

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

# **ЦИФРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ТА ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ**

## **Практикум**

### **Навчальний посібник**

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра  
за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в  
приладобудуванні»  
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Укладач: О. В. Муравйов

Електронне мережне навчальне видання

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2022

Рецензенти: *Голінко І. М.*, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів КПІ ім. Ігоря Сікорського  
*Васильковська І. О.*, канд. техн. наук, старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор: *Богдан Г. А.*, канд. техн. наук, старший викладач кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю КПІ ім. Ігоря Сікорського

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 6 від 24.06.2022 р.)  
за поданням Вченої ради приладобудівного факультету (протокол № 6/22 від 20.06.2022 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

## ЦИФРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТІВ ТА ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ Практикум

Цифрове моделювання об'єктів та динамічних систем. Практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Укладач: О. В. Муравйов ; КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. - 75 с.

Посібник призначений для студентів, що навчаються за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні», які вивчають курс «Цифрове моделювання об'єктів та динамічних систем».

Метою навчального посібника «Цифрове моделювання об'єктів та динамічних систем. Практикум» є формування у студентів навичок, що необхідні бакалавру у практичній роботі при проєктуванні сучасних систем і пристроїв та їх автоматизації. Посібник розроблено для комп'ютерного практикуму, що містить дев'ять практичних робіт. У ньому розглядаються практичні питання застосування САПР SolidWorks для побудови цифрових моделей об'єктів, аналізу статичних, динамічних систем та процесів, автоматизованої підготовки конструкторської документації, прототипування із використанням технологій 3D друку на основі цифрових моделей.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ №1</b>	
Основи роботи з САПР SolidWorks. Двомірне проєктування.....	5
<b>КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ №2</b>	
Проєктування 3D моделей. Робота з масивами. Реалістична візуалізація моделей.....	8
<b>КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ №3</b>	
Складання деталей. Проста анімація складання. Автоматична побудова асоціативного 2D креслення .....	14
<b>КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ №4</b>	
Створення моделі прес-форми деталі .....	19
<b>КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ №5</b>	
Моделювання та аналіз процесів і впливів. Додаток SolidWorks Simulation .....	25
<b>КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ №6</b>	
Основи роботи, налагодження та друк на 3D принтері .....	38
<b>КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ №7</b>	
Складна анімація. Використання програми SolidWorks Motion .....	47
<b>КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ №8</b>	
Дослідження траєкторії руху об'єктів і впливу сили тяжіння .....	52
<b>КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ №9</b>	
Аеродинамічний аналіз.....	62
<b>ЛІТЕРАТУРА</b> .....	73
<b>ДОДАТОК 1</b>	
Аксонометрія деталі.....	74
<b>ДОДАТОК 2</b>	
Креслення шестерні .....	75

## ВСТУП

Робота інженера та дослідника невід'ємно пов'язана з розрахунками та розробкою пристроїв, приладів та систем різного призначення, а також аналізом фізичних процесів, на основі яких вони функціонують. Більшість сучасної техніки має складну конструкцію, що в процесі експлуатації піддається дії різноманітних впливів, обумовлених як факторами навколишнього середовища, так і зміною власних параметрів. Враховувати всі ці аспекти необхідно ще на етапі проєктування пристроїв, на які сьогодні накладається багато вимог та необхідність відповідності стандартам, щодо дизайну, масогабаритних характеристик, собівартості та строку експлуатації виробу. Ефективно вирішувати вищезгадані питання дозволяють сучасні САПР на основі моделювання [1].

Цифрова 3D модель – основа сучасного виробництва від найпростіших деталей до апаратів космічної індустрії, основа наукових досліджень. Однією з найпопулярніших у світі на сьогоднішній день САПР, що застосовується для автоматизації конструкторських робіт, а також для технологічної підготовки процесів на промисловому виробництві є SolidWorks – програмний комплекс, що здатний забезпечити високу ефективність розробки виробів, підготовку технічної документації будь-якого рівня складності, зручність доступу та обміну даними завдяки наявності інтегрованої системи документообігу.

У даному посібнику розглядаються наступні аспекти застосування САПР SolidWorks: тривимірне цифрове моделювання, проєктування та дослідження об'єктів, конструкцій, динамічних систем та процесів; аналіз впливу на цифрові моделі різних факторів: тиску, температури, вібрацій; аналіз життєвого циклу деталей та конструкцій, їх оптимізація з метою зниження масогабаритних параметрів, підвищення стійкості та експлуатаційних характеристик; налаштування параметрів візуалізації та анімація комп'ютерних моделей; основи роботи, налагодження та друк на 3D-принтері деталей, що сформовані на основі цифрових моделей, створених в середовищі SolidWorks.



# КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ №1

## Основи роботи з САПР SolidWorks. Двовимірне проєктування

**Мета роботи:** навчитися використовувати інтерфейс програмного пакету SolidWorks та налаштовувати його елементи для зручності користувача, а також ефективно будувати двовимірні креслення деталей у відповідності до актуальних вимог та нормативів конструкторської документації.

### 1.1. Теоретичні відомості

Робота в САПР SolidWorks починається з відкриття вже створеного документа або вибору виду нового документа:

- двовимірне креслення;
- тривимірна деталь;
- складання тривимірних деталей або об'єднання декількох складань.

Для створення двовимірного креслення деталі необхідно вибрати вид документа «Креслення», а далі встановити необхідний формат аркуша. При виборі формату аркуша є можливість використання заданого користувачем або стандартного розміру аркуша. SolidWorks за замовчуванням містить всі формати з основними написами і рамками по ЄСТД (Єдиний стандарт технічної документації). Редагування основного напису після його появи на робочому аркуші здійснюється вибором в контекстному меню робочого поля аркуша пункту «Редагувати основний напис».

#### 1.1.2. Основні елементи інтерфейсу програмного пакету

Інтерфейс пакету SolidWorks налаштовується індивідуально під конкретного користувача. У контекстному меню панелі інструментів є можливість викликати для швидкого доступу необхідні кнопки і меню з наступним їх переміщенням в бажану частину вікна програми.

Рекомендується перед початком роботи вивести найбільш часто використовувані панелі кнопок, такі як: «Формат лінії», «Форматування»,

«Швидкі прив'язки», «Ескіз», «Розміри/Взаємозв'язки», «Шар» і розташувати їх на зручних позиціях, що значно прискорить роботу з двовимірним кресленням.

Для збільшення робочого поля аркуша рекомендується зменшити розмір розсувних бокових панелей і розміри іконок основної панелі інструментів, знявши прапорець «Використовувати великі кнопки з текстом» в її контекстному меню.

Основна робоча панель інструментів документа «Креслення» містить 5 головних вкладок:

1. «Креслення» – створення двовірних видів деталі на основі наявної 3D моделі, автоматична побудова перетинів, розрізів, видів і розривів.

2. «Примітка» – меню містить розстановку всіх видів розмірів і позначень (шорсткість поверхні, бази, розстановка позицій елементів креслення), нанесення штрихування і написів.

3. «Ескіз» – елементи побудови 2D креслення (лінія, багатокутник, фаска, скруглення, сплайн та ін.), основні функції для спрощення роботи з двовірними об'єктами (обрізати, подовжити, дзеркальне відображення, масив, зсув).

4. «Аналізувати» – меню містить функції аналізу вмісту документа: вимірювання відстаней між елементами, перевірка орфографії тексту, статистика креслення (кількість розрізів, видів, блоків, осьових ліній і т.д.)

5. «Додавання застосунків SolidWorks» – завантаження набору додаткових прикладних програм пакета SolidWorks: SolidWorks Simulation - застосунок для моделювання впливу різних факторів на конструкцію та дослідження її характеристик; SolidWorks Motion - створення анімованих дій; PhotoView 360 - створення зображень об'єктів з високою реалістичністю; SolidWorks Flow Simulation – реалізація аеродинамічних чи гідродинамічних розрахунків та досліджень на основі моделювання. Використання всіх зазначених прикладних програм пакету буде розглянуто в наступних роботах даного навчального посібника. При включенні будь-якої прикладної програми всі її функції будуть автоматично завантажені в робочий інтерфейс основного

пакету. Панель інструментів завантаженої програми можна вивести в робоче вікно САПР через контекстне меню панелі інструментів SolidWorks.

*Примітка.* При роботі в САПР SolidWorks корисно пам'ятати, що повторний виклик раніше використаної будь-якої функції здійснюється натисканням клавіші «Enter», скасування останньої дії - комбінацією клавіш «Ctrl + Z», закриття вікна властивостей елемента після внесення необхідних змін - клавішею «Esc» або кліком лівої кнопки миші при наведенні курсору на вільну ділянку робочого поля аркуша.

## **1.2. Завдання до виконання комп'ютерного практикуму**

1. Створити креслення формату А3 альбомної орієнтації з рамкою і основним написом відповідно до актуального стандарту конструкторської документації.

2. Налаштувати інтерфейс САПР SolidWorks для особистої зручності користування, відобразивши і компактно розмістивши найбільш часто використовувані панелі інструментів швидкого доступу.

3. Створити креслення деталі відповідно до наведеної в додатку 1 аксонометрії. Розміри деталі вибрати довільно зі збереженням пропорцій між елементами.

4. Заповнити основний напис креслення.

5. Домогтися коректного відображення креслення деталі з рамкою і основним написом при попередньому перегляді документа.

## КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ №2

### Проектування 3D моделей. Робота з масивами. Реалістична візуалізація моделей

**Мета роботи:** навчитися ефективно будувати в програмному пакеті SolidWorks тривимірні моделі деталей та простих об'єктів, а також здійснювати їх реалістичну візуалізацію за допомогою вбудованої в пакет прикладної програми PhotoView 360.

#### 2.1. Теоретичні відомості

При роботі в програмному пакеті SolidWorks з декількома документами швидке перемикання між ними здійснюється натисненням комбінації клавіш «Ctrl + Tab». Перегляд списку всіх відкритих документів здійснюється через головну панель управління (висувна панель в верхній частині екрану) у вкладці «Вікно», де можна закрити будь-який з відкритих документів або відобразити файл даного документа в папці жорсткого диску комп'ютера.

##### 2.1.1. Проектування 3D моделей

Побудова тривимірної моделі в САПР SolidWorks починається з вибору площини в дереві конструювання (першій вкладці на лівій висувній панелі інструментів) і створення на ній ескізу. Рекомендується обирати в якості базової площини ту, на якій можна побудувати найскладніший контур для ескізу майбутньої моделі з плоскими гранями. У разі, якщо деталь має неплоскі (круглі, еліптичні або складної форми) грані, рекомендується починати її побудову з ескізу, який відображає основу елемента майбутньої деталі для витягування або обертання. При виборі площини в дереві конструювання відразу з'являється можливість побудови на ній ескізу або установки її орієнтації перпендикулярно до лінії погляду користувача (в площині, що паралельна екрану монітора).

Побудова 3D моделей в середовищі SolidWorks відбувається за тим же принципом, що і, наприклад, в пакеті Компас: після створення базового ескізу і перетворення його в тривимірний об'єкт, на отриманих гранях і площинах відбувається подальша побудова двомірних ескізів з подальшим їх перетворенням в тривимірні елементи при використанні таких функцій як «Витягнута бобишка/основа», «Повернена бобишка/основа» [2]. Така ж пара функцій існує і для реалізації операцій віднімання обсягу деталі: «Витягнутий виріз» та «Повернутий виріз». Часто вживаними є також функції тривимірного моделювання «Фаска» та «Скруглення».

Усі перераховані функції знаходяться на вкладці «Елементи» основної робочої панелі інструментів програми, а також можуть бути винесені у вигляді окремих кнопок на панель швидкого доступу при активації в контекстному меню робочої панелі інструментів. Велика частина зазначених функцій стає активна тільки після виходу з режиму ескізу.

САПР SolidWorks дозволяє редагувати вже наявні елементи моделі в будь-якій послідовності з автоматичною перебудовою всієї конструкції після внесення коректив. Для цього необхідно в дереві конструювання вибрати будь-який пункт і натиснути «Редагувати визначення». Також в дереві конструювання є можливість «Приховати» і знову «Відобразити» будь-які елементи моделі.

### **2.1.2. Модель трійника розтруба**

Побудова моделі сполучної труби-трійника (рис. 2.1, а), слід почати з ескізу на площині «Справа», на якому необхідно створити два кола (профіль стінки труби) довільного діаметру.

Коригування розмірів елементів ескізу в середовищі SolidWorks зручно реалізовувати в такий спосіб: після побудова елементів довільного розміру слід за допомогою функції «Автоматичне нанесення розмірів» нанести розміри на елементи, далі у властивостях розмірів встановити потрібні значення. Після

проведення зазначених дій геометричні розміри самих елементів ескізу автоматично будуть змінені на зазначені.

Далі за допомогою функції «Витягнута бобишка/основа» необхідно створити циліндр з отвором (трубу).

Дану деталь можна побудувати і іншим способом: на основі однієї окружності ескізу витягнути циліндр при активній функції «Тонкостінний елемент» із зазначенням товщини стінки.

Для побудови ескізу на неплоскій (круглій) грані необхідно створити додаткову площину. Дана операція виконується при використанні функції «Площина» меню «Довідкова геометрія» вкладки «Елементи» основною робочою панелі інструментів програми.

Наступним кроком необхідно побудувати сполучні розтруби на кінцях основної труби. Спочатку слід створити на одному краю труби ділянку перехідного діаметру. Для цього можна скористатися функцією «Бобишка/підстава за перерізами», попередньо створивши кілька площин з колами необхідних діаметрів на ескізах. Активувавши зазначену функцію, необхідно обрати всі перетини і кромку основної труби і, увімкнувши «Тонкостінний елемент», побудувати необхідний сегмент моделі. Повторити операції для іншого кінця основної труби. Також можна скористатися функцією «Дзеркальне відображення» з копіюванням тіл.

Далі необхідно створити площину на деякій відстані від площини «Зверху» і побудувати на ній ескіз профілю бокового входу сполучної труби, узгодивши діаметри основного і бічного розгалужень. Витягнути ескіз із зазначенням напрямку «До поверхні» (вибравши в якості поверхні наявну грань основної труби). При виконанні операції обов'язковим є включена умова «Об'єднати результати». Далі створити ескіз окружності на торці бічної труби і операцією «Витягнутий виріз» з вказівкою напрямку «До поверхні» до внутрішньої стінки основної труби сформувати трубу-трійник.

На бічному вході труби сформувати стикувальний млинець зі з'єднувальними отворами. Отвори розподіляються за допомогою функції «Круговий масив» із зазначенням їх необхідної кількості.

Останнім етапом є завдання матеріалу, кольору і налаштування відтворення моделі для більш реалістичного її відображення.

### **2.1.3. Налаштування відображення моделі. Застосунок PhotoView 360**

Елементарне управління відображенням моделі здійснюється перемиканням стилів відображення під основною робочою панеллю інструментів. Є в наявності наступні стилі: «Зафарбувати з кромками», «Зафарбувати»...«Каркасний вигляд».

Після закінчення побудови моделі слід задати матеріал тіла або деталей. Для цього на правій висувній панелі інструментів необхідно відкрити вкладку «Зовнішні види, сцени та написи», вибрати зі списку необхідний матеріал з певним видом обробки поверхні і перетягнути його на модель. Після цього в точці перетягування з'являться кнопки вибору обсягу застосування операції: грань, елемент, тіло або документ (назва поточного документа). Швидко обрати матеріал всієї моделі можна в дереві конструювання, вибравши «Редагувати матеріал» в контекстному меню пункту «Матеріал».

Налаштування кольору поверхні (деталі, тіла) здійснюється на вкладці «Менеджер відображення» лівої висувної панелі інструментів, де в списку зовнішніх видів можна після подвійного кліку лівою кнопкою миші у властивостях виду задати будь-який колір для елемента моделі.

Для отримання більш реалістичного зображення моделі з детальною настройкою якості і спеціальних ефектів відображення слід використовувати прикладну програму пакета SolidWorks, яка отримала назву PhotoView 360 [3]. Щоб скористатися функціями даної програми необхідно попередньо завантажити її в середовище САПР, скориставшись вкладкою «Додавання застосунків SolidWorks» основної робочої панелі інструментів. Після цього стане доступна нова вкладка «Інструменти відображення» на цій же панелі. У

меню вкладки «Інструменти відображення» слід налаштувати якість відображення моделі в пункті «Параметри», потім рекомендується запустити «Вікно попереднього перегляду», а далі «Остаточне відображення». Слід пам'ятати, що остання операція при установці високої якості формованого зображення може зайняти багато часу і вимагати високу продуктивність комп'ютера для реалізації.

## 2.2. Завдання до виконання комп'ютерного практикуму

1. Створити модель трійника розтруба, показану на рис. 2.1, б, в. У якості матеріалу моделі обрати сталь піскоструминної обробки. Задати необхідний колір деталі. Домогтися максимальної реалістичності моделі та ідентичності її з зображенням, наведеним на рис. 2.1, а.

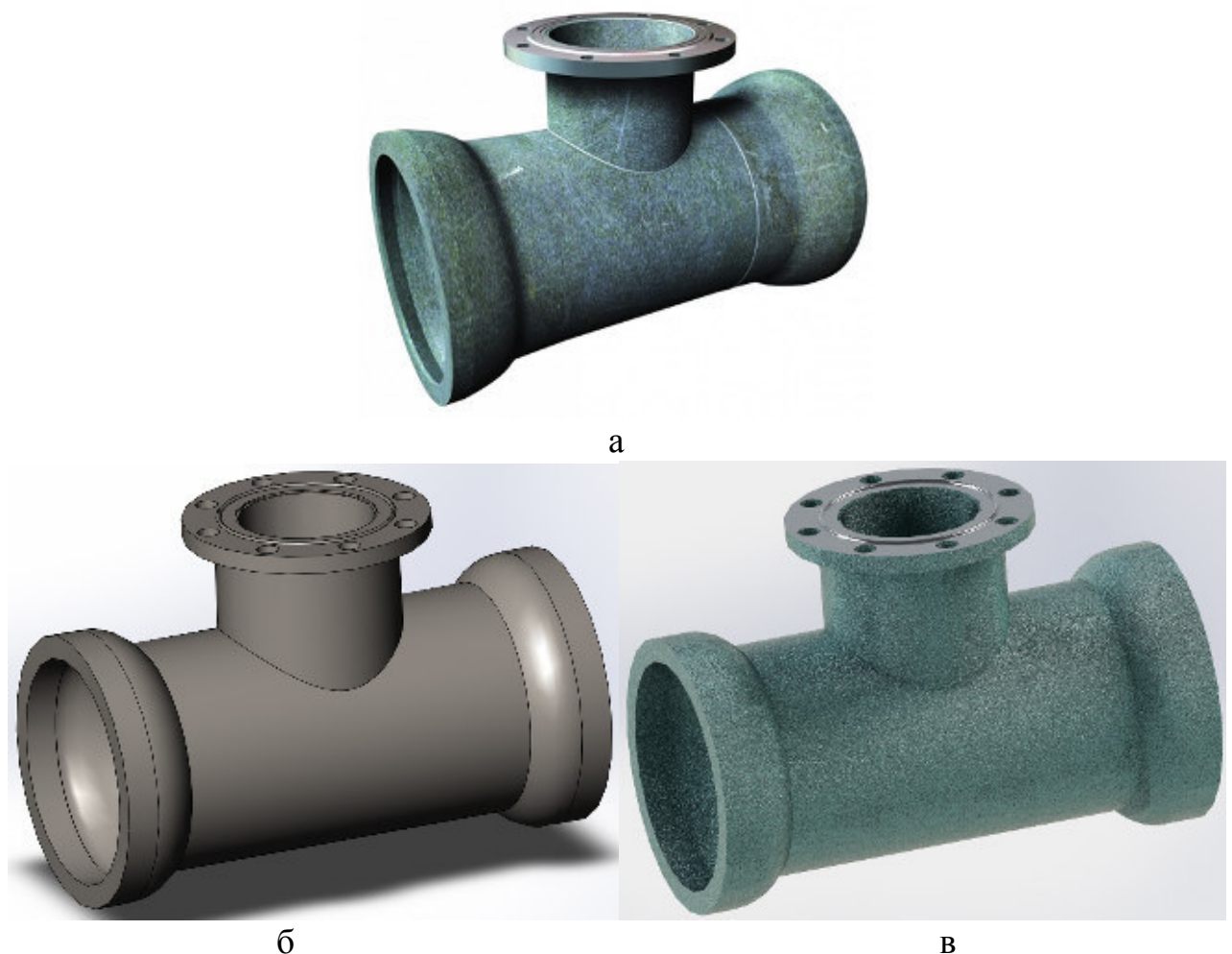


Рис. 2.1. З'єднувальний трійник розтруб: а) зображення, б) модель в середовищі SolidWorks з простим відображенням; в) модель в середовищі SolidWorks з відображенням за допомогою прикладної програми PhotoView 360



2. Створити модель (деталь) шестерні, креслення якої наведено в додатку 2, а зображення - на рис. 2.2. У якості матеріалу деталі обрати просту вуглецеву сталь. Для побудови моделі використати інтегровану в середовище SolidWorks бібліотеку стандартних виробів.

