МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. Потебні
ЗАПОРІЗЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРОНІКИ, ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

на тему **Дослідження алгоритмів розрахунку вартості 3D–друку з урахуванням геометричної складності моделі**

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1214-пзс-2
спеціальності 121 Інженерія програмного забезпечення
(код і назва спеціальності)
освітньої програми Інженерія програмного забезпечення
(код і назва освітньої програми)
М.А. Божедомов
(ініціали та прізвище)
Керівник доцент, к.т.н., О.М.Міхайлуца
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)
Рецензент Директор ТОВ «Дісітел»
П.О.Лютий
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Запоріжжя
2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. Потебні
ЗАПОРІЗЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Кафедра Електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення

Рівень вищої освіти _____другий (магістерський)_____

Спеціальність ___121_Інженерія програмного забезпечення_____
(код та назва)

Освітня програма ___Інженерія програмного забезпечення
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри_____Т.В. Критська_____
"_01_" __квітня_____2025_року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Божедомову Михайлу Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1.Тема роботи Дослідження алгоритмів розрахунку вартості 3D–друку з урахуванням геометричної складності моделі

керівник роботи Міхайлуца Олена Миколаївна, доцент, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від 28.03. 2025 р. №361-е

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи 1 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані магістерської роботи

- комплект нормативних документів ;
- технічне завдання до роботи.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

- огляд та збір літератури стосовно теми кваліфікаційної роботи;
- огляд та аналіз існуючих рішень та аналогів;
- дослідження технологій, методів та засобів проєктування систем для розрахунку вартості 3D-друку з урахуванням геометричної складності моделі;
- створення програмного продукту та його опис;
- перелік вимог для роботи програми;
- дослідження поставленої проблеми та розробка висновків та пропозицій.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

слайдів презентації

6. Консультанти розділів магістерської роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 01.04.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів магістерської роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області	01.04-13.04. 25	виконано
2	Формулювання основної задачі та гіпотез	14.04-27.04. 25	виконано
3	Аналіз існуючих методів розрахунку вартості	28.04-11.05. 25	виконано
4	Аналіз методів кількісної оцінки геометричної складності	12.05-25.05.25	виконано
5	Розробка структури власного алгоритму	26.05-15.06.25	виконано
6	Реалізація модуля обробки 3D-моделей	16.06-06.07.25	виконано
7	Реалізація алгоритму оцінки складності	07.07-20.07.25	виконано
8	Інтеграція алгоритму розрахунку вартості	21.07-03.08.25	виконано
9	Реалізація користувацького інтерфейсу	04.08-20.08.25	виконано
10	Розробка тестових моделей	21.08-11.09.25	виконано
11	Порівняльний аналіз та верифікація	12.09-28.09.25	виконано
12	Усунення додаткових проблем та «багів»	29.09-12.10.25	виконано
13	Аналіз результатів та формулювання висновків	13.10-26.10. 25	виконано
14	Оформлення звіту	27.10-10.11. 25	виконано

Студент _____ М.А. Божедомов
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ О.М. Міхайлуца
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ І.А. Скрипник
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Сторінок: 71

Рисунків: 19

Таблиць: 3

Джерел: 24

Божедомов М. А. Дослідження алгоритмів розрахунку вартості 3D–друку з урахуванням геометричної складності моделі: кваліфікаційна робота магістра спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення» / наук. керівник О. М. Міхайлуца. Запоріжжя : ЗНУ, 2025. 71с.

Мета роботи полягає у дослідженні методів визначення собівартості та кінцевої вартості 3D-друку залежно від матеріалів, технології, складності моделі та часу виконання, а також у створенні програмного рішення для автоматизації цього процесу.

Предметом дослідження є алгоритми розрахунку вартості 3D-друку та програмні інструменти для їх реалізації в середовищі користувача.

У процесі дослідження були проаналізовані основні чинники, що впливають на ціну 3D-друку, існуючі системи комерційного розрахунку та розроблено власний застосунок, який дозволяє автоматизовано оцінювати вартість друку на основі введених параметрів: тип матеріалу, об’єм моделі, час друку, енергоспоживання та витрати на обслуговування обладнання.

Ключові слова: 3D-друк, FDM, розрахунок вартості, програмне забезпечення, собівартість, автоматизація, Python.

SUMMARY

Pages: 71

Figures: 19

Tables: 3

Sources: 24

Bozhedomov M. A. Development of Software for 3D Printing Cost Calculation: master's thesis of specialty 121 "Software engineering" / Science head O. M. Mikhailutsa. Zaporizhzhia: ZNU, 2023. 71 p.

