

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт з дисципліни

«Smart-технології в машинобудуванні»

для студентів спеціальності
G9 «Прикладна механіка»
спеціалізації «Технології машинобудування»
галузі знань G «Інженерія, виробництво та будівництво»

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Smart-технології в машинобудуванні» для студентів всіх форм навчання спеціальності G9 «Прикладна механіка» спеціалізації «Технології машинобудування» галузі знань G «Інженерія, виробництво та будівництво» / Укл. ст. викл. Тришин П.Р. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2025 – 75 с.

Укладачі – Тришин П.Р., PhD, доц. каф. ТМБ

Рецензент – Гончар Н.В. канд.техн.наук, доц. каф. ТМБ

Відповідальний за випуск – Дядя С.І. канд.техн.наук, доц. каф. ТМБ

Затверджено на
засіданні кафедри
«Технології
машинобудування»
Протокол №1 від
06.08.2025р.

Рекомендовано до
видання НМК
машинобудівного
факультету
протокол № 1
від 26.08.2025р.

Вимоги з техніки безпеки

1. У аудиторіях, слід строго виконувати правила внутрішнього розпорядку.
2. Обов'язково знімати верхній одяг.
3. Зайві речі: сумки, парасольки та інше, залишати у відповідному для цього місці.
4. Дотримуватися робочої тиші.
5. При огляді та вивченні конструкції двигунів на макети не спиратись.
6. При використанні місцевого освітлення, напруга не повинна перевищувати 36В, а лампа повинна мати захисну сітку.

Забороняється

1. Залишати своє робоче місце без відома викладача.
2. Вмикати і вимикати (крім аварійних випадків) устаткування і механізми, робота на яких не доручена.
3. Працювати та ремонтувати несправне устаткування.
5. Торкатися до струмопровідних частин, електричних дротів (навіть ізольованих), кабелів, клем, наступати на переносні дроти на підлозі.
6. Відволікатися сторонніми справами і розмовами, ходити по приміщенню, відволікаючи інших.
7. Виконувати розпорядження адміністрації, якщо воно суперечить правилам охорони праці і може призвести до нещасного випадку.

Лабораторна робота №1

ЗВОРОТНИЙ ІНЖИНІРИНГ

1.1 Мета роботи

- 1) Ознайомитися з принципами зворотного проектування.
- 2) Набути навичок створення 3D-моделей з реальних об'єктів.

1.2 Матеріально-технічне забезпечення

- 1) Предмети домашнього вжитку
- 2) Програмне забезпечення для створення 3D-моделей

1.3 Загальні положення і відомості

Зворотне проектування — це процес аналізу та розбирання продуктів, систем або пристроїв з метою вивчення їхньої структури, принципів роботи та функцій з метою створення нових подібних або вдосконалених продуктів.

Зворотне проектування використовується в багатьох галузях, таких як інформаційні технології, машинобудування та виробництво, електроніка, кібербезпека, біомедичні та фармацевтичні дослідження.

Основні методи зворотного проектування включають статичний аналіз, динамічний аналіз та гібридні підходи, що поєднують обидва методи.

Зворотне проектування може бути законним та етичним, якщо воно виконується в рамках «добросовісного використання» та не порушує авторські права чи патенти. Однак воно може стати незаконним, якщо його використовують для зловживань, таких як хакерство чи піратство.

Спеціалізовані інструменти та програмне забезпечення для зворотного проектування включають декомпілятори, дизасемблери, налагоджувачі, аналізатори коду та різні сканери (такі як 3D-сканери).

Зворотне проектування дозволяє вивчати та розуміти принципи роботи існуючих технологій, що може призвести до

створення нових або вдосконалених продуктів та рішень. Це сприяє інноваціям та прискорює технологічний розвиток.

1.4 Порядок виконання лабораторної роботи

1) Вам потрібно вибрати предмет домашнього вжитку. Це може бути комп'ютерна миша, настільна лампа, сковорідка, що завгодно.

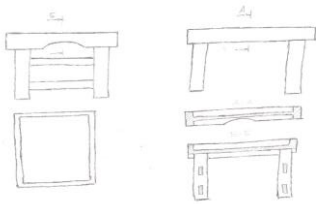
Приклади:



2) Вам потрібно підготувати вимірювальні інструменти: лінійку, штангенциркуль, рулетку, транспорир та все інше, що ви вважаєте за потрібне.

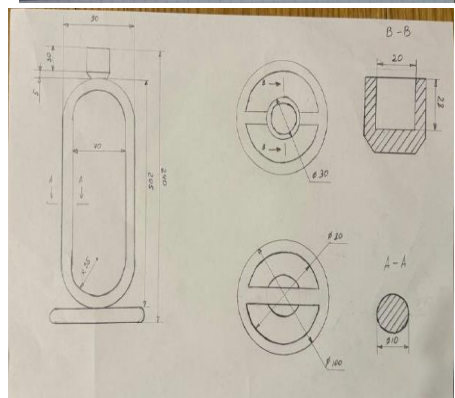
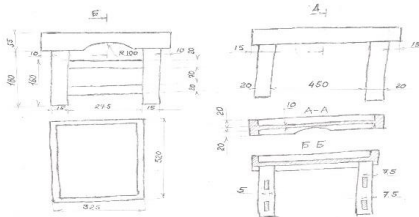
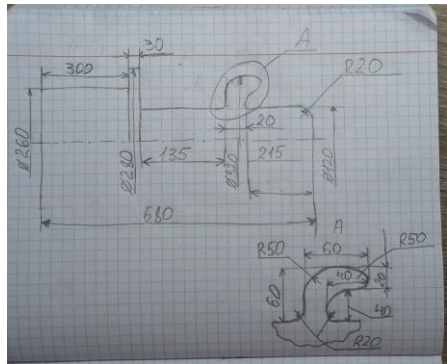
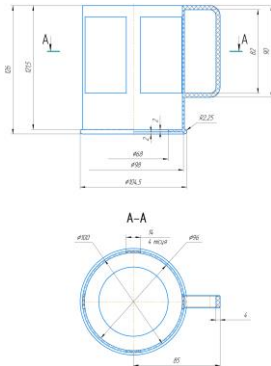
3) На аркуші зробіть контури (вигляди) вашого об'єкта з усіх боків, за потреби зробіть розрізи та виноски, а також розставте всі розміри, необхідні для побудови його 3D-моделі.

Приклади:



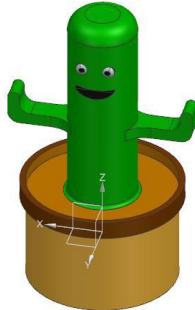
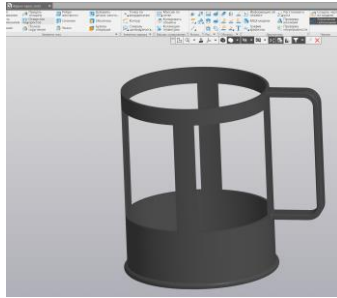
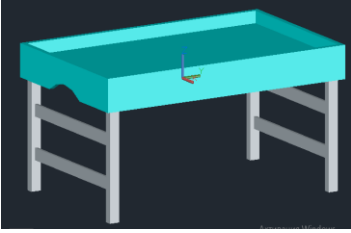
4) Виміряйте ці розміри на вашому об'єкті та перенесіть їх на аркуш.

Приклади:



5) Використовуючи програмне забезпечення для 3D-моделювання та ваш ескіз, створіть 3D-модель вашого виробу.

Приклади:



6) Складіть звіт, у якому необхідно включити друковані поля пунктів 3, 4, 5.

Контрольні питання:

- 1) Що таке зворотна інженерія?
- 2) У яких галузях промисловості використовується зворотна інженерія?
- 3) Які методи використовуються в зворотній інженерії?
- 4) Чи є зворотна інженерія законною та етичною?
- 5) Які інструменти та програмне забезпечення використовуються в зворотній інженерії?
- 6) Чому зворотна інженерія важлива для інновацій?

Лабораторна робота №2

СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ ЗА ДОПОМОГОЮ 3D-СКАНУВАННЯ

2.1 Мета роботи

- 1) Ознайомтеся з принципами 3D-сканування.
- 2) Ознайомтеся з основними параметрами 3D-сканування за допомогою смартфона.

2.2 Матеріально-технічне забезпечення

- 1) смартфон
- 2) KIRI Engine — програмне забезпечення для редагування 3D-сканувань

2.3 Загальні положення і відомості

3D-сканер – це периферійний пристрій, який аналізує форму об'єкта та створює його 3D-модель на основі отриманих даних.

3D-сканери поділяються на два типи за методом сканування:

1) Контактні, цей метод базується на безпосередньому контакті сканера з об'єктом, що досліджується.

2) Безконтактні

- Активні сканери: випромінюють деякі спрямовані хвилі на об'єкт та виявляють його відбиття для аналізу: найчастіше використовується світлодіодний або лазерний промінь, рідше – рентгенівське, інфрачервоне випромінювання або ультразвук.

- Пасивні сканери: нічого не випромінюють на об'єкт, а покладаються на виявлення відбитого навколишнього випромінювання. Більшість сканерів цього типу виявляють видиме світло – легкодоступне навколишнє випромінювання.

3D-моделі, отримані шляхом сканування, потім можуть бути оброблені інструментами CAD і в майбутньому можуть бути використані для розробки технології виробництва (CAM) та інженерних розрахунків (CAE). Для виведення 3D-моделей можуть

бути використані такі інструменти, як 3D-монітор, 3D-принтер або фрезерний верстат з підтримкою G-коду.

Фотограмметрія (грецьке *φως*, в загальному значенні *фотос* - світло, *υρανα* - письмо, *μετρον* - вимір) - наука, яка визначає об'єкти, форму та положення об'єктів у просторі. Причому об'єкти та їх розміри будуть змінюватися залежно від того, як вони виглядають на фотографічному зображенні.

Фотограмметрія використовується в геодезії, картографії, військовому праві та дослідженнях космосу.

Метод фотографування поділяється на наземну фотограмметрію та аерофотограмметрію.

Положення сфотографованого об'єкта визначається розташуванням між координатами точок на фотографії та об'єктом у природі. Фотограмметрія широко використовується для створення карт Землі, інших планет та Місяця, зникнення геологічних елементів родовищ та документування гірських порід, розвитку морських вод та потоків, а також для руйнування водопостачання, їх будівництва, проектування, будівництва та експлуатації інженерами. Військова влада має до цього певне відношення. KIRI Engine - 3D Scan Edit — це потужна та проста у використанні програма для 3D-сканування на вашому пристрої Android. Це ідеальний інструмент для зберігання, редагування та обміну 3D-моделями на вашому смартфоні. Розширена KIRI Innovations, ця програма дозволяє вам знімати, редагувати та ділитися фотореалістичними 3D-моделями об'єктів та людей за лічені хвилини.

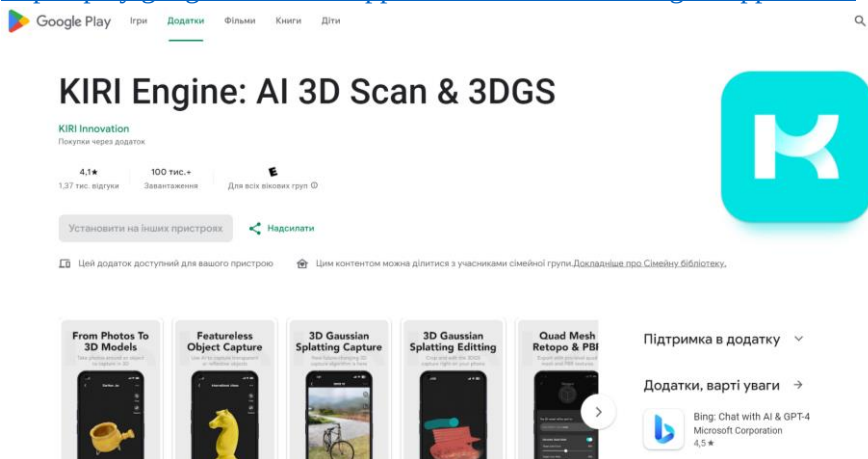
KIRI Engine використовує передові алгоритми фотограмметрії та технології комп'ютерного зору для створення детальних, високоякісних 3D-моделей. Вам потрібно буде зробити щонайменше 20 фотографій об'єкта або сцени, яку ви хочете сканувати, і KIRI Engine обробить фотографії на своїх темних серверах, щоб створити 3D-модель. Доповнення також постачається з додатковими інструментами редагування, які дозволяють вам розфарбовувати ваші 3D-моделі та налаштовувати їхні кольори та текстури. Після

завершення ви можете легко експортувати свої моделі в різні формати, такі як OBJ, FBX, STL, PLY тощо, та ділитися ними в соціальних мережах або електронною поштою.

2.4 Порядок виконання лабораторної роботи

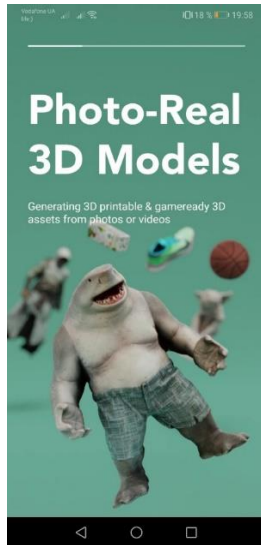
1) Завантажте застосунок на свій смартфон. Посилання:

<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.kiriengine.app&hl=ru>



2) Наступний крок – вибір об’єкта для сканування (взятого з першої роботи). Це може бути що завгодно: комп’ютерна миша, пульт від телевізора, улюблені парфуми. Предмет потрібно розмістити на підставці або тумбі, підійде табурет або невеликий столик. Обраний об’єкт слід розмістити в кімнаті так, щоб по ньому було зручно ходити з камерою. Бажано, щоб фон основи підставки під об’єктом був однотонним.

3) Відкрийте застосунок на своєму смартфоні. При першому запуску вам потрібно зареєструватися.



4) 3) Відео роботи з програмою:

<https://www.youtube.com/watch?v=tgJ7GOloj0M>.

<https://www.youtube.com/watch?v=UnBWl0dFzKY>

5) Відкрийте головне меню. Крайня ліва кнопка — це ваші створені моделі. Оскільки ви ще нічого не створили, тут порожньо. Кнопка «зірочка» — це галерея з уже створеними моделями, які можна завантажити, а потім відредагувати або роздрукувати на 3D-принтері.



5) Щоб розпочати роботу, потрібно активувати камеру – натиснути плюс вниз по центру екрана.

6) Щоб створити 3D-модель, необхідно зробити її фотографії по колу. Таких кіл буде три, і на кожному з них потрібно зробити до 20 фотографій з рівними інтервалами обертання камери навколо об'єкта. Перше коло робиться під прямим кутом до підлоги, для другого кола телефон нахилиється під кутом 60° до підлоги, щоб сфотографувати передню частину та трохи зафіксувати верхню частину об'єкта. Третій раунд фотографій робиться під кутом 30° , щоб зафіксувати якомога більше об'єкта з гори. У програмі максимальна кількість фотографій встановлена на 70, тому на останніх 10 фотографіях об'єкт має бути знятий з усіх ракурсів з максимальним крупним планом та чіткістю.