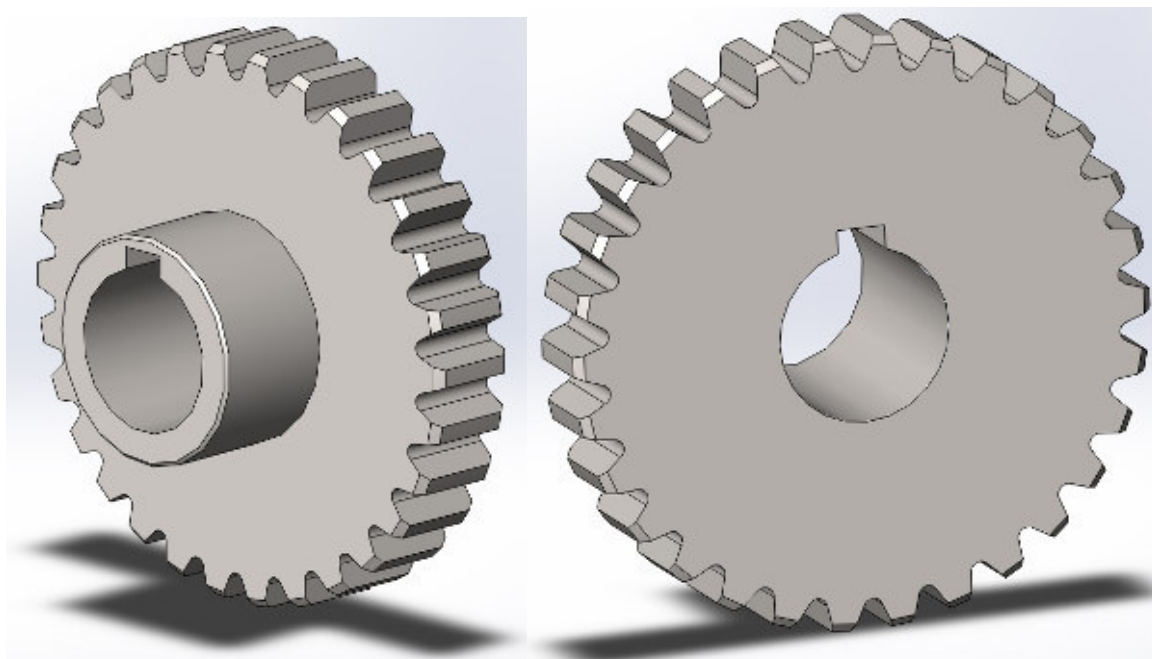


Рис. 2.2. Модель шестерні

## КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ №3

### Складання деталей. Проста анімація складання. Автоматична побудова асоціативного 2D креслення


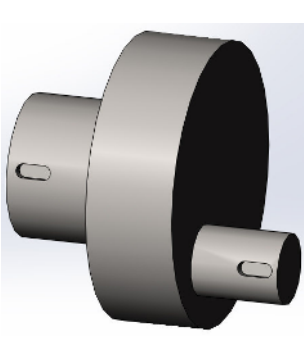
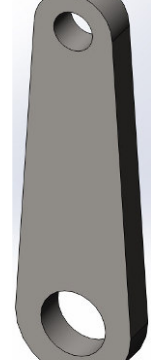
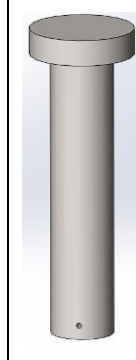
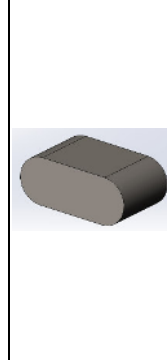
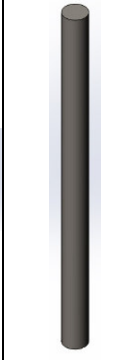
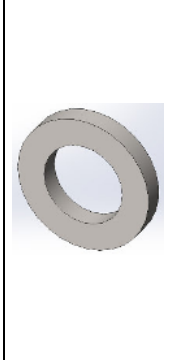
**Мета роботи:** навчитися моделювати в програмному пакеті SolidWorks складання деталей, реалізовувати анімацію збирання та розбирання конструкції та побудову асоціативних креслень з використанням вбудованих в середовище автоматизованих функцій.

#### 3.1. Теоретичні відомості

Створення складання деталей починається з відкриття нового документа «Складання», в якому буде відбуватися побудова і узгодження складальних елементів і блоків. Перед побудовою складання необхідна наявність збережених файлів деталей, з'єднувальні розміри яких будуть узгоджені між собою. Також є можливість узгодити з'єднувальні розміри деталей пізніше в режимі редагування складання.

Розглянемо побудову рухомого складання, що містить чотири простих деталі: корпус, колінвал, вісь і шатун. Для фіксації елементів в складанні будуть використовуватися дві шпонки, кільце і дріт (табл. 3.1). Колінвал містить дві канавки під шпонки, а вісь має отвір для вставки дроту.

Табл. 3.1. Деталі та сполучні елементи складання

						
Корпус	Колінвал	Шатун	Вісь	Шпонка	Дріт	Кільце

Після створення нового документу складання всі відкриті в програмі деталі будуть автоматично завантажені в список елементів для вставки, в іншому випадку необхідно додати деталі вручну. Додавання деталей в робоче поле складання здійснюється через вкладку «Складання» основної робочої панелі інструментів програми через пункт «Вставити компоненти».

Редагування деталей можна здійснювати безпосередньо з документа складання після його збереження. Для цього необхідно вибрати в контекстному меню потрібної деталі в дереві конструювання «Редагувати деталь», «Відкрити деталь». Після внесення коректив в одну з деталей і повернення до документа складання буде автоматично запропоновано перебудувати складальну конструкцію. Для виконання перебудови складання необхідною умовою є закриття режиму ескізу на всіх її деталях.

Після додавання всіх деталей в документ складання необхідно вказати сполучення між деталями і їх елементами (гранями, площинами). Для цього слід використовувати пункт «Умови сполучення» вкладки «Складання» основної робочої панелі інструментів програми.

Для створення вищеописаного складання необхідно застосувати наступні типи сполучень: концентричність (співвісність), збіг, дотичність, паралельність і заблокувати. Останній тип сполучення жорстко прив'язує дві деталі одна до одної без можливості будь-яких подальших переміщень.

Зображення отриманого складання деталей наведені на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Складання деталей

Після побудови складання його роботу в динаміці можна наочно побачити за допомогою функцій «Переміщати/Повертати компонент».

### **3.1.1. Проста анімація складання деталей**

САПР SolidWorks дозволяє швидко отримати запис (відео-файл) анімації збирання-розбирання складальної конструкції. Для створення анімованих дій попередньо необхідно, увімкнувши «Вид з рознесеними частинами» на основній робочій панелі інструментів програми, побудувати покроково рознесення всіх деталей складання. Отримане складання деталей прийме вигляд, що показано на рис. 3.2.

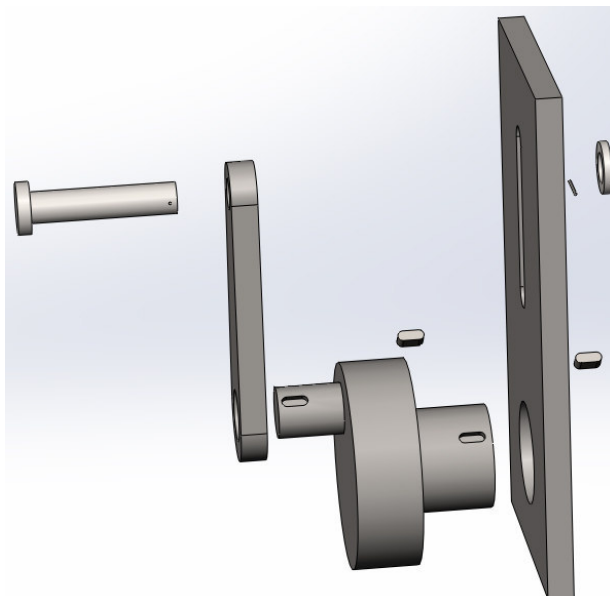


Рис. 3.2. Складання з рознесеними деталями

Для створення анімації далі необхідно на вкладці «Менеджер конфігурацій» лівої висувної панелі інструментів в таблиці «Конфігурації» відкрити в дереві конструювання контекстне меню «Вид з рознесеними частинами» і вибрати пункт «Анімувати складання елементів». Після цього відкриється панель налаштування швидкої анімації з можливістю зберегти файл-відео. Під час ходу анімації залишається доступною можливість змінювати ракурс огляду складання.

### 3.1.2. Побудова асоціативного 2D креслення

Після збереження файлу складання стає можливим автоматично побудувати його креслення з необхідними асоціативними видами. Для цього необхідно після створення нового документа типу «Креслення» вибрати на лівій висувній панелі інструментів програми «Деталь/Складання для вставки». Далі вказати на кресленні положення трьох основних асоціативних видів та ізометрії.

Для винесення додаткових видів необхідно на правій висувній панелі інструментів вибрати меню «Палітра видів», вказати в верхній частині вікна документ (деталь або складання) і перетягнути наявні види в робоче поле креслення. Приклад отриманого креслення наведений на рис. 3.3.

Побудова автоматичних розрізів на кресленні з асоціативними видами реалізується через пункт «Розріз» вкладки «Розташування виду» основної панелі інструментів програми. SolidWorks підтримує як автоматичне створення простих розрізів, так і дозволяють майже миттєво реалізовувати складні розрізи.

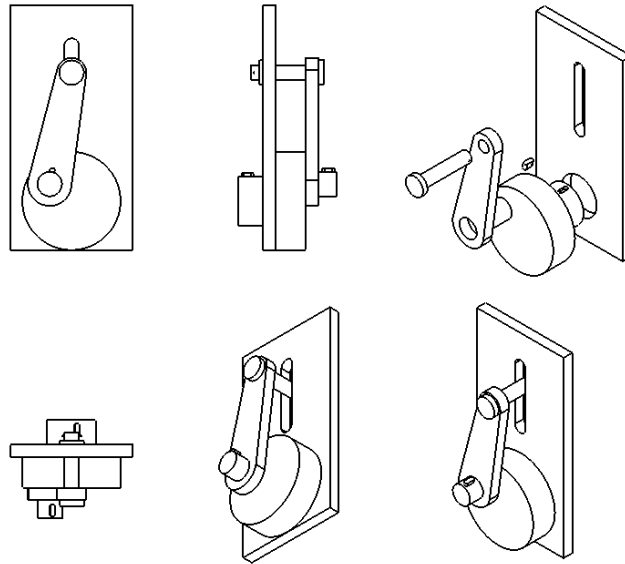


Рис 3.3. Креслення складання деталей з асоціативними видами

### 3.2. Завдання до виконання комп'ютерного практикуму

1. Створити деталі і з'єднувальні елементи, показані в табл. 3.1. У якості матеріалів деталей задати наступні: для корпусу - лита легована сталь; для колінвалу - легована сталь; для осі - проста вуглецева сталь; для шатуна - лита легована сталь; для шпонок - листова вуглецева сталь; для дроту - сталь холодновитягнута; для кільця - проста вуглецева сталь.
2. Створити складання деталей, зображення якого наведено на рис. 3.1.
3. Створити вид з рознесеними частинами (рис. 3.2) і реалізувати анімацію складання-розбирання конструкції.
4. Створити асоціативне креслення отриманого складання деталей з чотирма видами і розрізом та проставити на ньому габаритні розміри.

## КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ №4

### Створення моделі прес-форми деталі

**Мета роботи:** навчитися створювати в САПР SolidWorks модель прес-форми (матрицю та пуансон) для подальшого використання при штамповці на виробництві із застосуванням вбудованих в програмний пакет інструментів ливарної форми.

#### 4.1. Теоретичні відомості

Одним з найбільш популярних методів для виготовлення різних деталей в умовах сучасного серійного виробництва є штампування. Металеві вироби для надання їм потрібної форми при виготовленні піддають холодному штампуванню. Таким способом виготовляються деталі будь-яких габаритів: від масивних заготовок для судно-, машино- і автобудівельних підприємств, так і тонкостінні, буквально філігранні деталі (наприклад, тонкі стрілки годинника). Різні пластикові вироби, тенденція в застосуванні яких в якості корпусів пристроїв або інших малонавантажених частин конструкцій, стрімко наростає з кожним днем, сьогодні найчастіше виготовляються методом гарячого штампування. Застосування вищезазначених сучасних технологій масового виробництва потребує використання прес-форм, за допомогою яких досягається необхідна форма виробів. Прес-форма, як правило, складається з двох елементів: пуансона і матриці. Перший є підкладкою або основою, а другий формує основний рельєф на поверхні деталі під дією великого тиску.

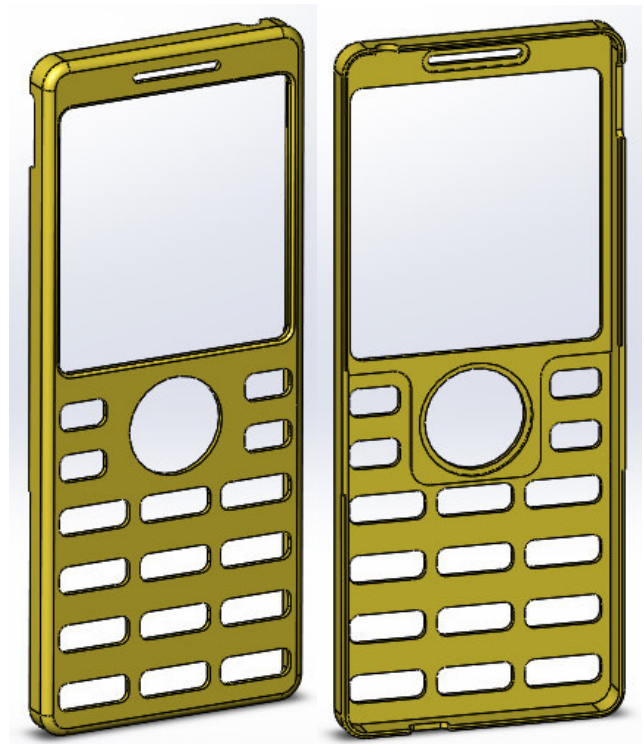
Середовище SolidWorks включає можливість проєктування прес-форм для деталей будь-якої складності форми. Для отримання доступу до необхідних функцій слід використовувати вкладку «Інструменти ливарної форми» основної панелі інструментів. Якщо дана вкладка відсутня, слід викликати контекстне меню на будь-якій наявній вкладці (наприклад, «Елементи» або «Ескіз»), і активувати потрібний набір функцій.

Розглянемо процес формування прес-форми в програмі SolidWorks, використавши в якості деталі передню частину корпусу мобільного телефону, зображення якого наведено на рис. 4.1, а. Перед початком роботи зі створення прес-форми необхідно побудувати модель деталі, яку планується виготовляти методом штампування. Отримана кришка корпусу відображена на рис. 4.1, б. Побудову виконано з урахуванням кріплень кришки і отворів (вирізів) під роз'єми пристрою.

Важливим нюансом є врахування термоусадки деталі після охолодження, отже, перед початком формування прес-форми деталь необхідно масштабувати з коефіцієнтом, відповідним певному матеріалу, з якого буде виготовлятися дана деталь. Прийmemo коефіцієнт масштабування рівним 1,01 і виконаємо операцію масштабування, використовуючи функцію «Масштаб» на вкладці «Інструменти ливарної форми» основної панелі інструментів.



а



б

Рис. 4.1: (а) мобільний телефон; (б) модель передньої частини корпусу мобільного телефону



Отримана в результаті масштабування модель послужить основою для створення пуансона і матриці.

Перш за все слід виконати аналіз нахилу елементів деталі по відношенню до заданої базової лінії. Для цього необхідно використовувати функцію «Лінії роз'єму», після активації якої на панелі потрібно задати невеликий «Кут нахилу» (3 градуси буде достатньо) і вказати грань напрямку натягу - плоску грань, яка буде збігатися з основою матриці (для поточної деталі - це грань, якою передня кришка пристрою буде стикатися із задньою частиною корпусу, виділена кольором на рис. 4.2, а. Після цього потрібно виконати «Аналіз нахилу», результатом якого буде визначення програмою всіх граней деталі, які будуть використані для створення прес-форми, у вигляді кольорової карти площин, зображення якої наведено на рис. 4.2, б. Певний колір відповідає додатному і від'ємному нахилу або його відсутності по відношенню до виділеної межі. Після цього необхідно виділити всі кромки, які сформують «Лінію роз'єму» і натиснути клавішу «ОК» на активній панелі. При виборі кромки, які вказувати не обов'язково, вони будуть показані як «Зайві». У результаті виділення повинна вийти тільки одна замкнута лінія складної форми, що проходить по периметру всієї деталі, як показано на рис. 4.2, в.

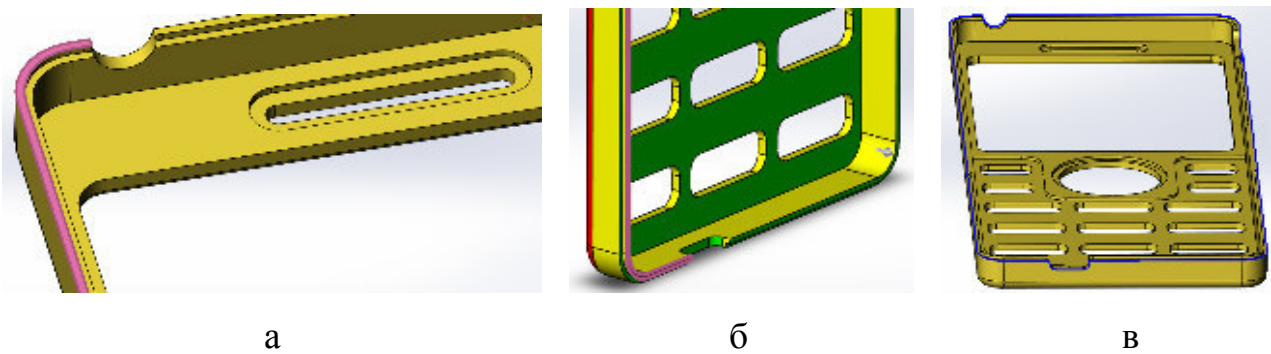


Рис. 4.2. Процес формування прес-форми деталі: а) грань напрямки натягу; б) колірна карта аналізу нахилу граней деталі; в) лінія роз'єму деталі

Як результат операції, в дереві побудови моделі повинен з'явитися пункт «Базова лінія нахилу 1». Якщо лінія нахилу сформована невірно, біля цього

пункту буде відображений застережливий символ, який свідчить про наявність помилки в побудові.

Наступним етапом створення прес-форми є формування відтинаючої поверхні, яка виступить в якості розділювальної площини між пуансоном і матрицею. Для виконання операції слід скористатися функцією «Поверхні, що відсікає», яка автоматично позначить більшість необхідних контурів, інші слід виділити вручну. Всі зазначені контури повинні бути замкненими. Результат виділення показаний на рис. 4.3, а, а результат операції - на рис. 4.3, б відповідно.

Далі необхідно скористатися функцією «Поверхні роз'єму», що автоматично використовує в якості лінії роз'єму «Базову лінію нахилу 1», що вже побудована на моделі. Єдине, що необхідно скоригувати - «Відстань поверхні роз'єму» (слід задати близько 50 мм), що визначить ширину площини, зображеної на рис. 4.3, в, для подальшого поділу моделі на пуансон і матрицю.

