпечення NX була повністю перероблена, внаслідок цієї переробки стало можливим підключення багатьох спеціалізованих нових функцій I-DEAS.

Система автоматизованого проектування I-DEAS (Integrated Design and Engineering Analysis Software) - була одною з перших CAD систем твердотілого моделювання, розроблена Structural Dynamics

Research Corporation в 1982 році і використовувалася в основному в автомобілебудуванні. Особливо популярною I-DEAS була у компаній Ford Motor Company і General Motors.

CATIA - це система автоматизованого проектування, яку виготовила фірма Dassault Systemes (Франція). Перша версія програми CATIA V1 була представлена в 1981 році. У сучасних умовах користувачі успішно застосовують дві версії програми (V5 і V6). Це - різні версії. Вперше у 1993 році була представлена програма CATIA V4 і знайшла своє застосування в Unix-подібних системах. Програма CATIA V5 була випущена через 5 років, в 1998 році, і з'явилася першою програмою, що працювала під управлінням програми Microsoft Windows. Програма V5 була створена на зовсім новій базі й сконцентрувала в собі всі наявні в цьому напрямку наробітки САПР початку 21 століття.

Для стимулювання більш активного переходу до програми CATIA V5, компанія Dassault Systemes приготувала й запропонувала концепцію PLM (Product Lifecycle Management), яка стала затребуваною всією індустрією САПР.

В 2008 році була створена версія програми CATIA V6 компанією Dassault Systemes, яка за задумом виробників повинна підтримувати програми моделювання всіх інженерних конструкцій і супутні процеси, що відбуваються з виробами. Суть нової концепції, що одержала назву "PLM 2.0 на платформі V6" - у тривимірному моделюванні й можливості спільної роботи декількох співробітників одночасно. Різні фахівці, що перебувають у момент виконання роботи в різних точках планети, могли тепер спілкуватися за допомогою Web.

Безумовно, це стало великим проривом в машинобудівній індустрії, оскільки кожний зі співробітників, що працюють над проектом, міг у реальному часі безперешкодно оперувати реальними й віртуальними об'єктами, використовуючи нові можливості онлайнового спілкування й взаємодії. Користувачі дали високу оцінку новому підходу у вирішенні конструкторських завдань. PLM-рішення програми V6 включають :

- систему CATIA для автоматизації проектування;
- для керування колективною роботою при вирішенні інженерних завдань передбачена програма ENOVIA;
- для розв'язку завдань системного аналізу - програма SIMULIA;

- для виробництва цифрового матеріалу - програма DELMIA.

Над програмою PALM V6 працюють кілька компаній. Зокрема, це філія ізраїльської фірми Dassault Systemes Israel (SMARTEAM).

Creo (колишній Pro/Engineer) - є системою високого класу й має у своєму розпорядженні можливості для інженерного проектування зварених несучих конструкцій. Ця система містить модулі для базисного твердотільного моделювання й конструкторських збірних вузлів.

Одержати докладний і повний огляд можливостей всіляких систем CAD/CAM/CAE останніх версій, оцінити розподіл впливу учасників ринку систем САПР, причини переходу з однієї системи на іншу - можна безпосередньо на сайтах розробників САПР, або за допомогою спеціалізованих ресурсів у мережі Internet, таких як наприклад <http://www.cad.dp.ua>. На ньому зібрані не тільки огляди різних САПР, але й різні статті, поради й посилання на сайти розроблювачів даних систем.

Слід пам'ятати, що сьогодні всі компанії-розроблювачі САПР, на своїх сайтах викладають не тільки останні релізи своїх програм, але й різні довідкові матеріали по своїх програмних продуктах. Оскільки вони зацікавлені в усе більшому поширенні й використанні саме своїх версій САПР.

Так лідер ринку компанія Autodesk дає ліцензію для студентів на три роки при використанні своїх програм. По функціоналу "студентська" версія програми конструювання майже така ж, як дорога професійна версія, але коштує в рази дешевше. Причому вартість базового пакета Autodesk для одного користувача (одне робоче місце) завелика навіть для діючого, високооплачуваного «західного» інженера. Тому САПР важкого рівня (CATIA, Creo, NX) закуповують тільки підприємства, при цьому у вартість ліцензії входить і навчання співробітників даної версії програми.

Перш ніж розглядати можливості спеціалізованих програм моделювання, слід розібратися із самими базовими поняттями, на основі яких побудована робота всіх програм 2D і 3D моделювання - а саме поняття векторної й растрової графіки, хоча окремо називають ще й фрактальний тип відокремлення зображень, говорити про який ми не

будемо.

Для роботи з будь-якими зображеннями на екрані комп'ютера необхідні спеціальні програми, які прийнято називати графічними редакторами.

Графічний редактор – це спеціальна програма для створення, редагування й перегляду графічних зображень. Графічні редактори можна розділити на дві категорії - растрові й векторні, залежно від того з яким типом графіки вони працюють.

Векторна графіка - представляє собою набір геометричних примітивів, наприклад: точки, прямі, окружності, прямокутники. Головна особливість векторної графіки в тому, що вся інформація про графічні об'єкти, зберігається в пам'яті комп'ютера у вигляді різних математичних формул. А це дає можливість зміни розмірів зображення без втрати якості картини.

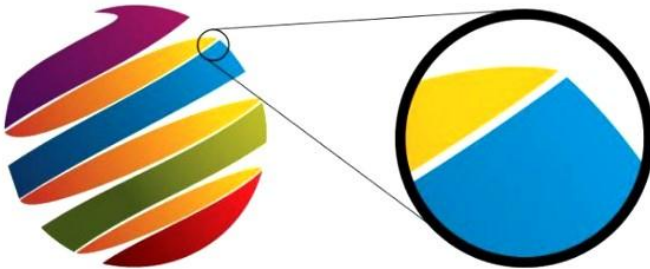


Рисунок 2.1 - Малюнок векторної графіки

При масштабуванні векторних зображень відбувається перерахування цих формул і такі візуальні елементи, як лінія, окружність або будь-яка інша геометрична фігура, залишаються незмінними. Такою ж залишається і якість картини в цілому. Це значно спрощує роботу із графікою й підвищує якість кінцевого результату.

Крім того, розмір файлів, у яких утримуються векторні зображення, значно менший, чим файли з растровою графікою такої ж якості, навіть якщо мова йде про зображення значного розміру з гарною деталізацією. Доповнює переваги векторної графіки робота як з окремими примітивними об'єктами, так і наявність можливості поєднувати їх у групи, зливати, обрізати й виконувати ще дуже велику кількість різних дій. Зображення при цьому є пошаровим, як і в будь-якому растровому редакторі, наприклад Adobe Photoshop.

Недоліки векторної графіки:

- відсутність можливості створювати реалістичну картинку, близьку по якості до світлина, це значно зменшує застосування векторної графіки;
- велика бібліотека фільтрів, які створюють найцікавіші ефекти при роботі з растровими картинками, у випадку роботи із векторними кривими стає абсолютно даремною;
- на відміну від растрових зображень, файли, що містять картинку у векторі, можна редагувати тільки в тій програмі, у якій вони були створені початково; але із цього правила є виключення, існують універсальні формати, вони змінюються в більшості векторних редакторів.

Самі популярні «векторні» програми - CorelDraw, Adobe Illustrator, Xara Designer, Adobe Fireworks, Inkscape, SK1.

Растрова графіка — завжди оперує матрицею пікселів. Кожному пікселю зіставляється значення яскравості, кольору, прозорості або комбінація цих значень. У растровому виді представимо будь-яке зображення, однак цей спосіб зберігання має свої недоліки: більший об'єм пам'яті, необхідний для роботи із зображеннями, втрати при редагуванні. Растровими зображеннями є будь-які світлина, скановані картини й зображення.

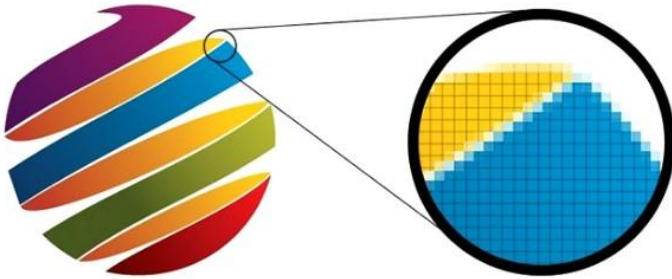


Рисунок 2.2 - Растрова графіка (при збільшенні стає видна матриця пікселів)

Звідси виникає таке поняття як "Розмір (Разрешение)" - це величина, що визначає кількість точок (елементів растрового зображення) на одиницю площі (або одиницю довжини). Його прийнято вимірювати в пікселях (англ. pixel, pel - скорочення від pictures element).

Чим більше пікселів на одиницю площі містить зображення, тим

більше воно детально. Максимальна деталізація растрового зображення задається при його створенні й не може бути збільшена. Якщо збільшується масштаб зображення, пікселі перетворюються в крупні зерна. За допомогою інтерполяції ступінчастість можна згладити. Ступінь деталізації при цьому не зростає, тому що для забезпечення плавного переходу між вихідними пікселями просто додаються нові, значення яких обчислюється на підставі значень сусідніх пікселів вихідного зображення.

Кожний піксель растрового зображення — це об'єкт, що характеризується певним кольором, яскравістю й, можливо, прозорістю. Один піксель може зберігати інформацію тільки про один колір, який і асоціюється з ним (у деяких комп'ютерних системах колір і пікселі представлено у вигляді двох роздільних об'єктів, наприклад, у відеосистемі ZX Spectrum).

Більшість форматів графічних файлів дозволяють зберігати дані про бажаний масштаб при виводі на друк, тобто про бажаний дозвіл в dpi (англ. dots per inch - ця величина говорить про кількість точок на одиницю довжини: наприклад 300 dpi означає 300 точок на один дюйм). Це винятково довідкова величина. Як правило, для одержання роздруківки світлини, який призначений для розглядання з відстані порядку 40 - 45 сантиметрів, досить розміру 300 dpi.

Найбільш популярні графічні редактори, у яких використовуються растрова графіка, це: Microsoft Paint, Adobe Photoshop, Corel Photo-Paint, Adobe Fireworks, GIMP і т.д.

Переваги растрової графіки.

Растрові редактори є найкращим засобом обробки світлин і малюнків, тому що забезпечують високу точність передачі градацій кольорів та півтонів.

Недоліки растрової графіки.

Зображення, створювані в растрових програмах, завжди займають багато пам'яті. Із цієї причини інформація у файлах растрового формату зберігається, як правило, у стислому виді.

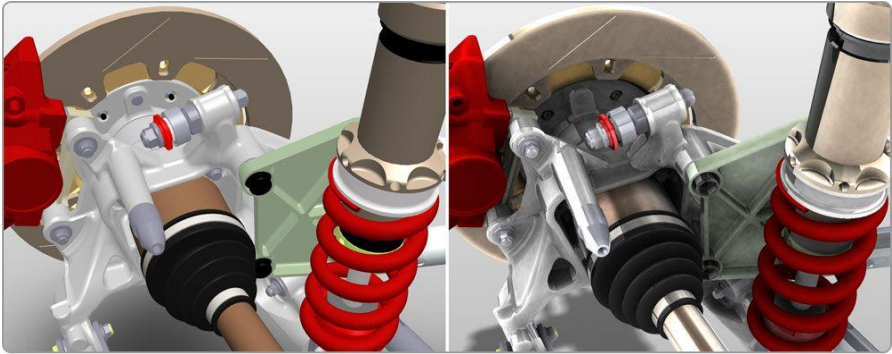
Растрові зображення неможливо збільшувати для уточнення деталей. Тому що зображення складається із точок, то збільшення приводить до того, що точки стають крупніше, що візуально спотворює ілюстрацію. Цей ефект називається пікселізацією.