The aim of this work is to study methods for determining the cost and final price of 3D printing depending on materials, technology, model complexity, and printing time, as well as to develop a software solution for automating this process.

The subject of the study is algorithms for calculating the cost of 3D printing and software tools for their implementation in a user-friendly environment.

During the research, key factors affecting 3D printing cost were analyzed, existing commercial pricing systems were reviewed, and a custom application was developed to automatically estimate printing costs based on input parameters such as material type, model volume, printing time, energy consumption, and equipment maintenance expenses.

Keywords: 3D printing, FDM, cost calculation, software, production cost, automation, Python.

ЗМІСТ

ВСТУП 8
1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ У РОЗРАХУНКУ ВАРТОСТІ 3D-ДРУКУ 12
1.1 Огляд проведених досліджень та наукових джерел 12
1.2 Огляд існуючих алгоритмів оцінки вартості FDM-3D-друку 14
1.3 Розрахунок вартості матеріалів, машино-годин, постобробки та інфраструктури 17
1.4 Огляд існуючих підходів та недоліки практичного впровадження 18
1.5 Пропозиція покращеного алгоритму та фреймворку з урахуванням геометричної складності 24
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ РОЗРАХУНКУ ВАРТОСТІ 3D-ДРУКУ 26
2.1 Фактори, що формують вартість 3D-друку 26
2.2 Методи автоматизованого аналізу CAD/STL-моделей 28
2.3 Програмні засоби та алгоритми планування для оцінки вартості 3D-друку 29
3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ВАРТОСТІ 3D-ДРУКУ 32
3.1 Загальний опис та архітектура системи 32
3.2 Використані технології 33
3.3 Архітектура бази даних 34
3.4 Функціональні модулі системи 38
3.5 REST API 42
3.6 Формули розрахунку вартості 44
3.7 Користувацький інтерфейс 52
4 ОЦІНКА ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ВАРТОСТІ ВИРОБІВ, СТВОРЕНИХ МЕТОДОМ 3D-ДРУКУ 58

4.1 Модуль управління запасами (Stock Management) 58
4.2 Модуль автоматизованого обліку філамента, інтегрований із програмним середовищем 60
4.3 Практичне застосування в 3D-друкарні OH MY STAND 62
4.4 Вплив точного розрахунку собівартості на прибутковість бізнесу 64
ВИСНОВКИ 67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 69

ВСТУП

Актуальність теми

У сучасному виробничому середовищі технологія адитивного виробництва (3D друк) набуває все більшого значення як інструмент швидкого створення складних форм, кастомізованих деталей, прототипів та кінцевих виробів. Починаючи з 2010-х років, 3D друк перестав бути лише експериментальною технологією і став одним із ключових напрямів цифрової трансформації виробничих процесів. Його поява спричинила справжню революцію у підходах до створення фізичних об’єктів — від швидкого прототипування до повноцінного виготовлення готових виробів.

Зокрема, геометрична складність моделі — тонкі стінки, внутрішні порожнини, lattice-структури, надскладні поверхні — стає ключовим фактором, що впливає на час друку, витрату матеріалу, енергію, підтримувальні структури та, як наслідок, на кінцеву вартість виробу. Наприклад, дослідження показують, що при адитивному виробництві збільшення геометричної складності не завжди прямо пропорційно веде до зростання вартості, але чинить значущий вплив на ресурсне навантаження процесу. [13]

Водночас, проблема точного й економічно обґрунтованого розрахунку вартості 3D-друку залишається невирішеною через низку причин: багато підходів і калькуляторів враховують лише матеріал, час друку, енергію та амортизацію обладнання, але недостатньо — геометричну складність моделі як окремий параметр [10, 15].

З огляду на це, актуальним є дослідження проблеми розрахунку вартості 3D-друку з урахуванням геометричної складності моделі, оскільки підвищення складності моделей та зростання застосування адитивного виробництва у масовому й серійному виробництві вимагає точніших підходів до ціноутворення, ніж це забезпечують традиційні калькулятори. Адекватне врахування геометричної

складності дозволяє оптимізувати дизайн виробів для адитивних технологій, підвищити ефективність процесів і конкурентоспроможність підприємств. Крім того, для бізнес-моделей і сервісних провайдерів у сфері 3D-друку більш точні розрахунки вартості створюють основу для прозорого ціноутворення, ефективного планування виробництва, інвестування в обладнання та вибору оптимальних технологій.