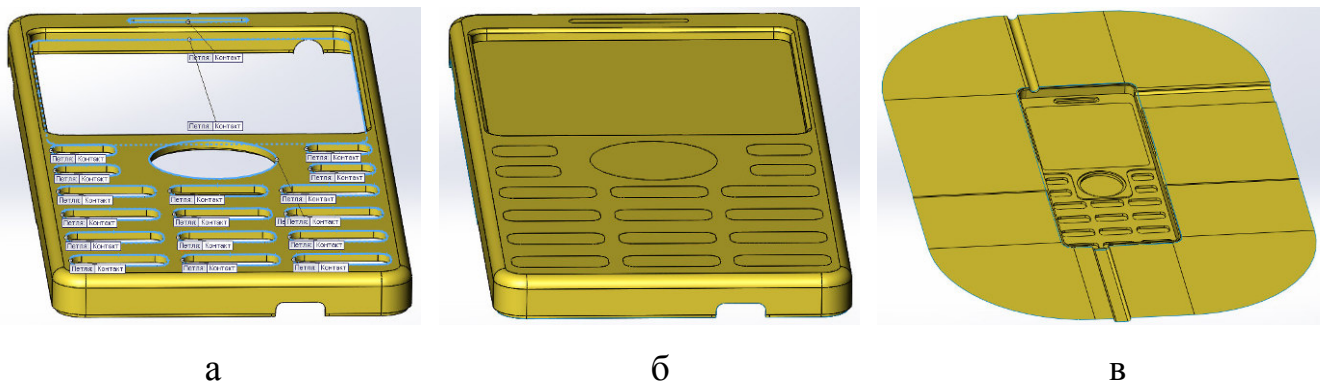


Рис. 4.3. Процес формування прес-форми деталі: а) контури, для формування відтинаючих поверхонь; б) модель з відсікаючими поверхнями; в) модель з поверхнею роз'єму

Наступним кроком необхідно сформувати на поверхні роз'єму ескіз з прямокутником, що визначить розміри майбутньої матриці і пуансона, як показано на рис. 4.4, а. Після виходу з побудованого ескізу слід скористатися функцією «Розділення інструментів», на запит якої вказати сформований ескіз. Далі можна відредагувати розміри блоку, половинки якого будуть пуансоном і

матрицею. Після застосування операції поділу пункт «Поверхня роз'єму 2» в дереві побудови моделі можна приховати. У результаті отримаємо модель, наведену на рис 4.4, б, що містить пуансон, матрицю і базову деталь всередині відображеного блоку.

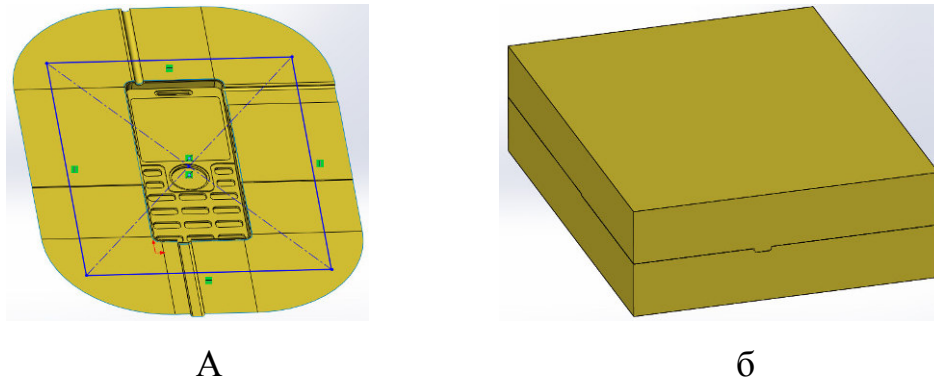


Рис. 4.4. Процес формування прес-форми деталі: а) прямокутний ескіз, що визначає форму і розміри прес-форми; б) блок, що містить в собі пуансон, матрицю і деталь

На поточному етапі пуансон і матриця повністю сформовані, але знаходяться в повному контакті з деталлю. Для отримання наочного результату необхідно повернути і рознести всі компоненти, використовуючи функцію «Перемістити/копіювати тіло», яку можна знайти у вкладці панелі інструментів «Елементи» (або переходом через Основне меню програми SolidWorks → «Вставка» → «Елементи» → «Перемістити/копіювати тіло»). Вибравши спочатку матрицю (верхню частину блоку) слід повернути її на 180 градусів і вручну (потягнувши курсором миші за потрібну стрілку системи координат, що з'явиться) перемістити на позицію поруч з рештою елементів моделі. Потім в якості тіла при виконанні команди «Перемістити/копіювати тіло» вибрати кришку мобільного телефону, яка в побудованій моделі позначена як «Базова лінія нахилу 1», і перемести її на позицію, наприклад, між пуансоном і матрицею.

Отримана вищеописаним способом прес-форма для виготовлення передньої панелі корпусу мобільного телефону методом гарячого штампування показана на рис. 4.5.

#### 4.2. Завдання до виконання комп'ютерного практикуму

1. Побудувати модель передньої панелі корпусу мобільного телефону, зображення якої показано на рис. 4.1, б.
2. Побудувати модель прес-форми, що складається з матриці і пуансона, описаним в роботі методом.
3. Як результат, отримати модель, наведену на рис. 4.5.

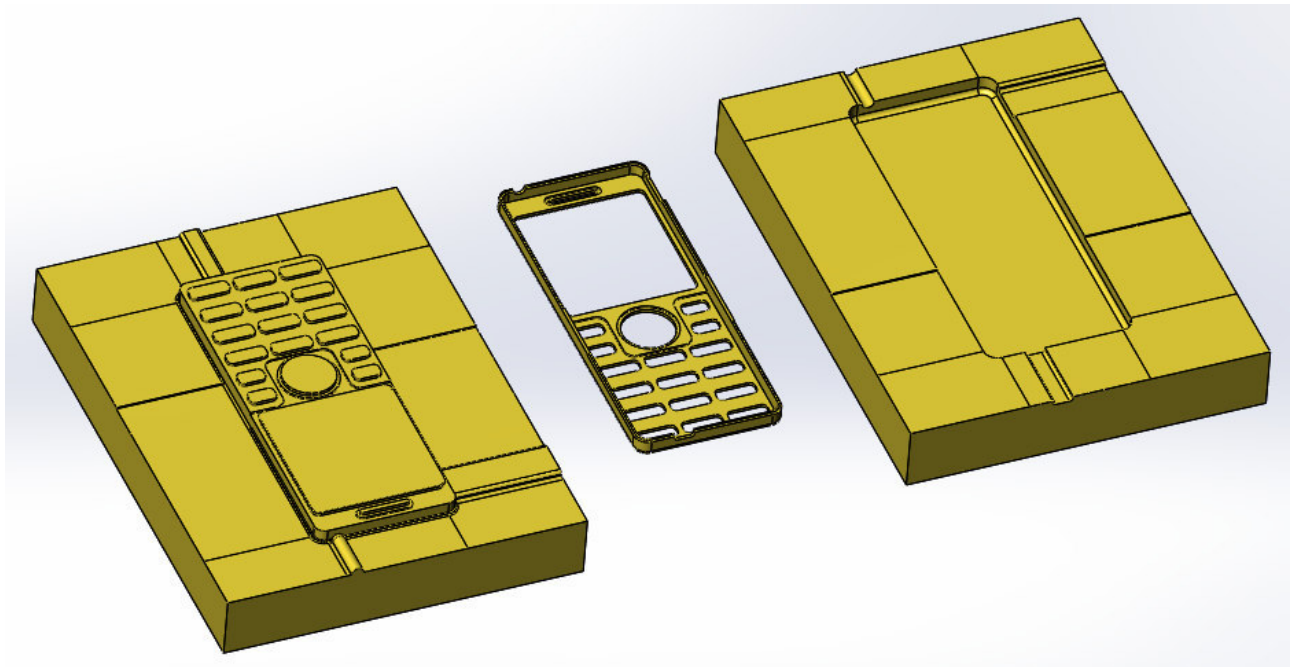


Рис. 4.5. Модель прес-форми передньої панелі корпусу мобільного телефону:  
зліва - матриця; праворуч - пуансон; в центрі - деталь, виготовлення якої  
планується методом гарячого штампування

## КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ №5

### Моделювання та аналіз процесів і впливів. Додаток SolidWorks Simulation

**Мета роботи:** навчитися та набути практичних навичок проведення в програмному пакеті SolidWorks досліджень динамічних процесів, аналізу напружень, навантаження, деформацій, власних частот, втоми, життєвого циклу конструкції під дією впливів різного характеру на модель.

#### 5.1. Теоретичні відомості

Прикладна програма SolidWorks Simulation є повністю інтегрованою і часто входить в базову комплектацію даної САПР та являє собою систему аналізу конструкцій будь-якої складності. Програмний пакет SolidWorks випускається в трьох модифікаціях, кожна з яких спрямована на вирішення спеціальних завдань різної складності:

- SolidWorks Simulation Standard. Версія пакета дозволяє здійснювати моделювання конструкції на основі лінійного статистичного аналізу.
- SolidWorks Simulation Professional. Пакет містить розширений набір функцій і можливостей, дозволяє здійснювати просторовий структурний аналіз, аналіз температурних полів, проведення симуляції частоти вібрацій, а також здійснення моделювання руху елементів конструкцій і складання деталей.
- SolidWorks Simulation Premium. Найбільш повна версія програмного пакета, яка дозволяє проводити моделювання процесів з урахуванням нелінійної залежності властивостей матеріалів і характеристик конструкцій, динамічний аналіз компонентів і складання деталей, а також використовувати реалістичні моделі композитних матеріалів [4].

Для вирішення інженерних завдань із застосуванням пакета SolidWorks Simulation необхідна висока продуктивність та обчислювальна потужність комп'ютера, вимоги до якого різко підвищуються зі збільшенням складності і кількості деталей в конструкції, а також точності проведення розрахунку та аналізу.

Програма SolidWorks Simulation дозволяє проводити 9 типів аналізу:

- статичний;
- частотний;
- втрата стійкості;
- термічний;
- ударне навантаження;
- втома;
- нелінійний;
- лінійної динаміки;
- посуд тиску.

Для проведення досліджень необхідно попередньо активувати прикладну програму і завантажити її функціонал в середовище SolidWorks, скориставшись вкладкою «Додавання застосунків SolidWorks» основної робочої панелі інструментів САПР. Завантаження програми призведе до появи нової вкладки «Simulation», на якій і здійснюється робота.

На вкладці «Simulation» необхідно вибрати пункт меню «Нове дослідження», після чого задати ім'я дослідження (рекомендується привласнювати логічні назви для зручності орієнтації при проведенні декількох видів аналізу однієї конструкції) і його тип. Розширені версії пакету дозволяють також на даному етапі активувати функцію «Використовувати 2D спрощення», що зменшить вимоги до продуктивності комп'ютера і часові витрати для проведення дослідження, однак значно знизить точність результатів аналізу.

Для базового знайомства з можливостями пакету SolidWorks Simulation проведемо три типи досліджень: статичне, частотне і аналіз втоми.

### **5.1.1 Статичний аналіз**

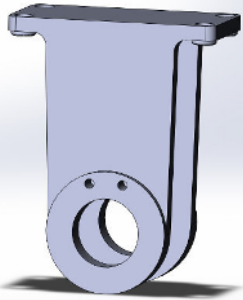

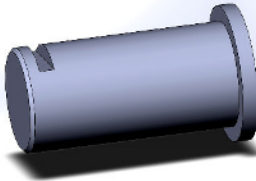
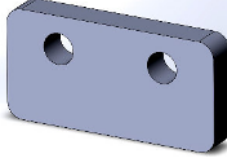
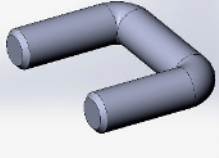
Статичний аналіз містить в собі дослідження внутрішніх напружень, переміщень елементів під дією навантажень та деформації елементів конструкції, що моделюється.

Виконаємо аналіз статичних навантажень на прикладі канатного блоку типової конструкції.

*Примітка.* Канатний блок - засіб для підйому вантажу на певну висоту, що має один або кілька струмків, які служать напрямними для канатів. Найчастіше канатні блоки використовуються в вантажопідйомній техніці.

Деталі складання показані в табл. 5.1, а конструкція на рис. 5.1.

Таблиця 5.1. Деталі складання канатного блоку

				
Кронштейн	Ролик	Вісь	Втулка	Скоба

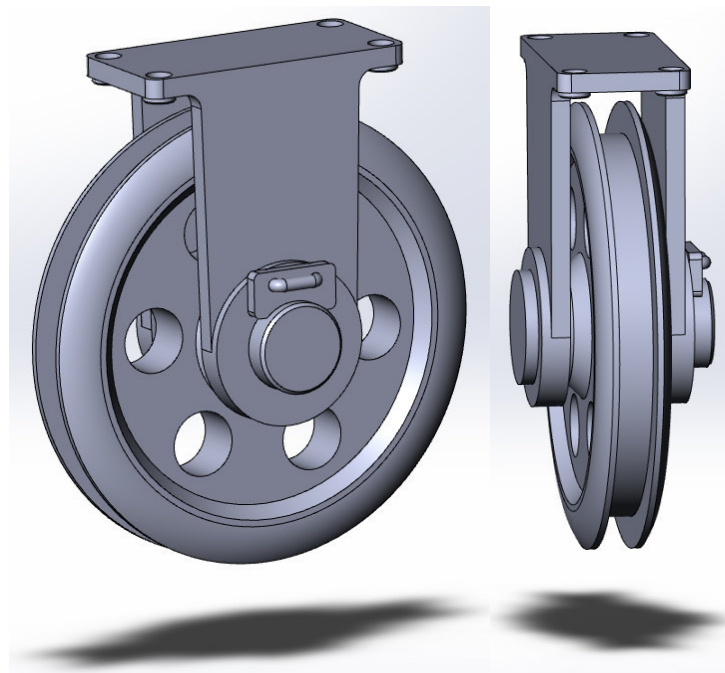


Рис. 5.1. Складання канатного блоку

Статичний аналіз моделі після запуску відобразиться у вигляді дерева конструювання дослідження. До запуску аналізу необхідно попереднього виконати наступні дії.



1. У дереві конструювання на вкладці «Деталі» задати всі матеріали елементів складання. Якщо матеріал не був заданий при створенні деталі, його можна вказати в контекстному меню використавши пункт «Застосувати/Редагувати матеріал». Зелена галочка на іконці деталі вказує на те, що матеріал компонента визначено.

2. Вказати кріплення всього складання конструкції, скориставшись основною панеллю інструментів програми. Для даної конструкції достатньо буде задати всього два типи кріплення:

- «Ролик/ковзання» → «Ролик/повзун» для верхньої грані кронштейна;
- «Фіксований шарнір» → «Зафіксований шарнір» для отворів на верхній грані кронштейна, призначених для болтового кріплення.

Задані кріплення змодельюють реальне з'єднання канатного блоку з підвісом або площиною, на якій він буде кріпитися при експлуатації.

Після виконання зазначених дій на вкладці «Кріплення» дерева побудови дослідження відобразиться повний список заданих кріплень складання, а в робочому вікні програми - набір стрілок на конструкції, які можуть мати різний колір і форму в залежності від виду обраного кріплення.

3. Задати зовнішні навантаження, які будуть діяти на конструкцію в ході моделювання, що імітують реальну експлуатацію виробу. На канатний блок діє два види навантаження: сила тяжіння (рівна приблизно  $9,81 \text{ м/с}^2$ ) і сила тиску каната і вантажу, прикріпленого до нього, на ролик блоку. Зовнішні навантаження можна задати, скориставшись пунктами «Сила» і «Сила тяжіння» меню основної панелі інструментів програми. При вказівці сили тяжіння необхідно правильно задати напрямки сили і її величину, а при визначенні сили тиску на ролик - величину і грань конструкції, на яку буде здійснюватися вплив. Після виконання зазначених дій вони відобразяться в пункті «Зовнішні навантаження» дерева побудови дослідження.

4. Останнім пунктом перед початком аналізу слід створити сітку елементарних комірок, які будуть виступати тілами для проведення аналізу всієї конструкції. Для цього необхідно в контекстному меню пункту «Сітка»



дерева побудови дослідження вибрати «Створити сітку». Найбільш важливим параметром сітки є розмір елементарної комірки, від якого безпосередньо залежить точність результатів проведеного аналізу. Груба сітка знизить точність дослідження, але потребуватиме меншої продуктивності комп'ютера в ході розрахунку. Висока щільність сітки дозволить зробити більш точні обчислення, але затребує більше ресурсів на побудову і проведення аналізу. Слід пам'ятати, що конструкція, яка містить дрібні елементи (наприклад, різьби з'єднання з дрібним кроком) або поверхні складної форми потребують створення сітки високої щільності.

Успішне створення сітки буде відображено не тільки на самій конструкції, а й у дереві побудови дослідження: на значку деталі в пункті «Сітка» з'явиться зелена галочка і відобразиться побудова сітки, також це буде відображено в пункті «Деталі» на іконці кожного елемента складання.

При невдалій побудові сітки необхідно повторити процедуру її створення, змінивши початкові параметри: точність сітки або кількість точок Якобіана.

Після виконання пунктів 1-4 конструкція набуде вигляду, що показаний на рис. 5.2.

У разі відсутності сітки на конструкції вона буде створена автоматично при запуску аналізу.

Перед запуском розрахунку рекомендується перевірити всі вхідні дані, що значно заощадить час проведення дослідження та отримання адекватних результатів аналізу моделі.

Початок розрахунку моделі по заданих параметрах здійснюється натисканням кнопки «Запуск» на основній панелі інструментів програми.

Результати розрахунку представлені в дереві побудови дослідження трьома основними пунктами: «Напруження 1», «Переміщення 1» та «Деформація 1», зображення яких наведено на рис. 5.3. Перехід між моделями результатів дослідження здійснюється подвійним кліком миші. Для більш реалістичного вигляду моделей існує можливість в контекстних меню пунктів

«Кріплення» та «Зовнішні навантаження» дерева побудови дослідження відключити відображення стрілок.

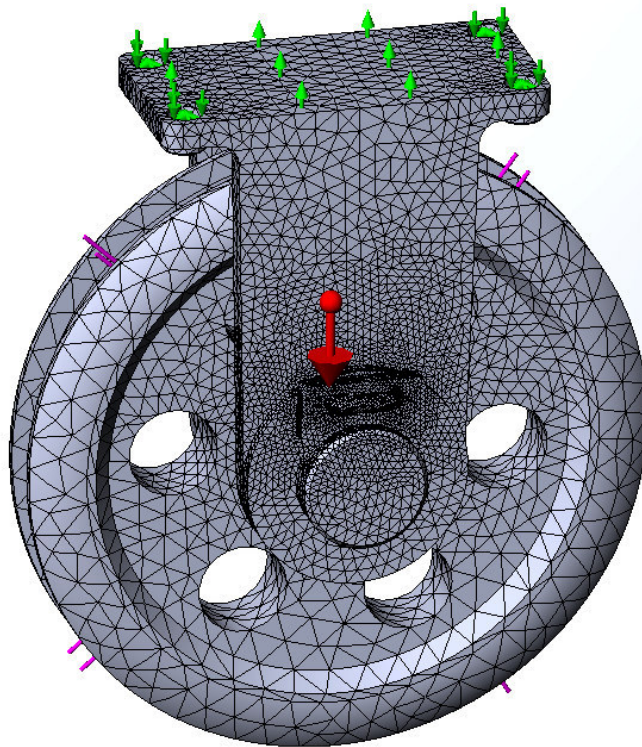


Рис. 5.2. Модель канатного блоку перед запуском розрахунку

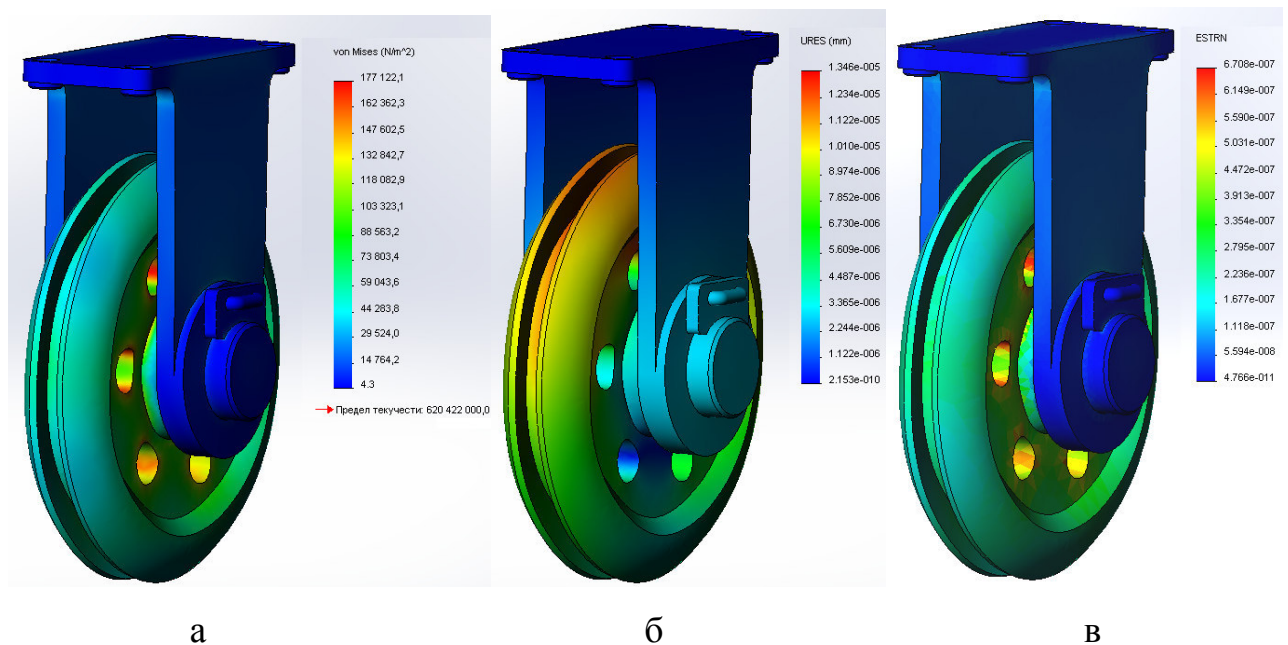


Рис. 5.3. Результати статичного аналізу:

а) напруження, б) переміщення, в) деформація

Епюра «Напруження» показує розподіл внутрішніх напружень в конструкції.