Векторний і растровий формат зображення відрізняються один від одного не тільки особливостями обробки й редагування. Застосу-

вання векторної графіки обмежене в основному областю поліграфії: логотипи, ілюстрації, технічні малюнки й схеми. Растрова ж графіка застосовується значно ширше.

Усі програми САПР і 3D-графіки (Maya, 3ds Max, Zbrush, Cinema 4D, Lightwave, Rhinoceros тощо) початково працюють (створюють об'єкти) у векторному форматі. А потім, для одержання фото-реалістичного зображення, у спеціальних модулях проводиться процес називаний растриванням (растеризація).

Так наприклад в SolidWorks для додаткового зафарбовування в реальному часі, включаючи відкидання тіні й відбиття сцени, застосовується спеціальний інструмент Realview (рис. 2.3).



Without RealView

With RealView and
Ambient Occlusion

Рисунок 2.3 - Застосування інструмента Realview в SolidWorks

Застосовуючи Realview під час моделювання, ви одержуєте цілком реалістичне зображення моделі, або складання, на екрані комп'ютера, таке як у реалії, за допомогою натискання всього лише однієї кнопки, швидко й зручно.

Аналогічно, коли ви скануєте якесь креслення (малюнок, зображення), ви одержуєте растровий малюнок. Для подальшого використання відсканованого креслення в CAD-системі, необхідно провести його векторизацію - тобто перевести зображення з растрової форми у векторну - це процес, зворотний растеризації.

Основним інструментом усіх векторних редакторів є інструмент - Криві Безьє, він дозволяє створювати прямі, ламані й гладкі криві, що проходять через вузлові точки, з певними дотичними в цих точках.

Цей інструмент моделювання з'явився в арсеналі конструкторів досить давно. Вивченням принципів опису складних тривимірних об'єктів зайнялися ще в 50-х роках минулого століття. Необхідність удосконалення процесу й інструментів моделювання була викликана потребою створення більш складних форм, чого досягти за допомогою лінійок, циркулів і лекал було неможливо. Крім того, математичні моделі були потрібні й для верстатів з ЧПУ.

Тому наприкінці 1950-х відразу дві французькі автомобільні компанії "Рено" і "Сітроен" паралельно запропонували способи математичного опису поверхонь. Працівники цих компаній П'єр Безьє й Поль де Кастельжо розробили процедуру опису поверхонь, створених із кривих, які можна контролювати в проміжних точках (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 - Citroen і утворюючі форму криві

Незважаючи на те що Поль де Кастельжо із "Сітроен" розробив свій метод на пару років раніше (в 1959 році), криві й засновані на них поверхні одержали назву на честь П'єра Безьє, оскільки його дослідження було опубліковано в 1962 році, а інформація про Поля де Кастельжо з'явилася тільки в 1970-х.

Криві Безьє — це вдосконалені Ермітові криві. Якщо Ермітову

криву не можна контролювати в проміжних точках, а задається тільки її поведінка на початку й кінці, то поведінку кривої Безьє можна контролювати на всіх ділянках за допомогою проміжних точок.



Рисунок 2.5 - Приклад Кривої Безьє у вікні САПР під час моделювання

Ступінь кривої визначає кількість контрольних точок. Дві контрольні точки означають, що крива має перший ступінь і безперервна на одній ділянці, п'ять контрольних точок свідчать про четвертий ступінь на чотирьох безперервних ділянках.

Однак криві Безьє мають ряд обмежень. Зокрема, їх розрахунки ускладнюються з ростом кількості контрольних точок, що суттєво утрудняє застосування таких кривих. Саме тому розвиток математичного апарату для опису кривих і поверхонь не зупинився на роботах Безьє.

У якості альтернативи кривим Безьє прийшли **сплайни** - складні криві, що складаються із простих сегментів, гладко сполучених один з одним. Як різновид сплайнів у комп'ютерному моделюванні закріпилися NURBS-поверхні, описані в 1975 році Кеном Версприлом.

Ключова відмінність NURBS від кривих Безьє - можливість створення точки вставки (Knot), що розбиває складну криву на складові. Це дозволяє гладко з'єднати дві криві Безьє в одну NURBS-криву. При використанні таких кривих як каркасів створюються поверхні. Залежно від складності, поверхня може мати або криві, що просто граничать (у простому випадку), або деяке число проміжних кривих (рис. 2.6), які дозволяють управляти поверхнею на всіх ділянках.

Вказані інструменти моделювання Криві Безьє, NURBS-поверхні та сплайни - є основою сучасних систем поверхневого моделювання. Вони дозволяють не тільки створювати й контролювати складні поверхні, але й гладко з'єднувати їх між собою таким чином,

щоб людське око не змогло відрізнити, де закінчується одна й починається інша поверхня.



Рисунок 2.6 - NURBS-поверхня

У більшості САПР та програм 3D графіки ці інструменти дозволяють з'єднувати криві й поверхні з безперервністю по розташуванню (G0), дотичній (G1) і кривизні (G2). І тільки Autodesk Alias створює ще більш гладкі з'єднання по G3 і G4.

У таких з'єднань також є свій математичний опис. Більш докладно довідатися про історію NURBS і ролі, які вони відіграють у сучасних САПР, можна у спеціалізованій літературі. А щоб наглядно зрозуміти математику цих кривих і сполучень, треба запустити будь-яку САПР і розпочати роботу цими інструментами.

Серед усіх спеціалізованих програм 3D-моделювання використовуваних у автомобілебудуванні при розробці дизайну нових автомобілів слід виділити **Autodesk Alias Automotive**.

Програму **Alias Automotive** сьогодні успішно використовують в усьому світі провідні автомобільні дизайн-студії, оскільки вона містить повний набір інструментів і рішень, необхідних для розрахунків і візуалізації всіляких форм і поверхонь.

Програмне забезпечення, у якому намагалися добитися математично точних поверхонь, з'явилося ще 30 років тому, але тільки зараз воно стало невід'ємною частиною дизайнерського пророблення й конструкторської підготовки виробництва.

Лідером у цій області по праву вважається лінійка продуктів Alias від компанії Autodesk, але в СНД дані технології ще не одержали широкого поширення з ряду причин. Так, багато виробників не усві-

домлюють, що, крім зовнішніх характеристик, математично точні поверхні допомагають досягти цілого ряду переваг по експлуатаційних характеристиках.

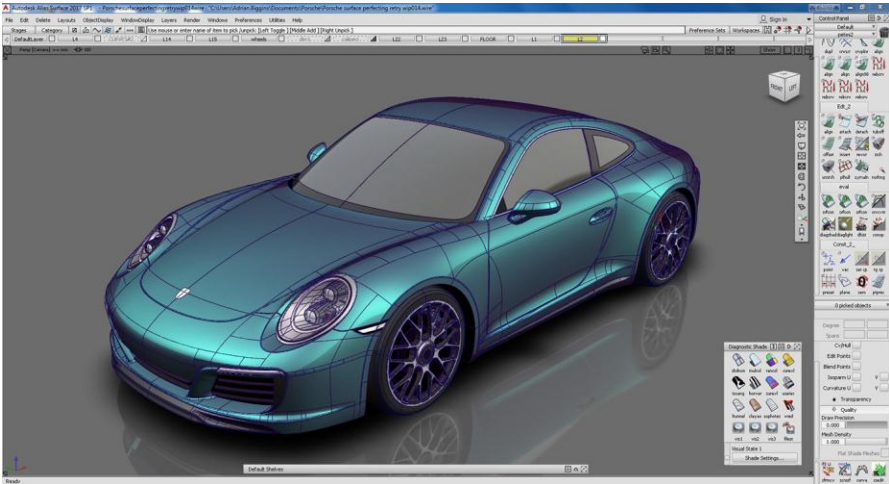


Рисунок 2.7 - Porsche 911 розроблений у Autodesk Alias Automotive

Наприклад, поверхні класу А (поверхні кузова автомобіля) мають більший коефіцієнт запасу міцності при статичних навантаженнях, що, у свою чергу, дозволяє заощаджувати на матеріалі. А відсутність кваліфікованих фахівців гальмує впровадження подібного роду ПО на підприємствах та інтеграцію із уже звичними всім машинобудівними САПР. Autodesk Alias охоплює всі етапи дизайну виробу: створення начерків та ескізів, одержання тривимірної моделі виробу на їхній основі й фотореалістичну візуалізацію (рис. 2.8-2.11).

Набір інструментів для створення ескізів дозволяє працювати з імпортованими зображеннями або створювати начерк з нуля. Autodesk Alias надає можливості повнофункціонального графічного редактора. Також Autodesk Alias дозволяє працювати за допомогою графічного планшета, що ще більше спрощує процес пророблення зовнішнього вигляду виробу.

На основі ескізів створюється тривимірна модель, яка складається з безлічі «шматків» — патчей (patch), що представляють собою одиночні NURBS-поверхні, які «натягають» на NURBS-криві, як на каркаси. Патчи сполучаються один з одним, утворюючи patch layout.

Ту саму форму можна змоделювати по-різному, створюючи різні комбінації патчей. Те, яким образом з'єднані патчи, і характеризує якість поверхні. Autodesk Alias дозволяє створювати безперервність (continuity) від G0 до G4. Безперервність G3 і G4 забезпечують найбільш плавний перехід поверхонь.