7) Після того, як ви зробите 70 фотографій, розпочнеться процес завантаження на сервер для обробки. Необхідно вказати назву моделі та вибрати відповідні характеристики зі списку для кращої класифікації моделі.

8) Після створення 3D-моделі на сервері ви отримаєте сповіщення та зможете завантажити модель на свою пошту.

9) Щоб відкрити модель на персональному комп'ютері, можна скористатися такими програмами: Meshmixer, Blender, стандартна програма для 3D-зображень у Windows, та іншими.

Контрольні питання

1. Що таке фотограмметрія?
2. Що таке 3D-сканер?
3. Як можна зробити 3D-сканування?
4. Які програми для 3D-сканування для смартфонів ви знаєте?
5. Що таке зворотна інженерія?
6. Навіщо потрібне 3D-сканування?

Лабораторна робота №3

ПОРІВНЯННЯ МЕТОДІВ ОТРИМАННЯ 3D-МОДЕЛЕЙ

2.1 Мета роботи

- 1) Ознайомтеся з основними методами створення 3D-моделей
- 2) Знайдіть переваги та недоліки кожного методу

2.2 Матеріально-технічне забезпечення

- 1) Персональний комп'ютер
- 2) Програмне забезпечення для створення 3D-моделей

2.3 Загальні положення і відомості

Існує два основних підходи до створення 3D-моделей: використання CAD-програм на основі креслень та вимірювань, а також використання 3D-сканерів для автоматичного створення цифрової моделі об'єкта.

CAD (Комп'ютерне проектування): Цей метод передбачає ручне створення 3D-моделі на основі вимірювань деталі, а потім створення креслення в CAD-програмах (наприклад, AutoCAD, SolidWorks, Tinkercad). Це дозволяє повністю контролювати процес моделювання, що особливо важливо під час проектування нових об'єктів або коли потрібна точна адаптація.

3D-сканування: Цей метод використовує спеціальні 3D-сканери для автоматичного створення цифрової копії фізичного об'єкта. Сканер збирає дані про поверхню об'єкта за допомогою лазерів, світлових або інфрачервоних датчиків та створює точну 3D-модель. Переваги цього підходу:

- **Швидкість:** Сканування можна виконати за лічені хвилини.
- **Точність:** Сучасні 3D-сканери забезпечують високу точність вимірювань, що особливо важливо для складних форм та геометрій.
- **Менше людських помилок:** На відміну від ручних вимірювань, сканування виключає людські помилки.

Однак варто врахувати, що у випадку 3D-сканування може знадобитися додаткова обробка моделі для усунення незначних дефектів, а також для підвищення точності моделі (наприклад, згладжування поверхонь або виправлення відсутніх даних).

Створення 3D-моделей за допомогою програмного забезпечення CAD (автоматизоване проектування) має низку суттєвих переваг, особливо в інженерії, архітектурі та дизайні. Ось основні переваги цього методу:

1. Висока точність та контроль

Програми CAD моделюють з дуже високою точністю. Ви можете детально контролювати кожен аспект об'єкта, включаючи точні розміри, геометрію та кути. Це критично важливо при проектуванні складних деталей, де найменша помилка може призвести до проблем на етапі виробництва.

2. Гнучкість у проектуванні

CAD дозволяє швидко змінювати або адаптувати модель під час роботи. Ви можете легко вносити зміни, пробувати різні варіанти проектування, комбінувати елементи, перевіряти їх сумісність і навіть тестувати майбутні механізми.

3. Інженерний аналіз та моделювання

Багато систем CAD, таких як SolidWorks або AutoCAD, містять модулі для аналізу міцності, теплопередачі, гідродинаміки та інших фізичних процесів. Це дозволяє вам протестувати ваші проекти, щоб переконатися, що вони працюють у реальних умовах, перш ніж вони будуть фізично виготовлені, зменшуючи кількість помилок та витрат.

4. Автоматизація процесів

Багато систем САПР пропонують функції автоматизації, такі як створення стандартних компонентів (болтів, гайок, шестерень тощо), створення складних вузлів і навіть автоматичний розрахунок креслень на основі 3D-моделі. Це економить час на рутинних завданнях і зменшує ймовірність помилок.

5. Створення креслень та документації

Програми САПР не тільки дозволяють створювати 3D-моделі, але й автоматично генерують детальні креслення, специфікації та іншу документацію, необхідну для виробництва або передачі проекту. Це особливо корисно для передачі даних заводам або постачальникам.

6. Інтеграція з виробничими системами (САМ)

Моделі, створені в програмах САПР, можна безпосередньо інтегрувати з системами САМ (автоматизоване виробництво) та 3D-принтерами, що дозволяє оптимізувати виробничі процеси та процеси виготовлення деталей. Таким чином, цифрова модель легко переходить на стадію реального виробництва без необхідності додаткових перетворень.

7. Робота з параметричними моделями

У деяких САПР-системах можна створювати параметричні моделі, де змінюються лише ключові параметри (наприклад, довжина, діаметр), а всі інші елементи автоматично коригуються. Це значно спрощує роботу з великими проектами та дозволяє швидко адаптувати модель до нових вимог.

8. Підтримка спільної роботи

Багато сучасних САПР-програм підтримують співпрацю в режимі реального часу, що дозволяє інженерам, конструкторам та дизайнерам у різних місцях працювати над одним проектом. Це значно пришвидшує робочий процес та покращує комунікацію.

9. Підтримка різних форматів та стандартів

САПР-системи дозволяють працювати з різними форматами файлів та дотримуватися міжнародних стандартів проектування (ISO, DIN тощо), що спрощує роботу з іноземними партнерами та замовниками, а також забезпечує уніфікацію документів.

САПР-програми надають інженерам та конструкторам потужні інструменти для створення точних та складних 3D-моделей, дозволяючи аналізувати, тестувати та генерувати документацію. Цей метод забезпечує повний контроль над процесом проектування, прискорює розробку та зменшує ризик помилок. Він особливо вигідний для складних технічних завдань та виробництва.

3D-сканери мають багато переваг, особливо коли йдеться про швидке та точне створення цифрової моделі існуючого об'єкта. Ось основні переваги використання 3D-сканерів:

1. Висока швидкість створення моделі

3D-сканери можуть значно пришвидшити процес створення цифрової моделі. Замість ручного вимірювання об'єкта та побудови його моделі в CAD-системі, сканер може відсканувати об'єкт за лічені хвилини та створити 3D-модель з мінімальною працею.

2. Точність та деталізація

Сучасні 3D-сканери забезпечують дуже високу точність. Вони здатні фіксувати найдрібніші деталі, включаючи складні поверхні, текстури та навіть мікронні деформації. Це особливо важливо в інженерії, реставрації чи медицині, де потрібна максимальна точність.

3. Зменшення людських помилок

У процесі ручного вимірювання та креслення завжди існує ризик людських помилок. 3D-сканування усуває цю проблему, оскільки весь процес автоматизований і мінімізує вплив людського фактора, такого як неправильні вимірювання або інтерпретація геометрії об'єкта.

4. Сканування складних геометрій

3D-сканери можуть легко обробляти складні форми та геометрії, які важко або навіть неможливо точно виміряти вручну. Це особливо корисно для об'єктів з криволінійними поверхнями, дрібними деталями або складними внутрішніми структурами.

5. Створення моделей для редизайну або реставрації

3D-сканування дозволяє швидко отримати цифрову копію об'єкта, яку потім можна використовувати для створення точних копій або для модифікації. Це особливо важливо для зворотного проектування та реставрації, коли необхідно відновити втрачені або пошкоджені деталі.

6. Мінімальні вимоги до навичок

3D-сканування не вимагає глибоких знань у галузі дизайну чи інженерії. Використання сканера доступне навіть користувачам без

технічної освіти, що робить цей інструмент зручнішим для ширшої аудиторії.

7. Підтримка різних матеріалів і текстур

Сучасні 3D-сканери можуть фіксувати не лише геометрію об'єкта, але й його текстури та кольори. Це особливо корисно в таких галузях, як мистецтво, археологія або розробка відеоігор, де важливо зберегти зовнішній вигляд об'єкта в цифровому вигляді.

8. Підготовка до виробництва та 3D-друк

Моделі, отримані шляхом сканування, можна використовувати для подальшої обробки, модифікації або безпосереднього виведення на 3D-принтер. Це спрощує та прискорює процес виготовлення деталей, коли потрібен швидкий зворотний зв'язок між фізичним об'єктом та цифровим середовищем.

9. Аналіз та контроль якості

3D-сканери можна використовувати для перевірки відповідності готового виробу оригінальному кресленню або специфікації. Це дозволяє контролювати якість, виявляти відхилення та виробничі дефекти з високим ступенем точності.

10. Зручність роботи з великими об'єктами

Спеціалізовані 3D-сканери, такі як лазерні або фотограмметричні, можуть використовуватися для сканування великих об'єктів, таких як автомобілі, будівлі або промислові споруди. Це робить сканування ефективним інструментом для великих проєктів, де ручне моделювання було б занадто трудомістким і дорогим.

3D-сканери пропонують швидку, точну та зручну альтернативу ручному моделюванню, особливо в ситуаціях, коли потрібне точне копіювання існуючих об'єктів або робота зі складними формами. Цей інструмент затребуваний у промисловості, медицині, реставрації та інших сферах, де важливо швидко отримати високоякісні цифрові моделі.

Таким чином, обидва методи мають свої переваги. Якщо вам потрібна швидка та точна модель існуючого об'єкта, 3D-сканер може

бути ідеальним рішенням. А для проектування або модифікації нових об'єктів основним інструментом залишаються програми CAD.

2.4 Порядок виконання лабораторної роботи

1. Опишіть основні етапи створення 3D-моделі шляхом моделювання за допомогою програмного забезпечення та 3D-сканування. Використайте матеріал з лабораторної роботи №1. 2. Надайте фотографії результатів моделювання та сканування вашої деталі.

2. Сформулюйте основні недоліки та переваги кожного методу, з яким ви зіткнулися.

3. Сформулюйте висновок про те, який метод кращий для вас, у якому випадку та чому.

Контрольні питання

1. Як використання САПР допомагає контролювати точність та розміри моделі під час процесу проектування?
2. Які види аналізу (наприклад, структурний розрахунок) можна виконувати за допомогою САПР, і як це впливає на кінцеву якість продукту?
3. Як автоматизація типових завдань САПР скорочує час проектування та зменшує ймовірність помилок?
4. Які можливості для співпраці надають сучасні САПР, і як це покращує взаємодію між конструкторами та інженерами?
5. Які переваги параметричного моделювання в САПР, і як воно спрощує роботу над складними проектами?
6. Чому створення моделей у САПР може займати більше часу, ніж 3D-сканування, особливо для складних об'єктів?
7. Які обмеження ручного моделювання об'єктів з дуже складною геометрією в САПР?
8. Наскільки високі вимоги до майстерності та досвіду конструктора під час роботи з програмами САПР, і як це впливає на ефективність?

9. Які типи об'єктів найкраще підходять для 3D-сканування, і яка основна перевага цього методу порівняно з ручним моделюванням?
10. Як 3D-сканери дозволяють швидко створювати точні моделі складних об'єктів, і як це допомагає пришвидшити виробничі процеси?

Лабораторна робота №4

РЕДАГУВАННЯ 3D-МОДЕЛІ В ПРОГРАМІ MESHMIXER

4.1 Мета роботи

- 1) Ознайомлення з основними елементами інтерфейсу програми Meshmixer.
- 2) Навчитися редагувати моделі в програмі Meshmixer

4.2 Матеріально-технічне забезпечення

- 1) ЕВМ.
- 2) Програмне забезпечення Meshmixer

4.3 Загальні положення і відомості

Meshmixer – один із найпопулярніших CAD-редакторів, що використовуються для створення або редагування тривимірних моделей та їх друку. Програма поширюється безкоштовно і має відкритий вихідний код.

Завдяки доступному інтерфейсу та гарному набору інструментів дана програма підійде як початківцям, так і професійним користувачам (інженерам, інноваційним розробникам, дизайнерам, скульпторам, художникам), які займаються розробкою та друком 3D-моделей. Додаток Meshmixer підтримує кілька форматів mesh-файлів (OBJ, STL, AMF, PLY, OFF, 3MF, MIX), більшість моделей сучасних 3D-принтерів (у програмі є готові налаштування для роботи з ними) і взаємодіє з відомими веб-сервісами тривимірного друку : Sculpteo, Shapeways та ін.

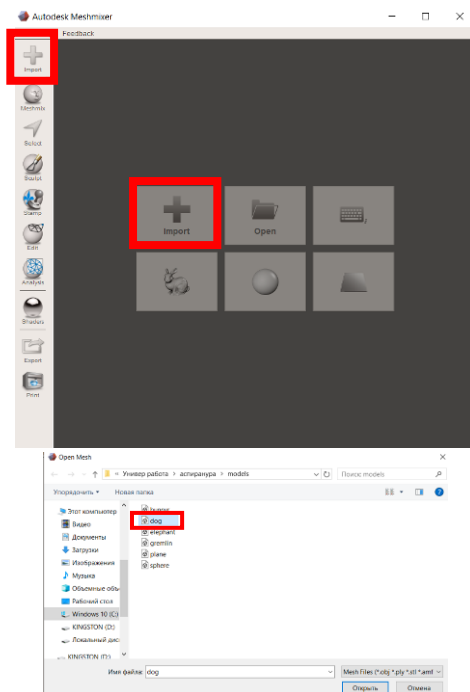
Функціонал CAD-редактора дозволяє налаштовувати робочий простір з урахуванням переваг кожного окремого користувача. Сам процес моделювання реалізований дуже просто: він схожий на ручне ліплення із пластиліну або глини. Meshmixer має в своєму розпорядженні набір різноманітних пензлів для втягування та витягування текстур, інструментами штампування, функцією автоматичного виправлення дефектів у моделях з можливістю

виправлення відразу кількох об'єктів та іншими потрібними інструментами. Також у програмі є і функція об'єднання кількох об'єктів в один. Крім того, редактор дозволяє конвертувати файли перед друком і відправляти безпосередньо готові проекти в слайсинг-програми для подальшого їх друку.