Епюра «Переміщення» демонструє зміну положення кожної точки конструкції по відношенню до початкового стану під дією зовнішніх навантажень.

Епюра «Деформація» описує зміну форми і розмірів елементарних осередків моделі конструкції по відношенню до ненавантаженого стану.

Кожна епюра містить кольорову відлікову шкалу із зазначенням величини змін в конструкції відповідно до кольору ділянки.

У контекстному меню дерева побудова дослідження для активної епюри можна активувати функцію «Анімувати», де буде наочно показано процес впливу заданих статичних навантажень на параметри (форму, розміри) конструкції.

Статичний аналіз дозволяє також провести оптимізацію конструкції, спрямовану на посилення найбільш навантажених ділянок, що продовжить термін служби виробу і підвищить його надійність та експлуатаційні параметри, а також на вдосконалення масогабаритних властивостей конструкції з метою економії матеріалів при виготовленні виробу. Інформація, необхідна для проведення такої оптимізації, наочно представлена на епюрі «Design Insight» (рис. 5.4), яку можна викликати з контекстного меню пункту «Результати» дерева побудови дослідження.

Дана епюра демонструє зміну рівня навантаження в об'ємі конструкції. Динамічний аналіз розподілу внутрішнього навантаження в конструкції дозволяє визначити місця, які піддаються найбільшому навантаженню (сині області на рис. 5.4, а) і локалізації найменших навантажень (прозорі області на рис. 5.4, в).

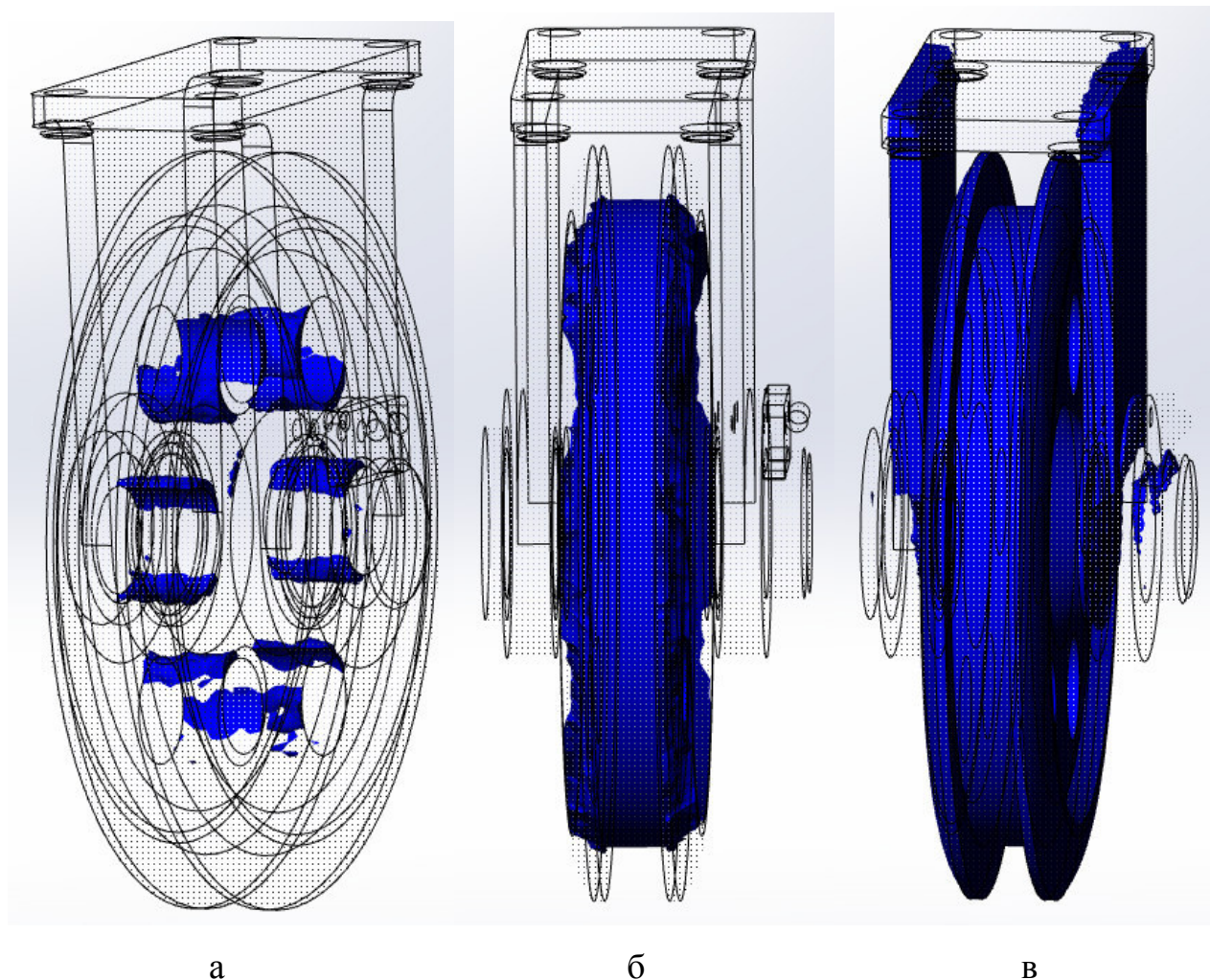


Рис. 5.4. Епюра «Design Insight»

Не виходячи з епюри «Design Insight», існує можливість оптимізувати конструкцію - видалити певний об'єм матеріалу з ненавантажених областей. Це відбувається тим же шляхом, що і на вкладці «Модель»: створенням ескізів і подальшим формуванням тривимірних елементів за допомогою функцій «Витягнутий виріз» і «Повернутий виріз».

Для посилення («нарощування») матеріалу на ділянках, що піддаються впливу найбільших навантажень, необхідно перейти на вкладку «Модель», де і провести доопрацювання конструкції.

### 5.1.2 Частотний аналіз

Метою частотного аналізу є розрахунок значень так званих резонансних частот конструкції для зіставлення їх з частотами коливань зовнішнього середовища або несучих елементів. Збіг цих частот в ході експлуатації виробу може привести до виникнення резонансу, значного посилення амплітуди внутрішніх коливань і руйнування або значної зміни характеристик конструкції.

При створенні ще одного дослідження типу «Частота» немає необхідності заново визначати кріплення складання, створювати сітку елементарних комірок або задавати матеріали деталей. Існує можливість переносити параметри між дослідженнями простим перетягуванням елементів дерева побудови дослідження.

Частотний аналіз можна виконати з урахуванням зовнішніх навантажень і без нього. У першому випадку необхідно використовувати програму розрахунку «Direct Sparse», у другому - «FFEPlus». Слід пам'ятати, що вирішення задачі частотного аналізу з урахуванням зовнішніх навантажень багаторазово збільшить вимоги до продуктивності комп'ютера і потребує значних витрат часу на виконання розрахунку.

Вибір програми для розрахунку виконується через пункт «Властивості» контекстного меню першого рядка (в якому міститься назва, що присвоєна дослідженню) дерева побудови дослідження. При виборі типу «Автоматична» програмний пакет самостійно вибере потрібну програму виходячи із заданих параметрів дослідження.

Результатом частотного аналізу є епюри переміщень, які також мають функцію анімації. Найбільш важливою інформацією даного типу дослідження є список резонансних частот конструкції (табл. 5.2) і список переміщень її вузлів.



Таблиця 5.2. Резонансні частоти конструкції

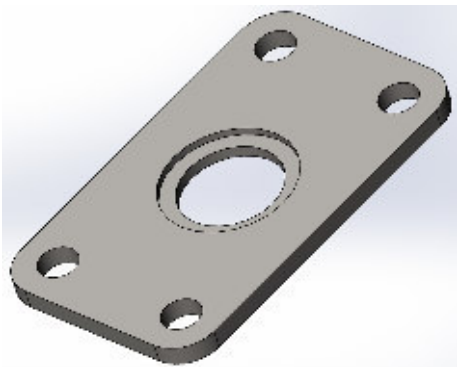
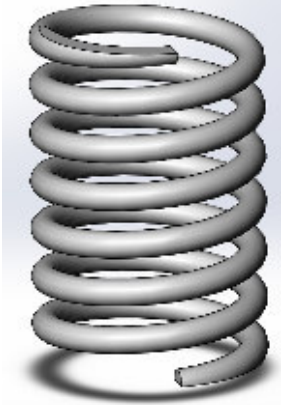
Режим No.	Частотний(Рад/сек)	Частотний(Герц)	Період(Секунди)
1	73504	11699	8.5481e-005
2	1.0804e+005	17196	5.8153e-005
3	1.0826e+005	17230	5.8039e-005
4	1.9683e+005	31327	3.1921e-005
5	2.0138e+005	32051	3.12e-005

### 5.1.3 Дослідження типу втоми

Аналіз втоми конструкції спрямований на визначення життєвого циклу виробу і його вузлів. На основі даного типу дослідження можна визначити, скільки циклів навантаження заданого типу зможуть витримати елементи конструкції, а також спрогнозувати, в якій області відбудеться руйнування деталі під впливом циклічних навантажень.

Для наочності і простоти інтерпретації результатів аналіз втоми виконаємо на прикладі нескладного складання пружинного елементу, що виконує функції амортизатора коливань. Деталі складання наведені в табл. 5.3, а зображення моделі конструкції - на рис. 5.5.

Таблиця 5.3. Деталі складання

	
Кришка	Пружина

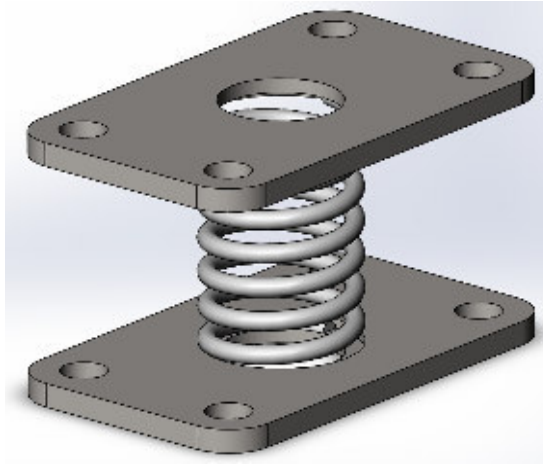


Рис. 5.5. Складання пружинного елементу

Для моделювання пружинних елементів доцільно використовувати тип кріплення «Підтримка пружності» («Пружна основа»).

Дослідження втоми конструкції слід почати з «додавання події» в контекстному меню пункту «Навантаження» дерева побудови дослідження. У події необхідно задати кількість циклів навантаження і його тип (наприклад, тип «повністю реверсовано» означає, що навантаження буде повністю зніматися і подаватися вказане число циклів), а також вказати в таблиці, з якого дослідження будуть взяті параметри зовнішніх навантажень для аналізу конструкції (якщо досліджень вже створено декілька).

Після створення події в дереві побудови дослідження відобразиться список деталей складання, зібраних в пункті «Деталі». Для кожної деталі за допомогою її контекстного меню необхідно визначити «дані втоми». Найбільш простим методом завдання цих параметрів є «їх отримання з модуля пружності матеріалу». Про успішне визначення даних втоми для кожної деталі сигналізує наявність на її іконці зеленої галочки.

Результатом аналізу втоми є дві епюри: «Пошкодження» і «Термін служби», наведені на рис. 5.6.

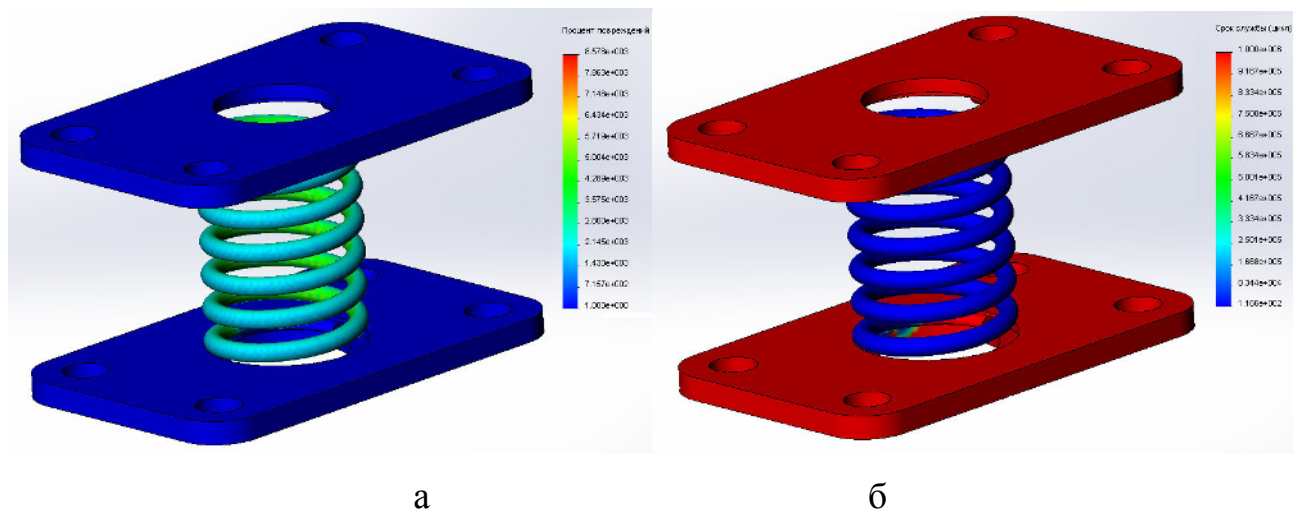


Рис. 5.6. Результати аналізу втоми: а) пошкодження, б) термін служби

Епюра «Пошкодження» відображає в процентному співвідношенні пошкодження конструкції після завершення заданого числа циклів навантаження. 100% пошкоджень в будь-якій точці відповідають повному руйнуванню виробу в даній локальній області.

Епюра «Термін служби» містить дані про кількість циклів заданого навантаження, які витримає певна точка конструкції до початку руйнування.

На підставі цих даних розраховується, наприклад, термін експлуатації виробу і гарантійний термін обслуговування сервісами компанії-виробника.

## 5.2. Завдання до виконання комп'ютерного практикуму

1. Створити деталі, показані в табл. 5.1, і об'єднати їх у складання, зображення якого наведено на рис. 5.1.

2. Виконати статичний аналіз отриманої конструкції під впливом сили тяжіння і сили, що тисне на ролик канатного блоку, величиною 100 Н. Визначити області максимальних напружень, переміщень і деформацій і їх величину.

3. Оптимізувати масогабаритні властивості конструкції (зменшити вагу не менш ніж на 10%), видаливши матеріал з малонавантажених областей. Переконайтеся, що видалення матеріалу не привело до значного збільшення деформацій в конструкції.



4. Провести частотний аналіз моделі канатного блоку з метою визначення перших п'яти резонансних частот конструкції.
5. Створити деталі, показані в табл. 5.3, і об'єднати їх в складання, зображення якого наведено на рис. 5.5.
6. Провести дослідження втоми пружинного елемента з метою визначення кількості циклів навантаження, величину якої слід задати з конструктивних міркувань, які витримає дана система без руйнування будь-яких елементів конструкції.

## КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ №6

### Основи роботи, налагодження та друк на 3D принтері

**Мета роботи:** ознайомитись та набути практичних навичок роботи з 3D принтером: підготовка до роботи, налаштування, друк деталі, заміна друкарського матеріалу, зміна режимів роботи. Навчитися адаптувати та конвертувати формат цифрової моделі, створеної в САПР SolidWorks, під необхідності 3D принтера за допомогою програми Cura.

#### 6.1. Теоретичні відомості

На сьогоднішній день все більш широку популярність у якості конструкційних матеріалів отримують полімерні сполуки, пластики та пластмаси, витісняючи інші матеріали завдяки своїй низькій вартості, хорошим механічним властивостям, малій питомій вазі, легкості в обробці та номенклатурі, що постійно розширюється.

Сучасні технології дозволяють створювати твердотільні деталі високої точності на основі їх тривимірних моделей [5]. Прикладом реалізації такої технології є струменевий 3D принтер, зображення якого приведено на рис. 6.1. Пристрій дозволяє друкувати деталі з різних видів пластику: ABS, PLA, Nylon та ін. Мінімальна товщина шару, що формує даний 3D принтер, становить 0,1 мм. Максимальна температура екструдера досягає 245°C, нагрівального елемента стола - 120°C. Максимальні габарити деталі, що здатен відтворювати даний 3D принтер, складають 20 × 20 × 20 см.

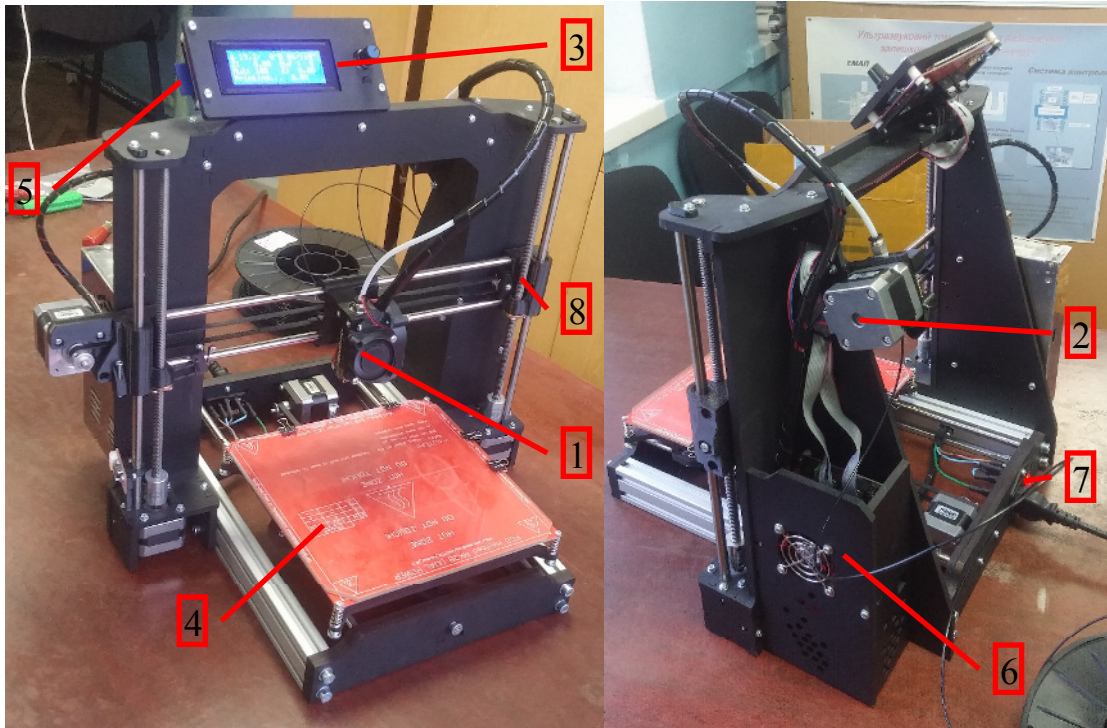


Рис. 6.1. 3D принтер

До основних елементів конструкції 3D принтера (згідно рис. 6.1) можна віднести: 1 - блок екструдера, що складається з нагрівача, сопла і двох кулерів охолодження; 2 - блок подачі матеріалу, в конструкцію якого входять двигун, шестерня, що забезпечує подачу матеріалу, і притискний ролик; 3 - панель керування, що містить дисплей і кнопочне реле; 4 - нагрівальний столик; 5 - слот для підключення SD карти пам'яті; 6 - блок живлення; 7 - кнопка увімкнення живлення принтера; 8 - система позиціонування.

### 6.1.1. Створення коду програми для 3D принтера

Побудову тривимірної моделі для подальшої її друку на 3D принтері можна здійснити в САПР, яка підтримує файли з розширенням \*.STL (stereolithography), до числа яких належить SolidWokrs.

Тривимірна модель, створена в середовищі SolidWokrs, обов'язково повинна бути твердотільною. При побудові моделі необхідно заздалегідь враховувати її габарити, масу і форму. Для цього необхідно задати матеріал деталі (або всіх деталей, що входять в конструкцію), що дасть можливість відстежувати масу конструкції скориставшись пунктом «Масові

характеристики» вкладки «Аналізувати» основної панелі інструментів програми.