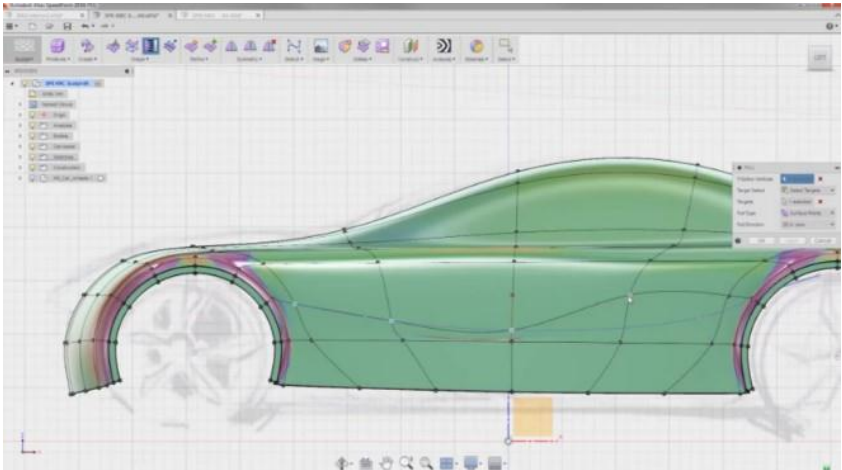


Рисунок 2.8 - Робота в полі ескізу у Alias Automotive

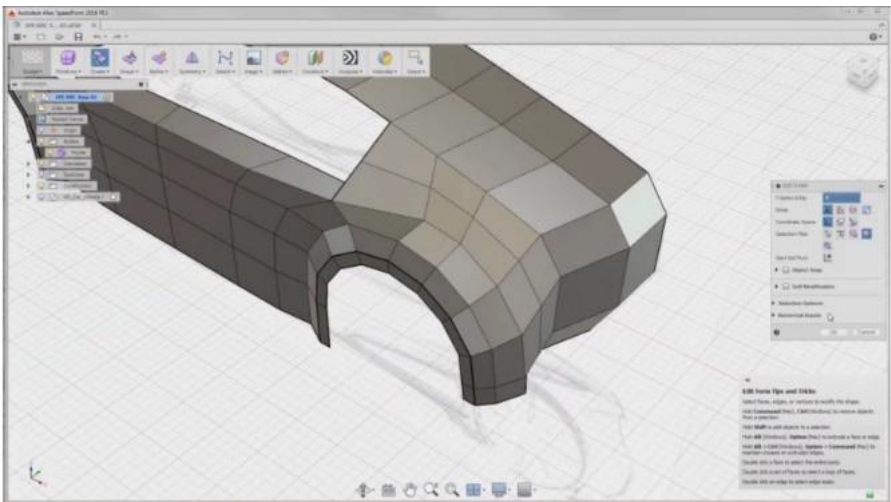


Рисунок 2.9 - Робота з NURBS-поверхнями у Alias Automotive

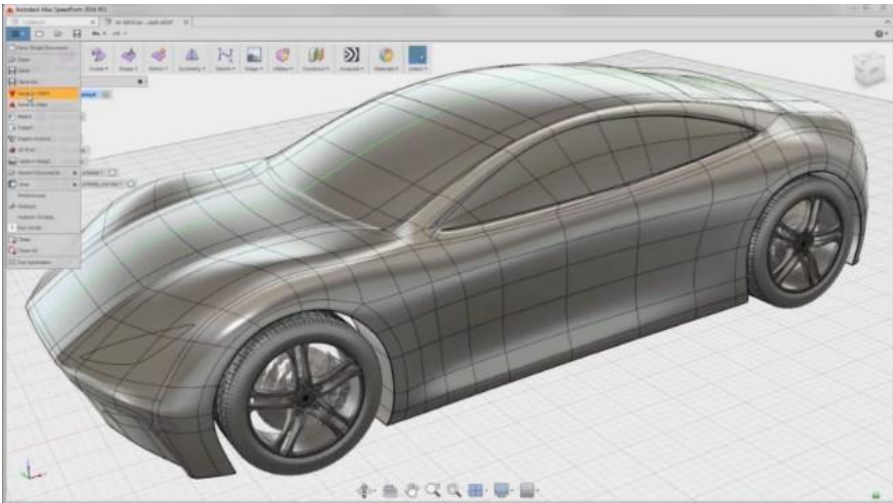


Рисунок 2.10 - Перетворення сітчастої моделі в поверхневу в Alias



Рисунок 2.11 - Фотореалістична візуалізація моделі Porsche 911 розробленої у Alias Automotive із додаванням фону

З найперших кроків пророблення концепції виробу Autodesk Alias надає великий набір як стандартних, так і зовсім унікальних інструментів, дозволяючи дизайнерам проектувати поверхні класу А в найкоротший термін. Комбінування 2D- і 3D-геометрії дає можливість вільного редагування складних поверхонь, враховуючи функціональне призначення виробу. Autodesk Alias допомагає скоординувати роботу різних служб і відділів шляхом проставляння особливих позначок на моделі (рис. 2.12).

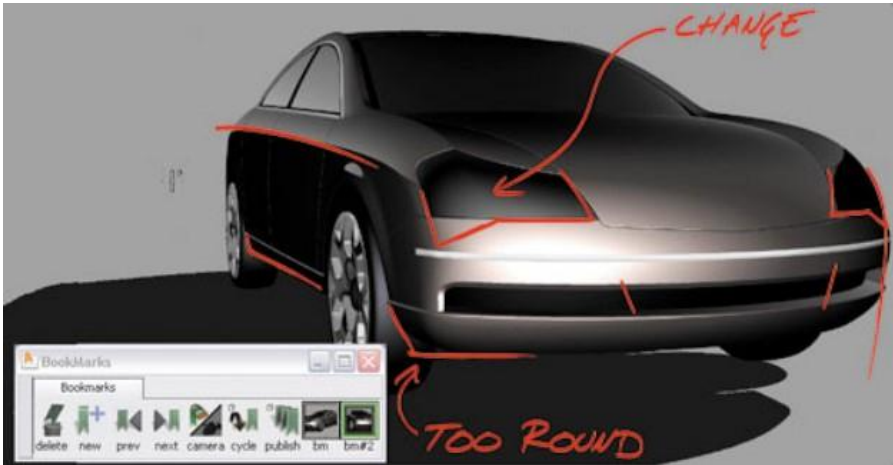


Рисунок 2.12 - Нанесення позначок на моделі у Alias Automotive

Швидка й надійна передача даних в інші САПР можлива завдяки використанню нейтральних форматів (IGES і STEP), а також транслятора даних Autodesk Directconnect, який дозволяє безперешкодно обмінюватися даними з різними САПР (CATIA V5/V6, NX, імпорт із SolidWorks, Creo).

Протягом усіх етапів проектування Autodesk Alias дає можливість стежити за всіма змінами моделі й представляти варіанти проєктованого виробу у вигідному світлі завдяки вбудованим засобам візуалізації, які дозволяють створювати фотореалістичні зображення й відеоролики. Величезна бібліотека шейдерів і налаштування висвітлення дозволяють виконувати всі роботи пов'язані з візуалізацією, безпосередньо в Autodesk Alias, а можливість експорту в Autodesk Showcase забезпечує можливість інтерактивної демонстрації виробу.

Autodesk Alias - це універсальний комплекс і головний інструмент сучасного промислового дизайну, що вирішує всі завдання моделювання: створення ескізу, проєктування тривимірної моделі й візуалізацію концепції виробу. Сумісність із основними CAD-системами зводить до нуля ризик викривлення дизайнерського задуму при передачі моделі конструкторам.

Працювати в Autodesk Alias можна без знання основ CAD-проєктування, що дозволяє залучати до розробки промислових виробів людей, що не мають спеціальної технічної освіти. До складу сі-

мейства входять Autodesk Sketchbook Designer, Autodesk Alias Design, Autodesk Alias Design for Inventor, Autodesk Alias Surface і Autodesk Alias Automotive, що дозволяє споживачеві вибрати продукт із необхідним для нього функціоналом.

Питання для самоперевірки

1. Яка основна мета використання систем САПР?
2. Як класифікуються системи САПР?
3. Коли з'явилися перші автоматизовані системи проектування?
4. Які основні функції САМ-систем?
5. Що таке хмарні САПР і які переваги їхнього використання?
6. Що таке твердотільне моделювання?
7. Яка основна функція САПР?
8. Що розуміють під проектуванням?
9. Які функції виконують системи САЕ?
10. Які функції САПР легкого рівня?
11. До якого рівня відносять САПР CATIA, NX, Creo?
12. Що таке графічний редактор?
13. Що таке векторна графіка та які її переваги й недоліки?
14. Що таке растрова графіка та які її переваги й недоліки?
15. Навіщо потрібна векторизація?
16. Для чого потрібен інструмент Крива Безьє?
17. Що таке сплайн?
18. Розкажіть про використання поверхонь типу NURBS.
19. Назвіть спеціалізовані програми 3D-моделювання використовуваних у автомобілебудуванні.
20. Що таке візуалізація і для чого вона потрібна?
21. Який процес зворотній векторизації і навіщо він потрібен?
22. Які переваги САПР середнього рівня?
23. Яка головна особливість важких САПР?

ЛЕКЦІЯ № 3. ЗАГАЛЬНІ ПРИНЦИПИ СТВОРЕННЯ ТВЕРДОТІЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ, ЕСКІЗІВ ТА КРЕСЛЕНЬ У САПР

План лекції. Обмеження двомірного проектування. Перехід на тривимірне моделювання. Керування орієнтацією деталі. Відображення моделі в декількох вікнах. Загальні принципи 3D-моделювання деталей. Ескізи й операції. Створення елементів по перетинах. Створення кінематичних елементів. Створення 3D-моделі по її плоскому кресленню.

Література: [4], [5], [6], [10], [11], [16] - [22], [81], [82].

Перш ніж приступити до побудови тривимірних моделей, давайте спробуємо відповісти на запитання: а навіщо нам це потрібно? Оскільки в наш час, в не найкращі для нашої економіки часи, ще майже половина користувачів САПР засновують свою роботу на двомірних, тобто плоских технологіях. Тому є кілька причин, і головна серед них не стільки людська інертність в освоєнні нових технологій, скільки вартість ліцензій сучасних систем САПР.

Отже це означає, що використовувані ними системи (наприклад той же AutoCAD), працюють у режимі "електронного кульмана". У цьому випадку електронне креслення складається з окремих геометричних примітивів (відрізків, окружностей, дуг тощо). При введенні геометричних об'єктів, що складають креслену деталь, конструктор може використовувати знання й навички, набуті при кресленні на кульмані, з використанням олівця та лінійок, тому що логіка креслення в обох випадках має багато спільного.

Незважаючи на те, що 2D-системи дозволяють цілком успішно вирішувати поставлені перед більшістю користувачів завдання, у міру розвитку нових технологій усе ясніше проявляються серйозні обмеження, властиві плоскому проектуванню.

Основний недолік 2D-систем полягає в тому, при створенні плоского креслення конструкторові доводиться мислити не в термінах проектованої деталі – основа, отвір, ребро жорсткості, а в термінах традиційного набору геометричних примітивів – відрізок, дуга, окружність і т.д. Наприклад, для побудови тонкостінної трубки на зобра-

женні деталі Патрубок, показаної на рис. 3.1, конструктор повинен розкласти її на окремі відрізки й дуги й побудувати проєкції цих елементів на всіх необхідних видах деталі. Ця робота вже досить рутинна і не несе в собі творчого початку.

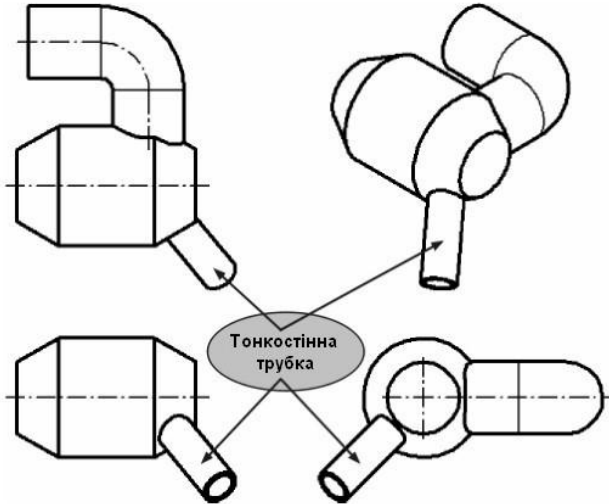


Рисунок 3.1 - Патрубок

Якщо виникає необхідність внести в деталь будь-які зміни, то їх необхідно заново відобразити на всіх видах деталі, що знову пов'язано з великими витратами часу. Частково цю проблему можна вирішити за рахунок створення параметричних плоских креслень. Однак не всі сучасні 2Dсистеми мають такі можливостями. До того ж створення складного параметричного креслення є далеко не простим завданням.

Обмеження 2Dсистем особливо наочно проявляються, коли поверхня деталі має складну форму (рис. 3.2), або коли необхідно побудувати аксонометричну проєкцію (рис. 3.3). Значна трудомісткість побудови складних поверхонь і аксонометричних проєкцій може змусити конструктора відмовитися від їхнього зображення або спростити форму деталі. У першому випадку це утрудняє розуміння проекту, у другому – знижує привабливість виробу з погляду споживача.

Список обмежень двомірного проектування можна продовжити й далі. У нього можна включити складність розуміння взаємного положення й взаємодії деталей у складальних одиницях, складність або

неможливість передачі даних у системи інженерного аналізу й підготовки керуючих програм для верстатів із числовим програмним управлінням (ЧПУ).