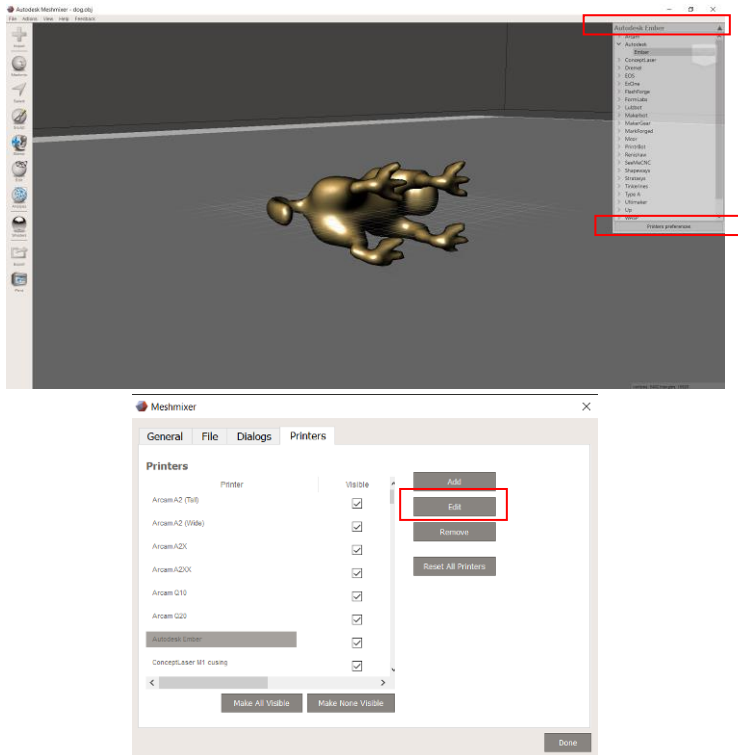
4.4 Порядок виконання лабораторної роботи

1) Відкрийте програму Meshmixer

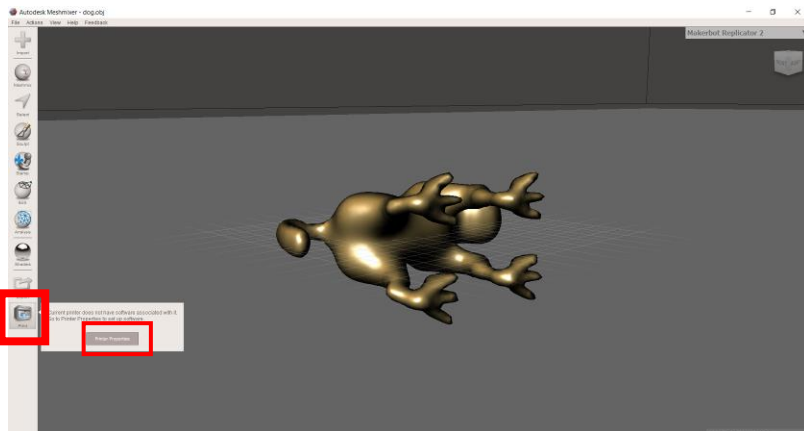
2) Натисніть Import в центрі вікна (або зліва у верхньому куті). Виберіть файл, який потрібно редагувати (з лабораторної роботи 2). Meshmixer підтримує популярні розширення mesh файлів: .STL, .OBJ, .PLY, .AMF, а також .3MF, .OFF та .MIX. Ви також можете схопити і перемістити файли прямо в поле для редагування. Можна вибрати: замінити поточний об'єкт або додати до моделі.



3) При використанні Meshmixer ви можете вибрати свій принтер зі списку або, якщо його немає у списку, вказати властивості 3D принтера вручну. Вказати тип вашого 3D принтера ви можете в меню у верхньому правому кутку. Якщо вашого 3D принтера немає у списку або ви зібрали власний, можна додати власні налаштування.

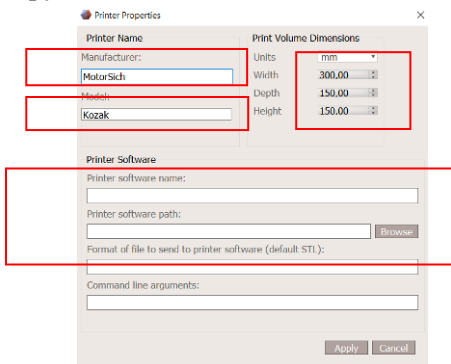


4) Також принтер можна додати наступним чином: виберіть Print у нижньому лівому кутку. Виберіть Printer Properties.



5) Тепер ви можете вказати Model принтеру та вибрати Manufacturer, який відповідає за тип друку (як на малюнку).

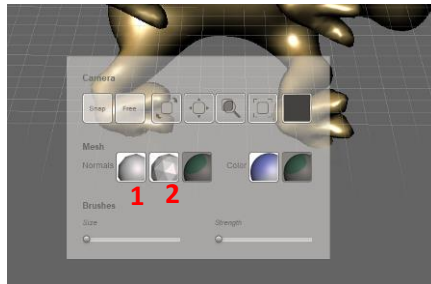
6) Встановіть розміри 3D-принтера у розділі Printer Volume Dimensions (як на малюнку). Також можна вказати програмне забезпечення принтеру Printer Software або вказати шлях до нього.



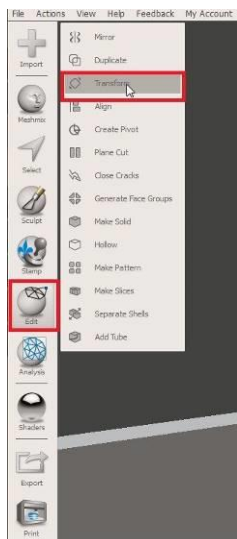
7) Натисніть Apply, щоб додати ваш 3D принтер.

8) Вивчаємо основні рухи. Переміщайтесь в поточній площині, **натиснувши центральну кнопку миші**. Повертайтеся навколо центру координатної системи, **затиснувши праву кнопку миші, ліву кнопку миші + ALT або середню кнопку миші + SHIFT**. Наближуйтеся/віддаляйтесь (zoom) за допомогою **коліщатка миші** або **натиснувши праву кнопку миші + ALT**. Якщо ви втратили

модель з фокусу, можете перейти до **View>Recenter View**, щоб сфокусуватися на початку координат. Ви також можете отримати доступ до всіх елементів керування камерою, натиснувши **space**. При затиснутій кнопці **space** ви також можете міняти візуальне відображення об'єкта. Meshmixer може згладити (1) поверхню вашого об'єкта або показати всі трикутники (2), з яких складається модель.



9) Зміна та масштабування 3D об'єктів. На панелі ліворуч виберіть пункт Edit і виберіть Transform. Тут можна вказати параметри базового розташування об'єкта або переміщати/обертати його вручну.



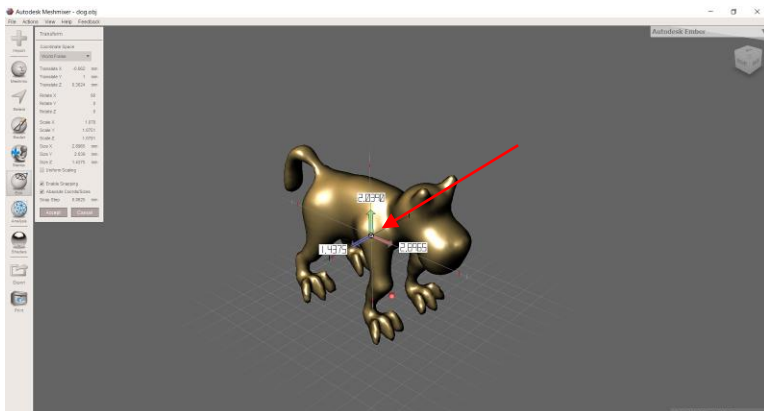
10) Розміщення об'єкта вручну. При розміщенні об'єкта можна перемикатися між двома базовими точками. По-перше, у вас є World Frame (система координат принтера), яка визначена центром координатної системи у вашому робочому просторі. Будь-які зміни чи переміщення відбуватимуться щодо центру. По-друге, ви можете працювати з Local Frame (система координат моделі). У цьому випадку переміщення відбуватимуться щодо центру системи координат, але обертання визначатиметься координатною системою об'єкта, з яким ви працюєте. Ви можете масштабувати вашу модель вздовж осей X, Y та Z. Перемикатися між двома варіантами систем відліку (frames) можна у Transform menu (1) або за допомогою bubbles у Transform колі (2).

11) Розташуйте модель як на малюнку



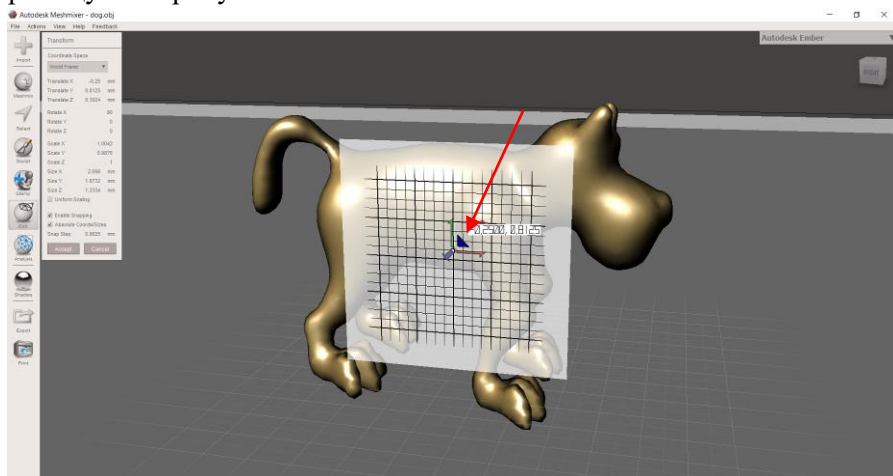
Для переміщення та масштабування обраного об'єкта достатньо зробити кілька кроків:

- Перевірте, чи активний чекбокс Enable Snapping (3) внизу вікна Transform. Ви можете змінити налаштування Snap Step відповідно до необхідної точності розташування об'єктів.
- Сектори кола (6) обертають об'єкт. Поверніть модель на 90°.
- Натисніть і потягніть одну зі стрілок (4), щоб перемістити об'єкт вздовж однієї з осей координат, також можливо вручну задавати переміщення в таблиці (5). Перемістіть модель по Y на 2мм, по Z та X установіть 0мм.
- Натисніть та потягніть за білий куб у центрі, щоб збільшити вашу модель. Збільште модель у 1,5 рази.



- Щоб розтягнути модель з одного боку, натисніть і потягніть на квадраті в кінці стрілок.

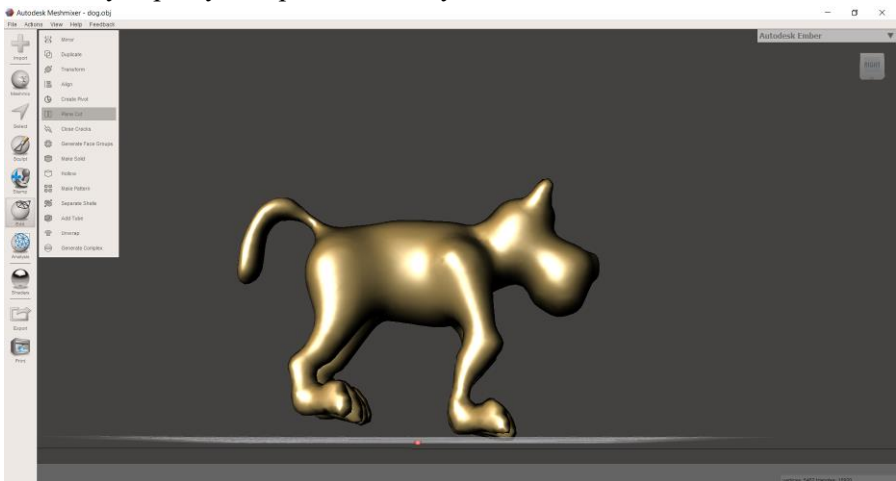
- Зміщуйте вашу модель вздовж площини затиснувши та переміщуючи трикутники.

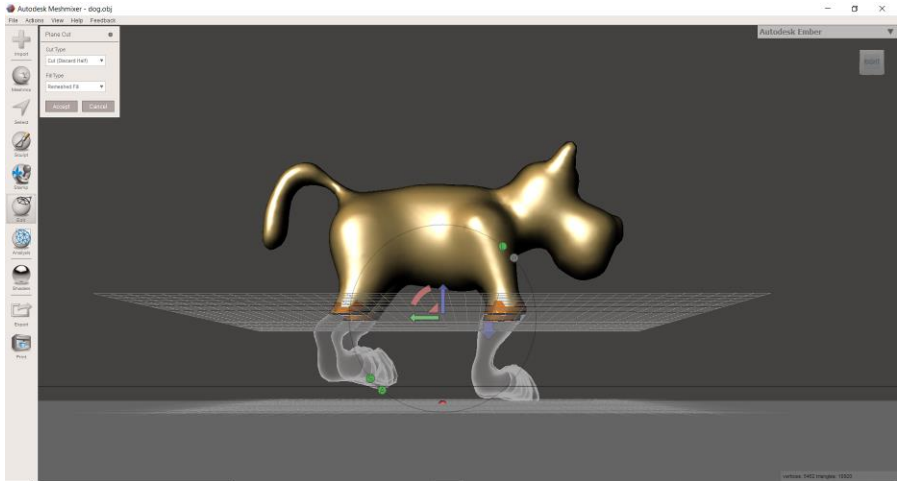


12) Автоматичне розміщення об'єкта. Використовуючи інструмент Align, ви можете розташувати плоску поверхню об'єкта ідеально рівно на віртуальному столі для друку. Виберіть об'єкт, який ви хочете вирівняти і встановіть Base Point в якості бази. Ви можете дзеркально відобразити ваш об'єкт, натиснувши блакитну стрілку.



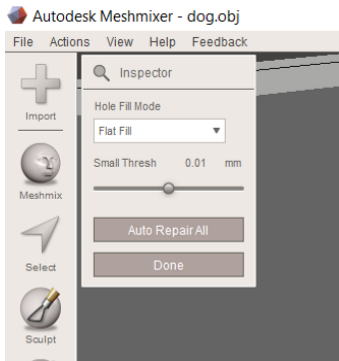
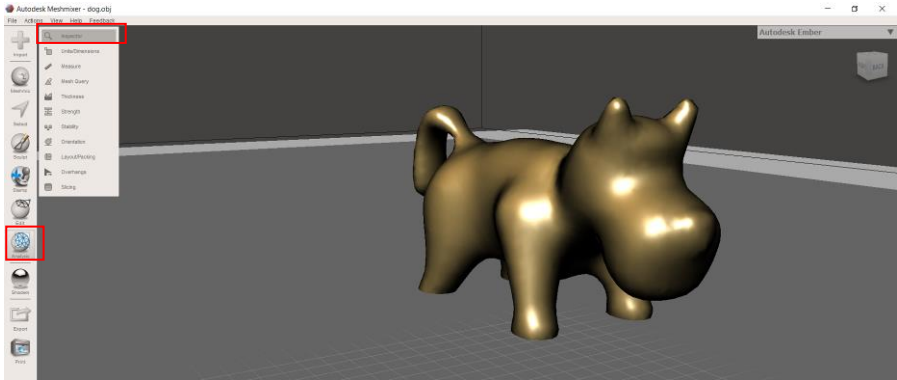
13) Створюємо плоску поверхню. Для створення плоскої поверхні використовуйте команду Plane Cut. Це швидкий інструмент для створення гладкої і стабільної поверхні для друку. Як і у випадку з інструментом transform, ви можете переміщати площину щодо глобальних або локальних координат. Блакитна стрілка вказує напрямок, в якому ви підріжете модель. Для зміни напрямку натисніть блакитну стрілку. Підріжте частину моделі.





14) Автоматичне виправлення 3D моделі. Перед 3D друком варто переконатися, що в моделі немає небажаних отворів і дефектів. Зробити це просто. Виберіть пункт Analysis> Inspector. Після розрахунків ви побачите різнокольорові сфери в місцях де є отвори і западини. Колір сфери відображає розмір отвору. Блакитний означає незначну похибку, яку легко виправити. Червоний означає велику похибку. Meshmixer може виправити і значні похибки, але після виправлення їх варто перевірити ще раз. Рожевий означає ділянку, який буде видалений на першому етапі виправлення моделі. Для якісного виправлення вам, можливо, доведеться запустити Inspector повторно. Для виправлення кожної помилки окремо ви можете клікати на сфери. Для масового виправлення можна скористатися опцією Auto Repair All.