Деталі слід формувати виходячи з міркувань можливостей і особливостей майбутнього процесу 3D друку. Конструкція повинна мати якомога менше елементів, формування яких потребує нарощування підтримок для уникнення провисання частин деталі під час друку. При необхідності конструкцію рекомендується розділити на кілька окремих деталей, які потім будуть збиратися вручну на основі розбірних або нерозбірних з'єднань, і друкувати кожен з них окремо. Також слід пам'ятати про те, що елементи конструкції, товщина яких менше діаметра сопла принтера, можуть бути спотворені або не відображені зовсім.

Після створення тривимірної моделі деталі в SolidWorks необхідно зберегти файл у форматі \*.STL. Слід пам'ятати, що відкрити файл з таким розширенням SolidWorks не зможе, тому рекомендується також зберігати моделі в редагованому форматі.

Перетворення файлу з розширенням \*.STL в програмний код здійснюється, наприклад, за допомогою програми Cura, інтерфейс якої версії 15.04.3 показаний на рис. 6.2.

Робота з програмою починається з налаштування 3D принтера, на якому будуть друкуватися деталі. При виборі «типу машини» слід вказати «Інші». Після створення принтера необхідно в «Налаштуваннях принтера» вказати «Максимальні ширину, глибину та висоту (мм)» деталі, яку здатний відтворити принтер. Всі три значення необхідно вказати по 200 мм і закрити вікно налаштування принтера кнопкою «ОК».

Далі необхідно перенести раніше створену модель (файл з розширенням \*.STL) в програму Cura. Для цього можна скористатися пунктом меню «Файл» → «Завантажити файл моделі...» або просто перетягнути файл у вікно програми. Також є можливість відкрити відразу декілька моделей для їх подальшого одночасного друку на принтері. Після завантаження деталі вона з'явиться в робочому полі вікна програми.

Вибір деталі у вікні програми відкриє доступ до кнопок її повороту, нахилу, масштабування та інших функцій. До надзвичайно корисних можна віднести функції перегляду пустот в деталі (прозорого відображення) і відображення пошарового формування деталі в процесі друку.

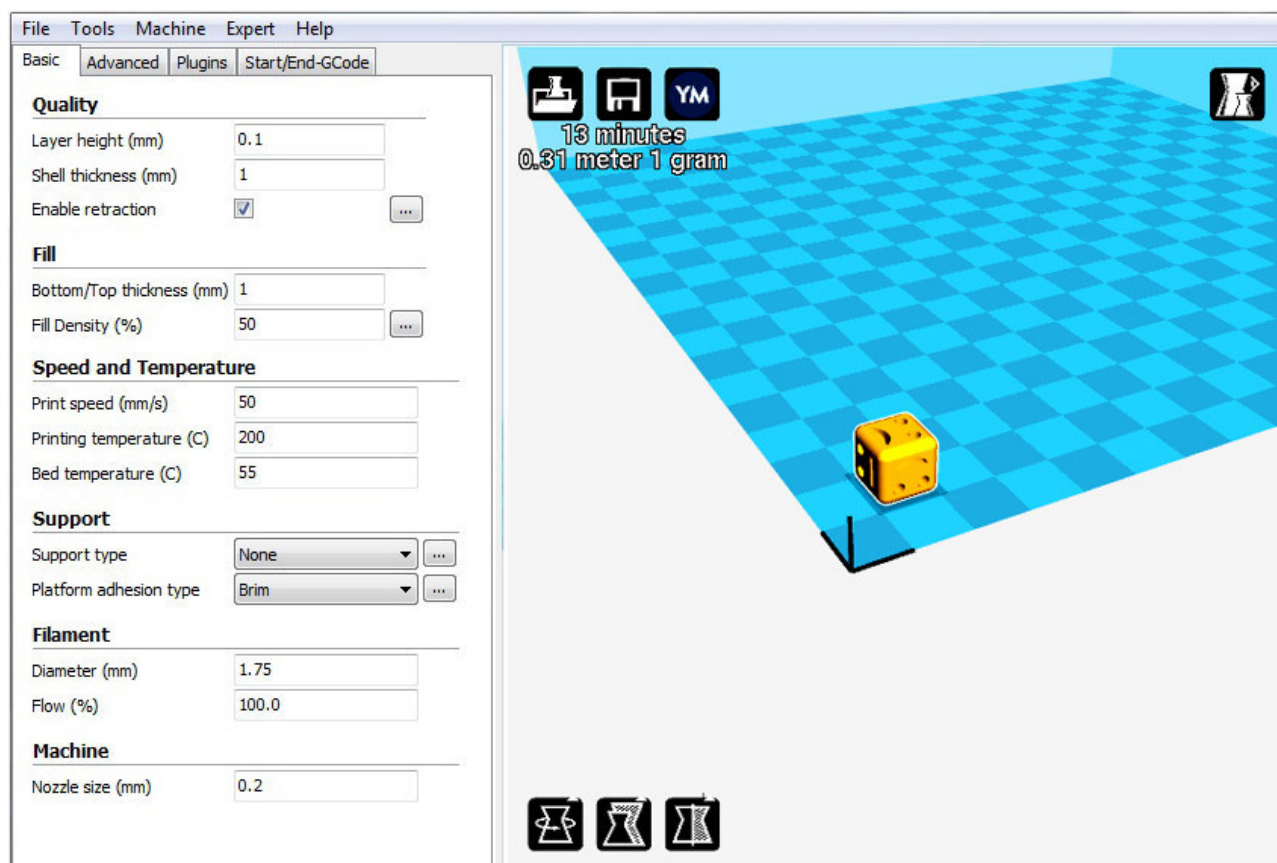


Рис. 6.2 Інтерфейс програми Cura

Робоче поле вікна програми Cura містить віртуальний стіл 3D принтера, розміри якого відповідають заданим в налаштуваннях принтера. Деталь слід встановити в області столу, яка буде оброблена зв'язуючою рідиною перед початком друку. Орієнтуватися на віртуальному столі можна за допомогою системи координат (відображається чорним кольором), центр якої відповідає лівій передній точці столу принтера.

У програмі обов'язково необхідно вказати наступні параметри, величини яких слід встановлювати виходячи з конструктивних міркувань:

- «Висота шару (мм)» - рекомендується 0,1-0,2;

- «Товщина стінки (мм)» - рекомендується не менше 1;
- «Товщина Низ/Верх (мм)» - рекомендується не менше 1;
- «Щільність заповнення (%)» - рекомендується не менше 20;
- «Температура друку (C)» - для ABS пластику встановити 225;
- «Температура стола (C)» - для ABS пластику встановити 110;
- «Тип підтримки» - вибирається виходячи з форми деталі і наявності в ній пустот;
- «Тип прилипання до столу» - рекомендується встановлювати «ні» і забезпечувати прилипання зв'язуючою рідиною потрібного типу.
- «Діаметр (мм)» - відповідно до документації на матеріал;
- «Діаметр сопла (мм)» - вказати діаметр сопла, яке в даний момент встановлено в екструдері (0,2, 0,4 або 0,5);

При наведенні курсору миші на кожен параметр буде відображено докладний опис з рекомендаціями.

Параметри діаметра нитки матеріалу, а також необхідні для його друку температури столу і екструдера наведені в документації, що зберігається в коробці з пластиком.

При вказівці будь-якого параметра або масштабування деталі програма автоматично виконає перерахунок часу друку, довжини матеріалу і його маси, що буде витрачено для друку. Ці параметри завжди відображаються в лівому верхньому кутку робочого поля середовища Cura.

Після внесення всіх необхідних параметрів та установки деталі в потрібне положення на робочому столі принтера слід зберегти файл коду програми, використовуючи пункт «Save GCode» меню «Файл» інтерфейсу Cura. Результуючий файл повинен мати розширення \*.gcode та має бути поміщений на SD карту пам'яті для подальшого перенесення на 3D принтер.

### 6.1.2. Підготовка 3D принтера до роботи

Перед початком роботи з принтером необхідно провести його калібрування і налаштування згідно параметрів майбутнього друку. Перш за все, слід обрати сопло екструдера, від діаметра отвору якого залежить точність друку і можливість коректно відтворити більш дрібні елементи деталі. Однак слід пам'ятати, що вибір сопла з меншим діаметром різко збільшить час друку деталі. У комплекті з даним 3D принтером наявні три сопла: 0,5 мм, 0,4 мм і 0,2 мм. Заміна сопла екструдера проводиться за допомогою відповідних інструментів (розвідних ключів) виключно в присутності викладача при нагрітому до робочої температури екструдері.

Наступним кроком підготовки принтера до роботи є заправка його необхідним для друку матеріалом. Обраний матеріал необхідно просунути через трубку подачі, яка починається в блоці подачі матеріалу і закінчується в екструдері. Для цього необхідно вручну віджати притискний ролик блоку подачі матеріалу і пропустити пластик через отвір, наявний в його основі. Бабину з матеріалом слід встановити на спеціальну підставку з роликами, що забезпечує автоматичне розмотування пластика по мірі необхідності.

Виходячи з необхідної (заданої в файлі програмного коду) товщини шару при друку деталі, слід здійснити калібрування зазору між соплом екструдера і нагрівальним столом. Ця операція проводиться для того, щоб поверхня столу була строго паралельна площині XY системи координат позиціонування принтера, перший шар матеріалу був рівномірно розподілений по поверхні столу, а також забезпечувалося надійне прилипання пластика до столу і при цьому не спотворювалася товщина першого шару матеріалу. Калібрування здійснюється програмно переміщенням екструдера над столом і установкою потрібного зазору між соплом і столом. Для цього слід попередньо включити пристрій кнопкою живлення, обрати відповідну опцію інтерфейсу програми і переміщати екструдер в площині XY при постійній координаті  $Z = 0$ . Розмір зазору встановлюється за допомогою щупів (металевих еталонних пластин) і обертання системи регулювання висоти на кожній з ніжок стола. Достатнім для

точної роботи пристрою є відкалібрувати зазор в чотирьох крайніх точках столу. При товщині шару формування деталі 0,2 мм рекомендується встановити зазор між соплом і нагрівальним столом трохи менше цього значення (наприклад, 0,15 мм), щоб забезпечити надійне прилипання першого шару пластика до поверхні.

Після заправки принтера матеріалом рекомендується зробити попередній ручний прогін пластика для забезпечення його правильної подачі і видалення залишків попереднього матеріалу з сопла екструдера. Для виконання цієї процедури необхідно запустити програму «PREHEAD ABS (PLA)», вибравши її з меню «QUICK SETTINGS» інтерфейсу принтера. Дана програма нагріє екструдер і стіл пристрою до температур, необхідних для друку відповідним видом пластику. Процес виходу принтера на заданий режим можна динамічно спостерігати на дисплеї, у першому рядку якого при виході з усіх опцій відображаються поточне/задане значення температур екструдера і стола (рис. 6.3).



Рис. 6.3 Дисплей 3D принтера

Після виходу на заданий режим необхідно вручну, віджавши притискний ролик блоку подачі матеріалу, почати поступово проштовхувати пластик в екструдер до його появи з сопла. Як тільки пластик почав виходити з сопла, процедура вважається закінченою і залишається лише вручну видалити



видавлений з сопла матеріал. Дану процедуру можна також виконати в автоматизованому режимі, скориставшись меню інтерфейсу 3D принтера.

### **6.1.3. Друк на 3D принтері**

Процедура друку деталі на підготовленому до роботи і відкаліброваному принтері (зазор між соплом екструдера і столом повинен бути узгоджений з товщиною шару при друку деталі, що задано в програмному коді) проводиться на основі наступного алгоритму:

1. вставити SD карту пам'яті з файлом коду програми у відповідний слот, що знаходиться за дисплеєм пристрою. Файл повинен мати розширення \*.gcode і може перебувати як в корені карти пам'яті, так і в будь-якій папці;

2. включити живлення пристрою;

3. переконатися, що необхідний (відповідно до параметрів, що задані в файлі програмного коду) матеріал заправлений в принтер;

4. виходячи із заданого в програмному коді положення деталі на нагрівальному столі, обробити потрібну область столу спеціальним спиртовим розчином, що забезпечує надійне прилипання деталі до поверхні. Наносити зв'язуючу рідину потрібно тонким рівномірним шаром за допомогою пензлика. У наявності є кілька видів розчинів, що мають різну ступінь прилипання до столу, вибір між якими слід робити виходячи з габаритів деталі, що друкується, і площі її дотику до поверхні столу. При виникненні труднощів вибору рекомендується узгодити тип застосовуваної рідини з викладачем;

5. обрати в меню інтерфейсу 3D принтера пункт «SD CARD», далі знайти і вибрати необхідний файл коду програми та запустити друк натисненням пункту «PRINT»;

6. в разі необхідності існує можливість скорегувати температуру столу, екструдера і інші параметри друку через програмний інтерфейс принтера в процесі друку деталі;

7. автоматично почнеться підготовка принтера до друку, виходячи з параметрів, заданих у файлі програмного коду. Вихід принтера на робочий

режим і відсоток виконаного друку деталі динамічно відображаються на дисплеї пристрою (рис. 6.3). Слід пам'ятати, що при запуску друку в першу чергу здійснюється нагрів столу до заданої в програмі температури, а лише потім починається нагрів екструдера;

8. після завершення процесу друку необхідно вимкнути живлення 3D принтера (якщо не планується друк наступної деталі), дочекатися остигання столу до температури навколишнього середовища і обережно зняти з нього деталь. Якщо при знятті деталі виникли труднощі, слід обережно побризкати водою кімнатної температури на стик між деталлю і нагрівальним столом, дочекатися, поки вода просочиться в капіляри, після чого зняття деталі відбудеться без докладання якихось зусиль. У разі виникнення труднощів при знятті деталі зі столику 3D принтера необхідно звернутись до викладача;

9. після зняття деталі зі столу необхідно очистити стіл від залишків пластику і зв'язуючої рідини за допомогою широкого леза або шпателя. Робити це слід дуже обережно, щоб не порушити калібрування системи позиціонування принтера;

10. прибрати сміття, яке виникло після друку деталі, зі столу, на якому встановлений 3D принтер, і прилеглої області в приміщенні.

## **6.2. Завдання до виконання комп'ютерного практикуму**

1. Створити тривимірну твердотільну модель довільної деталі в САПР SolidWorks. Обраний об'єкт моделювання попередньо узгодити з викладачем.

2. Перенести модель в середовище програми Cura і, встановивши необхідні параметри, отримати файл програмного коду для друку на 3D принтері. Записати файл на SD карту пам'яті.

3. Підготувати 3D принтер до роботи. При необхідності відкалібрувати пристрій згідно наведеного в роботі алгоритму.

4. Роздрукувати деталь на 3D принтері згідно наведеного в роботі алгоритму. Домогтися отримання якісної деталі з високим ступенем відповідності побудованій в середовищі SolidWorks тривимірній моделі.

## КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ №7

### Складна анімація. Використання програми SolidWorks Motion

**Мета роботи:** навчитися створювати прості динамічні моделі з фізичними контактами між елементами в програмному пакеті SolidWorks, реалізовувати їх анімацію з використанням рухомих камер.

#### 7.1. Теоретичні відомості

Базовий пакет програми SolidWorks дозволяє створювати не тільки анімацію збирання-розбирання конструкції, але і моделювати рух із взаємозв'язками між деталями.

Створення анімації починається з переходу на вкладку «Анімація 1» під робочим полем вікна програми. Якщо дана вкладка недоступна, необхідно в контекстному меню основної панелі інструментів активувати «Motion Manager». Панель настройки анімації містить своє дерево побудови і часову шкалу дій. У базовій версії пакету SolidWorks доступно два види анімації:

- «Рух складання» – простий рух деталей по ключових точках із застосуванням двигунів і урахуванням усіх сполучень між деталями;
- «Базовий рух» – більш реалістична анімована модель, що дозволяє розраховувати рух пружин і вплив сили тяжіння.

Простий приклад реалізації анімації руху можна розглянути на складанні деталей, наведеному на рис. 3.1. На панелі анімації, вибравши функцію двигун, тип двигуна – двигун, що обертається, вказати в якості компонента грань деталі Колінвал (при цьому з'явиться червона стрілка напрямку обертання, який можна змінити на протилежний). Далі вибрати «Рух з постійною швидкістю» і вказати швидкість обертання колінвалу. Закрити вікно «Двигун» і на панелі анімації вибрати «Розрахувати». Після закінчення розрахунку руху всіх деталей моделі можна запустити анімацію кнопкою «Програвання».

### 7.1.1. Використання прикладної програми SolidWorks Motion

Для розгляду деяких можливостей програми SolidWorks Motion, що дозволяє створити складну і красиву анімацію з можливістю запису високоякісного відео, створимо модель маятника Ньютона, наведену на рис. 7.1. Зображення деталей, що входять в конструкцію, містить табл. 7.1.

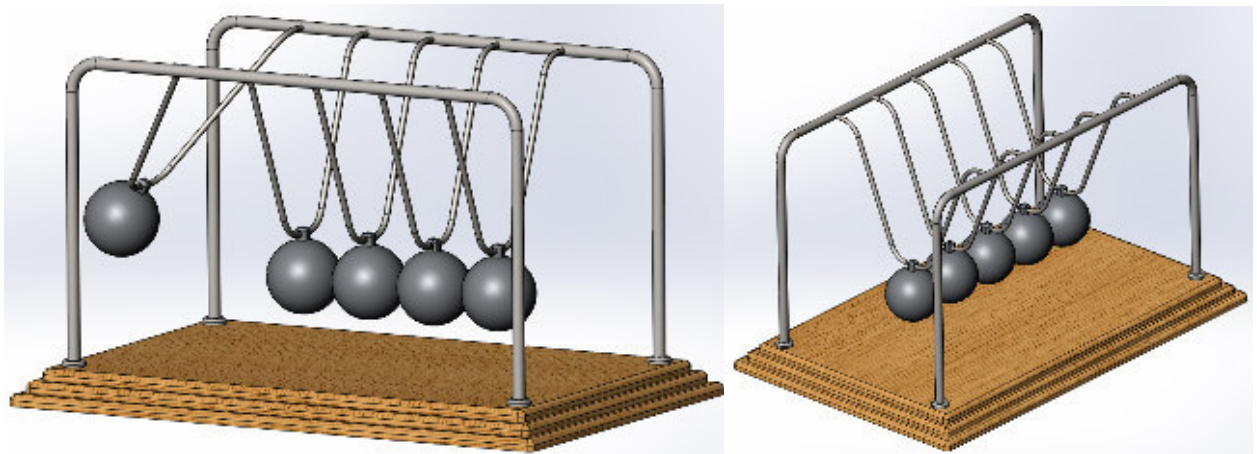

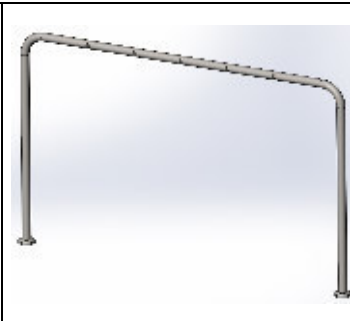
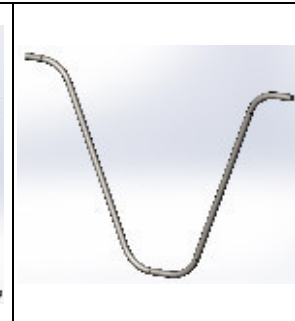
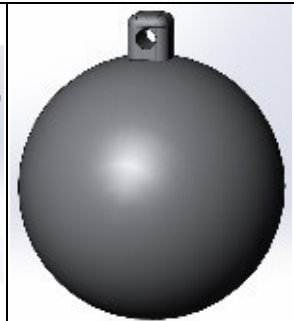


Рис. 7.1. Модель конструкції маятника Ньютона

Таблиця 7.1. Деталі конструкції

			
Основа	Планка	Дріт	Куля

Створюючи елементи складання, необхідно пам'ятати про узгодження всіх з'єднувальних і габаритних розмірів деталей, що до нього входять. Особливу увагу слід звернути на розмір кріпильних отворів (ненаскрізних) на планці й відстані між ними, товщину дроту та розмір кріпильного отвору кулі, а також діаметр останньої.

При створенні моделей дроту і планки рекомендується використовувати лінію, побудовану на 3D ескізі (як траєкторію) з подальшим застосуванням функції «Бобишка/Підстава по траєкторії» на основі 2D ескізу окружності.