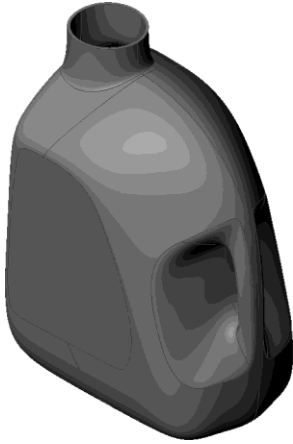


Рисунок 3.2 - Приклад складної форми

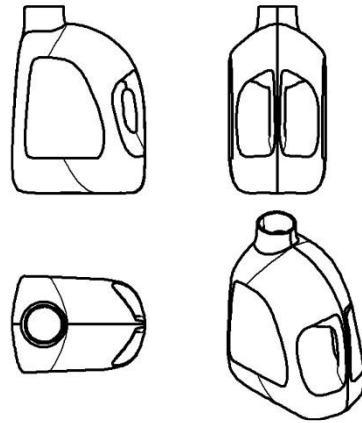


Рисунок 3.3 - Побудова видів та аксонометрії

Наведені вище приклади дозволяють зробити висновок, що використання тільки лише двовірних систем як засобу проектування й підготовки креслень породжує серйозні проблеми й сповільнює випуск нових виробів.

Перехід на тривимірне моделювання.

Сучасні 3D-системи мають досить ефективні засоби моделювання. Вони дозволяють створювати тривимірні моделі самих складних деталей і складань.

Використовуючи наочні методи створення об'ємних елементів, конструктор оперує простими й природними поняттями: основа, бобишка, ребро жорсткості, отвір, фаска, оболонка (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 - Основні елементи 3D-моделі деталі

При цьому процес проектування часто відтворює технологічний процес виготовлення деталі. У процесі побудови тривимірних моделей складальних одиниць конструктор має можливість тимчасово відключати відображення будь-яких елементів моделі.

Це особливо зручно, якщо модель містить у собі корпусні деталі, у яких розміщені інші компоненти виробу. На рис. 3.5 ліворуч показана модель складальної одиниці "Вентиль", виконана в системі КОМПАС. Праворуч показана частина тієї самої моделі, але з "погашеною" деталлю "Корпус".

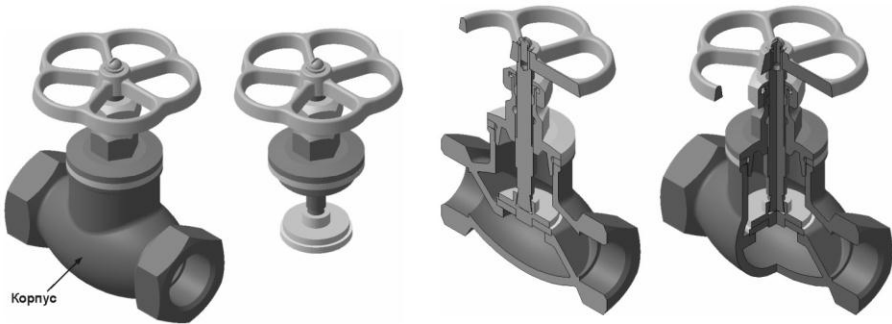


Рисунок 3.5 - "Вентиль" в зборі розроблений в системі Компас

Рисунок 3.6 - Перетин вентилля фронтальною та ламаною площинами

У будь-який момент, безпосередньо на екрані монітора, конструктор може виконати розріз моделі стандартними або додатковими площинами проекцій, або побудувати свій, самий неймовірний розріз. На рис. 3.6 ліворуч "Вентиль" розсічений фронтальною площиною проекцій. Праворуч те ж складання розрізане ескізом, що представляють собою ламану лінію із двох перпендикулярних відрізків.

Після побудови 3D-моделі деталі або складання, або безпосередньо в ході побудови, конструктор може одержати її креслення, унікши в такий спосіб рутинного створення видів засобами плоского креслення. Для цього потрібно лише вказати необхідні види, провести лінії розрізів або перетинів.

Плате креслення буде створено автоматично та з абсолютною точністю, незалежно від складності моделі. Отриманий у такий спосіб документ можна допрацьовувати вбудованими в систему засобами 2D-креслення: проставити додаткові розміри, позначення позицій, за-

повнити основний напис або підготувати специфікацію (рис. 3.7).

У всіх сучасних 3D-системах об'ємні моделі й плоскі креслення асоційовані між собою. Це означає, що будь-яка зміна, внесені в модель, буде негайно й точно відбите на всіх видах креслення.

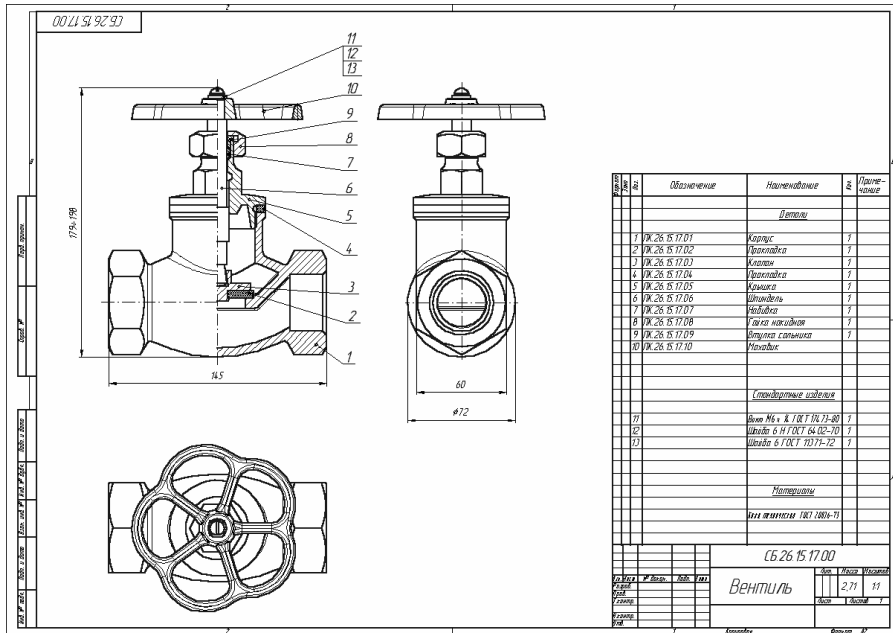


Рисунок 3.7 - Автоматично створене креслення зі специфікацією

Кожна сучасна 3D-система має у своєму розпорядженні потужні засоби редагування моделі. Можливості таких систем дозволяють задавати параметричні зв'язки та асоціації як між окремими елементами деталей, так і між деталями в складальних одиницях. Це дозволяє швидко вносити зміни в проект, створювати різні варіанти як окремих деталей, так і всього виробу в цілому.

На рис. 3.8 показано два варіанти деталі "Кронштейн", що відрізняються розмірами своєї основи. Для побудови другого варіанта досить змінити значення розміру, що визначає довжину основи. Після цього система перебудує модель зі збереженням загальної топології деталі: хомут для кріплення підшипника пов'язаний з лівою гранню деталі, а три кріпильні отвори – із правою.

Три деталі, показані на рис. 3.9 – це насправді три різні конфігурації однієї й тієї ж моделі "Хрестовина", що відрізняються своїми параметрами. Таким чином, для одержання всіх типорозмірів родинних деталей, що випускаються або використовуваних на підприємстві, часто досить побудови однієї єдиної моделі.

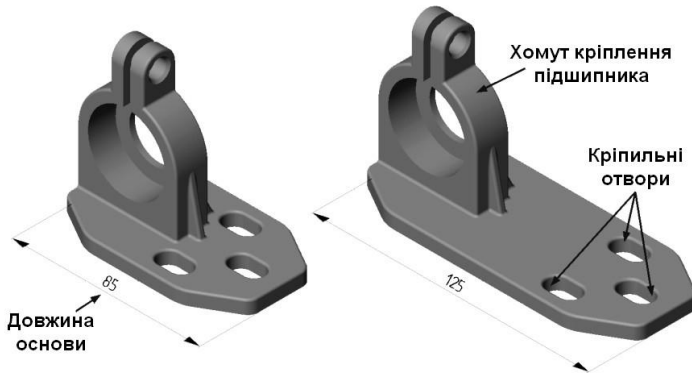


Рисунок 3.8 - Варіанти деталі "Кронштейн"

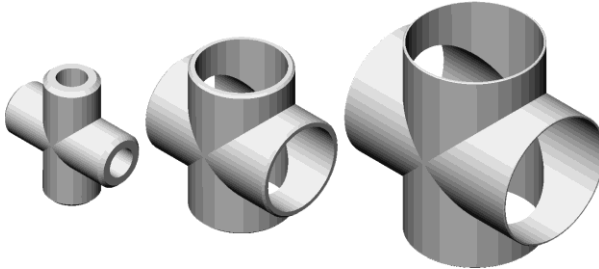


Рисунок 3.9 - Конфігурації деталі "Хрестовина"

По тривимірній моделі деталі система легко визначає її фізичні характеристики: площа поверхні, об'єм, координати центру ваги і т.д.. Якщо користувач визначає властивості матеріалу, то автоматично обчислюється маса. Це стосується як деталей, так і складань будь-якої складності. На рис. 3.10 показана модель складальної одиниці "Блок напрямний", виконаної в системі КОМПАС.

А вже на рис. 3.11 ви бачите інформаційне вікно з результатами розрахунків масових та інерційних характеристик складання з урахуванням ваги кожної із вхідних у неї деталей. Деякі сучасні 3D-системи забезпечуються вбудованими модулями, що розширюють їхні можли-

вості: створення ливарних форм, робота з деталями з листового металу, проектування трубопроводів і т.д. На рис. 3.12 показана деталь "Коробка", спроектована в системі SolidWorks. Деталь виготовлена методом гнуття зі сталевго листа.

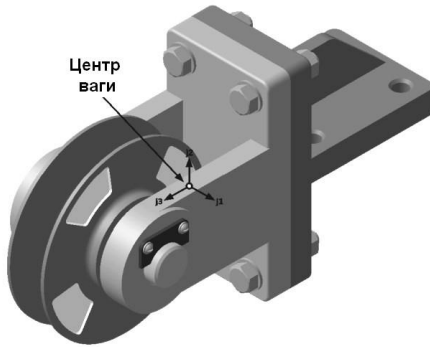


Рисунок 3.10 - Центр ваги складання "Блок нап'ямний"

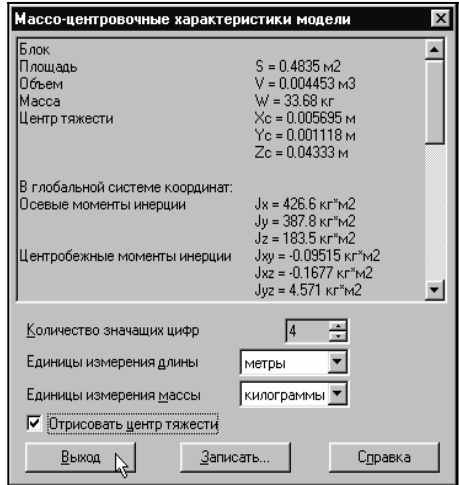


Рисунок 3.11 - Результаты розрахунків масових та інерційних характеристик складання

Праворуч показано плоске розгорнення цієї деталі, автоматично побудоване системою з урахуванням допусків згину. На зображенні розгорнення добре видні лінії згину й границі областей гнуття.

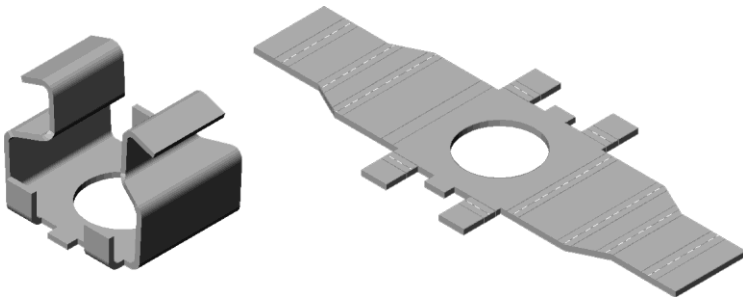


Рисунок 3.12 - Деталь "Коробка" спроектована в системі SolidWorks

На рис. 3.13 показана деталь "Кришка", спроектована в системі

КОМПАС. Деталь виготовляється методом лиття із пластмаси. Для виготовлення такої деталі необхідне спеціальне технологічне оснащення – прес-форма, яка складається з матриці (формотворного елемента, що визначає зовнішню форму деталі) і пуансона (формотворного елемента, що визначає внутрішню форму деталі).