15) Збережіть створену модель у своїй папці File/Save as/....



4.5 Контрольні питання

- 1) Які функції виконує MeshMixer
- 2) З чого починається робота у MeshMixer
- 3) Перелік етапів для редагування моделі у MeshMixer.
- 4) Розміщення об'єкта вручну у MeshMixer.
- 5) Переміщайтесь у поточній площині у MeshMixer.
- 6) Зміна та масштабування 3D Об'єктів у MeshMixer.
- 7) Налаштування простору для друку у MeshMixer.
- 8) Імпорт та експорт mesh файлів у MeshMixer.

Лабораторна робота №5

ПІДГОТОВКА 3D-МОДЕЛІ ДО ДРУКУ В ПРОГРАМІ

MESHMIXER

5.1 Мета роботи

- 1) Ознайомитись з налаштуваннями розрізу моделі
- 2) Навчитись аналізувати орієнтацію моделі для друку

5.2 Матеріально-технічне забезпечення

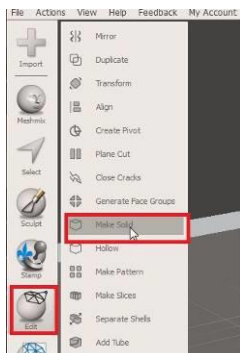
- 1) ЕВМ.
- 2) Програмне забезпечення Meshmixer

5.3 Загальні положення і відомості

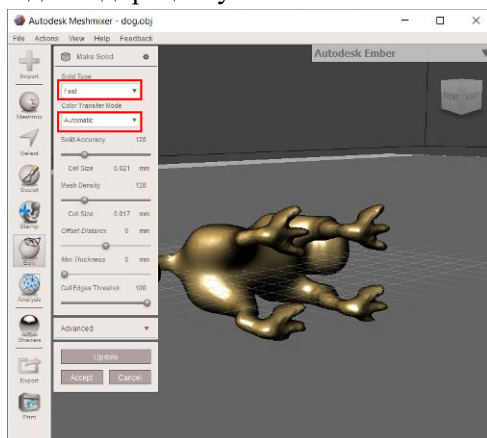
Проектування деталей, які підходять до інших частин, може бути величезним викликом у традиційній САПР. У Meshmixer є набір інструментів, спеціально розроблених для вирішення цієї проблеми. наприклад інструмент Offset, Join, soft transform , align and attract, які спрощують адаптацію наявних дизайнів до чогось іншого.

5.4 Порядок виконання лабораторної роботи

- 1) Відкрити модель з 4 лабораторної роботи (.../models/dog.obj). Збільшити модель, щоб вона займала 30% простору.
- 2) Відріжте нижню частину моделі по площині столу Edit/Plane Cut
- 3) Перетворюємо сітку в твердотільну модель. Натисніть edit, а потім - make solid.

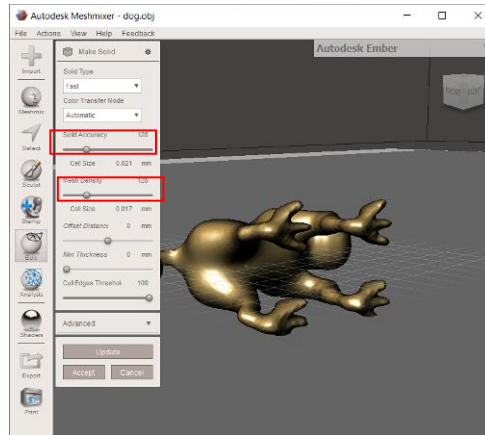


4) Виберіть solid type. тепер ви можете вибрати різний рівень точності трансформації сітки. виберіть fast, так як це досить точний варіант, який швидко відпрацьовує.



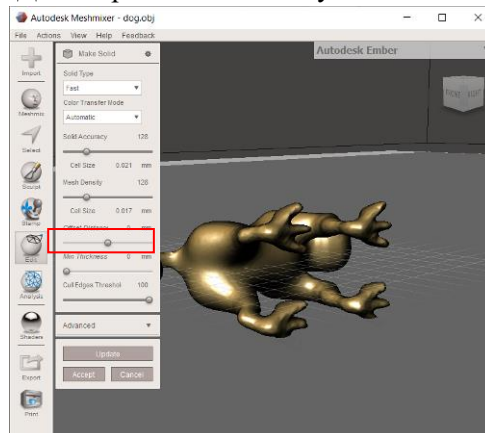
5) Встановіть color transfer mode в режим automatic.

6) Тепер можемо перейти до налаштувань solid accuracy. ця установка відповідає за з'єднання згенерованих твердотільних блоків один з одним. чим вище точність, тим краще будуть розпізнаватися западини, але і обробка займе більше часу. для початку встановіть accuracy в районі 100. ви можете використовувати слайдер або вибрати значення поруч зі слайдером і вказати потрібне вам значення.



1) Параметр mesh density теж встановить в 100. Цей параметр відповідає за визначення кутів. Якщо ви вкажете менше число, кути будуть нагадувати фаски.

2) Offset distance дає можливість зробити ваш об'єкт тонше або товщим. Матеріал, яким ви друкуєте завжди сідає при охолодженні. Пластик PLA вмощується приблизно на 1.5%, а ABS в деяких випадках до 5%. Так що якщо ви знаєте цей відсоток, можете розрахувати додатково необхідну кількість матеріалу. якщо точність не є важливою або у вас відносно невелика модель, просто залиште цей параметр в 0. Для збереження налаштувань натисніть ассерт.



3) Створюємо порожнечі в 3d моделі для економії матеріалу і часу. Іноді під час 3d друку моделей великого обсягу вам хочеться заощадити час і матеріал. у цьому розділі ми розглянемо як цього домогтися, створивши порожнечі в моделі.

4) натисніть edit, а потім hollow (відразу ж під командою make solid).

5) після обробки ви побачите обезформлені об'ємні ділянки в середині моделі, які є сформованими порожнечами.

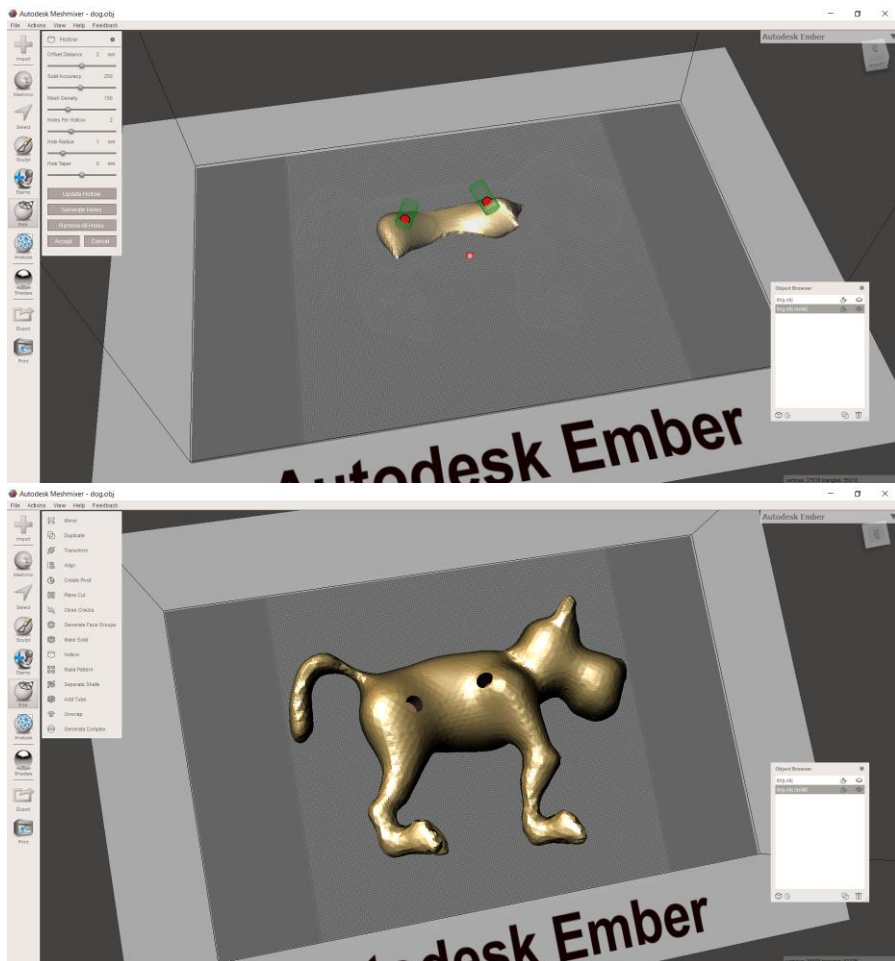
6) тепер ви можете змінити offset distats. цей параметр визначає товщину стінок. Важливо, не робіть стінки занадто тонкими, так як модель може не друкуватися. Встановіть товщину стінок 2мм.



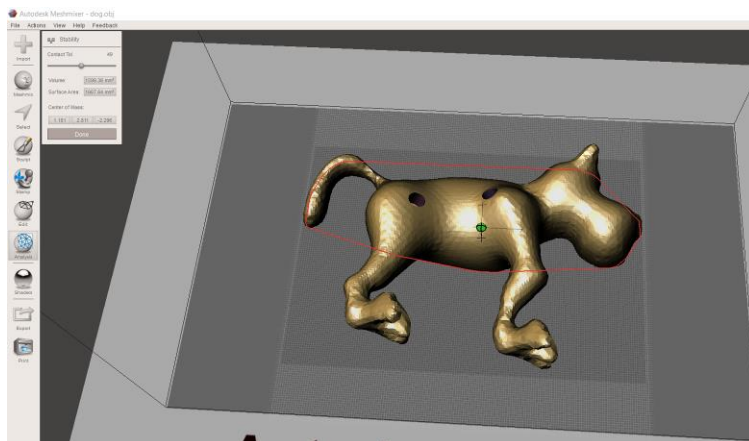
7) Solid accuracy і mesh density поліпшать гладкість і точність отворів. Різниця між настройками medium і high-quality помітна, але на практиці вам навряд чи знадобиться висока точність. При цьому high-quality обробка займе набагато більше розрахункового часу. Так що кращий вибір для швидкого і гарного результату встановіть

близько 250 для параметра accuracy і 100-150 для mesh density. Інші налаштування залиште як є і натисніть асепт для обробки.

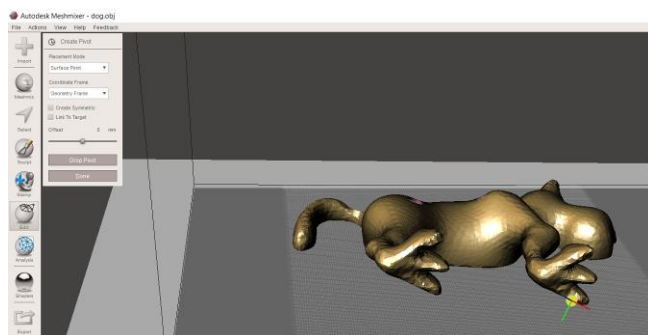
8) Створюємо власні отвори для виведення матеріалу. після створення порожнечі в моделі. У деяких технологіях 3d друку, наприклад, спікання металу в якості матеріалу використовується металевий порошок. У більшості випадків, під час SLS-друку вам необхідна оболонка вашої моделі, для цього необхідно зробити модель порожнистою. Однак порошковий матеріал всередині моделі все одно залишиться і якщо його не видалити, буде коштувати вам грошей. Якщо ви плануєте спікання вашої моделі, треба створити евакуаційні отвори для порошку. Meshmixer пропонує ефективний інструмент для створення таких отворів. Встановіть значення holes per hollow рівним 2. Під час 3d друку моделей більшого розміру ви можете додати більше отворів, але зазвичай 2 отвори цілком достатньо. Тепер встановіть радіус отвору Hole Radius 1мм. Якщо необхідно, можете додати кут нахилу за допомогою опції hole taper, встановіть 0°. Коли встановлені бажані настройки, натисніть generate holes. Тепер ви зможете переміщати отвори (як на малюнку), потягнувши за червону крапку. ви можете оновити параметри, натиснувши generate holes ще раз і видалити отвори, натиснувши remove all holes.



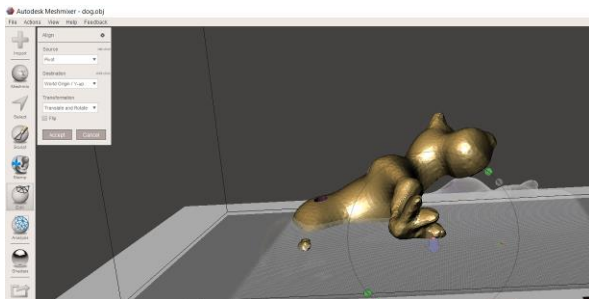
9) Перед початком 3d друку, треба переконаватися, що об'єкт перебуває на одній площині з підставою. Для цього перейдіть в меню analysis/stability. Цей інструмент Meshmixer розрахує площу поверхні і об'єм вашого об'єкта. Більш того, червоним кольором буде відзначена поверхню контакту моделі з заснованої площиною. Налаштовуючи contact tol ви додаєте або забираєте деякий зазор між основною площиною і об'єктом. Червона точка в центрі вашого об'єкта вказує на нестабільну позицію. Зелена точка - стабільна.



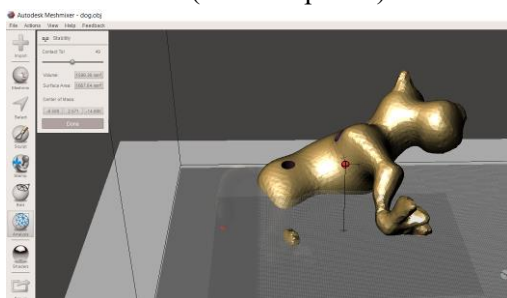
10) Є один трюк, який допоможе виставити ваш об'єкт ідеально щодо основної площини без покрокової повільної трансформації. Перейдіть в edit/create pivot. У placement mode виберіть пункт surface point, а в geometry - coordinate frame. Після цього клікніть на площині вашого об'єкта, яку ви хочете вирівняти. натисніть drop pivot, щоб підтвердити прихильність і натисніть done для виходу.



11) тепер перейдіть в edit/align, виберіть опцію pivot в source і натисніть на точку, яку ви переміщали до цього. Встановіть destination відповідно до однієї з координатних осей. Для повороту моделі можете використовувати синю стрілку.

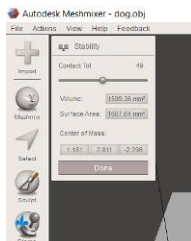


12) ще раз перевірте стабільність вашої 3d моделі за допомогою інструменту stability. Тепер модель розташовується на базовій площині не стабільно (точка червона).