Отже, обрана тема дослідження має науково-практичне значення, бо дозволяє розробити або вдосконалити методики оцінки вартості виробництва деталей методом 3D-друку з урахуванням одного з найбільш «скритих» факторів — геометричної складності, що наразі недостатньо представлений у дослідницькій та прикладній літературі.

Мета роботи

Мета роботи полягає у дослідженні впливу геометричної складності 3D-моделі на процес розрахунку вартості 3D-друку, а також у розробці підходу, що дозволить підвищити точність оцінки собівартості виготовлення деталей методом адитивного виробництва.

Об’єкт дослідження

Об’єктом дослідження є процес розрахунку вартості виготовлення виробів за допомогою адитивних технологій (3D-друку).

Предмет дослідження

Предметом дослідження є методи оцінювання вартості 3D-друку з урахуванням параметрів геометричної складності моделі, таких як кількість полігонів, наявність внутрішніх порожнин, площа поверхні та об’єм виробу.

Методи дослідження

Для вирішення поставлених завдань у роботі використовуються такі методи дослідження:

1. Аналіз наукових публікацій і технічної документації, присвячених розрахунку вартості 3D-друку;
2. Порівняльний аналіз існуючих підходів до калькуляції собівартості адитивного виробництва;
3. Експериментальні методи для оцінки впливу геометричної складності моделі на час друку та споживання матеріалу;
4. Статистичні методи для узагальнення отриманих результатів та формування емпіричної залежності між параметрами моделі й вартістю друку.

Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна полягає у врахуванні геометричної складності 3D-моделі як окремого вагомого параметра під час формування методики розрахунку вартості адитивного виробництва. У роботі запропоновано підхід, що дозволяє підвищити точність оцінки собівартості друку шляхом використання геометричних характеристик моделі та їхнього зв’язку з технологічними параметрами процесу.

Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення полягає в можливості застосування отриманих результатів для створення програмних засобів або калькуляторів вартості 3D-друку, які більш точно оцінюватимуть собівартість виробів. Це дозволить підприємствам і сервісним компаніям оптимізувати ціноутворення, планування виробничих процесів та підвищити ефективність використання обладнання й матеріалів.

Апробація результатів

Основні положення та результати дослідження були представлені на Міжнародній науково-практичній конференції Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні ЗНУ «Інновації в обліково-фінансовій сфері та інженерії різних галузей економіки» (Запоріжжя, 2025 р.), а також обговорювалися на студентських наукових семінарах кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення.

Глосарій

3D-друк (адитивне виробництво) — технологія створення тривимірних об’єктів шляхом послідовного нашарування матеріалу відповідно до цифрової моделі.

STL-файл — стандартний формат збереження тривимірних моделей, що описує поверхню об’єкта за допомогою трикутних полігонів.

Геометрична складність моделі — сукупність параметрів, які характеризують складність форми 3D-об’єкта: кількість вершин і граней, криволінійність, наявність порожнин, дрібних елементів тощо.

Собівартість 3D-друку — загальна вартість виготовлення об’єкта, що включає витрати на матеріали, енергію, амортизацію обладнання, оплату праці та інші супутні витрати.

G-код — набір команд, що визначає рух друкарської головки та параметри процесу під час 3D-друку.

Слайсер — програмне забезпечення, яке перетворює 3D-модель у G-код для друку на 3D-принтері.

Матеріал для друку (філамент, смола, порошок) — сировина, що використовується у процесі адитивного виробництва.

1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ У РОЗРАХУНКУ ВАРТОСТІ 3D-ДРУКУ

1.1 Огляд проведених досліджень та наукових джерел

У сучасному виробничому середовищі технологія адитивного виробництва (3D-друк) дедалі більше використовується для швидкого створення складних форм, персоналізованих компонентів та прототипів, що породжує потребу у точному розрахунку собівартості виробництва. З одного боку, значна кількість робіт розглядає базові витрати — матеріал, час друку, енергію, амортизацію обладнання. З іншого — аспект «геометричної складності моделі» (наприклад: кількість граней, криволінійність, внутрішні порожнини, заповнення, тонкі стінки) щодо впливу на вартість залишається досить слабо окресленим.

Наприклад, в роботі [5] розглянуто взаємозв’язок між заповненням обсягу будівельної камери та витратами виробництва методом DMLS. Авторами встановлено, що одинична вартість виробу може бути в середньому завищена на 157 % через неповне завантаження камери. Хоча ця робота не фокусувалася спеціально на геометричній складності частини, вона підкреслює, що форма й спосіб розміщення деталі в камері впливають на економіку процесу.