Після винесення всіх деталей в документ складання необхідно встановити наступні сполучення між його елементами:

- збіг нижніх плоских граней двох планок і поверхні основи маятника;
- паралельність між планками (їх площинами в дереві конструювання) і потрібними гранями основи маятника;
- задані (однакові) відстані від граней основи до площин планок для осесиметричного і паралельного розташування останніх на основі маятника;
- концентричність кріпильних ділянок дротів і отворів в планці;
- збіг торців кріпильних ділянок дротів і дна отворів в планці;
- концентричність отворів куль і центру дротів;
- збіг певних площин всіх куль з відповідними площинами всіх дротів;
- збіг певних площин всіх куль з додатково створеної площиною, що відповідає центральній осі симетрії всієї конструкції маятника, для точної установки всіх куль на одній осі;

Наступним кроком необхідно активувати функції програми SolidWorks Motion на вкладці «Додавання застосунків SolidWorks» основної робочої панелі інструментів програмного пакету. Після цього на вкладці «Анімація 1» стане доступним третій вид анімації «Аналіз руху» у висувному списку над деревом побудови анімації. При виборі типу моделювання «Аналіз руху», стануть доступні додаткові функції анімації.

Слід установити на панелі налаштування анімації «Силу тяжіння», спрямовану строго вниз і рівну  $9,8 \text{ м/с}^2$ .

Далі необхідно створити «Контакти» між кожною парою сусідніх куль типу «Тверді тіла»: в діалоговому вікні даної функції відключити опції «Матеріал» та «Властивості пружності» (зняти галочки), а в другій вкладці «Властивості пружності» задати «Коефіцієнт відновлення» рівним 0,9.

Далі слід вручну наклонити одну з крайніх куль на початковий кут для створення руху в системі маятника під дією сили тяжіння на вкладці «Анімація 1». Заключною дією є активація розрахунку анімованих дій кнопкою «Розрахувати». Після закінчення даного процесу можна запустити анімацію кнопкою «Програвання».

Панель анімації містить також налаштування швидкості і циклічності дій, а також можливість зберегти файл-відео (наприклад, підтримує формат фалів \*.avi).

У дереві побудови анімації можна також налаштувати освітлення: увімкнути/вимкнути різні його типи, а також задати ракурс джерела освітлення і яскравість.

### **7.1.2. Налаштування камер анімації**

У дереві побудови анімації за замовчуванням задана проста камера, що володіє ефектами збільшення/зменшення зображення і декількома видами траєкторії руху (пряма, дуга). Навпроти кожного елемента дерева побудови анімації розташовується рядок часової шкали, на якій і буде виконано повне встановлення дій для кожного об'єкта в будь-який момент часу. При виборі рядка «Орієнтація та види камер» з'являється можливість на часовій шкалі встановити «ключ», що відповідає певному положенню камери в конкретний поточний момент часу. У контекстному меню ключа задаються параметри траєкторії руху камери після проходження даної часової точки.

Створення та налагодження додаткової камери здійснюється наступним чином: попередньо на вкладці «Модель» необхідно задати траєкторію руху створюваної камери. Для цього слід створити додаткову площину, в якій сплайном намалювати цю траєкторію. Далі на вкладці «Анімація 1» в дереві побудови вибрати в контекстному меню пункту «Джерела світла, камери та сцени» параметр «Додати камеру». У діалоговому вікні задати «Місце, що визначає базу» (точку, в яку буде завжди спрямована камера) і «Розташування камери» (траєкторію її руху - задану лінію-сплайн). Також в даному вікні

можна задати різні параметри самої камери: тип об'єктива, розмір кадру та інші. Після створення камери необхідно прив'язати її рух до часових точок. Для цього, розгорнувши пункт «Джерела світла, камери та сцени», в контекстному меню рядка «Камера» вибрати «Вид камери». Далі у відповідному рядку часової шкали встановити точку часового інтервалу й у «Властивостях» контекстного меню пункту «Камера» задати «Розташування камери»: процентну відстань уздовж обраної траєкторії. Необхідно поставити кілька таких часових точок і відповідні їм відсотки проходження камери по траєкторії: наприклад, для початку, середини і кінця всього часового відрізка анімації задати відсотки проходження траєкторії 0, 50% і 100% відповідно. Задані часові точки відобразяться у вигляді ключів, що не можна редагувати, на шкалі. Останніми діями є запуск «Розрахунку» і «Програвання» самої анімації.

## **7.2. Завдання до виконання комп'ютерного практикуму**

1. Створити анімацію руху складання деталей, наведеного на рис. 3.1, з обертанням колінвалу.
2. Створити деталі, показані в табл. 7.1. Матеріалами деталей задати наступні: для основи - дуб; для планки - легована сталь; для дроту - сталь холоднокатана; для кулі - срібло без домішок.
3. Створити модель маятника Ньютона, зображення якої наведені на рис. 7.1, з усіма необхідними для анімації руху сполученнями між деталями.
4. Створити реалістичну анімацію руху моделі маятника Ньютона з додатковою камерою, яка буде рухатися по круговій траєкторії навколо конструкції. Зберегти файл-відео цієї анімації.

## КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ №8

### Дослідження траєкторії руху об'єктів і впливу сили тяжіння

**Мета роботи:** навчитися виконувати в програмному пакеті SolidWorks дослідження траєкторії руху та прискорення об'єктів за допомогою динамічних моделей під дією сили тяжіння з урахуванням властивостей матеріалів деталей та фізичних взаємодій між елементами конструкції.

#### 8.1. Теоретичні відомості

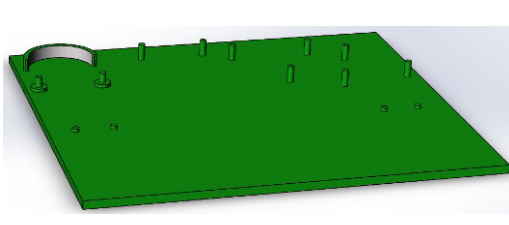
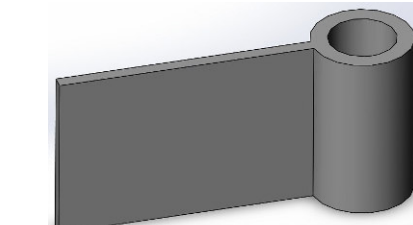
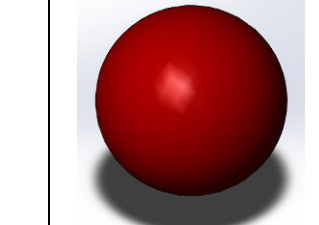
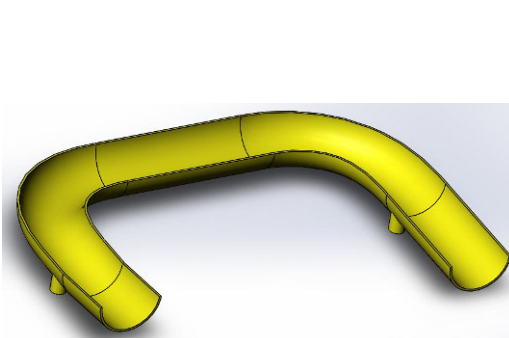
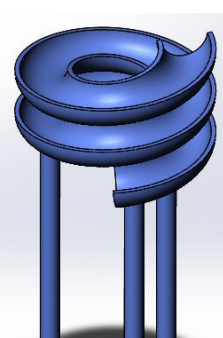
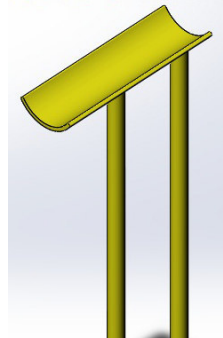
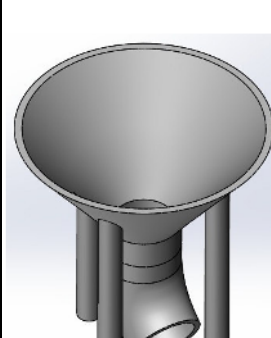
Проектування сучасних приладів і систем включає інженерні розрахунки високої складності і, як правило, вимагає побудови математичних моделей. Особливі труднощі виникають при розрахунку динамічних моделей, що враховують вплив на систему різних чинників, які в обов'язковому порядку будуть мати місце при реальній експлуатації пристрою. Наявність динамічних елементів в системі обумовлює необхідність брати до уваги вплив сили тяжіння (гравітації), тертя і характеристик матеріалів (властивостей пружності), що входять в конструкцію [6]. Подібні завдання з високою ефективністю можна вирішувати із застосуванням програмного пакету SolidWorks і вбудованого застосунка SolidWorks Motion.

##### 8.1.1. Дослідження руху за допомогою програми SolidWorks Motion

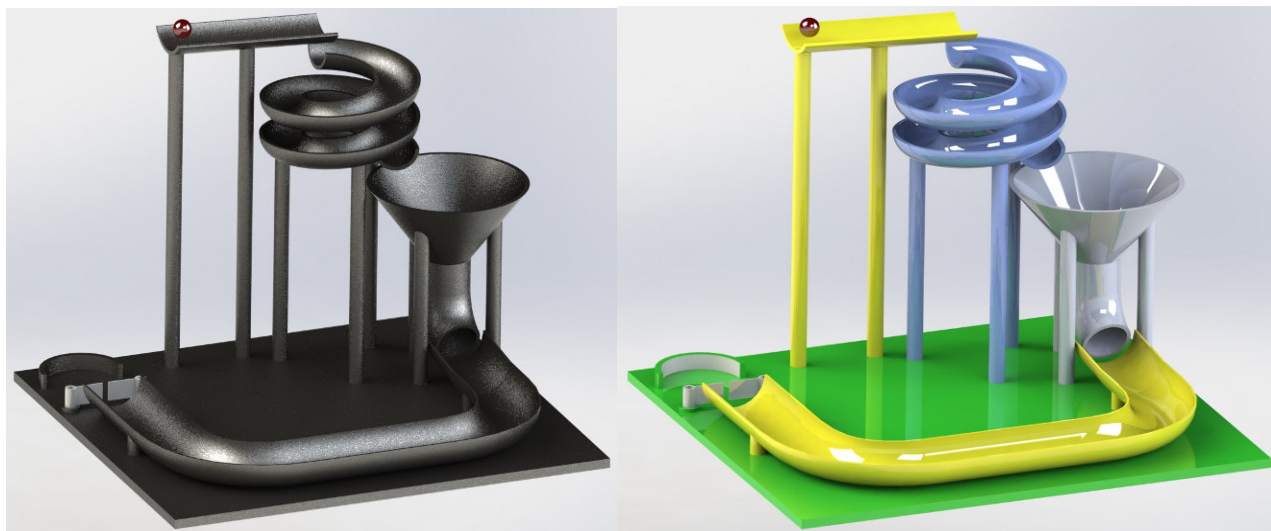
Розглянемо можливість дослідження руху об'єкта на простому прикладі моделювання впливу сили тяжіння на динамічну систему. Модель експериментального стенду буде включати конструктивні елементи, показані в табл. 8.1. Діаметр кульки дорівнює 10 мм, маса - 4,1 г.



Таблиця 8.1. Деталі моделі експериментального стенду

		
Основа стенда	Дверцята	Куля
		
Жолоб	Спіраль	Похила дошка
		
		Воронка

Всім компонентам моделі експериментального стенду необхідно задати матеріал. Для прикладу розглянемо дві наступні комбінації: всі компоненти стенду, крім дверцят (пластик), зі сталі (рис. 8.1, а); сталева куляка і пластикові напрямні (рис. 8.1, б). Зображення моделі експериментального стенду показано на рис. 8.1. У процесі формування моделі необхідно ставити потрібні типи сполучень («Умови сполучення») між елементами моделі, які не будуть згодом перешкоджати або обмежувати рух цих компонентів, якщо таке маєтсья на увазі (наприклад, куля не повинна мати сполучень, а дверцята повинні мати можливість обертатися). Перевірити це можна використавши функції «Перемістити компонент» та «Повертати компонент» основної панелі інструментів програми на вкладці «Складання». У процесі руху куля повинна почергово взаємодіяти з усіма елементами конструкції: скотитися з похилої дошки на спіраль, пройти її і впасти у воронку, яка направить кулю в жолоб, а в кінці останнього, відкривши дверцята, потрапити на обмежувальне загородження.



а

б

Рис. 8.1. Модель експериментального стенду:

- а) експериментальний стенд зі сталі з пластиковими дверцятами;
- б) компоненти моделі виконані з пластика за винятком кульки (сталь)

Візуалізація зображення (рис. 8.1) реалізована за допомогою програми PhotoView 360, основи роботи з якою описані в комп'ютерному практикумі №2. Габаритні розміри сформованої моделі стенду 185×220×245 мм. Маса сталевого варіанту дорівнює 3,1 кг.

Для проведення дослідження руху отриманої моделі необхідно на основній панелі інструментів SolidWorks на вкладці «Додавання застосунків SolidWorks» активувати прикладну програму SolidWorks Motion. Після цього в нижній частині вікна програми в контекстному меню вкладки «Анімація 1» вибрати пункт «Створити нове дослідження руху». Перехід до нового вікна дослідження виконається автоматично.

Максимально реалістичне дослідження моделі проводиться в режимі «Аналіз руху». Інші режими розраховують поведінку моделі спрощено, наприклад, без урахування взаємодії елементів, обміну енергією між ними і деяких властивостей матеріалів, таких як модуль пружності. При проведенні дослідження в режимі «Аналіз руху» задіюються алгоритми розрахунку програми SolidWorks Simulation.

Проведення аналізу гравітації обумовлює необхідність додавання в модель сили тяжіння і вказівки компонентів, що будуть фізично взаємодіяти. На панелі інструментів над деревом побудови дослідження руху є можливість задати гравітацію. Для цього потрібно скористатися кнопкою «Сила тяжіння», а у вікні задати числове значення гравітації. Зазначимо стандартне значення  $9806,65 \text{ мм/с}^2$ , що задається за замовчуванням, а також орієнтацію сили - паралельно будь-який з вертикальних граней елементів стенду з напрямком вниз.

Перед запуском розрахунку також необхідно вказати елементи, що будуть взаємодіяти при динамічному аналізі. Задати необхідні вхідні дані можна скориставшись кнопкою «Контакт», а у вікні вказати наступне: «Тип контакту» - «Тверде тіло»; у вікні введення компонентів вибрати попарно всі елементи стенду, так як кулька буде взаємодіяти з кожним з них без винятку; матеріалами контактних пар вибрати відповідні поставленим умовам. Якщо всі елементи моделі мають однаковий матеріал, можна замість контактних пар задавати всі елементи в одному пункті «Контактів твердого тіла». В інших випадках необхідно ставити всі контакти попарно, вказуючи матеріал першого і другого компонентів контактної пари. Наприклад, за умови, що всі елементи моделі, крім дверцят, складаються зі сталі, найбільш правильно вказати три «Контакти твердого тіла»: в перший набір контактів об'єднати кулю, дошку з нахилом, спіраль, воронку, жолоб і основу стенда; другою контактною парою задати кулю і ліві дверцята; третьою парою - кулю і праві дверцята. Контактним матеріалом дверцят можна вказати «Acrylic» (полімер), для інших елементів моделі встановити «Steel (Dry)» (суха сталь). Якщо жоден з наявних матеріалів не підходить, є можливість самотійно задати модель матеріалу, вказавши всі його властивості пружності.

Слід також звернути увагу, які елементи моделі є вільними (рухомими), а які статичними. Перевірити і змінити властивості деталей і компонентів моделі можна в їх контекстному меню. Можливі два стану компонента: «Зафіксований» і «Звільнити». Зрозуміло, в даній конструкції куля і дверцята

повинні бути вільними, тоді як всі інші елементи моделі повинні бути зафіксовані. Перший компонент, який виноситься на складання при його формуванні, за замовчуванням має статус «Зафіксований», всі інші компоненти отримують властивість вільних.

Щоб усунути прив'язку формування анімації руху до ракурсу спостереження моделі користувачем, слід включити функцію «Вимкнути відтворення ключових точок виду» в контекстному меню пункту «Орієнтація та види камер» в дереві побудови моделі дослідження руху.

При необхідності можна скоригувати тривалість дослідження (час, протягом якого буде відбуватися моделювання руху компонентів конструкції), пересунувши керуючий ключ (правий чорний ромб у верхньому рядку дерева побудови моделі руху) в потрібне положення на шкалі часу дослідження. Це може значно скоротити час розрахунку поведінки моделі, якщо рух компонентів швидкоплинний. За замовчуванням час дослідження встановлюється 5 секунд.

На останньому підготовчому етапі перед проведенням дослідження слід встановити кулю в початкове положення. Зробити це необхідно таким чином, щоб деталі не перетиналися. Найкраще розташувати кулю в декількох міліметрах над поверхнею початку похилої дошки.

Задавши всі початкові умови і вхідні дані для дослідження поведінки моделі під дією сили тяжіння, можна запускати розрахунок аналізу руху. Для запуску цього процесу слід скористатися кнопкою «Розрахувати» на панелі інструментів дослідження руху. Хід розрахунку можна спостерігати динамічно по переміщенню керуючого ключа у верхньому рядку дерева побудови моделі руху. Також в процесі розрахунку буде покроково змінюватися положення вільних елементів експериментального стенду, що буде відображатися на моделі, що аналізується, як показано на рис. 8.2, що демонструє етапи руху кулі по напрямних елементів конструкції моделі.

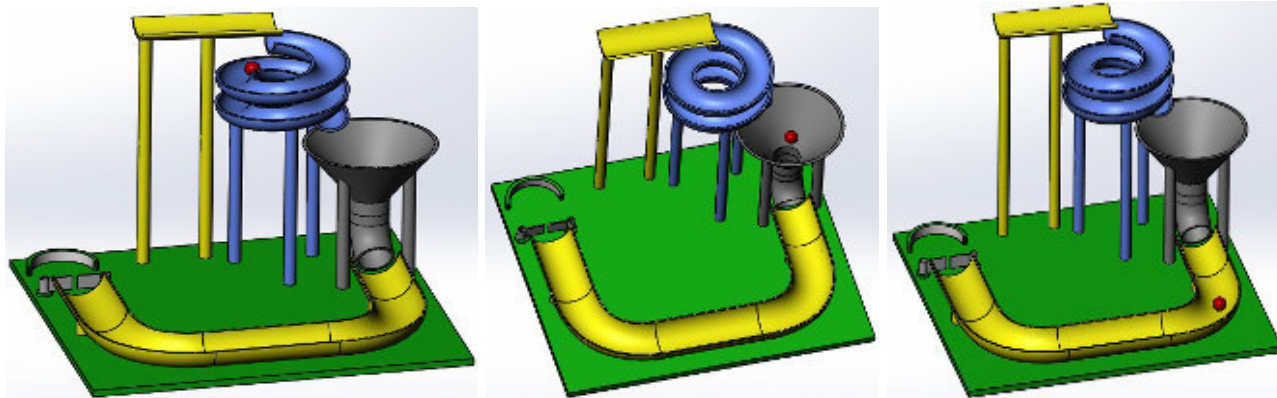


Рис. 8.2. Етапи руху кулі в моделі

Залежно від початкового положення кулі її траєкторія руху по напрямних змінюється, як і час досягнення обмежувального бар'єра. Це наочно демонструє рис. 8.3, на якому видно, що куля може стикатися як з однією, так і з двома дверцятами в кінці жолоба, що обумовлено кутом виходу з останнього. Також на траєкторію руху і час проходження експериментального стенду впливають задані матеріали компонентів моделі. У випадку з пластиковими направляючими куля досягає обмежувального кордону за 3,625 с., Тоді як зі сталевими елементами моделі цей час збільшується на 0,125 с. при однаковому початковому положенні кулі. Дану закономірність обумовлює різниця в шорсткості поверхні і пружних властивостях матеріалів.

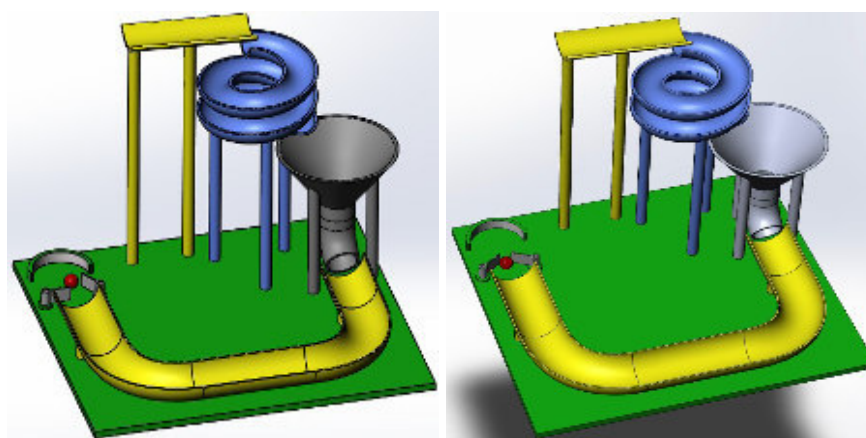


Рис. 8.3. Відмінності траєкторії руху кулі в залежності від її початкового положення на моделі

Після завершення розрахунку вкладка дослідження руху буде виглядати, як показано на рис. 8.4. Особливу увагу слід звернути на рядки на шкалі часу, відповідні вільним елементам моделі (куля і двоє дверцят): при розрахунку вони повинні заповнюватися жовтим кольором синхронно зі зміною положення керуючого часового ключа. Якщо цього не відбувається, дані компоненти розглядаються програмою як статичні і не будуть змінювати своє положення в просторі під впливом інших тіл.