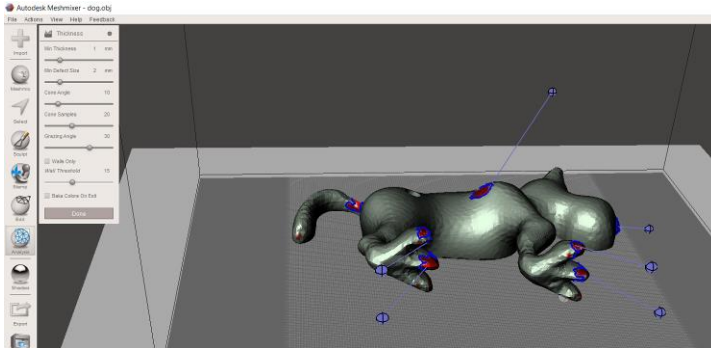


13) Поверніть модель у попереднє становище у верхньому меню Actions/UndoBack

14) Аналіз стабільності і товщини. іноді вам треба зробити швидкий аналіз геометрії вашої 3d моделі. Meshmixer не може змагатися з серйозними програмами фем-аналізу, але відмінно впорається з розрахунком таких властивостей як обсяг і маса моделі. Розрахувати ці параметри ви можете за допомогою інструменту stability.



Товщину моделі можна перевірити за допомогою analysis/thickness. Тепер ви можете встановити мінімальну товщину або вказати власні значення і Meshmixer виділить ці області. Ви можете редагувати окремі ділянки. Виділити їх можна, клікнувши на відповідних сферах.



5.5 Контрольні питання

- 1) Як розрізати модель у MeshMixer.
- 2) Аналіз орієнтації для друку у MeshMixer.
- 3) Підготовка до 3D друку
- 4) Створення порожнин в 3D моделі для економії матеріалу і часу
- 5) Створення отворів для виведення матеріалу

Лабораторна робота №6

АВТОМАТИЧНЕ ТА РУЧНЕ СТВОРЕННЯ ПІДТРИМОК НА 3D-МОДЕЛІ В ПРОГРАМІ MESHMIXER

6.1 Мета роботи

- 1) Навчитись аналізувати моделі для визначення необхідних підтримок
- 2) Навчитись автоматичному та ручному створенню підтримок
- 3) Навчитись редагувати створені підтримки

6.2 Матеріально-технічне забезпечення

- 1) ЕВМ.
- 2) Програмне забезпечення Meshmixer

4.3 Загальні положення і відомості

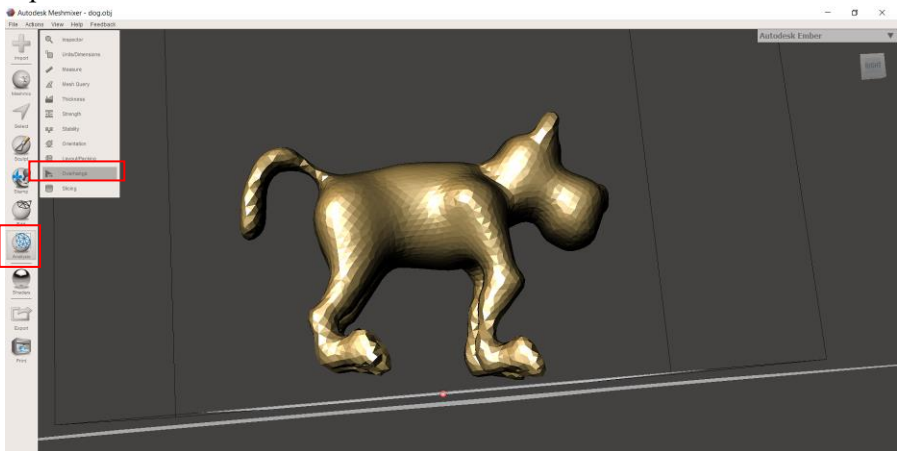
Автоматичне та ручне створення супортів. Meshmixer надає чудовий інструмент для створення власних супорт-структур. Є можливість генерувати супорти автоматично.

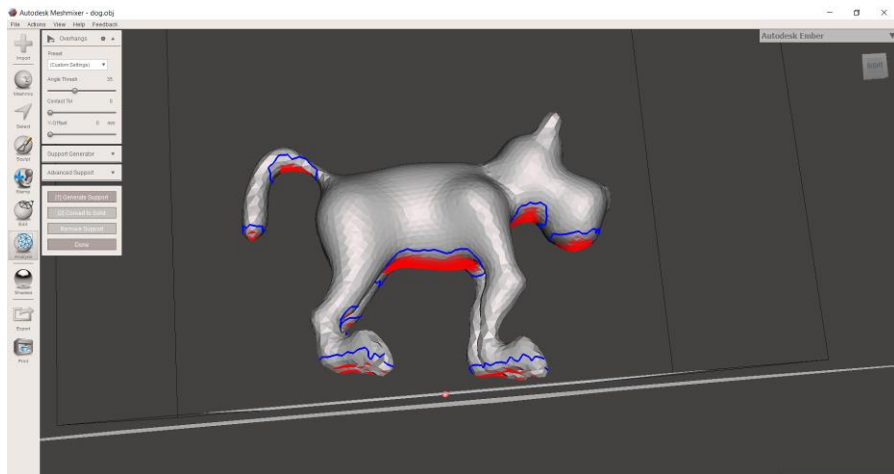
6.4 Порядок виконання лабораторної роботи

- 1) Відкрити модель з 4 лабораторної роботи (.../models/dog.obj). Збільшити модель в 15 разів.
- 2) Спочатку розташуйте вашу модель на базовій площині як на малюнку, відстань по осі Y 15мм .



3) Потім перейдіть до analysis /overhangs. Тут ви можете вибрати один із 3D принтерів, представлених у списку або вибрати custom settings. Червоним виділені місця які звисають і потребують підтримок.



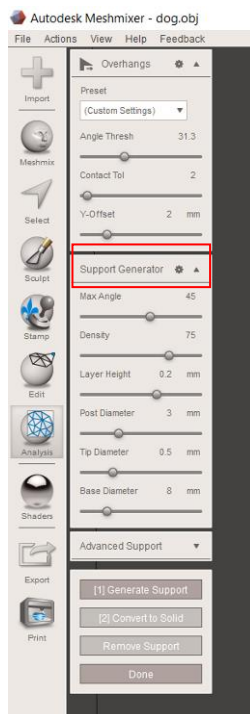


4) Налаштуйте angle thresh, щоб помітити проблемні ділянки. Проблемні ділянки визначаються кутом між вектором-перпендикуляром до поточної площини та вектором, який перпендикулярний базовій площині. Цей кут повинен бути меншим за встановлене значення. Встановіть 30°.

5) Contact tol - це поріг між двома гранями. Якщо відстань між нависанням та іншим місцем менша за це значення, це не буде виявлено як нависання. Встановіть 2 мм.

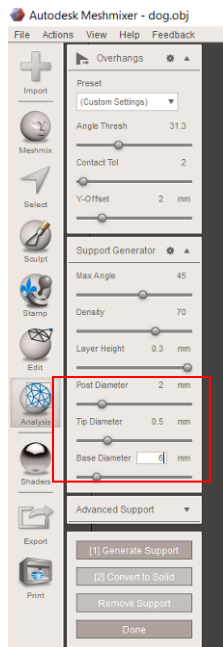
6) Y-offset - це відстань між базовою площиною та проблемною ділянкою. Працює так само, як contact tol, але для порівняння береться базова площина. Встановіть 2 мм.

7) Налаштуйте параметри ваших супорт-структур у support generator.

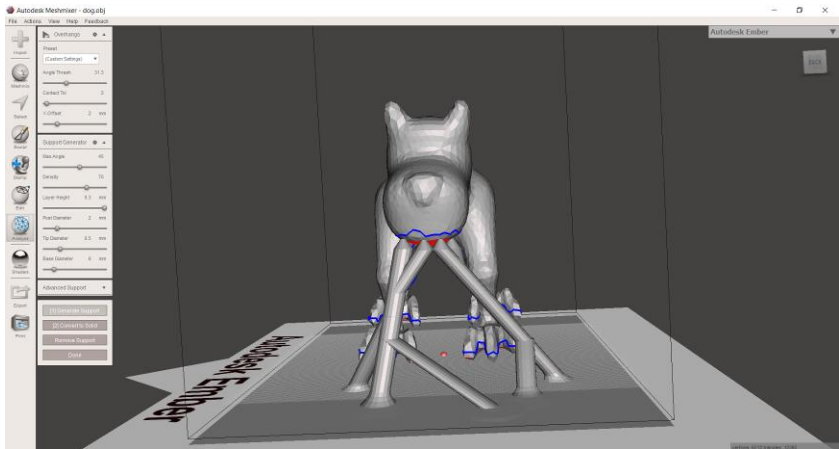


8) Max angle – максимально допустимий кут нахилу. Цей кут вважається щодо базової поверхні. Як правило, це значення виставляють в 45 °, але можна змінювати в залежності від вашого 3d принтера та 3d моделі. Density визначає відстань між супортами. Встановіть значення 70%. Layer height виставляється відповідно до товщини шару друку, яку забезпечує ваш 3d принтер. Встановіть 0,3мм.

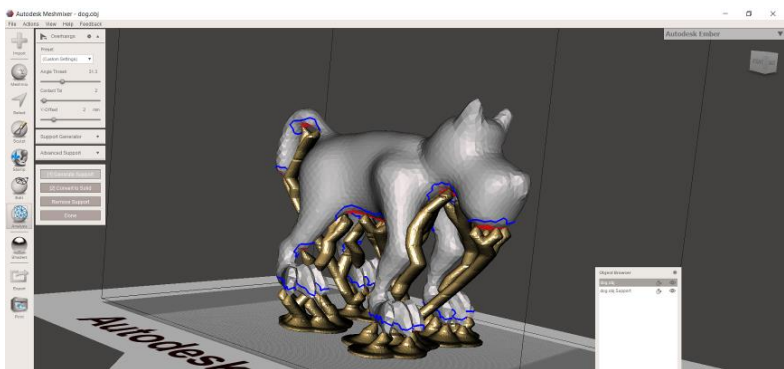
9) Налаштувавши base, post і tip diameter, ви можете створити дуже маленькі або великі супорт-структури. Встановіть base diameter – 2 мм, post diameter – 6 мм і tip diameter – 0,5 мм.



10) Тепер, щоб створити супорт, ви можете натиснути на виділену червоним поверхню. Коли ви змінюєте властивості, наступна супорт-структура буде з новими налаштуваннями. Якщо ви помилилися, можете видалити супорт, клацнувши на ньому мишкою із затиснутою клавішею Ctrl. Команда remove support видалить усі супорт-структури. Ви можете змінити напрямок розташування супортів. Для цього натисніть на червоній зоні праву кнопку миші і ведіть в потрібне місце, коли супорт зелений це вірний варіант розташування, коли жовтий – не вірне його розташування. Для посилення супортів можливо від них теж створювати підтримки. Для цього наведіть на супорт затисніть праву кнопку миші і ведіть як вам потрібно. Створіть вручну підтримки як на малюнку і натисніть Done.



11) Для автоматичної генерації супортів з вибраними параметрами, можна скористатися опцією Generate support. Щоб вона була активною видаліть створені вручну супорти за допомогою Remove Support. Create solid перетворює всі супорт-структури на твердотільну модель. Для цього створіть нову модель підтримок Create solid/ New object



6.5 Контрольні питання

- 1) Які створюються автоматично підтримки у Meshmixer
- 2) Які створюються вручну підтримки у Meshmixer
- 3) Перелік етапів для створення підтримок вручну у Meshmixer.

Лабораторна робота №7

СТВОРЕННЯ КЕРУЮЧОЇ ПРОГРАМИ ДЛЯ 3D-ДРУКУ В ПРОГРАМІ REPETIER-HOST

7.1 Мета роботи

- 1) Ознайомлення з основними елементами інтерфейсу програми Repetier-Host.
- 2) Навчитися редагувати моделі в програмі Repetier-Host.

7.2 Матеріально-технічне забезпечення

- 1) ЕВМ.
- 2) Програмне забезпечення Repetier-Host

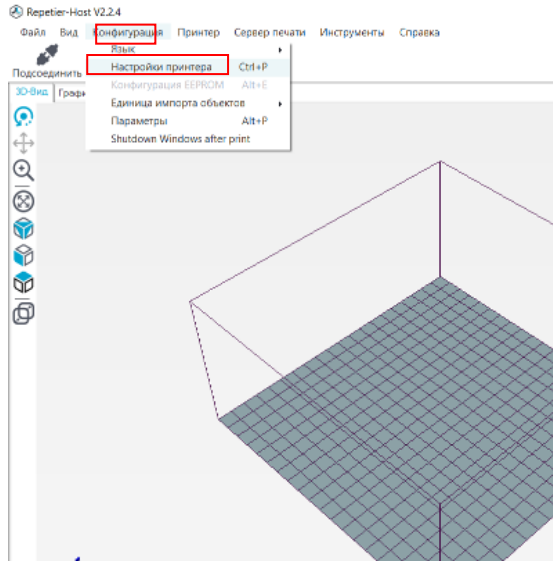
7.3 Загальні положення і відомості

Repetier-Host – програмне забезпечення, яке дозволяє створювати моделі для 3D-принтерів, редагувати їх і відправляти на друк. Графічна оболонка має російську версію, а інтерфейс програми інтуїтивно зрозумілий і простий. З допомогою не можна детально налаштувати параметри принтера та 3D-моделі, а також завантажити попередній перегляд фігур. Repetier-Host – це хост для 3D-принтера та програма для нарізки, яка перетворює файли STL на G-код за допомогою одного з трьох відомих механізмів нарізки: Cura, Slic3r або PrusaSlicer. Він також має масу функцій, які спрямовані на покращення налаштувань 3D-друку.

У верхній частині вікна знаходяться головні параметри програми, за допомогою яких користувач зможе завантажити модель, зберегти готовий або відправити його на друк. Ще вище пропонуються розширені налаштування програмного забезпечення та принтера. Справа містить інформацію про завантажену модель, інструменти для редагування та друку конкретного проекту. У розділі «слайсер» користувач зможе налаштувати основні параметри 3D-принтера.

Repetier-Host має потужний генератор G-коду, який швидко створює «вихідник» для друку. Редактор G-кода дозволить

дуже інтуїтивно зрозумілий і схожий на будь-яке інше програмне забезпечення для нарізки.



3) Необхідно визначити параметри друку принтера: швидкість руху екструдера - 5000 мм/хв, швидкість вертикального руху вздовж осі Z - 120 мм/хв, температура екструдера - 230°, температура столу - 50°.