У статті [7] досліджено вплив складності форми (через індекс «complexity factor») на вартість виготовлення методом піскового 3D-друку форм і стрижнів. Автори показують, що при високій складності моделей 3D-друк за певних умов стає економічно вигіднішим порівняно з традиційним литтям. Ця праця прямо демонструє важливість геометричної складності, але її застосування обмежене до спеціалізованої технології (пісковий друк).

Адитивне виробництво дає велику свободу дизайну і часто вважається, що складність форми майже не впливає на вартість, на практиці все ж існують

складності, які впливають на весь життєвий цикл виробу — включно з підготовкою, постобробкою, витратами на обладнання [4].

У дослідженні [20] створено модель витрат для технології FDM (екструзія пластика) з урахуванням параметрів як матеріал, час друку, кількість партій. Хоч геометрична складність моделі не акцентована, цей підхід дозволяє побачити, як вартості змінюються залежно від виробничого масштабу та технологічних параметрів.

Огляд джерел також включає дослідження, що пропонує методику «Design 2 Cost» для порівняння складності та вартості між субтрактивним та адитивним виробництвом. У цьому методі складність частини виражена через морфологічні критерії (наприклад, octree-поділ геометрії) і застосована для економічного порівняння [9]. У статті [17] розроблено індекс складності 3D-моделі на основі методів розпізнавання ознак (feature recognition) CAD/STL-файлів. Цей підхід поєднує правило-орієнтовані та граф-орієнтовані алгоритми для аналізу геометрії моделі, що дозволяє кількісно оцінити її складність з урахуванням таких факторів, як кількість елементів (features), топологія, взаємне розташування частин, а також наявність внутрішніх порожнин та складних криволінійних поверхонь. Розроблений індекс забезпечує більш точну оцінку витрат на 3D-друк, оскільки геометрична складність моделі безпосередньо впливає на час друку, витрати матеріалу та необхідність використання підтримок. Автори зазначають, що застосування цього підходу дозволяє стандартизувати порівняння складності різних моделей і створює основу для автоматизованих систем калькуляції вартості 3D-друку, що важливо як для виробничих підприємств, так і для дослідницьких лабораторій. Крім того, індекс може бути інтегрований у програмне забезпечення для попереднього планування виробництва, що дозволяє оптимізувати як матеріальні, так і часові ресурси.

Отже, узагальнюючи, можна зазначити, що існує достатня база досліджень, які розглядають витрати 3D-друку з урахуванням технологій, матеріалів

та масштабу виробництва. Водночас питання кількісної оцінки геометричної складності моделі та її прямого впливу на собівартість друку досліджено значно менше. Деякі роботи вже інтегрують геометричні параметри або індекси складності, проте загальної універсальної методики поки що не сформовано, що створює наукову та практичну нішу для розробки підходу, який дозволить враховувати геометричні характеристики моделі, такі як кількість граней, площа поверхні, внутрішні порожнини, заповнення та підтримки, у моделі калькуляції вартості для 3D-друку.

1.2 Огляд існуючих алгоритмів оцінки вартості FDM-3D-друку

Оцінка собівартості у FDM-3D-друку є важливою задачею при організації малих виробництв та сервісів друку на замовлення. На відміну від традиційних технологій, FDM-друк має велику кількість змінних параметрів — швидкість, висоту шару, температуру, кількість периметрів, заповнення, — які безпосередньо впливають на тривалість процесу, витрати матеріалу та енергоспоживання. Тому точний розрахунок вартості вимагає поєднання технічної та економічної моделей.

Базова економічна модель

Найпростішим підходом до визначення вартості є адитивна модель повної собівартості:

$$C_{totl} = C_{mat} + C_{el} + C_{amort} + C_{labor} + C_{add} + OH + P,$$

де: $C_{mat} = m \times P_{mat}$ — вартість використаного філаменту;

m — маса використаного матеріалу (кг);

P_{mat} — ціна за 1 кг філамену;

$C_{el} = t \times W \times P_{kWh}$ — вартість електроенергії; t — час друку (год);

W — середнє електроспоживання (кВт);

P_{kWh} — тариф за електроенергію;

$C_{amort} = t / R_{amort}$ — амортизаційні витрати на знос принтера;

R_{amort} — ресурс обладнення (год), на який розподіляється амортизація;

$C_{labor} = (t_{setup} + t_{post}) / R_{hr}$ — вартість часу оператора;

t_{setup} — час налаштування;

t_{post} — час постобробки;

R_{hr} — погодинна ставка оператора;

C_{add} — витрати на підготовку, очищення, видалення підтримок, пакування;

$C_{add} = C_{prep} + C_{clean} + C_{\text{sup}\,ports} + C_{pack}$;

OH — накладні витрати (оренда, інтернет, бухгалтерія тощо);

P — запланований прибуток;

$P = C_{total} \times M$; M — цільова маржа (коефіцієнт).