Рисунок 3.13 - Деталь "Кришка" спроектована в системі КОМПАС

На рис. 3.14 показані ці елементи, спроектовані в системі КОМПАС на основі геометрії деталі "Кришка". Твердотільні моделі пуансона й матриці можуть бути передані безпосередньо в технологічну систему для підготовки керуючих програм для верстата з ЧПУ й наступного виготовлення в металі. На рис. 3.15 деталь "Кришка" показана в оточенні матриці й пуансона для більш наочної уяви їх форми та взаємного положення.

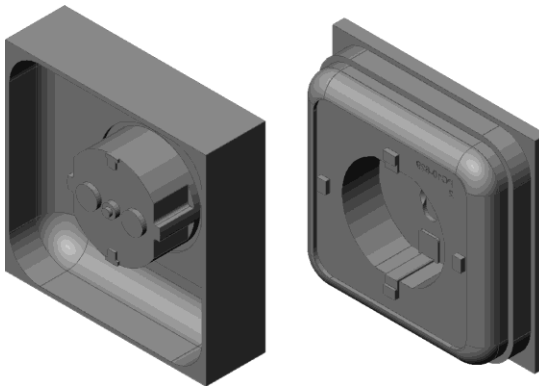


Рисунок 3.14 - Прес-форма "Кришки"

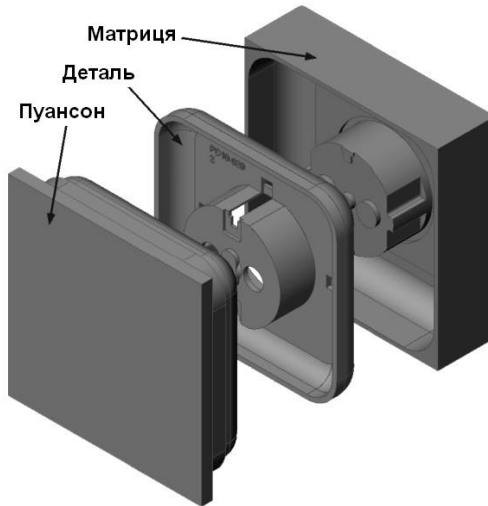


Рисунок 3.15 - Оснащення для виготовлення деталі з пластмаси

Тривимірні твердотільні моделі містять у собі всю геометричну інформацію, необхідну для роботи систем інженерного аналізу. У цьому полягає одна з головних переваг 3D-моделювання. Така модель може бути передана в будь-яку систему інженерних розрахунків для виконання її аналізу: розрахунків напруг і деформацій, частотного аналізу для визначення власних частот і форм коливань, теплових розрахунків і пов'язаних з ними температурних деформацій і напруг.

Робота подібних систем заснована на використанні методу кінцевих елементів, при якому тривимірна модель розбивається на елементарні об'ємні елементи різної форми, одержувані при нанесенні на тверде тіло сітки кінцевих елементів. Розбивка моделі на сітку кінцевих елементів дозволяє з високим ступенем точності відтворити реальну твердотільну геометрію деталі або вузла й забезпечує високу точність рішень.

Багато із сучасних систем інженерних розрахунків не вимагають від конструктора докладного знання теорії, на якій базуються розрахунки методом кінцевих елементів. Маючи у своєму розпорядженні тривимірну модель деталі, користувач повинен вибрати необхідний йому вид розрахунків, визначити характер закріплення й зовнішні навантаження, що діють на деталь, а також вибрати з бібліотеки матері-

ал, з якого вона буде виготовлятися.

На рис. 3.16 показана деталь "Важіль", спроектована в системі SolidWorks. Матеріал деталі – алюмінієвий сплав.

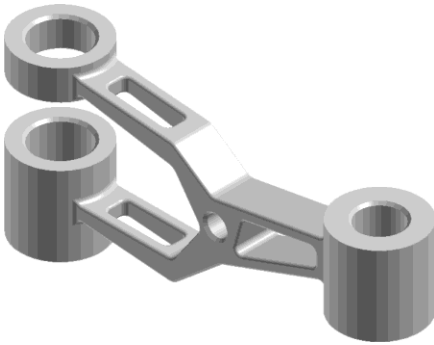


Рисунок 3.16 - Деталь "Важіль" спроектована в системі SolidWorks

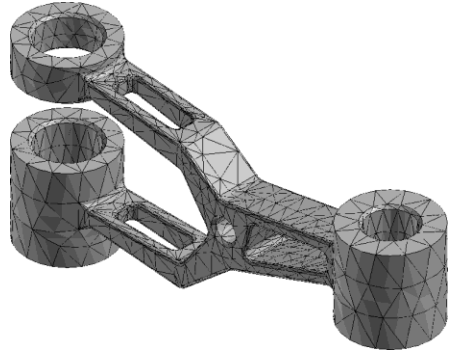


Рисунок 3.17 - Результат розбивки моделі на сітку кінцевих елементів

Далі дана модель була передана в систему інженерних розрахунків Designspace для виконання її аналізу методом кінцевих елементів. На рис. 3.17 показаний результат розбивки моделі на сітку кінцевих елементів. На рис. 3.19 показані напрямки і величини прикладених зусиль, а також навантажені й опорні поверхні деталі.

З малюнка ясно, що на модель діють дві сили, вектори яких рівномірно розподілені по навантаженій циліндричній грані в правій частині деталі. Дві циліндричні грані в лівій частині деталі є опорними (фіксованими). Далі показані результати розрахунків для даної геометрії деталі, її матеріалу, опорних елементів і прикладених навантажень. На рис. 3.19 показаний розподіл еквівалентних напруг у моделі. На рис. 3.20 показаний результат оцінки коефіцієнта безпеки по еквівалентних напругах. На рис. 3.21 показаний результат розрахунків деформації моделі. Спеціальним значком (синього кольору), у правій частині деталі позначена ділянка, що зазнає максимальної деформації.

Якщо модель являє собою складальну модель якого-небудь механізму, то для неї може бути виконаний кінематичний аналіз із визначенням координат, швидкостей, прискорень і сил взаємодії окремих її ланок. На основі заданих параметрів деякі системи дозволяють згенерувати avi-файл, який можна переглянути за допомогою стандартних засобів Windows.



Рисунок 3.18 - Напрямок і величина прикладених зусиль

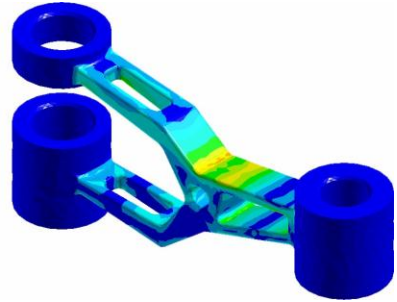


Рисунок 3.19 - Розподіл еквівалентних напруг у моделі

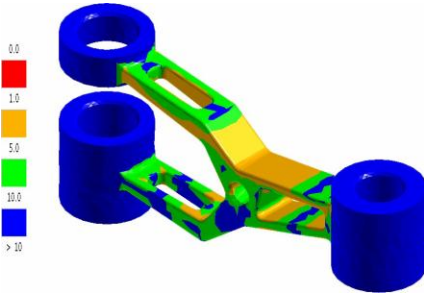


Рисунок 3.20 - Результат оцінки коефіцієнта безпеки

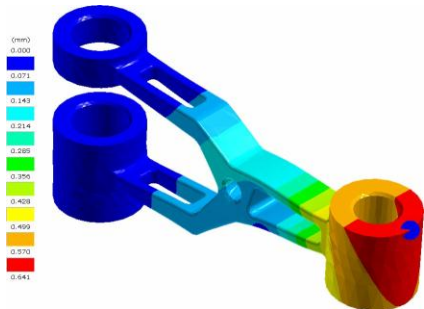


Рисунок 3.21 - Результат розрахунків деформації моделі

Тривимірна модель є набагато більш наочним представленням виробу, ніж її плоске креслення. Крім створення будь-якої аксонометричної проєкції, 3D-системи дозволяють легко будувати рознесені види виробу, за допомогою яких можна демонструвати порядок складання, розбирання або технічного обслуговування виробу. Така можливість може бути дуже корисною при підготовці технічної документації й рекламних матеріалів. На рис. 3.22 ліворуч показана складальна одиниця "Кран кульовий", виконана в системі КОМПАС.

Праворуч показаний рознесений вид тієї ж моделі. Рознесені види й анімаційні ролики можуть бути використані як наочні приладдя при підготовці виробництва, при навчанні й перепідготовці персоналу, що займається технічним обслуговуванням продукції, що випускається, а також у відділі маркетингу для демонстрації замовникові можливостей і характеристик пропонованої продукції ще до випуску перших

дослідних зразків.

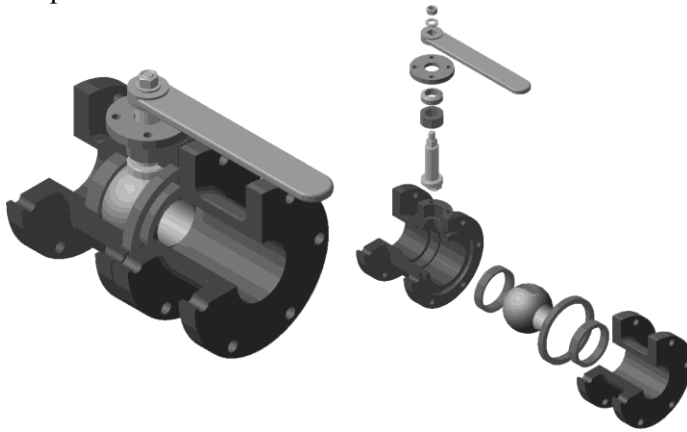


Рисунок 3.22 - Складальна одиниця "Кран кульовий", виконана в системі КОМПАС

Спеціальні підсистеми створення фотореалістичних зображень на основі твердотільних моделей, дозволяють нанести на поверхню змодельованих деталей і вузлів різні текстури. На рис. 3.23 ліворуч показана твердотільна модель шатуна, спроектована в системі SolidWorks. Праворуч показана та ж модель із нанесеною на неї текстурою грубого чавунного виливка.

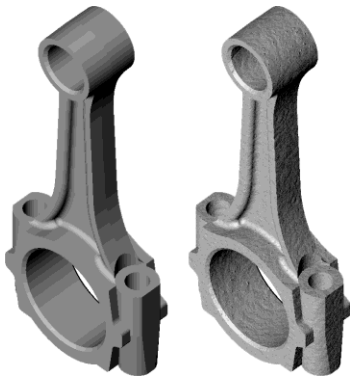


Рисунок 3.23 - Твердотільна модель шатуна (SolidWorks)

Крім того подібні системи дозволяють вибрати фонове зображення, на якому розміщена модель. Види текстур й фонові зображення вибираються з готових стандартних бібліотек, у яких можуть бути присутні різні сорти каменю, конструкційні матеріали, дерево й багато чого іншого. При необхідності бібліотеки можуть бути доповнені користувачем самостійно. На основі інформації про розставлені джерела світла генеруються тіні й півтіні, що надають надзвичайну правдоподібність комп'ютерному зображенню ще не існуючої реально конструкції.