Настройки принтера

Принтер: default

Соединение | Принтер | Экструдер | Размеры | Скорости | Распараметры

Регулировка:

Autotest

Скорость порода: 1000 [mm/min]

Скорость оси Z: 100 [mm/min]

Ручное управление скор. экструдера: 2 [mm/s]

Ручное управление скор. вращающегося: 30 [mm/s]

Температура экструдера (mm): 200 °C

Температура стола (mm): 120 °C

☒ Контроль температуры стола и экструдера

☐ Удалить M105 запросы из журнала

Проверка каждые 3 секунды

Позиция парковки: X: 0 Y: 0 Z: 0 [mm]

☒ Отправить ETA на дисплей принтера ☐ Парковать после завершения

☒ Очистить экструдер после завершения ☐ Очистить термо-стол после завершения

☒ Очистить моторы после завершения ☒ На принтере установлена SD карта

Доб. к максимальному: 5 [mm]

Перевернуть направление управления для: ☐ Oxy X ☐ Oxy Y ☐ Oxy Z ☐ Flip X and Y

OK Применить Отмена

4) Необходимо назначить количество экструдеров - 1, максимальную температуру экструдера - 280°C, максимальную температуру стола - 120°C, максимальный объем экструзии - 12 мм²/с

Настройки принтера

Принтер: default

Соединение | Принтер | Экструдер | Размеры | Скорости | Распараметры

Количество экструдеров: 1

Number of fans: 1

Макс. температура экструдера: 280

Макс. температура стола: 120

Макс. объем сопла: 12 [mm/s]

☐ Принтер имеет экструдер специализированной конструкции (см. примечание)

Экструдер 1

Настройка:

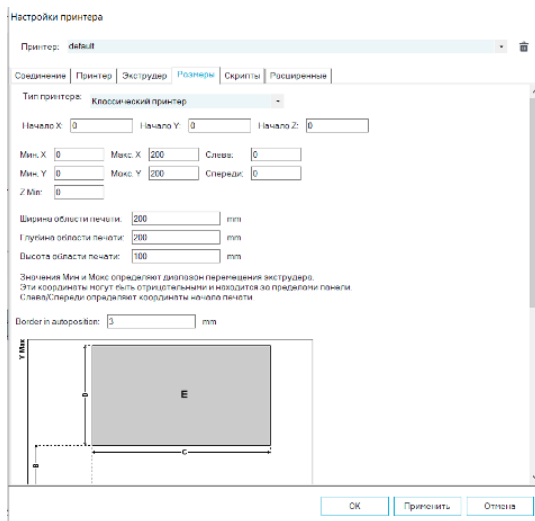
Диаметр: 0.4 [mm] Специальная температура: 0 °C

Цвет: [red]

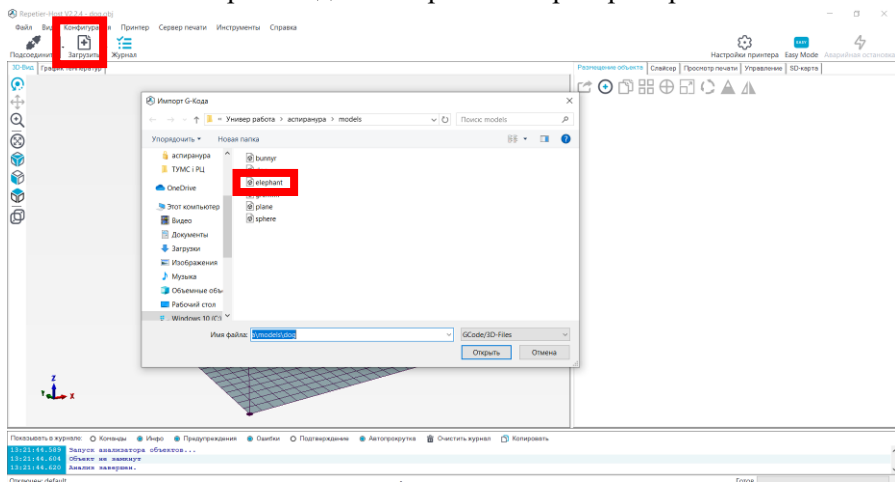
Сдвиг по X: 0 Сдвиг по Y: 0 [mm]

OK Применить Отмена

5) Необходимо указать размеры области печати: ширина - 200 мм, длина - 200 мм, высота - 200 мм.

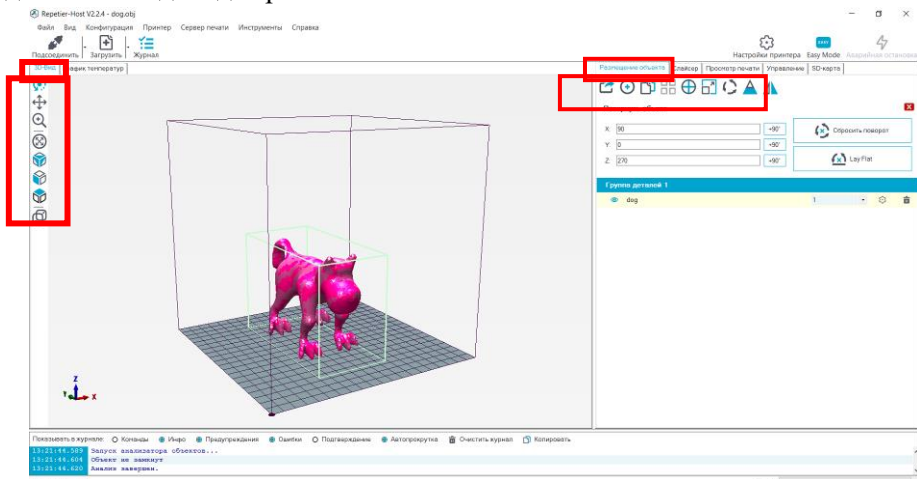


6) Щоб завантажити модель для друку, натисніть кнопку «Завантажити». Виберіть модель з першої лабораторної роботи.

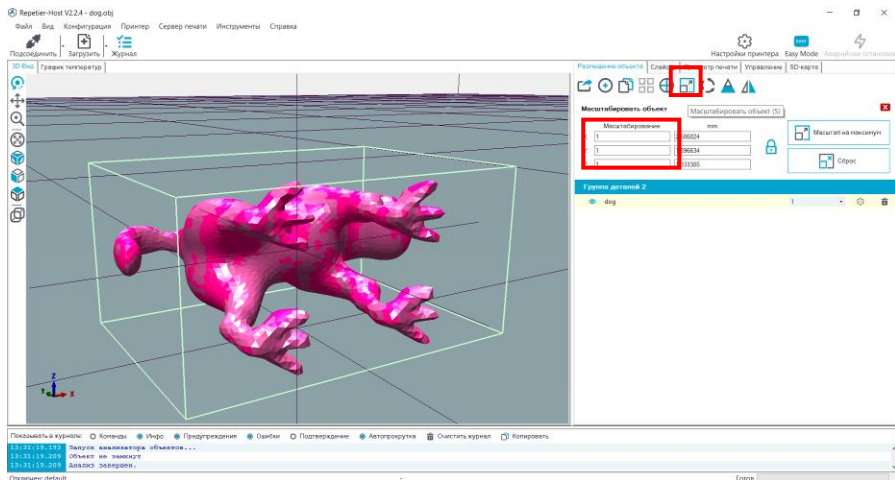


7) 3D-вигляд. Це простір, де ви можете переглянути модель на стику вашого принтера та внести зміни до масштабу, розміру тощо. Repetier-Host має зручні кнопки для завантаження 3D-моделей у зріз та їх орієнтування на поверхні друку. Праворуч, на вкладці

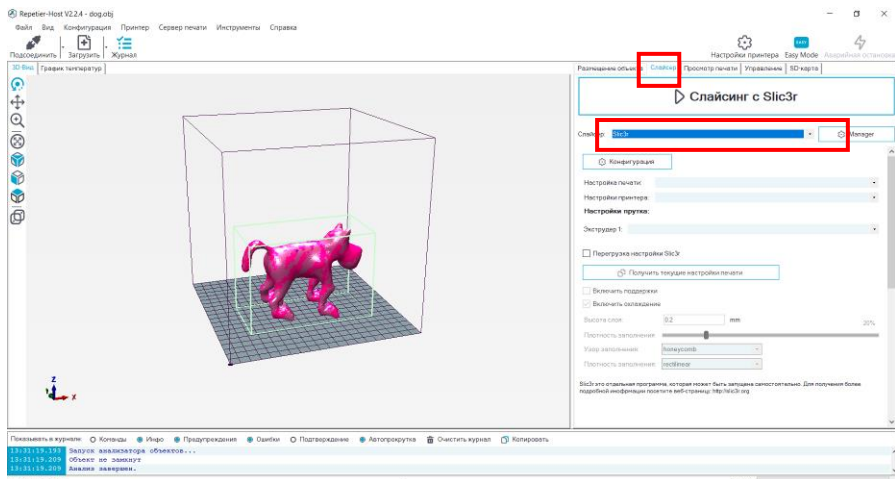
«Розміщення об'єкта», ви можете виконати додаткові дії для підготовки моделі до зрізання.



8) Збільште модель так, щоб вона займала половину простору, за допомогою кнопки "Масштаб". Якщо ви хочете масштабувати вздовж кожної координатної осі окремо, зніміть прапорець "Зафіксувати співвідношення сторін". Щоб перемістити вигляд, утримуйте коліщатко миші та переміщуйте його, щоб повернути вигляд, утримуйте Ctrl та праву кнопку миші та переміщуйте його, або кнопку повороту на лівій панелі. Для масштабування використовуйте коліщатко миші або лупу на лівій панелі та переміщуйте, утримуючи праву кнопку миші. Щоб перемістити модель, використовуйте хрестик на лівій панелі та утримуйте праву кнопку миші. Щоб відцентрувати вигляд моделі, використовуйте хрестик у колі на лівій панелі.

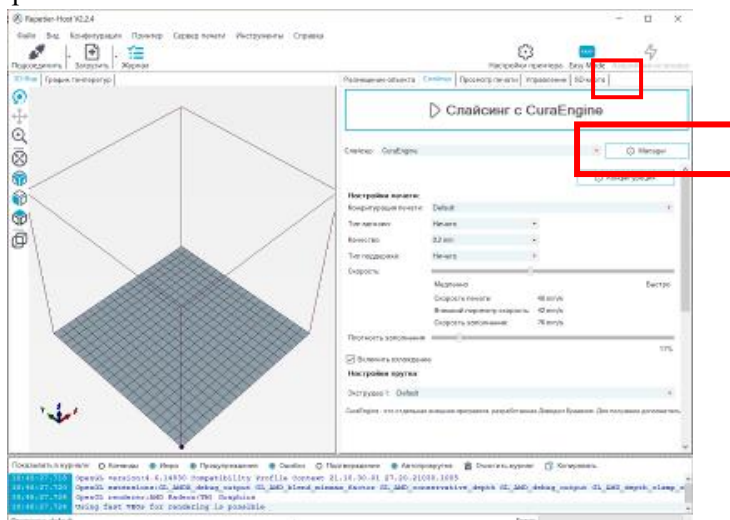


9) Під вкладкою зрізу у правій частині вікна розташовані інтуїтивно зрозумілі елементи керування. Як ми вже згадували, ви можете вибрати один із трьох механізмів зрізу, кожен із яких має свій унікальний набір функцій.



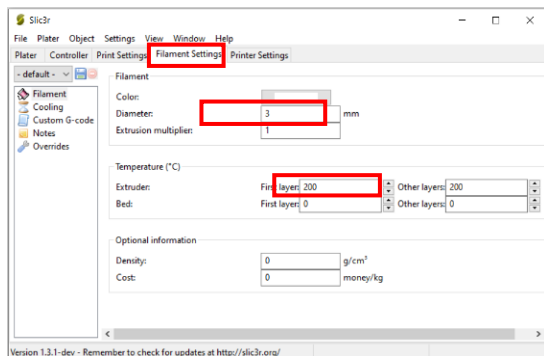
10) Ви можете точно налаштувати параметри на мікрорівні в кожному зрізі та зберегти конфігурації, щоб мати змогу повторно використовувати налаштування для швидкого друку, не потребуючи

постійного врахування налаштувань. Перейдіть на вкладку Зрізач. Виберіть зрізач Slic3r.

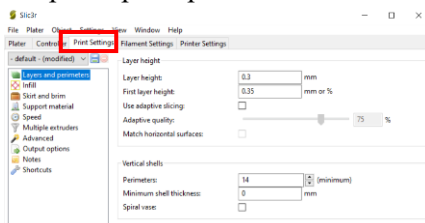


11) Після натискання кнопки «Конфігурація» у верхній частині Repetier-Host з'явиться вікно з вкладками: «Налаштування друку», «Налаштування нитки» та «Налаштування принтера» та іншими. Кожна з цих вкладок має опції, які потрібно налаштувати. У налаштуваннях 3D-друку ліворуч є багато опцій.

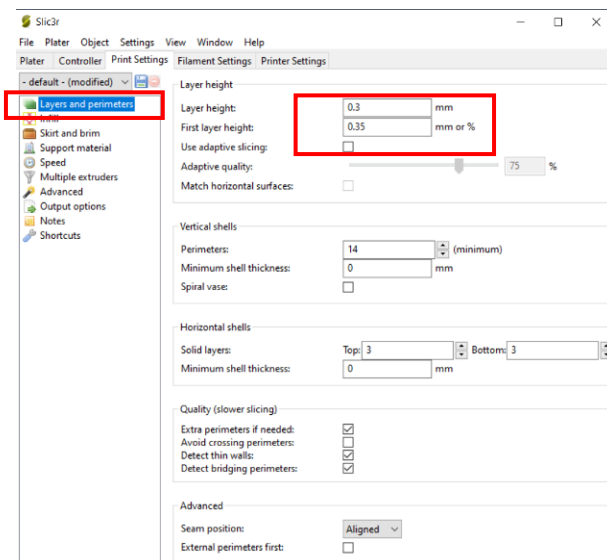
12) Налаштуйте параметри нарізки 3D-моделі: Налаштування нитки. Встановіть діаметр нитки на 1,75 мм, температуру екструдера «першого шару» на 205°C.



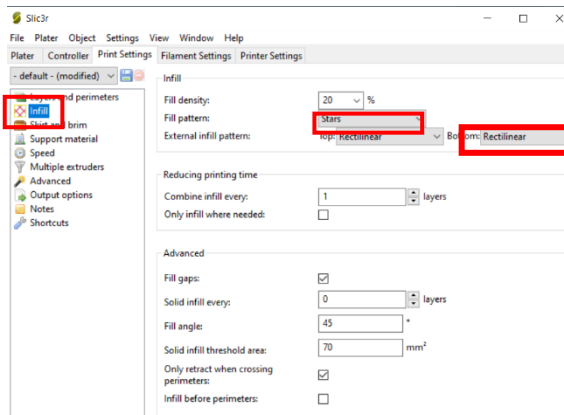
13) Налаштуйте параметри нарізки 3D-моделі: Параметри друку



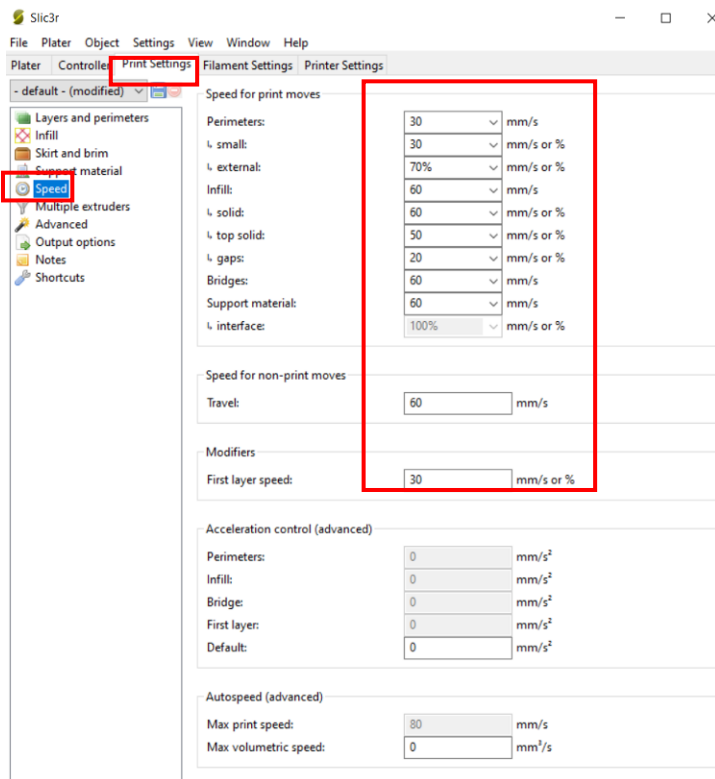
14) Вкладка «Шари та периметри». Тут ви встановлюєте висоту шару, а також вертикальні та горизонтальні стінки. Встановіть висоту шару на будь-яку висоту, яка вам підходить: 0,1 мм вважається гарною якістю, а 0,3 мм – приблизною, тому число від 0,15 до 0,2 мм може бути хорошим компромісом між швидкістю та якістю 3D-друку. Рекомендується встановити висоту першого шару приблизно на 0,3 мм, навіть якщо ваша деталь має високу роздільну здатність. Це допоможе правильно побудувати перший шар, що допоможе обмежити будь-які збої 3D-друку на першому шарі.