Параметрична модель на основі G-code

Для точного визначення вартості у FDM-друці доцільно використовувати параметри, отримані безпосередньо з G-code-файлу:

довжина екструзії L;

витрата філаменту $m = L \times A_{fil} \times \rho$;

L — довжина екструзії;

A_{fil} — площа перерізу філаменту;

ρ — густина матеріалу;

час друку t розрахований слайсером;

середня потужність нагрівачів і рухових систем W.

Дані можуть зчитуватися автоматично з G-code (наприклад, через аналіз команди $G1$ або звіти слайсера).

Activity-Based Costing (ABC) для FDM

Метод розподілу витрат за видами діяльності використовується для урахування операцій, які не описуються G-кодом — наприклад, встановлення деталі на стіл, видалення підтримок, контроль якості.

$$C_{abc} = \sum_{k=1}^{n} (r_k \cdot d_k),$$

де r_k — вартість одиниці активності (грн/год), d_k — обсяг спожитого ресурсу (час, кількість деталей тощо).

Приклад активностей: підготовка робочої зони — 5 хвилин; налаштування принтера — 10 хвилин; постобробка — 15 хвилин; контроль якості — 5 хвилин. Загальний час множиться на погодинну ставку працівника.

Динамічне ціноутворення залежно від терміновості

Для комерційних FDM-сервісів доцільно враховувати термін виконання замовлення.

Корекція ціни здійснюється за формулою:

$$C_{labor} = (t_{setup} + t_{post}) \cdot R_{hr};$$

$$C_{final} = C_{base}\left(1 + \frac{\beta}{\varphi(T_{deadline})}\right),$$

де C_{base} — базова вартість; β — коефіцієнт терміновості;

$\varphi(T_{deadline})$ — час до дедлайну.

Комбінована модель для FDM

На основі аналізу доцільно застосовувати комбінований підхід, що поєднує: параметричний розрахунок (G-code → матеріал, час, електроенергія); ABC-модуль (операційні витрати); динамічну надбавку за терміновість чи складність; амортизаційний блок, що враховує знос принтера залежно від часу друку.

Загальна формула:

$$C_{totl} = \left(C_{mat} + C_{el} + C_{amort} + C_{abc}\right) \cdot \left(1 + \beta\right),$$

де β — коефіцієнт націнки або терміновості.

Такий підхід забезпечує баланс між точністю та простотою впровадження і є оптимальним для автоматизованих веб-калькуляторів собівартості FDM-друку.

1.3 Розрахунок вартості матеріалів, машино-годин, постобробки та інфраструктури

Розрахунок вартості 3D-друку є ключовим етапом при плануванні виробництва, оскільки дозволяє визначити економічну доцільність виготовлення виробу, оцінити собівартість та сформувати кінцеву ціну продукту. За результатами досліджень, собівартість 3D-друку складається з кількох основних компонентів: вартості матеріалів, машинного часу, витрат на постобробку, енергоспоживання та загальної інфраструктури виробництва [3].

Вартість матеріалів у більшості випадків становить від 30 до 60% загальної собівартості друку [6]. Вона визначається типом полімеру, металу або композиту, який використовується, а також рівнем втрат матеріалу під час процесу. Для термопластів (PLA, ABS, PETG) витрати є відносно низькими, тоді як для металевих порошків (наприклад, титанових або нікелевих сплавів) вартість може бути у 10–15 разів вищою [12]. Також враховується коефіцієнт використання матеріалу (Material Utilization Ratio), який описує, яка частина матеріалу фактично йде у виріб, а яка — у відходи [19].

Машино-години або час роботи 3D-принтера формують другу велику частину витрат. Вартість машино-години залежить від типу обладнання (FDM, SLA, SLS, DMLS тощо), його потужності, рівня зносу та амортизації. Машинний час розраховується з урахуванням середньої вартості обслуговування, електроспоживання, вартості витратних матеріалів (насадки, лазери, фільтри) та амортизації

обладнання. Для промислових принтерів ціна машино-години може коливатися від 10 до 150 доларів США залежно від технології [3].

Окремо враховуються витрати на постобробку, яка включає очищення поверхонь, видалення підтримуючих структур, полірування, термічну або хімічну обробку, фарбування та інші операції, необхідні для досягнення готового вигляду виробу [8]. Постобробка може займати до 30–40% загального часу виготовлення моделі, а її вартість становить до 25% від загальної ціни виробу. Ці показники залежать від складності геометрії, обраних матеріалів та вимог до якості поверхні.