Про переваги тривимірного моделювання можна говорити й далі, але й наведених фактів досить, щоб переконатися в його перевагах. Чому ж багато фахівців використовують лише добре зарекомендували себе, але, вже поступово втрачаючи актуальність 2D-системи? Ми вже говорили про дві основні причини, які звичайно згадують користувачі: висока вартість 3D-систем і складність їхнього освоєння.

Керування орієнтацією деталі.

При роботі над 3D-моделлю постійно виникає необхідність переглядати її з різних сторін. Для цього в будь-якій системі моделювання передбачені різні способи керування орієнтацією деталі - за допомогою миші або клавіатури використовуючи комбінації системних клавіш "Ctrl-", "Alt-", "Shift-" та стрілок, або використовуючи відповідні налаштування меню програми.

Наприклад, в системі Компас, якщо Вам необхідно повернути 3D-модель у площині екрана, то потрібно переміщати курсор з натиснутою лівою кнопкою миші, одночасно втримуючи натиснутою кнопку <Alt> на клавіатурі. Будь-яку модель можна розташувати в просторі таким чином, що одна із трьох стандартних площин проекцій буде паралельна площині екрана (рис. 3.24). При цьому можна одержати будь-яку стандартну проекцію деталі, що відповідає її видам на аркуші креслення (рис. 3.25).

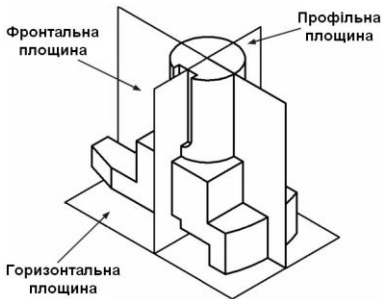


Рисунок 3.24 - Стандартні площини проекцій

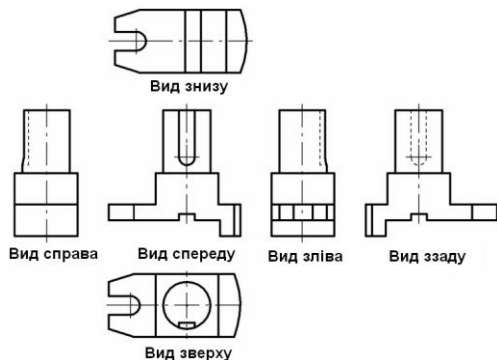


Рисунок 3.25 - Стандартні проекції деталі

Для одержання потрібної стандартної проекції деталі з використанням стандартних орієнтацій, треба розкрити в програмі список ви-

дів натисканням миші на кнопці **"Список видів"** у рядку поточного стану. Далі виберіть назву стандартної проекції зі списку видів (рис. 3.26). Після цього обрана проекція буде відображена в полі **"Текущая ориентация изображения"**, а зображення на екрані буде перебудовано відповідно до зазначеного напрямку погляду.



Рисунок 3.26 - Список видів проекції 3D-деталі



Рисунок 3.27 - Вибір орієнтації 3D-моделі користувачем

Іноді під час моделювання потрібно, щоб паралельно площині екрана виявилася не одна зі стандартних площин проекцій, а певна плоска грань деталі, або побудована користувачем допоміжна площина. Для одержання такої орієнтації необхідно вказати клацанням миші потрібний плоский об'єкт у моделі (рис. 3.27), а потім вибрати зі списку видів рядок **"Нормально к ..."**.

Ви можете розширити список стандартних видів, запам'ятавши поточну орієнтацію моделі під будь-яким власним іменем, а потім вертатися до неї в будь-який момент, вибравши її ім'я зі списку. Це можна зробити за допомогою системного діалогового вікна **"Ориентация вида"** (рис. 3.28).

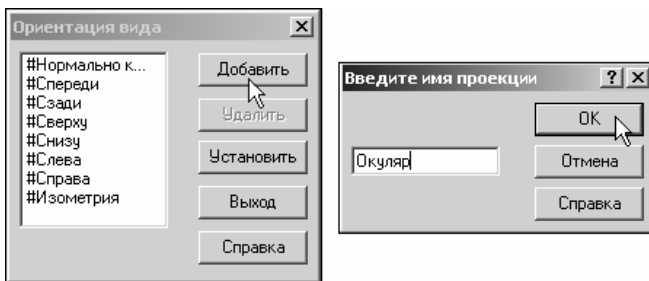


Рисунок 3.28 - Створення власного виду 3D-моделі на екрані

Ви можете не тільки створювати новий вид, але й вибирати будь-який з вже існуючих. Для цього клацанням миші потрібно вибрати потрібний вид у списку й нажати кнопку **"Установить"**. Крім того користувацький вид, що став непотрібним, можна вилучити зі списку за допомогою кнопки **"Удалить"**.

Загальні принципи моделювання деталей.

Процедури моделювання, які надають у розпорядження користувача сучасні тривимірні системи, настільки прості й наочні, що просто прирікають будь-кого на успіх. Єдиний спосіб розв'язати всі сумніви – це спробувати самостійно побудувати кілька 3D-моделей, починаючи з найпростіших і поступово переходячи до більш складних.

Починаючи з найперших елементарних кроків, Ви самі зможете перекоонатися, що для успішної роботи в абсолютно будь-якій системі, від Компаса до САПІА - не треба робити інтелектуальних подвигів на щоденній основі! Головне що від Вас вимагається - це всього лише зробити перший крок, тобто взяти і почати процес моделювання.

А для цього необхідно усвідомити і запам'ятати одну просту річ - ***у всіх сучасних системах тривимірного моделювання побудова твердотільної моделі виконується по загальному принципу***, який полягає в послідовному виконанні операцій об'єднання, віднімання й перетинання над об'ємними елементами (призмами, циліндрами, пірамідами, конусами і т.д.).

Розглянемо найпростіший приклад побудови 3D-моделі деталі, зі вказаною вище послідовністю операцій. На початку створюється прямокутна призма (рис. 3.29), що лежить в основі деталі (1). Потім до моделі додається циліндрична бобишка шляхом об'єднання призми із циліндром (2). До створеного в результаті тіла, додається усічена піраміда (3). Нарешті, у моделі виконується побудова отвору шляхом віднімання з неї циліндра (4).

Як створюються об'ємні елементи. Для створення об'ємних елементів використовується переміщення плоских фігур у просторі. У процесі переміщення ці фігури обмежують частину простору, яка й визначає форму елемента. Нижче показано кілька типових переміщень плоских фігур і отримані в результаті об'ємні елементи різної форми. Переміщення прямокутника в напрямку, перпендикулярному його площині, приведе до формування призми, яку можна розглядати як прямокутну пластину певної товщини.

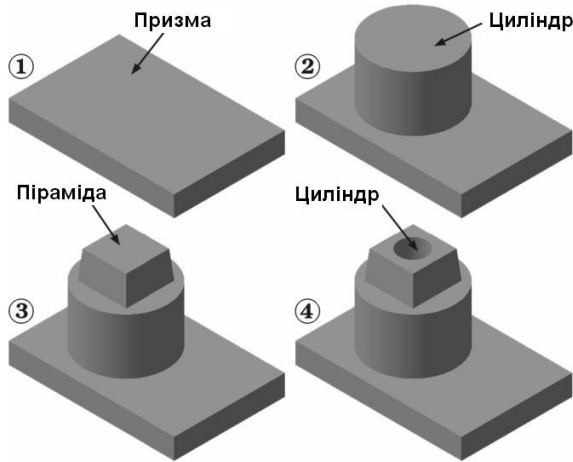


Рисунок 3.29 - Побудова простої 3D-моделі деталі

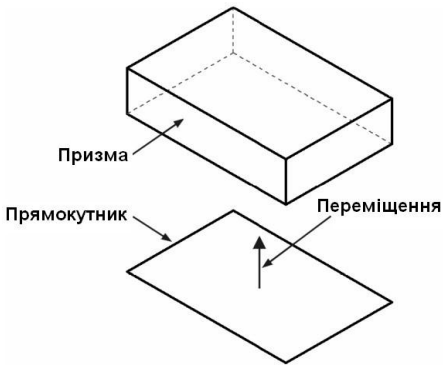


Рисунок 3.30 - Створення прямокутної пластини



Рисунок 3.31 - Створення валу

У результаті повороту ламаної лінії на 360° навколо осі, що лежить у площині ламаної, буде сформований об'ємний елемент. Цей елемент буде являти собою вал, що складається із циліндричних і конічних ділянок. Якщо окружність перемістити уздовж напрямної кривої, то отримаємо об'ємний елемент, що являє собою круглий стрижень певного діаметру й форми (рис. 3.32).

Ескізи й операції.

Плоска фігура, у результаті переміщення якої утворюється об'ємне тіло, називається ескізом, а саме переміщення – операцією.

Ескіз може розташовуватися в одній зі стандартних площин проєкцій, на плоскій грані існуючого тіла або на допоміжній площині, положення якої визначено користувачем. Ескізи зображуються засобами плоского креслення й складаються з

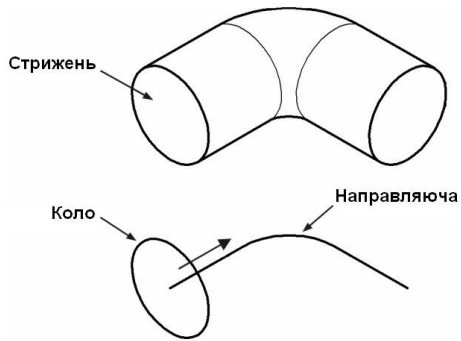


Рисунок 3.32 - Створення зігнутого стрижня

окремих графічних примітивів: відрізків, дуг, окружностей, ламаних ліній і т.д. При цьому доступні всі команди побудови й редагування зображення, засоби створення параметричних залежностей і різні сервісні можливості. В ескіз можна скопіювати зображення зі створеного раніше креслення або фрагмента. Це дозволяє при створенні тривимірної моделі використовувати існуючі плоскі креслення.

Різні системи мають у своєму розпорядженні різний набір інструментів для побудови об'ємних елементів. Однак деякі базові типи операцій присутні практично у всіх системах. До цих основних операцій можна віднести наступні:

- **операція видавлювання** – видавлювання ескізу в напрямку, перпендикулярному площині ескізу;
- **операція обертання** – обертання ескізу навколо осі, що лежить у площині ескізу;
- **кінематична операція** – переміщення ескізу уздовж напрямної;
- **операція по перетинах** – побудова об'ємного елемента по декільком ескізам, які розглядаються як перетин елемента в декількох паралельних площинах.

Кожна операція має додаткові можливості (опції), які дозволяють змінювати або уточнювати правила побудови об'ємного елемента. Наприклад, якщо в операції видавлювання прямокутника додатково задати величину й напрямок ухилу, то замість призми буде побудова-

на усічена піраміда.

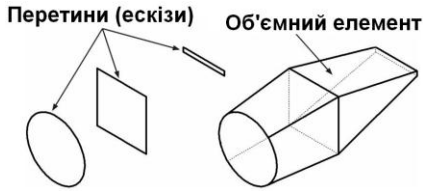


Рисунок 3.33 - Операція по перетинах



Рисунок 3.34 - Побудова усіченої піраміди

Таким чином, процес створення тривимірної моделі полягає в багаторазовому додаванні або видаленні додаткових об'ємів. Кожний з них являє собою елемент, утворений за допомогою операцій над плоскими ескізами. Але із цього правила є виключення. Наприклад, такі елементи, як фаски або скруглення не мають потреби в створенні ескізів. При виборі операції потрібно в першу чергу визначити, чи буде створюваний елемент відніматися з наявного на даний момент тіла, або додаватися до нього. Прикладами видалення об'єму з деталі можуть бути різні отвори, проточки, канавки, пази, а прикладами додавання об'єму – бобишки, виступи, ребра.