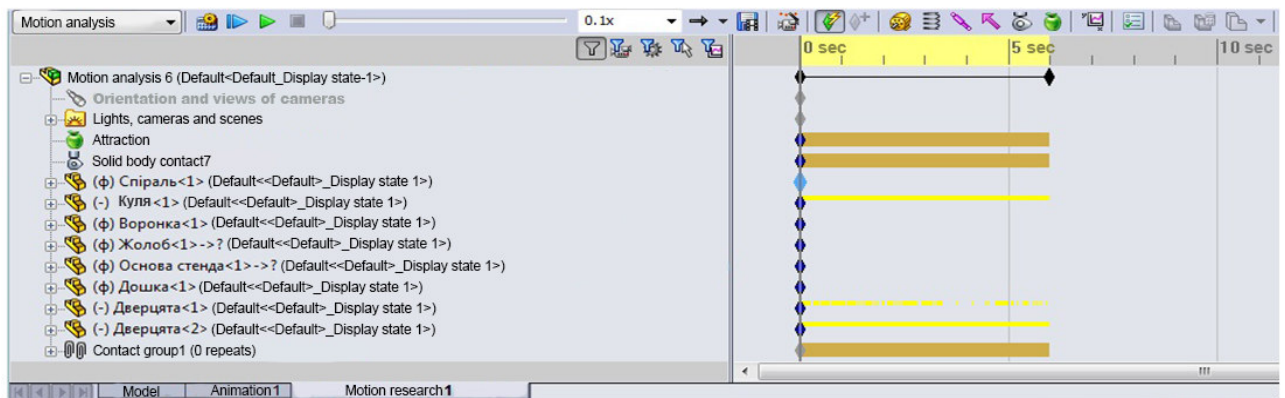


Рис. 8.4. Дерево побудови і часова шкала дослідження руху

Далі з'являється можливість покроково переглядати процес руху кулі за допомогою кнопок «Відтворення» або вручну переміщенням лінії поточного становища дослідження на часовій шкалі. При цьому можна довільно переміщати камеру і міняти її ракурс, спостерігаючи за найцікавішими ділянками моделі.

### 8.1.2. Налаштування якості візуалізації анімації дослідницької моделі

Крім зображень можна записати відео-файл з анімацією аналізу руху. Для цього слід скористатися кнопкою «Зберегти анімацію» на панелі інструментів вкладки дослідження. У вікні є можливість задати необхідні параметри синтезованого відео: розширення, формат співвідношення сторін, кількість кадрів в секунду і часовий діапазон дослідження. В якості обробника файлу можна вказати «екран SolidWorks» (спрощена візуалізація анімації моделі) або «PhotoView» (доступно тільки при запущеному додатку PhotoView 360). Вибір



другого варіанту значно підвищить якість одержуваного відео, однак також суттєво збільшить час на його генерацію. Наступне вікно дозволяє вказати програму і якість стиснення даних. При малій кількості кадрів в секунду, високому стисканні (більше 80%) і оброблювачі у вигляді «екран SolidWorks» створення файлу відео анімації руху вимагає максимум кілька хвилин, однак і якість відео при цьому буде дуже низька. Якщо вказати оброблювачем «PhotoView» і високі параметри якості (розширення HD  $1920 \times 1080$ , частоту кадрів 24 в секунду, низький відсоток стиснення), генерація відео може зайняти кілька годин і більше в залежності від обчислювальної потужності комп'ютера, на якому проводиться дослідження.

### **8.1.3. Можливі проблеми при проведенні дослідження руху та шляхи їх усунення**

При запуску розрахунку руху можлива некоректна поведінка елементів моделі (наприклад, проходження кулі крізь інші деталі), відсутність реакції деталей на вплив тіл або поява помилок програми. Розглянемо можливі шляхи усунення цих неполадок під час проведення дослідження:

1. У першу чергу необхідно перевірити наявність перетину деталей (інтерференцію) в моделі (випадок, коли деталь частково накладена на іншу деталь). Для цього слід скористатися функцією «Перевірка інтерференції», яку можна знайти в контекстному меню першого пункту дерева побудови дослідження руху. Ця функція дозволяє попарно перевірити деталі моделі і виявити їх накладання. Також є можливість при переході на вкладку «Модель» програми SolidWorks на вкладці «Аналізувати» основної панелі інструментів скористатися кнопкою «Перевірка інтерференції», яка дозволить проаналізувати на наявність накладань всю модель комплексно. При наявності навіть мінімальної інтерференції між елементами моделі обов'язково необхідно усунути цю помилку шляхом перебудови деталей.

2. Слід переконатися, що потрібні компоненти моделі закріплені, а решта звільнені. Як вже було сказано вище, це можна зробити в контекстному меню

кожного компонента моделі. Для тестового розрахунку можна провести дослідження системи без джерцят, зафіксувавши всі елементи стенду і залишивши вільною тільки кулю.

3. Раціонально спробувати змінити початкове положення кулі, перемістивши її ближче до поверхні похилої дошки (зробити зазор близько 1 мм), так як її падіння з великої висоти може викликати значну деформацію елементів і, як наслідок, помилку розрахунку руху.

4. Перебудувати складання моделі, якщо в її елементи були внесені будь-які зміни. Зробити це можна кнопкою «Перебудувати» на основній панелі інструментів програми SolidWorks. У більшості випадків система пропонує виконати перебудову автоматично, проте можливі винятки.

5. Перескласти модель дослідного стенду скорегувавши і мінімізувавши кількість сполучень між деталями. Чим меншою буде кількість сполучень, тим швидше буде виконуватися розрахунок руху. Умови сполучення не повинні блокувати рух компонентів моделі, якщо таке передбачається.

6. Спростити процедуру аналізу поведінки компонентів стенду можна вказавши однаковий матеріал з наявних у списку для всіх елементів контактних пар (наприклад, акрил).

7. Усі деталі моделі можна об'єднати в один пункт «Контакти твердого тіла», створивши замість пар контактну групу. У такому випадку доведеться вказати єдиний контактний матеріал для всіх елементів стенду.

8. По можливості максимально звільнити оперативну пам'ять комп'ютера, закривши невикористовувані на поточний момент програми. Дослідження руху враховує багато факторів і властивостей компонентів моделі (пружність матеріалів, шорсткість поверхонь, силу тертя, прискорення, передачу імпульсу між тілами і т. п.), що вимагає значних обчислювальних ресурсів комп'ютерної техніки при проведенні такого розрахунку.



## **8.2. Завдання до виконання комп'ютерного практикуму**

1. Побудувати максимально наближено модель стенду для дослідження руху і впливу сили тяжіння, показану на рис. 8.1, зображення компонентів якої містить табл. 8.1.

2. За допомогою програми SolidWorks Motion провести дослідження траєкторії руху кульки описаним в роботі методом. Домогтися максимальної адекватності моделі та достовірності отриманих результатів.

3. Записати файл відео анімації руху кулі по всім направляючим моделі, виходячи з результатів проведеного аналізу.

## КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ №9

### Аеродинамічний аналіз

**Мета роботи:** навчитися виконувати в САПР SolidWorks аеродинамічний аналіз із застосуванням прикладної програми пакету Flow Simulation.

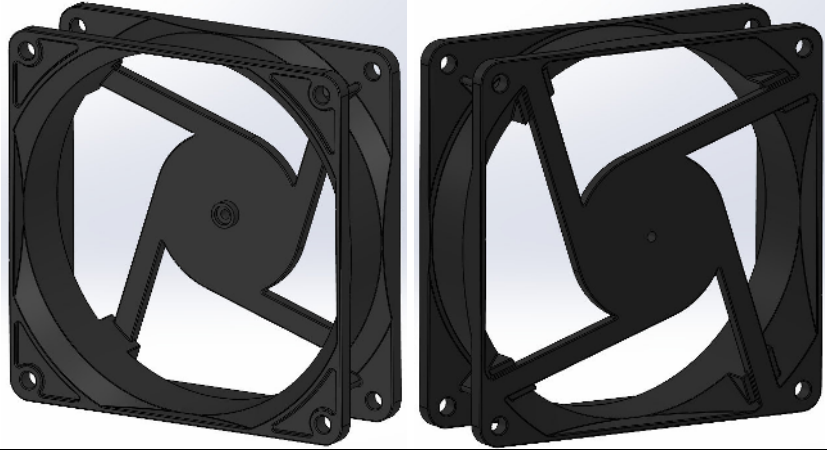
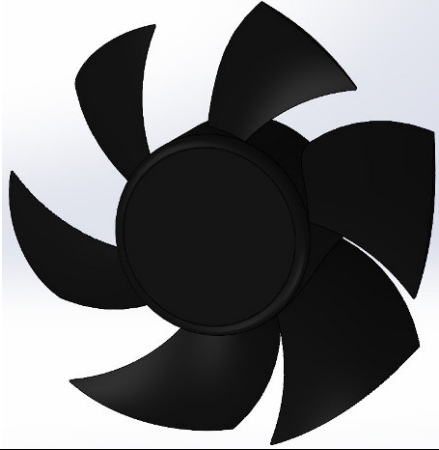
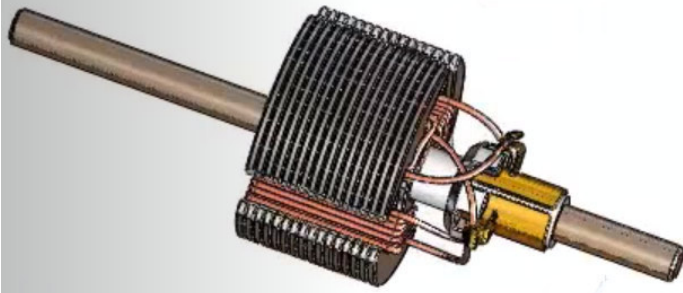
#### 9.1. Теоретичні відомості

Найбільш складні дослідження динамічних процесів і систем середовище SolidWorks дозволяє реалізувати на основі цифрових моделей за допомогою інтегрованої в пакет програми Flow Simulation. Даний програмний модуль включає можливість проведення таких типів аналізу як: аеродинамічний, гідродинамічний, радіаційний теплообмін, теплопровідність в твердих тілах, гравітаційний вплив, обертання та інші. При цьому дослідження може враховувати не тільки зміни в об'ємі тіл змодельованих компонентів, що виникають під дією різних факторів, а й зміни навколишнього середовища в певному робочому об'ємі, викликані впливом на нього самих об'єктів моделювання. В якості елементів оточення можуть виступати рідини та газы, параметри і характер розподілу в об'ємі яких будуть аналізуватися під впливом компонентів системи.

##### 9.1.1. Побудова моделі комп'ютерного кулера

Основи роботи з модулем Flow Simulation програмного пакета SolidWorks розглянемо на прикладі розв'язання зовнішньої аеродинамічної задачі, метою якої є аналіз траєкторій та швидкості руху повітряних потоків при проходженні через типовий комп'ютерний кулер, що широко застосовуються для охолодження компонентів електроніки в стаціонарних персональних комп'ютерах. Експериментальна модель (без радіатора охолодження) складається з елементів, зображення яких наведено в табл. 1.

Таблиця 9.1. Компоненти моделі

		
Корпус кулера		Крильчатка
		
Двигун		

У якості матеріалу корпусу та крильчатки кулера виступає пластик. Для зручності побудови моделі корпусу рекомендується сформувати одну його чверть, а далі використати функцію кругового масиву з подальшим об'єднанням тіл. Поетапне формування конструкції показано на рис. 9.1. Двигун є стандартним виробом, файл з моделлю якого можна знайти у вільному доступі в мережі інтернет на сайті виробника. Однак, для проведення дослідження руху повітряного потоку даний компонент є обов'язковим і на результати аналізу суттєвого впливу не чинить.

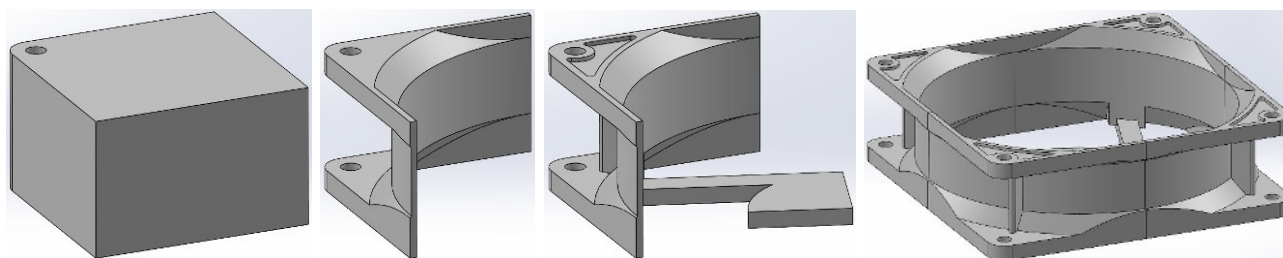
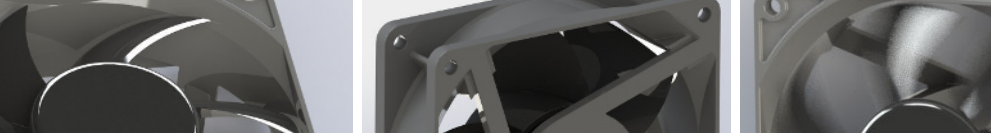


Рис. 9.1. Етапи формування моделі корпусу кулера



### 9.1.2. Підготовка моделі для проведення аеродинамічного дослідження

1. У складанні рекомендується наявність трьох деталей: корпусу кулера, крильчатки і додаткового елемента, який раціонально побудувати вже на складанні (його призначення та процес формування буде розглянуто нижче). Зверніть увагу, що двигун в складання додавати не рекомендується, так як він значно ускладнить формування вищезазначеного елемента.

64

Для реалізації аеродинамічного дослідження необхідно додати в модель вищезазначену деталь, об'єм якої буде відповідати області обертання. У нашому випадку ця область включає деталь крильчатки та простір між нею і корпусом кулера. Формувати цю додаткову деталь раціонально вже на побудованій моделі. Для цього необхідно використовувати функцію «Створити» (створення і вставка нової деталі в модель), після цього включити режим редагування доданого елемента і сформувати циліндричний компонент, показаний на рис. 9.3 сірим кольором. Область обертання не повинна перетинатися з корпусом кулера, інакше виникне помилка розрахунку аеродинамічного аналізу моделі.



Рис. 9.3. Деталь (позначена сірим кольором), що відповідає області обертання в моделі кулера

Доданий в модель елемент, відповідний області обертання, в розрахунку аеродинамічного аналізу моделі участі не бере, а є виключно допоміжним компонентом. У цьому можна буде переконатися після внесення початкових параметрів проєкту дослідження, скориставшись функцією «Управління компонентами», де буде за замовчуванням відзначено, що деталь неактивна.

### 9.1.3. Аеродинамічне дослідження за допомогою програми

#### **SolidWorks Flow Simulation**

Коли процес формування і підготовки моделі завершено, необхідно запустити додаток Flow Simulation, скориставшись для цього відповідною кнопкою на основній панелі інструментів програми у вкладці «Додавання застосунків SolidWorks». Після появи вкладки модуля ініціювати на ній запуск нового дослідження, використовуючи «Майстер проєкту». Далі слід по черзі у вікнах налаштувань вказати наступні параметри нового аналізу: систему одиниць вимірювання (рекомендується «mm-g-s»), тип завдання - «Зовнішня» (дослідженню підлягає довкілля моделі); фізичні моделі - «Обертання» з типом «Локальна область(ті) (Sliding)»; додати в середовище газ - повітря («Air»). Значення інших параметрів проєкту можна залишити за замовчуванням.

Після створення проєкту слід налаштувати наступні параметри дослідження в дереві побудови його моделі:

1. При необхідності зменшити розмір «Розрахункової області», що визначає робочий об'єм простору дослідження моделі;

2. Додати область обертання, вказавши при цьому раніше створену відповідну деталь моделі. Також слід вказати швидкість і напрямок обертання елемента. Швидкість визначається значенням параметра кутової швидкості, одиницею вимірювання якого є радіани за секунду (для довідки: 1 рад/с дорівнює 57,29 град/с). Необхідно пам'ятати, чим більше задане значення швидкості обертання, тим довший буде процес розрахунку аналізу моделі. Принципово важливо правильно вказати напрямок обертання: при неправильному визначенні напрямку результати аналізу будуть недостовірними і розрахунок дослідження необхідно буде виконувати заново. Напрямок обертання визначається знаком параметра кутової швидкості (плюс або мінус) і відображається у вигляді стрілки на поверхні області обертання, як показано на рис. 9.4, а.

3. Визначити глобальні цілі дослідження. У даному пункті рекомендується вказати середньовитратні статичний тиск, повний тиск і швидкість.

Результат внесення параметрів дослідження в дерево побудови моделі показаний на рис. 9.4, б.

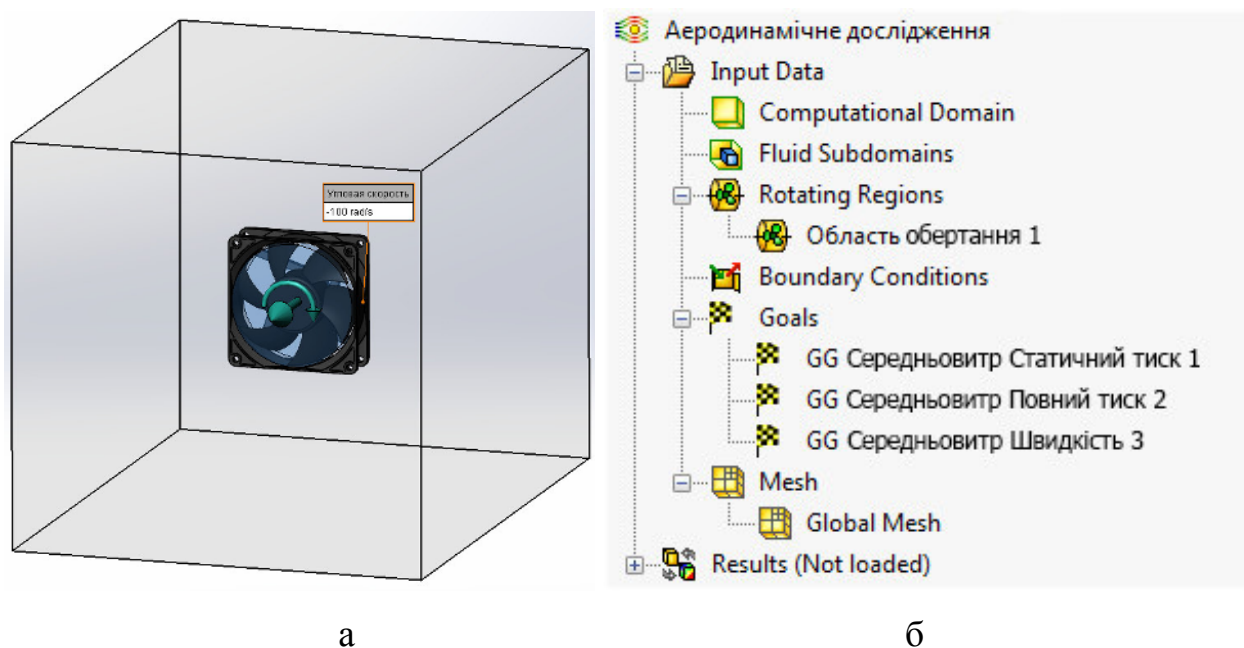


Рис. 9.4. Налаштування параметрів дослідження: а) визначення значення і напрямку кутової швидкості; б) дерево побудови проєкту перед розрахунком

Визначивши всі початкові умови і вхідні параметри проєкту можна приступати до розрахунку, скориставшись кнопкою «Запустити» основної панелі інструментів програми.

Процес розрахунку моделі займає досить тривалий час (при невеликому значенні кутової швидкості обертання, наприклад, 100 рад/с - до декількох хвилин, при 500 рад/с - до декількох десятків хвилин в залежності від обчислювальної потужності комп'ютера), проте, після його завершення всі результати при зміні вхідних даних можна побачити практично миттєво. Після закінчення розрахунку в дереві побудови проєкту з'явиться вкладка зі списком результатів, за допомогою яких можна детально проаналізувати характер руху повітря в моделі кулера. Одними з найбільш наочних і інформативних



інструментів інтерпретації розв'язання аеродинамічної задачі є наступні: «Картина у перерізі», «Траєкторії потоку» та «Графіки». Розглянемо по черзі кожен тип результатів на підставі кількох прикладів аналізу швидкості потоку повітря в системі.