Витрати на інфраструктуру охоплюють підтримку виробничого середовища — оренду приміщень, охолодження, вентиляцію, обслуговування обладнання, програмне забезпечення, а також оплату праці персоналу. Згідно з дослідженням, ці витрати мають сталу складову, яка розподіляється між усіма замовленнями. Наприклад, для малих виробництв 3D-друку частка інфраструктурних витрат може становити до 20% собівартості, тоді як для великих підприємств — менше 10%, завдяки ефекту масштабу.

1.4 Огляд існуючих підходів та недоліки практичного впровадження

На сучасному ринку 3D-друку існує кілька програмних рішень, які дозволяють проводити попередню оцінку вартості виготовлення деталі, враховуючи матеріал, час друку та основні витрати на обладнання.

3D Printing Cost Calculator

Одним із сучасних веб-інструментів для визначення вартості адитивного виробництва є сервіс 3DPrintingCostCalculator, який надає користувачеві можливість сформувати детальну калькуляцію на основі комплексного набору параметрів. Цей ресурс орієнтований на користувачів, які прагнуть отримати максимальну деталізацію структури витрат, включаючи матеріал, час роботи обладнання,

електроенергію, ручну працю та низку додаткових операційних витрат. Інструмент дозволяє вводити вагу моделі, витрату матеріалу, тривалість друку, тариф на електроенергію, а також задавати власні ставки на роботу оператора чи додаткові процеси. Сервіс підтримує збереження декількох профілів принтерів та налаштувань матеріалів, що робить його зручним для регулярного використання у невеликих виробництвах або майстернях. Інтерфейс програмного застосунку наведено на відповідному рисунку (див. Рис. 1.1).

Водночас сервіс має низку обмежень. Зокрема, він не враховує складність геометрії моделі, кількість підтримок чи особливості внутрішніх порожнин, що може суттєво впливати на реальний час друку та обсяг постобробки. Значна частина вхідних даних потребує ручного введення, що підвищує ризик неточностей при обчисленні. Крім того, інтерфейс містить велику кількість полів і налаштувань, що може ускладнювати використання для недосвідчених користувачів.