15) Наступний параметр для налаштування – це «Заповнення». Тут ви вибираєте відсоток заповнення суцільних областей вашого об'єкта. Зазвичай вибирайте від 10% до 15%. Використання нижчого відсотка заповнення може значно скоротити час 3D-друку, витрату матеріалу та вагу ваших моделей. Repetier-Host пропонує кілька варіантів заповнення візерунком – стільники, як правило, найміцніші. Що ж, найбільш оптимізованими з точки зору якості та швидкості є прямолінійні траєкторії.

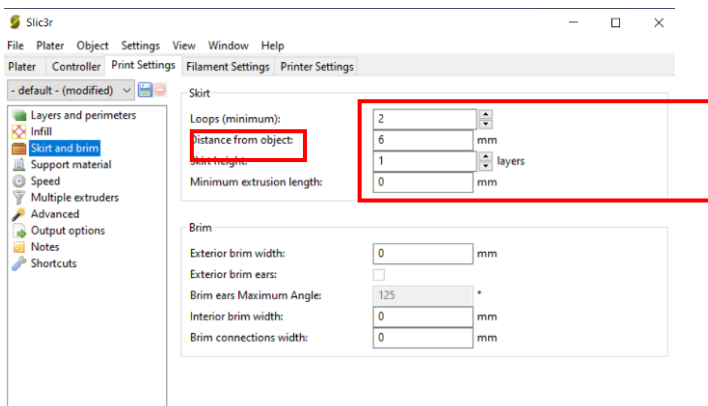


16) Після того, як заливка встановлено, час розпочати роботу. 3D-принтери можуть друкувати зі швидкістю від 1 мм/с до 400 мм/с. Як правило, зі збільшенням швидкості якість знижується. Я зазвичай друкую з швидкістю від 60 до 120 мм/с.

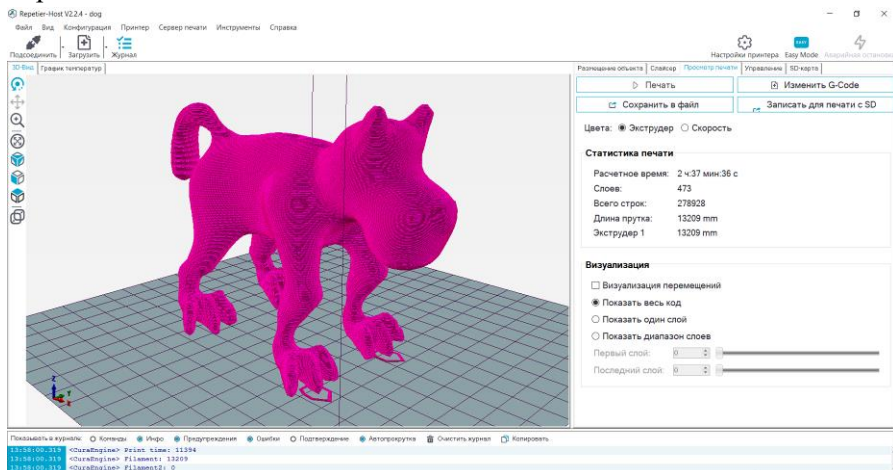


17) Наступний параметр Repetier-Host — «Skirt and Brim» (Спідниця та край), де можна вибрати, скільки філаменту подавати в сопло перед початком друку основної моделі для її очищення. Значення за замовчуванням — 2 петлі на відстані 6 мм від моделі. Як правило, цього достатньо для початку якісного 3D-друку. Якщо цих налаштувань недостатньо, можна збільшити кількість петель або відстань від моделі. Збільшуючи будь-який з цих параметрів, ви збільшуєте кількість матеріалу, що подається. Змінюючи відстань до об'єкта, слід пам'ятати, що зі збільшенням відстані ви зможете візуально визначити, чи добре відкалібрований стіл. Зворотний бік медалі полягає в тому, що зі збільшенням відстані від моделі 3D-друк може вийти за межі робочого простору. Загалом, просто фізично

неможливо занадто сильно збільшити цю відстань, особливо якщо ваша 3D-модель має широку основу.

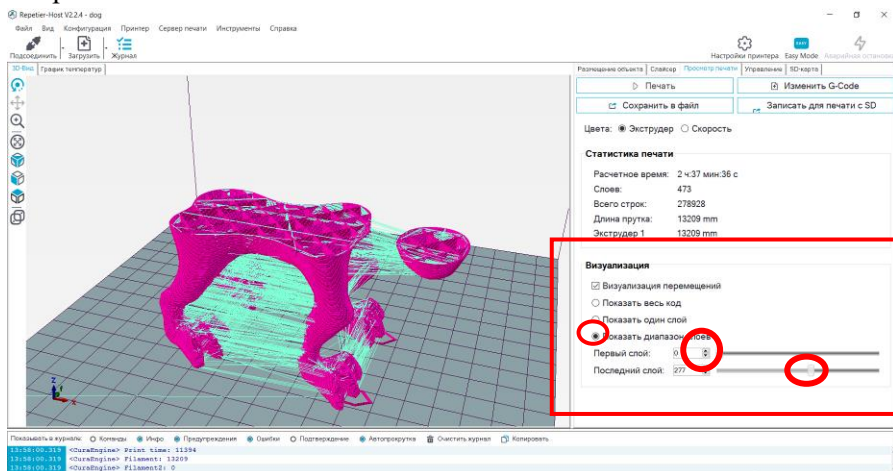


18) Закрийте вікно налаштувань. Після того, як ви все підготували, скористайтеся величезною прямокутною кнопкою у верхньому правому куті «Нарізання за допомогою CuraEngine», щоб нарізати модель.



19) Попередній перегляд друку. Ви розмістили модель та обрізали її відповідно до ваших потреб. Тепер час побачити результат. У вікні попереднього перегляду ви можете візуалізувати, як модель

буде надрукована в 3D. Швидкість принтера, рух сопла, обробка нерівностей (якщо такі є) та багато іншого. Якщо попередній перегляд показує проблеми, їх можна негайно виправити.



20) Після завершення нарізання можна натиснути «Друк», щоб розпочати 3D-друк, або «Зберегти у файл», щоб розпочати друк із SD-карти.

Контрольні питання

- 1) Як обертати модель на робочому столі
- 2) Як перемістити модель на робочому столі
- 3) Як змінити масштаб моделі
- 4) Як додати модель
- 5) Як відрагувати зламану модель при загрузці
- 6) Як змінювати параметри слайсінгу
- 7) Що таке підтримки
- 8) Як змінити щільність підтримок
- 9) Як змінити щільність наповнення моделі
- 10) Як згенерувати керуючу програму
- 11) Як подивитися візуалізацію друку

Лабораторна робота №8

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В РОБОТІ ІНЖЕНЕРА

8.1 Мета роботи

- 1) Навчіться використовувати сучасні інструменти для полегшення роботи інженера
- 2) Навчіться використовувати різні типи штучного інтелекту

8.2 Матеріально-технічне забезпечення

- 1) Персональний комп'ютер
- 2) Штучний інтелект

8.3 Загальні положення і відомості

Штучний інтелект (ШІ) – це галузь інформатики, яка займається створенням систем і програм, здатних виконувати завдання, що потребують рівня інтелекту, який зазвичай асоціюється з людиною. Метою штучного інтелекту є розробка комп'ютерних систем, здатних вирішувати завдання, що потребують розуміння, навчання, сприйняття, планування, аналізу, розпізнавання образів, обробки мови та багато іншого.

Системи та програми штучного інтелекту можуть використовувати різноманітні методи та методи, такі як машинне навчання, нейронні мережі, обробка природної мови, символічні методи, експертні системи тощо. Вони можуть застосовуватися до широкого кола завдань та галузей, включаючи медицину, фінанси, виробництво, транспорт, освіту, ігри тощо.

Цілі розробки штучного інтелекту можуть варіюватися від автоматизації повсякденних завдань до створення систем, які можуть перевершити людський інтелект у різних галузях. Дослідження в галузі штучного інтелекту мають велике значення для створення нових технологій, удосконалення існуючих систем та застосування інтелектуальних рішень для вирішення складних проблем.

Штучний інтелект (ШІ) охоплює широкий спектр методів і методів, кожен з яких призначений для вирішення конкретних завдань. Ось деякі з основних типів штучного інтелекту:

1. Експертні системи: це програмні системи, які використовують бази знань, логічний висновок та правила логічного висновку для моделювання знань та експертного мислення в певній галузі. Вони часто використовуються для прийняття рішень та вирішення складних проблем у певних галузях, таких як медицина, фінанси чи інженерія.

2. Машинне навчання: це галузь штучного інтелекту, в якій комп'ютерні системи автоматично навчаються на основі даних без явного програмування. Машинне навчання включає різні методи, такі як нейронні мережі, методи опорних векторів, дерева рішень тощо. Воно використовується в широкому спектрі застосувань, включаючи класифікацію, регресію, кластеризацію, виявлення аномалій тощо.

3. Нейронні мережі: це моделі, натхненні біологічною нервовою системою, яка складається з взаємопов'язаних нейронів. Нейронні мережі використовуються в машинному навчанні для обробки даних та навчання на прикладах. Вони широко використовуються в таких галузях, як розпізнавання образів, обробка природної мови, комп'ютерний зір та інші.

4. Обробка природної мови (NLP): це галузь штучного інтелекту, яка займається взаємодією між комп'ютерами та людською мовою. Вона включає методи аналізу, розуміння, генерації та взаємодії з природною мовою. НЛП використовується в таких застосунках, як машинний переклад, розпізнавання тону тексту, аналіз настроїв, чат-боти тощо.

5. Робототехніка: це галузь штучного інтелекту, яка займається проектуванням та створенням роботів і автономних систем, які можуть взаємодіяти з навколишнім середовищем. Це включає різні аспекти, такі як комп'ютерний зір, планування руху, управління та взаємодія з людиною.

6. Генетичні алгоритми та еволюційні обчислення: це методи оптимізації, натхненні процесами біологічної еволюції. Вони

використовують принципи відбору, мутації та кросовера для пошуку оптимальних рішень у просторі можливих рішень.

Це лише декілька основних типів штучного інтелекту, і в цій галузі існує набагато більше підходів і технологій.

Ось деякі відомі готові продукти, що використовують технології ІІІ:

1. ChatGPT та інші чат-боти, засновані на мовних моделях Generative Pre-trained Transformer (GPT) від OpenAI: ці чат-боти використовують глибокі нейронні мережі для генерації тексту та здатні спілкуватися з користувачами, відповідаючи на їхні запитання та підтримуючи діалоги.

2. Amazon Alexa, Google Assistant, Apple Siri: це голосові помічники, які використовують технології розпізнавання мовлення, обробки природної мови та машинного навчання для виконання команд, надання інформації та керування пристроями.

3. IBM Watson: це платформа ІІІ, яка надає широкий спектр послуг і функцій, таких як аналіз даних, розпізнавання зображень, обробка природної мови, інтелектуальний пошук тощо.

4. Tesla Autopilot: це автоматизована система керування автомобілями Tesla, яка використовує машинне навчання та комп'ютерний зір для розпізнавання дорожніх умов, автоматичного керування та запобігання аваріям.

5. DeepMind AlphaGo: Це програма штучного інтелекту, розроблена DeepMind, яка здатна грати в гру Go на рівні чемпіонів світу. Вона використовує методи глибокого навчання та навчання з підкріпленням для розробки своєї ігрової стратегії.

6. Когнітивні сервіси Microsoft Azure: Це набір API та інструментів, які надають Microsoft Azure можливість вирішувати проблеми в галузі комп'ютерного зору, обробки природної мови, мовленнєвих технологій та інших областях з використанням штучного інтелекту.

Це лише кілька прикладів готових продуктів з використанням технологій штучного інтелекту, які широко використовуються в

різних сферах життя та бізнесу.

8.4 Порядок виконання лабораторної роботи

1. Відповідно до варіанта, виберіть завдання

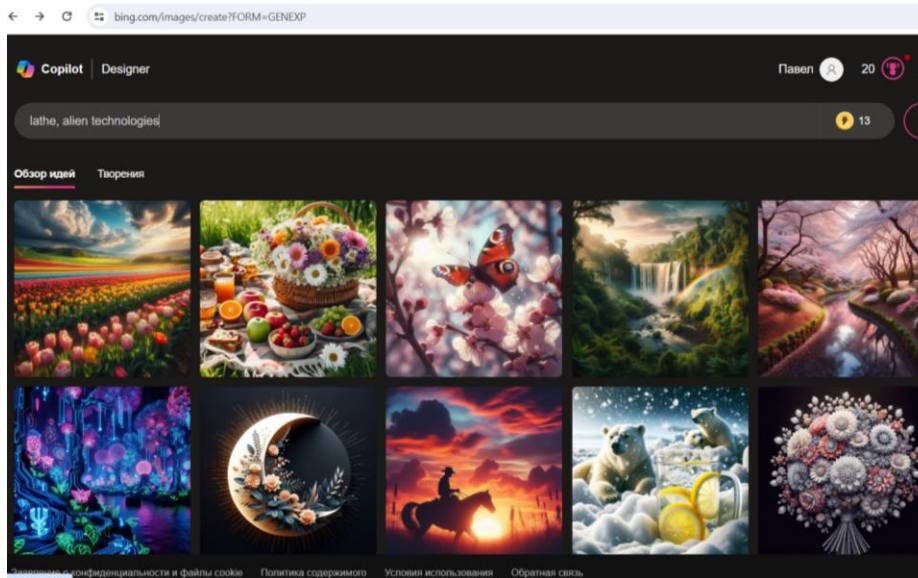
2. Використовуючи ШІ, розв'яжіть завдання. Продублюйте хід виконання завдання за допомогою скріншоту з екрана. Процедура обов'язково повинна містити: Опис завдання, Способи вирішення завдання, Який і чому було обрано певний ШІ, Головний екран ШІ та встановлені умови розв'язання для ШІ, Результати, Висновок.

3. Зробіть звіт та письмово дайте відповіді на контрольні питання.