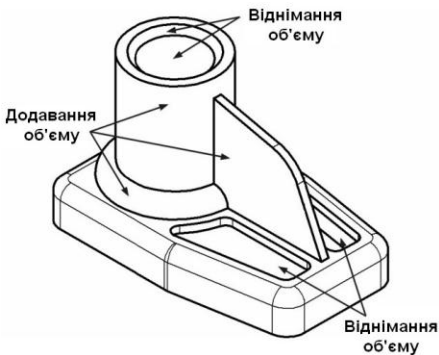


Рисунок 3.35 - Створення тривимірної моделі

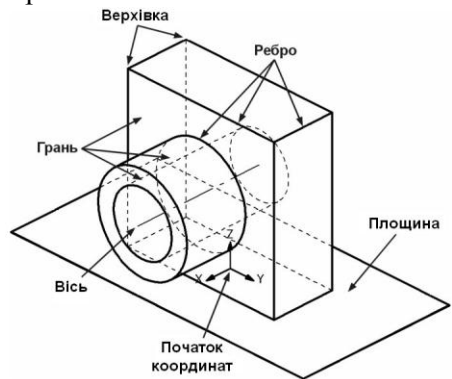


Рисунок 3.36 - Основні елементи 3D-моделі

Основні терміни тривимірної моделі. Об'ємні елементи, з яких складається тривимірна модель, утворюють у ній грані, ребра й вершини. Коротка характеристика цих елементів наведена в табл.3.1.

Таблиця 3.1 - Основні терміни тривимірної моделі

Грань	Гладка (необов'язково плоска) частина поверхні деталі. Гладка поверхня деталі може складатися з декількох граней
Ребро	Пряма або крива, що розділяє дві суміжні грані
Вершина	Точка на кінці ребра
Тіло деталі	Замкнена й безперервна область простору, обмежена гранями деталі. Вважається, що ця область заповнена однорідним матеріалом, з якого виготовлена деталь

Крім того в моделі можуть бути присутні додаткові елементи: символ початку координат, площини та осі.

Основа моделі.

Побудова деталі починається зі створення її основи – першого формотворного елемента. Основа є в будь-якій деталі й вона завжди одна. Зрозуміло, що створення основи завжди пов'язане з додаванням матеріалу, адже до його появи віднімати матеріал просто нема із чого.

У якості основи можна використовувати кожний із чотирьох основних типів формотворних елементів: елемент видавлювання, елемент обертання, кінематичний елемент і елемент по перетинах.

На початку створення моделі завжди постає питання про те, який з її елементів використовувати як основу. Для цього бажано хоча б приблизно представляти конструкцію майбутньої деталі.

Найчастіше в якості основи слід використовувати той елемент деталі, до якого зручніше додавати всі інші елементи. Часто такий підхід повністю або частково повторює технологічний процес виготовлення деталі.

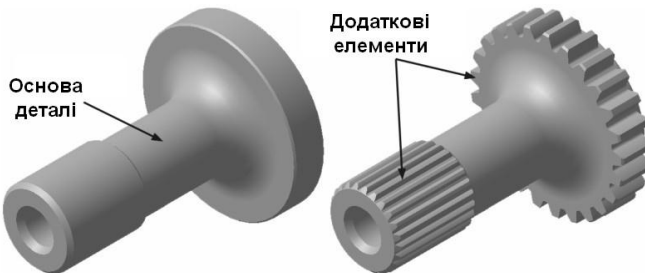


Рисунок 3.37 - Додавання до основи додаткових елементів

У якості основи можна розглядати елемент деталі, щодо якого задані положення, розміри або форма більшості інших елементів.

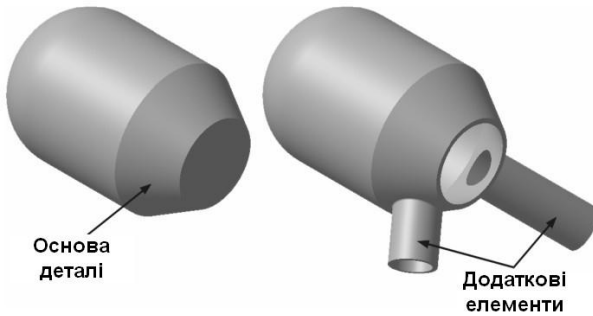


Рисунок 3.38 - Основа із заданим положенням інших елементів

У деяких випадках у якості основи слід розглядати найбільш складний елемент деталі, який можна побудувати однією командою або до якого згодом потрібно додати мінімальну кількість інших елементів. Зокрема, цілком можлива така ситуація, коли деталь повністю або в значній мірі складається з одної основи.

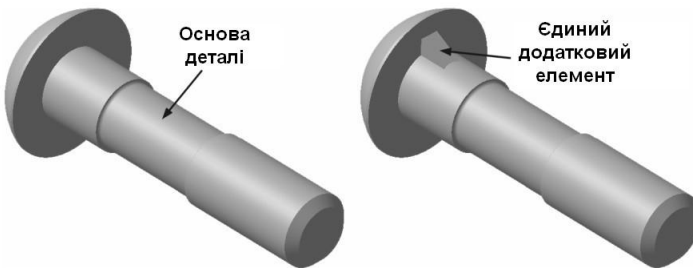


Рисунок 3.39 - Додавання мінімальної кількості елементів

Створення 3D-моделі по її плоскому кресленню.

Зазвичай при використанні систем тривимірного моделювання спочатку створюється модель деталі, а потім її плоске зображення – робоче креслення.

Однак може знадобитися вирішити зворотне завдання: побудувати тривимірну модель деталі по її раніше розробленому кресленню. Таке завдання виникає тоді, коли в знову проєктованих засобах 3D-моделювання виробів потрібно скористатися 2D-кресленнями раніше

розроблених деталей.

В такому разі беруть вже існуюче 2D-креслення (рис. 3.40), в електронному форматі, або сканують креслення на паперовому носії та виконують його векторизацію, і вже потім відкривають в 3D-програмі для побудови 3D-моделі.

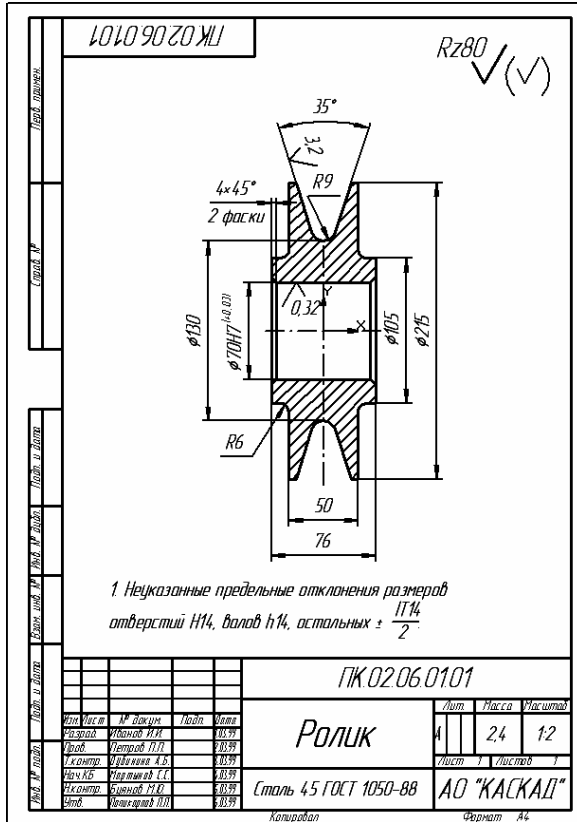


Рисунок 3.40 - Пример выходного кресления для построения 3D-детали

Коли вже є якісне електронне 2D-креслення, яке містить усю геометрію, необхідну для побудови тривимірної моделі цієї деталі, то на створення 3D-моделі вже буде потрібно не більше хвилини!

Отже необхідно на електронному 2D-кресленні, січною рамкою виділити необхідну для побудови геометрію (рис. 3.41) та скопіювати її в поле ескізу майбутньої 3D-моделі.

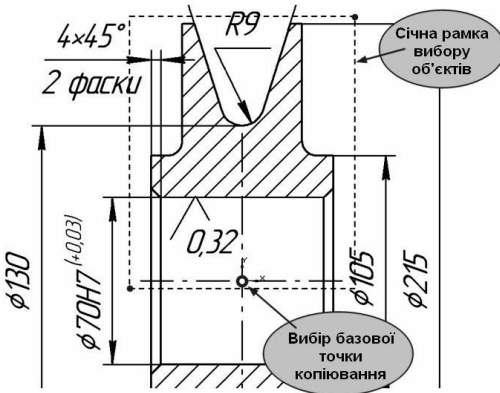


Рисунок 3.41 - Виділення необхідної геометрії січною рамкою



Рисунок 3.42 - Готова 3D-модель

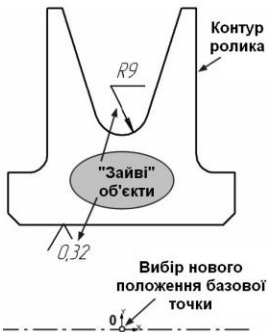


Рисунок 3.43 - Видалення зайвої геометрії

Після копіювання геометрії січною рамкою, разом з геометричними об'єктами в ескізі виявляться й деякі допоміжні об'єкти (розміри, позначення шорсткості поверхонь і т.д.). Всі ці об'єкти треба вилучити (рис. 3.43) - вони не будуть враховуватися при побудові об'ємних елементів, а будуть тільки захащувати ескіз. І нарешті використовуючи тип операції "Обертання" - будуюмо 3D-модель ролика, рис. 3.42. Готовій моделі призначаємо тип матеріалу "Сталь 45."

Питання для самоперевірки

1. Які основні обмеження двомірного проектування?
2. Розкажіть загальні принципи створення 3D-деталей.
3. Що таке каркасна модель деталі?
4. В чому полягає особливість поверхневого моделювання?
5. Що таке параметризація?
6. Назвіть основні операції побудови 3D-деталей.
7. Назвіть основні терміни тривимірної моделі.
8. Розкажіть загальний алгоритм створення 3D-моделі деталі по її плоскому кресленню.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

Базова

1. Sham Tickoo. SOLIDWORKS 2018 for Designers, 16th Edition. Schererville : CAD/CIM Technologies, 2018. 1987 p.
2. SOLIDWORKS 2018. Learn by doing - Part 1: parts, assembly, drawings, and sheet metal. Tutorial Books, 2018. 532 p.
3. SOLIDWORKS 2018. Learn by doing - Part 2: surface design. Tutorial Books, 2018. 149 p.
4. Грабченко А. І., Доброскок В. Л. Сучасні технології матеріалізації комп'ютерних моделей. Х. : НТУ "ХПІ", 2009. 86 с.
5. Грабченко А. І., Доброскок В. Л. Теорія 3D моделювання: Навч. посібник. Х. : НТУ "ХПІ", 2009. 230 с.
6. Дударева Н. Ю., Загайко С. А. SolidWorks на примерах. СПб. : БХВ-Петербург, 2011. 496 с.
7. Проектирование автомобиля. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2013. 260 с.

Допоміжна

8. Гончаров П. С., Артамонов И. А., Халитов Т. Ф. NX Advanced Simulation. Инженерный анализ. М. : ДМК Пресс, 2012. 504 с.
9. Данилов Ю., Артамонов И. Практическое использование NX. М. : ДМК Пресс, 2011. 332 с.
10. Дударева Н. Ю., Загайко С. А. SolidWorks. Оформление проектной документации. СПб. : БХВ-Петербург, 2009. 384 с.
11. Ловыгин А. А., Твердовский Л. В. Современный станок с ЧПУ и CAD/CAM-система. М. : ДМК Пресс, 2015. 280 с.
12. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов : задачи, методы, рекомендации. М. : ДМК Пресс, 2015. 562 с.
13. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи СПб. : БХВ-Петербург, 2012. 448 с.
14. Алямовский А. А. COSMOSWorks. Основы расчета конструкций на прочность в среде SolidWorks. М. : ДМК Пресс, 2010. 784 с.
15. Алямовский А. А., Собачкин А. А., Одинцов Е. В. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике. СПб. : БХВ-Петербург, 2008. 1040 с.