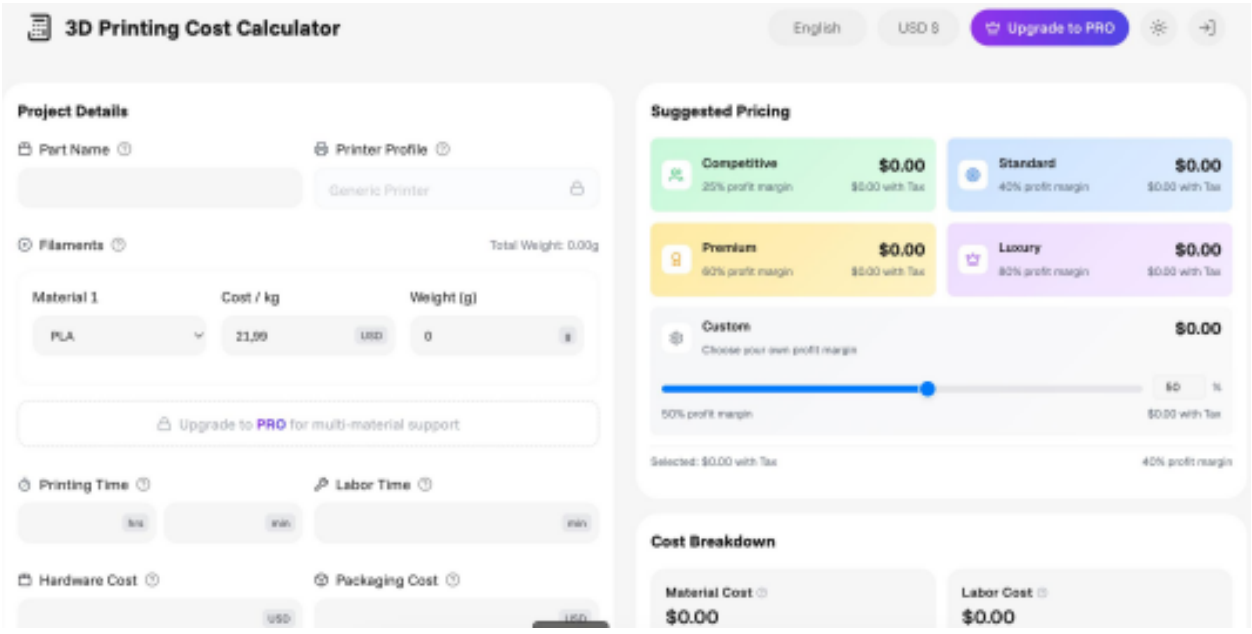


Рисунок 1.1 — Інтерфейс сервісу 3D Printing Cost Calculator

3DFils 3D Printing Cost Calculator

Калькулятор 3DFils пропонує більш комплексну модель оцінки, порівняно зі спрощеними онлайн-інструментами, оскільки враховує не лише витрати на матеріал, а й електроенергію та частину операційних витрат, пов’язаних з експлуатацією обладнання. Завдяки підтримці як філаментів, так і рідких смол цей інструмент підходить для ширшого кола задач, а його простий та логічний інтерфейс робить використання зручним для користувачів із різним рівнем підготовки. Разом із тим калькулятор має свої недоліки. Він не оцінює складність геометрії моделі, не аналізує кількість підтримок, внутрішні структури чи потенційні витрати на постобробку, що знижує точність фінальних розрахунків. Частину параметрів, зокрема витрати на ручну працю та технічне обслуговування, користувач повинен визначати самостійно, що може призводити до суб’єктивності результатів. Крім того, інструмент не передбачає можливості створення профілів принтера або порівняння моделей, тому його доцільніше використовувати для побутових або напівпрофесійних задач, а не для повноцінного виробничого планування.

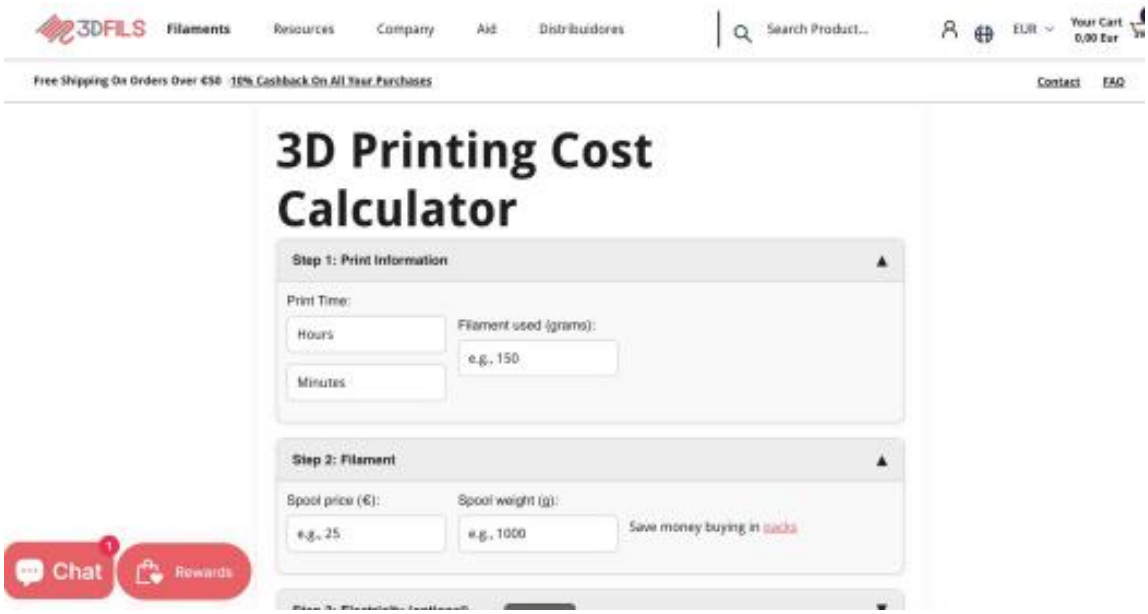


Рисунок 1.2 — Інтерфейс програмного застосунку *3DFils 3D Printing Cost Calculator*

Volaryx 3D Print Cost Calculator

Volaryx 3D Print Cost Calculator є комерційним програмним рішенням, розробленим для B2Bсервісів у сфері 3Dдруку та друкарень, яке дозволяє клієнтам завантажувати STL або STEP файли і отримувати миттєву оцінку вартості друку. Програма пропонує інтеграцію калькулятора безпосередньо на веб-сайт через iframe, що не вимагає спеціальних навичок програмування. Клієнт завантажує модель, обмежену приблизно 200 МБ, після чого система аналізує параметри моделі, такі як об’єм, вибраний матеріал та налаштування друку, і надсилає оцінку вартості на електронну пошту. Для компаній доступні широкі можливості налаштування, включно з вибором матеріалів, встановленням тарифів, мінімальної ціни, налаштуванням знижок за кількістю, врахуванням VAT та орієнтовними термінами доставки. Модель оплати передбачає підписку на 59 € на місяць або 499 € на рік, з 14денним безкоштовним пробним періодом, що дозволяє компаніям оцінити функціонал перед придбанням.