ПРИКЛАД

Завдання: використання ШІ для створення конструкції токарного верстата з використанням позаземних технологій.

Головний екран Copilot:



Результат:



ВАРІАНТИ ЗАВДАННЯ:

1) Дослідження алгоритмів оптимізації для адитивних процесів. Дослідження різних алгоритмів оптимізації, таких як генетичні алгоритми або алгоритми машинного навчання, та їх застосування для покращення процесів адитивного виробництва. Завдання включає вибір оптимальних параметрів друку, оптимізацію часу та матеріалів.

2) Розробка системи моніторингу процесу друку. Створення системи моніторингу, яка використовує комп'ютерний зір або аналіз

даних для відстеження якості друку в режимі реального часу. Завдання включає вибір та налаштування відповідних датчиків і створення алгоритмів для аналізу отриманих даних.

3) Створення моделі машинного навчання для прогнозування дефектів друку. Розробка моделі машинного навчання на основі даних про минулі дефекти друку для прогнозування можливих дефектів на новій друкованій продукції. Завдання включає збір та попередню обробку даних, вибір відповідного алгоритму машинного навчання та оцінку якості моделі.

4) Розробка алгоритму для автоматичної підготовки моделі до друку. Розробка алгоритму, який використовує методи машинного навчання для автоматичної підготовки тривимірної моделі до друку на 3D-принтері. Завдання включає сегментацію моделі, визначення оптимального розташування на платформі друку та створення опор.

5) Дослідження методів покращення точності та швидкості друку за допомогою штучного інтелекту: Дослідити різні методи, такі як адаптивне керування температурою або швидкістю, та їх застосування для покращення якості та швидкості друку на 3D-принтері. Завдання включає аналіз впливу різних параметрів на якість та швидкість друку та вибір оптимальних стратегій.

6) Розробка автоматичної системи проектування. Дослідити методи машинного навчання для створення системи, здатної автоматично генерувати концептуальні проекти на основі заданих параметрів та вимог. Завдання включає збір та попередню обробку даних, вибір алгоритмів машинного навчання та розробку системи, здатної генерувати та оцінювати проекти.

7) Створення інструментів для автоматичної генерації варіантів проектних рішень. Розробити програмні засоби, що використовують генетичні алгоритми або інші методи оптимізації для генерації різних варіантів проектних рішень на основі заданих критеріїв. Завдання включає вибір та налаштування алгоритмів оптимізації та створення інтерфейсу для взаємодії з користувачами.

8) Дослідити методи автоматичної оптимізації проекту.

Дослідити різні методи оптимізації, такі як генетичні алгоритми, алгоритми оптимізації з використанням нейронних мереж тощо, та їх застосування для покращення проектних рішень. Завдання включає вибір відповідних критеріїв оптимізації, розробку моделей для оцінки якості проектів та порівняння ефективності різних методів оптимізації.

9) Розробка системи підтримки рішень у проектній діяльності. Розробити систему, здатну аналізувати різні варіанти проектних рішень та пропонувати рекомендації на основі досвіду та знань, отриманих з попередніх проектів, або експертних знань. Завдання включає розробку моделей знань та алгоритмів для прийняття рішень на основі цих моделей.

10) Дослідження застосування методів обробки природної мови в проектній діяльності. Дослідити різні методи обробки природної мови та їх застосування для аналізу та синтезу інформації в проектній діяльності, наприклад, для автоматичного аналізу вимог проекту або для автоматичної генерації текстової документації. Завдання включає вибір відповідних методів обробки природної мови та їх інтеграцію в робочий процес проектування.

11) Оптимізація параметрів виробничого обладнання. Дослідити методи машинного навчання для оптимізації робочих параметрів обладнання, таких як швидкість різання, температура або тиск. Завдання включає збір даних про виробничий процес, розробку моделей для прогнозування якості та продуктивності, а також створення алгоритмів для автоматичної оптимізації параметрів.

12) Прогнозування відмов обладнання. Розробити модель машинного навчання для прогнозування можливих відмов обладнання на основі даних про його стан та історію обслуговування. Завдання включає збір та попередню обробку даних про стан обладнання, вибір відповідних алгоритмів машинного навчання та створення системи моніторингу стану обладнання.

13) Оптимізація процесу контролю якості. Дослідити методи машинного навчання для автоматизації процесу контролю якості

виготовлених деталей. Завдання включає збір даних про якісні характеристики деталей, розробку моделей для визначення відповідності стандартам якості та інтеграцію цих моделей у виробничий процес.

14) Аналіз даних виробничого процесу для виявлення вузьких місць. Аналіз даних виробничого процесу за допомогою методів машинного навчання для виявлення вузьких місць та можливих покращень. Завдання включає збір та попередню обробку даних, виділення ключових виробничих параметрів, застосування методів машинного навчання для визначення взаємозв'язків між ними та продуктивністю.

15) Прогнозування попиту на деталі та оптимізація плану виробництва. Розробіть модель для прогнозування попиту на деталі на основі історичних даних про замовлення та інших факторів, таких як сезонні коливання та ринкові тенденції. Завдання включає збір та аналіз даних про замовлення, розробку моделей прогнозування попиту та створення алгоритмів для оптимізації плану виробництва на основі цих прогнозів.

Контрольні питання:

- 1) Що таке ШІ? Наведіть приклади?
- 2) Що ви знаєте про історію ШІ?
- 3) Які переваги та недоліки використання штучного інтелекту, такого як ChatGPT або Google Bard, в освіті?
- 4) Як використовувати штучний інтелект у навчанні?
- 5) Які переваги та недоліки використання штучного інтелекту в інженерії?

Література

Основна література

1. Vinesh Raja, Kiran J. Fernandes. Reverse engineering: an industrial perspective. - London: Springer, 2008. - 242 p
2. Грабченко А.І., Доброскок В.Л. Сучасні технології матеріалізації комп'ютерних моделей: Навч. посібник. – Х.: НТУ "ХПІ", 2009. – 86 с.
3. Адитивні технології : навч. посіб. / Т. Р. Ганєєв, І. О. Прибителько, М. М. Руденко, І. О. Петренко – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. – 105 с
4. Пупань Л. І. Постпроцеси адитивних технологій: навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної, заочної та дистанційної форм навчання / Л. І. Пупань. – Харків: НТУ «ХПІ», 2023. – 91 с.
5. Манжілевський О. Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування : навчальний посібник / О. Д. Манжілевський, Р. Д. Іскович-Лотоцький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 105 с
6. Srivatsan T. S. Additive Manufacturing: Innovations, Advances, and Applications / T. S. Srivatsan, T. S. Sudarshan. – Boca Raton : CRC Press, 2015. – 460 p.
7. Мاستенко И. В., Стельмах Н. В. Поліпшення механічних властивостей друкованих деталей. – 2018.
8. Griffey, Jason. 3-D The types of 3-D printing / Library Technology Reports, 2017.
9. Пічугіна Ю. В., Максимова Ю. О., Мазур Ю. В. Економіка майбутнього – перспективи розвитку 3D друку в Україні. Регіональна економіка та управління. 2020. №1 (27). С. 65-68.

10. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (І части-на). Наука, технології, інновації. 2017. № 1. С. 68-77.

11. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (ІІ части-на) Наука, технології, інновації. 2017. № 2 (2). С. 29-36.

12. Андрощук Г. О., Копил Я. В. 3D-друк в епоху інноваційних технологій: проблеми регулювання. Інтелектуальна власність в Україні. 2016. № 5. С. 17-26.

13. Гречко О. М. Сучасні адитивні технології та 3D-друк. Огляд останніх досягнень в різних сферах людського життя. Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. 2019. № 1. С. 63-75.

14. Олексієнко С. В., Прибилько І. О., Ганєєв Т. Р., Ганєєва Т. В. Адитивні те-хнології в архітектурі та містобудуванні. Новітні технології у науковій діяльності і навчальному процесі : зб. тез Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих учених, 18-19 берез. 2021 Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2021. С. 40-41.

15. Назаркевич Є. Адитивні технології та 3D моделювання в ювелірному мис-тецтві. Народна творчість та етнологія, 2021, №2(390). С. 113-122.

16. Струтинська О. В. Сучасний стан і перспективи розвитку технологій три-вимірного моделювання та друкування. Науковий часопис НПУ імені М. П. Драго-манова. Серія № 2. Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання. 2018. №20(27). С. 88-94.

17. S. Pradhan, S. Kumar, S. Srivastav Canister Satellite Light Weight Chassis Design using Bio Mimicry of Human Skeleton. International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology. 2023. Vol. 10(5). P. 1-9.

18. 3D друк в умовах біомедичного використання [Електронний ресурс] : кон-спект лекцій з дисципліни «3D друк в умовах біомедичного використання» для сту-дентів спеціальності 163 «Біомедична інженерія» денної та заочної форм навчання / уклад. Б. В. Єфременко. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. – 56 с.

Додаткова література

19. Масючок О.П., Юрженко М.В., Колісник Р.В., Кораб М.Г. Адитивні технології полімерних матеріалів. Автоматичне зварювання. 2020. №5. С.53-60. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.05.08>.

20. Васишин Т., Сорочинський Є. Застосування генеративного дизайну в проєктуванні будівельних конструкцій. Матеріали VI Міжнародної студентської науково-технічної конференції «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання», 2023, с. 36-37.

21. Díaz, G., Herrera R. F., Muñoz-La Rivera F. C., Atencio E. (2021). Applications of generative design in structural engineering. *Revista ingeniería de construcción*, 36(1), 29–47. DOI: 10.4067/s0718-50732021000100029

22. Гривюк О. Технології 3D сканування. Інформаційно-комп'ютерні технології–2018, 2018, 9: 242-245.

23. Топчій Н.В. 3D-сканери. принципи роботи та аналіз сучасного стану. Вчені записки, 2024, 6202425.

24. Солнцев О., Сапон С. Обладнання для гібридних технологій формоутворення виробів з полімерних матеріалів. Технічні науки та технології, 2023, Т. 3(33): С. 9-22.

25. Габовда О.В. Аналіз сучасного стану гібридного адитивного виробництва та перспективийого впровадження в Україні. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 2023, Т. 34(1), С. 1-8

26. Тарасюк Г. М., Чагайда А. О. Проєктування харчових продуктів з використанням технології 3D-і 4D-друку та його значення для розвитку адитивного виробництва. Економіка, управління та адміністрування, 2024, Т. 4 (110): С. 18-24.

27. Kantaros A., Ganetsos T., Piromalis, D. 4D printing: technology overview and smart materials utilized. Journal of Mechatronics and Robotics, 2023, Vol. 7(1), P. 1-14.

28. Diegel O., Nordin A., Motte D. Additive Manufacturing Technologies. A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing, P. 19–39. DOI: 10.1007/978-981-13-8281-9_2.

29. Dilberoglu U. M., Gharehpapagh B., Yaman U., Dolen M. The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0. Procedia Manufacturing, 2017. Vol. 11. P. 545–554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148>

30. Sanjay S., Guha P. M. Optimization of Binder Jetting Using Taguchi Method. Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 2017. Vol. 69, No3. DOI: 10.1007/s11837-016-2231-4.

31. Beth E. Carroll, Todd A. Palmer, Allison M. Beese Anisotropic tensile behavior of Ti–6Al–4V components fabricated with directed energy deposition additive manufacturing. Acta Materialia, 2015. Vol. 87, P. 309–320. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.12.054>

32. Svetlizky D., Das M., Zheng B., Vyatskikh A. L., Bose S., Bandyopadhyay A., Schoenung J. M., Lavernia E. J., Eliaz N. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. Materials Today, 2021. Vol. 49, P.271–295. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2021.03.020>

33. Perez M., Carou D., Rubio E. M., Teti R. Current advances in additive manufacturing. Procedia Cirp, 2020, Vol. 88, P. 439-444 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.076>

34. Colosimo B. M., Qiang H., Tirthankar D., Tsung, Fugee Opportunities and challenges of quality engineering for additive manufacturing. Quality Engineering for Advanced Manufacturing, 2018. Vol. 50, Is. 3. DOI: <https://doi.org/10.1080/00224065.2018.1487726>
35. Singh S., Ramakrishna S., Berto F. 3D Printing of polymer composites: A short review. MDPS, 2020. Vol. 2, P. 97. DOI: <https://doi.org/10.1002/mdp2.97>

Навчально-методична література

36. Тексти (конспект) лекцій з дисципліни «Smart-технології в машинобудуванні» для студентів всіх форм навчання спеціальності G9 «Прикладна механіка» спеціалізації «Технології машинобудування» галузі знань G «Інженерія, виробництво та будівництво» / Укл. П.Р. Тришин – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2025. – 85 с.
37. Методичні рекомендації для самостійної роботи з вивчення дисципліни «Smart-технології в машинобудуванні» для студентів всіх форм навчання спеціальності G9 «Прикладна механіка» спеціалізації «Технології машинобудування» галузі знань G «Інженерія, виробництво та будівництво» / Укл. П.Р.Тришин – Запоріжжя: НУ «За-порізька політехніка», 2025. – 24 с.

Інформаційні ресурси

38. Hybrid Manufacturing & The Future of 3D Printing for Production [Елек-тронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.engineering.com/hybrid-manufacturing-the-future-of-3d-printing-for-production/> (дата звернення: 19.05.2025). – Назва з екрана.
39. What is hybrid manufacturing? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.3dsculplab.xyz/Blog/post/What-is->

[hybrid-manufacturing](#) (дата звернення: 19.05.2025). – Назва з екрана.

40. LUMEX Avance-60 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.lumex-matsuura.com/english/lumex-avance-60> (дата звернення: 19.05.2025). – Назва з екрана.

41. Directed Energy Deposition through Powder Nozzle Select series [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://en.dmgmori.com/products/machines/additive-manufacturing/powder-nozzle/lasertec-65-ded-hybrid> (дата звернення: 19.05.2025). – Назва з екрана.

42. Top 5 Generative Design Tools of 2022 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.archistar.ai/blog/top-5-generative-design-tools-of-2022/#popup-id-31813> (дата звернення: 12.05.2025). – Назва з екрана.

43. The Best Generative Design Software in 2024 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://all3dp.com/1/the-best-generative-design-software/> (дата звернення: 12.05.2025). – Назва з екрана.

44. Featured: Applying cutting-edge generative design in NASA & ESA's Mars Sample Return Mission [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.thenewtoncorp.com/news/generative-design-mars-sample-return-mission> (дата звернення: 12.05.2025). – Назва з екрана.

45. What to Expect from a Personalized Knee or Hip Replacement [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.conformis.com/personalized-knee-and-hip-implants/> (дата звернення: 12.05.2025). – Назва з екрана.

46. MSC Apex Generative Design [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://hexagon.com/fr/products/msc-apex-generative-design> (дата звернення: 12.05.2025). – Назва з екрана.

47. Product design and manufacturing [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.autodesk.com/design-make/pdm> (дата звернення: 12.05.2025). – Назва з екрана.

48. Fishing Pliers Reimagined With Generative Design [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://all3dp.com/4/fishing-pliers-reimagined-with-generative-design/> (дата звернення: 12.05.2025). – Назва з екрана.

49. Automated CAE for rear axle concepts [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.synera.io/focused-case-study/automated-cae-for-rear-axle-concepts> (дата звернення: 12.05.2025). – Назва з екрана.