16. Потемкин А. Е. Трёхмерное твердотельное моделирование. М. : КомпьютерПресс, 2002. 296 с.
17. Потемкин А. Е. Инженерная графика. Просто и доступно. М. : Лори, 2000. 480 с.
18. Большаков В. П., Тозик В. Т., Чагина А. В. Инженерная и компьютерная графика: учеб. пособие. СПб. : БХВ-Петербург, 2013. 288 с.
19. Большаков В. П., Бочков А. Л. Основы 3D-моделирования. Изучаем работу в AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor. СПб. : Питер, 2013. 304 с.
20. Большаков В. П. Инженерная и компьютерная графика. Практикум. СПб. : БХВ-Петербург, 2004. 592 с.
21. Gahan A. 3D automotive modeling : an insider's guide to 3D car modeling and design for games and film. Burlington : Elsevier Inc., 2011. 468 p.
22. Nikola Vukašinić, Jože Duhovnik. Advanced CAD modeling. Explicit, parametric, free-form CAD and Re-engineering. Cham : Springer Nature Switzerland AG, 2019. 260 p.
23. Агапов В. П. Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости пространственных тонкостенных подкрепленных конструкций. М : АСВ, 2000. 152 с.
24. Большаков В. И., Яценко Е. А., Соссу Г. Основы метода конечных элементов. Днепропетровск : ПГАСиА, 2000. 255 с.
25. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. М. : Мир, 1984. 428 с.
26. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М. : Мир, 1975. 540 с.
27. Образцов И. Ф., Савельев Л. М., Хазанов Х. С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов. М. : Высш. шк., 1985. 392 с.
28. Сабоннадьер Ж. К., Кулон Ж. Л. Метод конечных элементов и САПР. М. : Мир, 1989. 190 с.
29. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М. : Мир, 1979. 395 с.
30. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. М. : Мир, 1977. 351 с.
31. Алиева Н. П., Журбенко П. А., Сенченкова Л. С. Построение моделей и создание чертежей деталей в системе Autodesk Inventor. Саратов : Профобразование, 2017. 112 с.

32. Каменев С. В. Моделирование станка-гексапода в CAD-системе Autodesk Inventor. Оренбург : ОГУ, 2017. 142 с.
33. Kishore T. Learn Autodesk Inventor 2018 Basics: 3D Modeling, 2D Graphics, and Assembly Design. Hyderabad : Apress, 2017. 542 p.
34. Bob McFarlane. Autodesk Inventor exercises for Autodesk Inventor and other feature-based modelling software. New York : Routledge, 2017. 432 p.
35. Randy H. Shih. Autodesk Inventor 2019 and engineering graphics. Mission, KS : SDC Publications, 2018. 705 p.
36. Randy H. Shih. Parametric modeling with Autodesk Inventor 2018. Mission, KS : SDC Publications, 2017. 618 p.
37. Autodesk Inventor 2018 basics tutorial. Tutorial Books, 2017. 189 p.
38. T-FLEX CAD. Основы. 2D проектирование и черчение. Руководство пользователя. М. : Топ Системы, 2019. 1407 с.
39. T-FLEX CAD. Трёхмерное моделирование. Руководство пользователя. М. : Топ Системы, 2019. 1415 с.
40. Потемкин А. Е. Твердотельное моделирование в системе КОМПАС-3D. М. : БХВ-Петербург, 2004. 512 с.
41. АРМ FEM. Система прочностного анализа для КОМПАС-3D. Королёв : Научно-технический центр "Автоматизированное Проектирование Машин", 2014. 26 с.
42. Ганин Н. Б. Проектирование и прочностной расчет в системе КОМПАС-3D V13. Саратов : Профобразование, 2017. 320 с.
43. Денисов М. А. Автоматизированное проектирование в ANSYS и КОМПАС-3D. Екатеринбург, Изд-во Урал. ун-та, 2015. 264 с.
44. Жарков Н. В., Минеев М. А., Финков М. В. КОМПАС-3D. Полное руководство. От новичка до профессионала. Спб. : Наука и техника, 2016. 672 с.
45. Зиновьев Д. В. Основы проектирования в КОМПАС-3D V16. Павлоград : Студия Vertex, 2017. 327 с.
46. Конакова И. П. Шероховатости поверхностей и их практическое применение в программе КОМПАС. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. 104 с.
47. Корнеев В.Р., Жарков Н. В., Минеев М. А. Компас-3D на примерах. Для студентов, инженеров и не только. Спб. : Наука и техника, 2017. 272 с.
48. Савченко Н. В. Автоматизация построения чертежей. Лабораторный практикум по инженерной и компьютерной графике в системе

- КОМПАС-3D. Самара : Изд-во СГАУ, 2015. 216 с.
49. Басов К. А. ANSYS : справочник пользователя. Саратов : Профобразование, 2017. 640 с.
 50. Chen Xiaolin, Liu Yijun. Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench. Boca Raton : CRC Press, 2015. 408 p.
 51. David Moratal. Finite element analysis from biomedical applications. Valencia : Polytechnic University of Valencia, 2016. 507 p.
 52. Erdogan Madenci, Ibrahim Guven. The Finite element method and applications in engineering using ANSYS. New York : Springer International Publishing, 2015. 663 p.
 53. Farzad Ebrahimi. Finite element analysis new trends and developments. Iran : International University of Imam Khomeini, 2016. 408 p.
 54. Mary Kathryn Thompson, John M. Thompson. ANSYS Mechanical APDL for finite element analysis Oxford : Butterworth-Heinemann, 2017. 438 p.
 55. Saeed Moaveni. Finite element analysis. Theory and application with ANSYS. Essex : Pearson Education Limited, 2015. 929 p.
 56. Sham Tickoo. CATIA V5-6R2015 for designers. Hammond : CAD/CIM Technologies, 2016. 1630 p.
 57. CATIA v6 essentials. Sudbury : Jones and Bartlett Publishers, 2011. 305 p.
 58. Gaurav Verma, Matt Weber. Creo Parametric 4.0 Black Book. USA : CAD/CAM/CAE Works, 2017. 737 p.
 59. Paul Obiora Kanife. Computer aided virtual manufacturing using Creo Parametric. Notting Hill : Springer, 2016. 678 p.
 60. Creo Parametric 4.0 Basics. Tutorial Books, 2017. 311 p.
 61. Jouni Ahola. Creo Parametric Modeling for Manufacturing v3. Helsinki : Klaava Media, 2015. 750 p.
 62. Jouni Ahola. Creo Parametric Basic Turning. Helsinki : Klaava Media, 2015. 520 p.
 63. Jouni Ahola. Creo Parametric Milling. Helsinki: Klaava Media, 2015. 589 p.
 64. NX для конструктора-машиностроителя / П. С. Гончаров и др. Москва : ДМК Пресс, 2010. 504 с.
 65. Почекуев Е. Н., Путеев П. А., Шенбергер П. Н. Проектирование в Siemens NX технологических процессов изготовления деталей листовой штамповкой. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2014. 230 с.
 66. Почекуев Е. Н., Путеев П. А., Шенбергер П. Н. Проектирование

- штампов для последовательной листовой штамповки в системе NX. М. : ДМК Пресс, 2012. 336 с.
67. Федоров А. Л., Сафонов М. В. Основы проектирования сборочно-сварочной оснастки с помощью пакета NX. Тольятти : Изд-во ТГУ, 2016. 68 с.
 68. Поляков А. Н. Разработка управляющих программ для станков с ЧПУ. Система NX. Фрезерование. Оренбург : Оренбургский гос. ун-т., 2016. 171 с.
 69. Поляков А. Н. Разработка управляющих программ для станков с ЧПУ. Система NX. Часть II. Оренбург : Оренбургский гос. ун-т., 2016. 118 с.
 70. Reiner Anderl, Peter Binde. Simulations with NX. Kinematics, FEA, CFD, EM and Data Management. With numerous examples of NX 9. Munich : Carl Hanser Verlag, 2014. 390 p.
 71. Sham Tickoo. Siemens NX 12.0 for Designers, 11th Edition. Schererville : CAD/CIM Technologies, 2018. 1140 p.
 72. Jože Duhovnik, Ivan Demšar, Primož Drešar. Space Modeling with SolidWorks and NX. Ljubljana : University of Ljubljana, 2015. 500 p.
 73. Рычков С. П. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. М. : ДМК Пресс, 2013. 784 с.
 74. Бражникова О. И. Компьютерный дизайн художественных изделий в программах Autodesk 3DS Max и Rhinoceros. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. 100 с.
 75. Фомин Б. Rhinoceros. NURBS моделирование для Windows. USA : Robert McNeel & Associates, 2006. 290 с.
 76. Andre Kutscherauer. 3D Car Modeling with Rhinoceros. Munich : AK3D, 2011. 624 p.
 77. Fletcher Dunn, Ian Parberry. 3D Math Primer for Graphics and Game Development. Plano, Texas : Word ware Publishing, Inc., 2002. 440 p.
 78. Joseph Richard Saltzman. Supermodels Professional 3D Training Tools. Buckinghamshire : Cinemagic Productions Limited, 1999. 970 p.
 79. Ron K.C. Cheng. Inside Rhinoceros 5. Stamford : Cengage Learning, 2014. 658 p.
 80. Ali K. Kamrani, Emad Abouel Nasr. Engineering Design and Rapid Prototyping. London : Springer Science+Business Media, LLC, 2010. 460 p.
 81. Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker. Additive manufacturing

technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. New York : Springer Science + Business Media New York, 2015. 510 p.

82. Kuang-Hua Chang. Product design modeling using CAD/CAE. The computer aided engineering design series. Waltham : Elsevier Inc., 2014. 421 p.
83. Осипов В. И. Компьютерные технологии при проектировании и аэродинамических исследованиях легкового автомобиля. М. : МАДИ, 2018. 100 с.

Інформаційні ресурси

84. 3D-моделирование: тонкости CAD-дизайна для 3D-печати. <https://3dtoday.ru/category/3d-modelirovanie> (дата звернення: 27.10.2019)
85. АСКОН - комплексные решения для автоматизации инженерной деятельности и управления производством. CAD/AEC/PLM. URL: <https://ascon.ru/products/7/review/>. (дата звернення: 10.10.2019)
86. Система NX (колишня назва - Unigraphics) компанії Siemens. URL: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/ru/products/nx/>. (дата звернення: 10.10.2019)
87. Система CATIA. URL: <https://www.3ds.com/products-services/catia/>. (дата звернення: 10.10.2019)
88. Система SolidWorks. URL: <https://www.solidworks.com>. (дата звернення: 10.10.2019)
89. Welcom to ANSYS, Inc. – Corporate Homepage. URL: <https://www.ansys.com>. (дата звернення: 10.10.2019)
90. Система PTC Creo Elements/Pro (колишня назва Pro/ENGINEER) компанії PTC (Parametric Technology Corporation). URL: <https://www.ptc.com/en/industries/automotive>. (дата звернення: 10.10.2019)
91. Система Solidedge компанії Siemens. URL: <https://solidedge.siemens.com/ru/>. (дата звернення: 10.10.2019)
92. Система T-FLEX. URL: <http://www.tfex.ru/>. (дата звернення: 27.10.2019)
93. Система Autodesk Inventor. URL: <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview>. (дата звернення: 27.10.2019)