Функція «Картина у перерізі» дозволяє проаналізувати розподіл значень певної фізичної величини в зазначеній користувачем площині. Приклади використання різних варіацій цієї функції для аналізу розподілу швидкості потоку повітря показані на рис. 9.5.

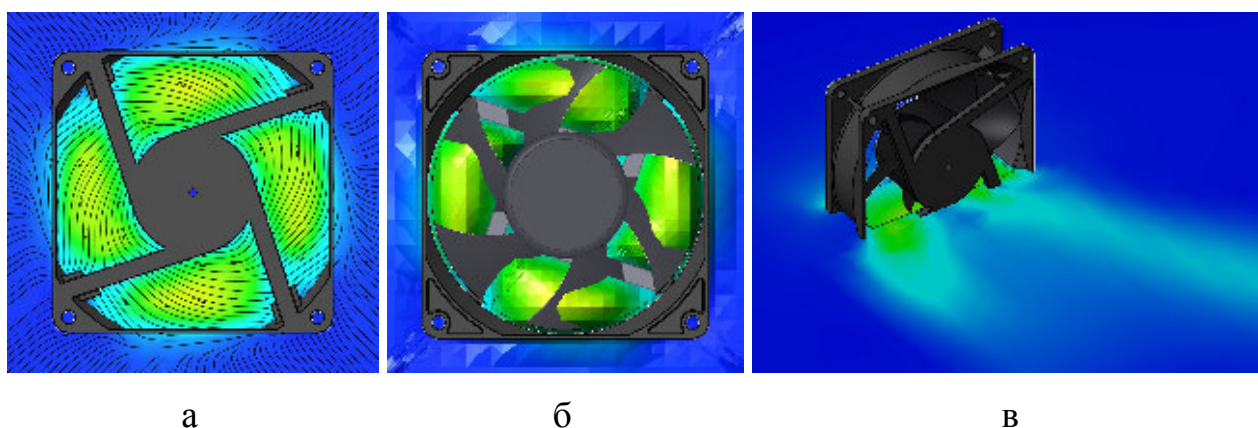


Рис. 9.5. Розподіл швидкості потоку повітря в площині перетину моделі:

- а) колірна заливка поверхні з лініями потоку і відображенням напрямків векторів;
- б) тривимірна поверхня з колірною індикацією;
- в) аналіз у площині, що перпендикулярна екрану, зі зміщенням

Розглянемо можливість візуалізації результатів аналізу на основі функції «Графіки», що дозволяє відображати двомірні графічні залежності певної фізичної величини від координат моделі. Для використання інструменту необхідно вказати ескіз, криву або ребро моделі, довжина яких буде відкладатися по осі абсцис сформованого графіка. Застосування даної функції розглянемо на прикладі аналізу швидкості потоку повітря, вказавши в якості ребра зовнішню кромку лопаті крильчатки, що показано на рис. 9.6.



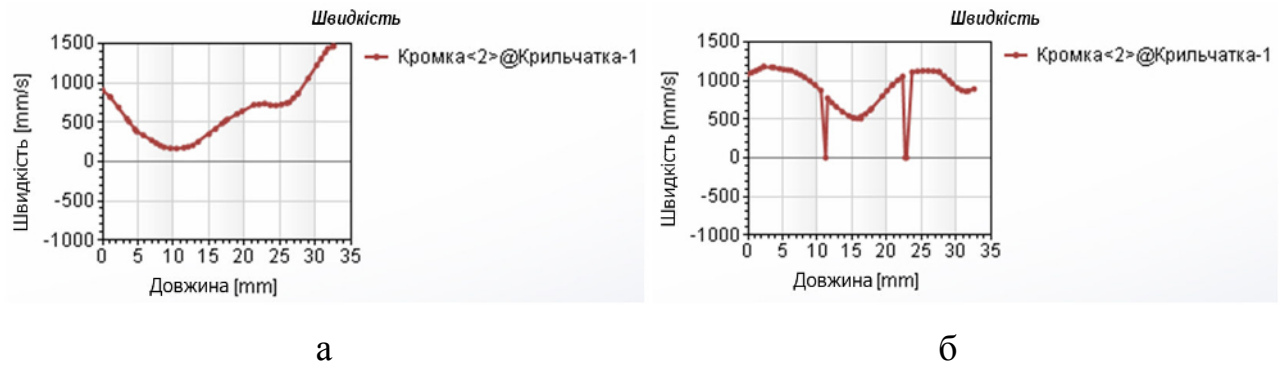
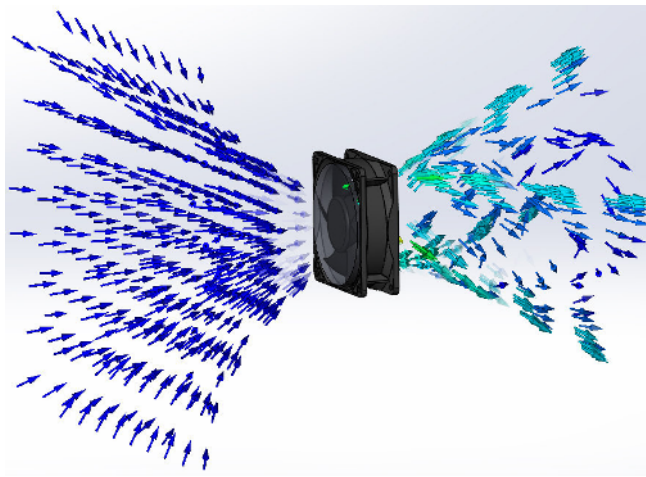


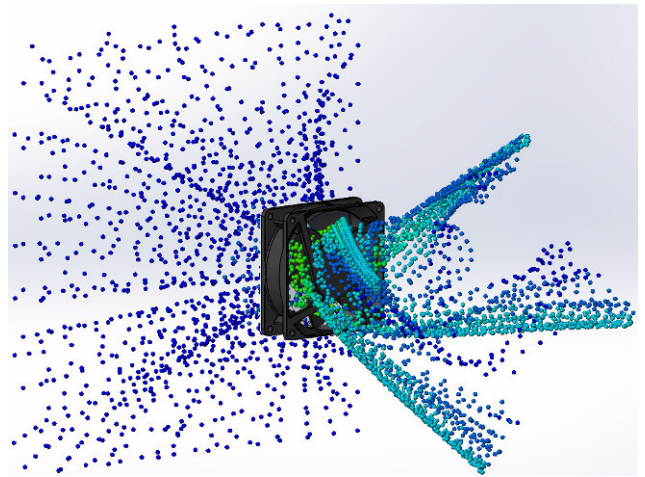
Рис. 9.6. Розподіл швидкості потоку повітря на зовнішній кромці лопаті крильчатки кулера: а) без урахування повороту; б) з урахуванням повороту

За допомогою функції «Траєкторії потоку» є можливість відстежити траєкторії руху частинок газу (у даному випадку повітря) в області робочого простору моделі. Результати аналізу можна представити у вигляді статичних і динамічних траєкторій. Крім цього, є можливість вибору характеру початкового розподілу часток газу (по лінії, прямокутнику або сфері), а також кількості точок виходу цих частинок в область робочого простору моделі. Другий вид представлення за різними варіаціями цих параметрів демонструють зображення, показані на рис. 9.7.

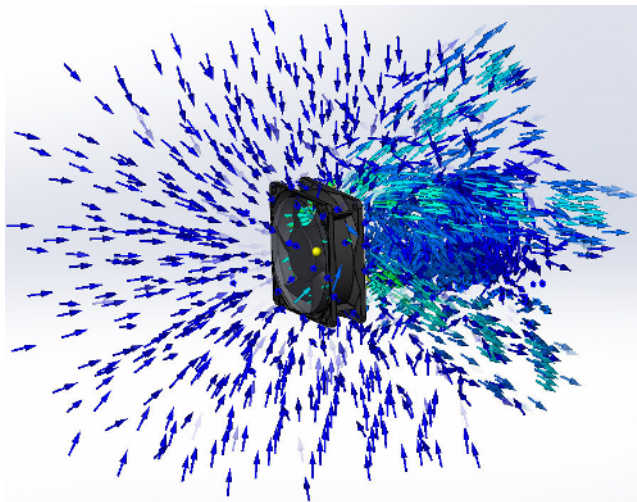
Результати формування статичних траєкторій руху частинок газу в робочому просторі моделі для двох типів розподілу початкових положень частинок показані на рис. 9.8.



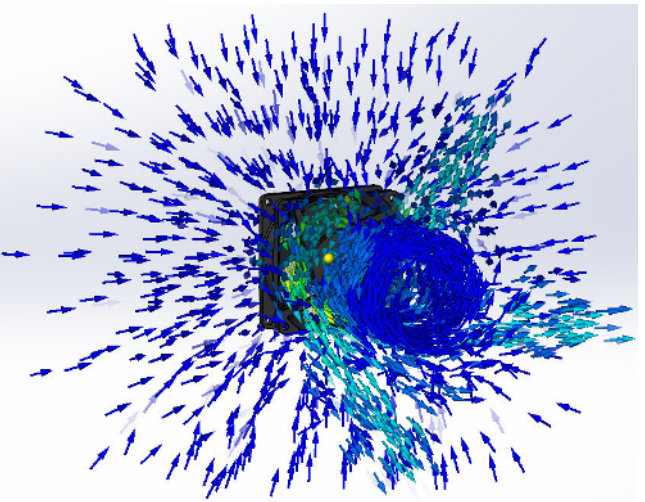
а



б



в



г

Рис. 9.7. Динамічні траєкторії потоків повітря в моделі з колірною індикацією швидкісної залежності: а), б) стартові точки знаходяться на площині; в), г) стартові точки розподілені рівномірно по сфері

Обидва типи представлення траєкторій проходження частинок газу через робочий об'єм моделі можна анімувати, що дозволяє більш наочно візуалізувати характер та траєкторії їх руху. Ця функція доступна в контекстному меню більшості підпунктів дерева побудови проєкту і називається «Програвати».

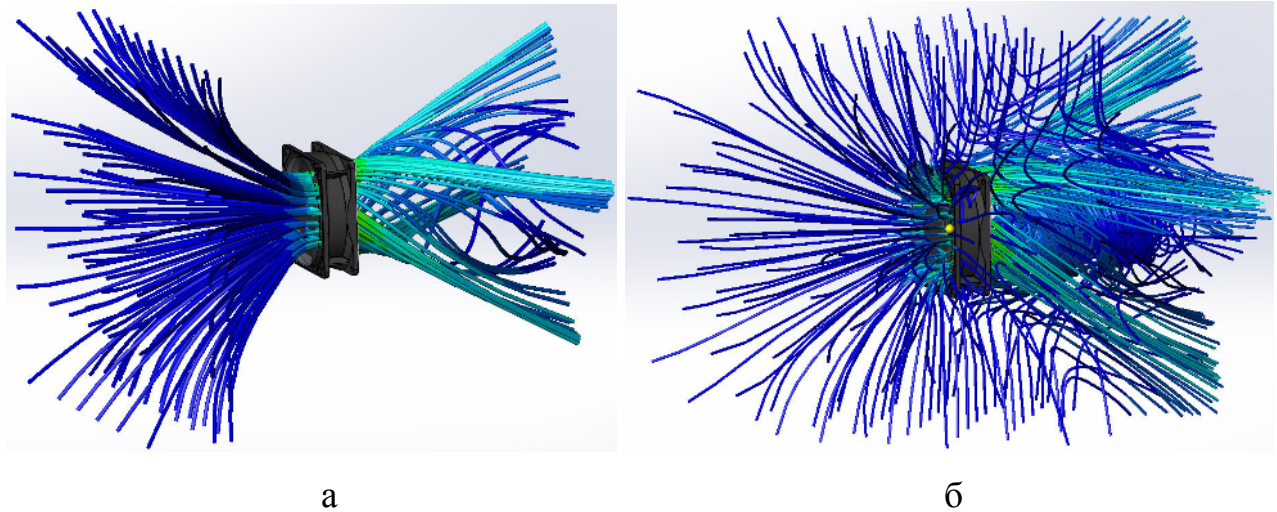


Рис. 9.8. Статичні траєкторії руху потоків газу в моделі з колірною індикацією швидкісної залежності: а) стартові точки знаходяться на площині; б) стартові точки розподілені рівномірно по сфері

Як і в додатку SolidWorks Motion, при роботі з Flow Simulation є можливість запису файлу відео з анімацією результатів дослідження. Для переходу в режим запису анімації необхідно в контекстному меню підпункту дерева побудови результатів аналізу моделі вибрати «Анімація...». Налаштування збереження дозволяють вказати якість стиснення, кількість кадрів в секунду та директорію зберігання файлу відео. Так як розрахунок результатів аналізу проєкту вже виконано, синтез файлу відео проходить надзвичайно швидко.

## 9.2. Завдання до виконання комп'ютерного практикуму

1. Побудувати максимально наближено модель комп'ютерного кулера (без радіатору), показану на рис. 9.2, зображення компонентів якої містить табл. 9.1. Не слід включати в модель двигун або спрощений аналог цієї деталі (наприклад, вісь обертання), так як це значно ускладнить проведення аеродинамічного аналізу моделі.

2. Підготувати модель кулера для проведення аеродинамічного дослідження описаним в роботі методом.

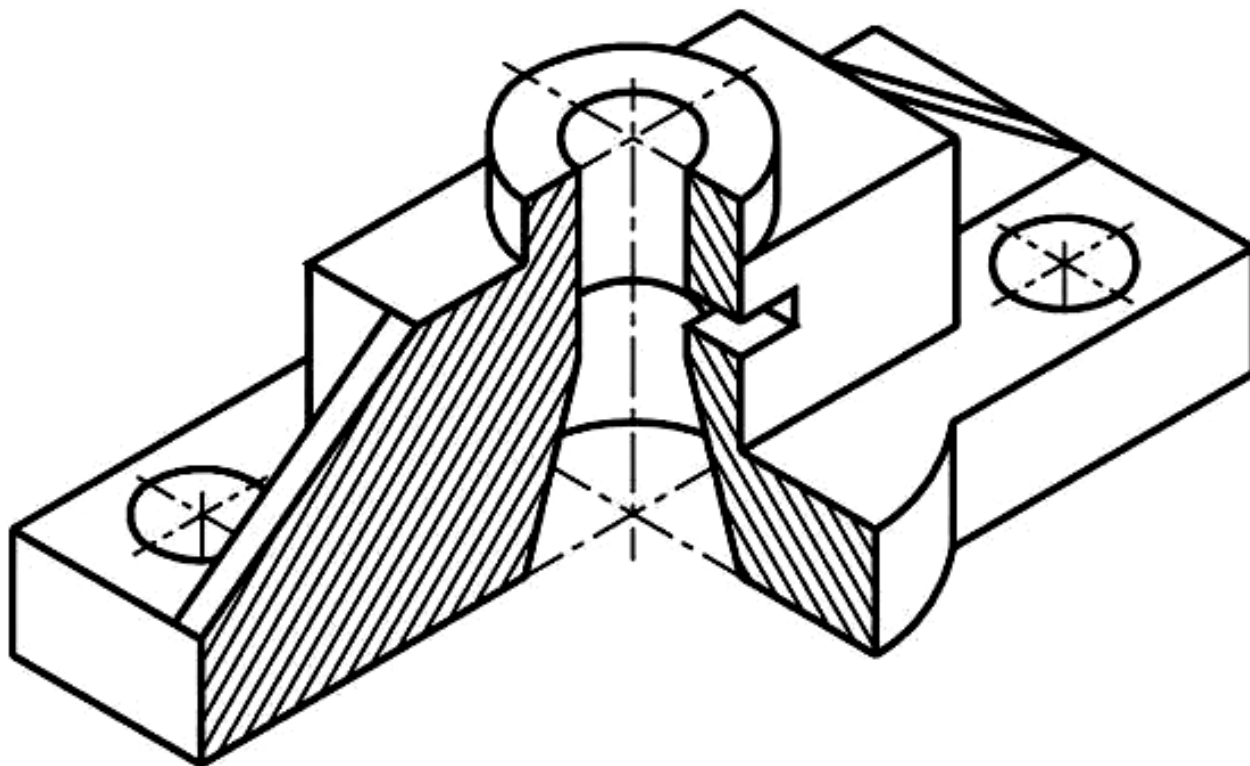
3. За допомогою програми SolidWorks Flow Simulation провести аналіз руху повітряних потоків в моделі кулера, описаними в роботі способами. Домогтися максимальної адекватності моделі та достовірності отриманих результатів. Визначити максимальну швидкість руху повітряного потоку в робочій області простору моделі при певній заданій користувачем кутовій швидкості обертання крильчатки.

4. Записати два файли відео анімації руху повітряних потоків за результатами проведеного аналізу на основі подання у вигляді статичної та динамічної траєкторій.

## ЛІТЕРАТУРА

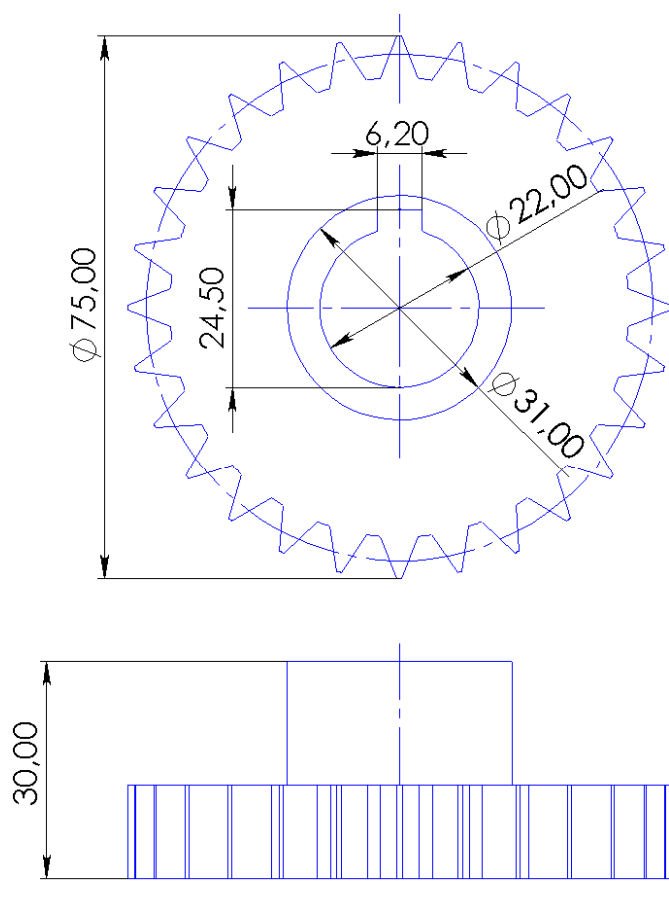
1. Плашихін С. В. Основи роботи з сучасними інтегрованими комплексами. Розділ 2. Основи твердотільного параметричного моделювання в системі SolidWorks [Електронний ресурс] : методичні вказівки до лабораторних робіт для студентів напряму підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / уклад. С. В. Плашихін. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 85 с.
2. Муравйов О. В. Технологія приладобудування [Електронний ресурс]: методичні вказівки до виконання комп'ютерного практикуму для студентів напряму підготовки 6.051003 «Приладобудування», професійного спрямування «Прилади і системи неруйнівного контролю» / Уклад.: О. В. Муравйов. – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. – 73 с.
3. Глущенко М. О. Моделювання людського ока за допомогою сучасних САД систем / М. О. Глущенко, О. В. Муравйов // XIV Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», 18-19 травня 2021 р., м. Київ, Україна : збірник праць конференції. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – С. 274–277.
4. Planchard D. C. Engineering design with SolidWorks 2020. SDC Publications, 2019. – 816 p.
5. Муравйов О. В. Сучасний стан та перспективи розвитку адитивних технологій / О. В. Муравйов, Ю. М. Нижник, В. Ф. Петрик, А. Г. Протасов, К. М. Серий // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки, 2021. – Том 32 (71), №5. – С. 114-119.
6. Поліщук М. М. САД-проекти та робототехнічні системи. Практикум [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології» / М. М. Поліщук, Є. О. Батрак; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 113 с.

**ДОДАТОК 1**  
**Аксометрія деталі**



## ДОДАТОК 2

### Креслення шестерні



Модуль	$m=2,5$
Кут профіля	$\alpha=20^\circ$
Кількість зубців	$z=28$
Діаметр ділильної окружності	$d_A=70$
Коефіцієнт висоти голівки	$h_a=1$
Коефіцієнт висоти ніжки	$h_f=1,25$

1. Гострі кромки притупити
2. Фаски  $0,5 \times 45$
3. HRC 40...45