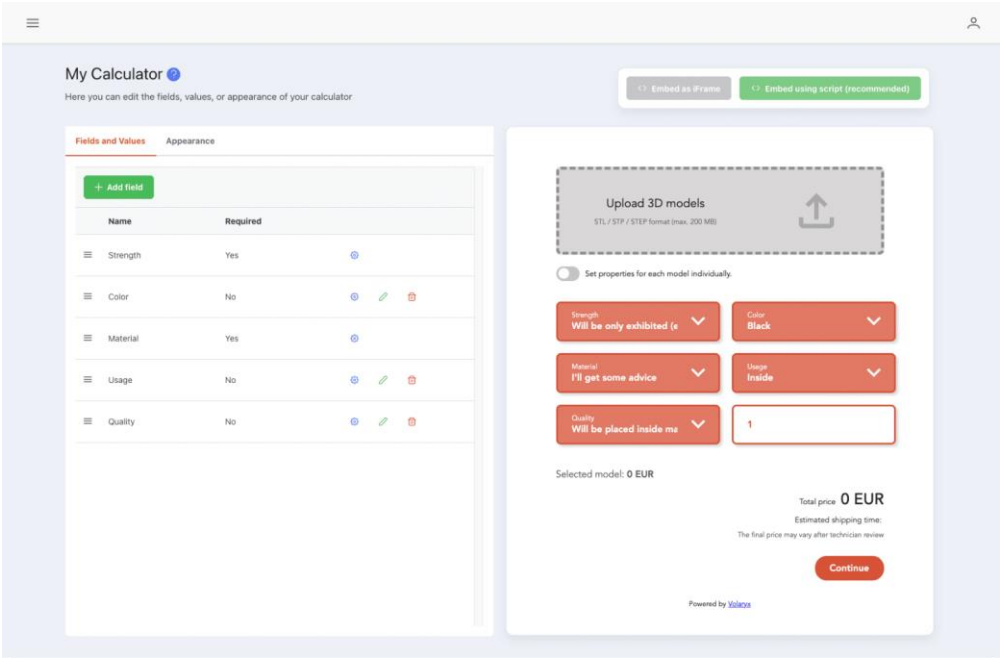


Рисунок 1.3 — Інтерфейс програмного застосунку «Volaryx»

Незважаючи на очевидні переваги, Volaryx має певні обмеження. Хоча користувач може завантажувати файли, видима інформація про геометричну складність моделі, наприклад, кількість полігонів або внутрішні порожнини, не відображається публічно, що обмежує точність оцінки складних конструкцій. Крім того, тарифікація часто визначається сервісом вручну, що створює обмеження для клієнтів із нестандартними або великими замовленнями. Система зазвичай не враховує витрати на людинопогодини, роботу з підготовки моделі до друку або постобробку виробу; такі витрати додаються як загальні множники, що може знижувати точність кінцевого розрахунку. Тому, хоча Volaryx є потужним інструментом для швидкого прорахунку вартості друку, він має обмеження при роботі з дуже складними моделями або при необхідності інтеграції всіх факторів виробничого процесу в оцінку.

ResinCalc

ResinCalc спеціалізується на розрахунку вартості як для філаментів, так і для рідких смол. Ця програма дозволяє користувачу вводити обсяг матеріалу, тривалість друку та тариф на електроенергію, а також орієнтовні витрати на використання обладнання. Інтерфейс ResinCalc простий і дозволяє швидко отримати загальну суму прямих витрат, що значно полегшує попередню калькуляцію. Водночас, незважаючи на очевидні переваги, програма не враховує вплив складності геометрії моделі на час друку, кількість необхідних підтримок чи витрати на постобробку, а введення даних залишається майже повністю ручним, що може призводити до неточностей у фінальній оцінці.

PrintCalc

PrintCalc — калькулятор, який надає користувачеві можливість вводити не тільки вагу матеріалу та час друку, а й рівень складності моделі. Користувач може обрати одну з умовних категорій складності — «Simple», «Normal» або «Complex» — і на цій основі програма формує орієнтовну ціну. Цей підхід дозво-

ляє хоча б частково враховувати вплив геометрії деталі, проте категорії складності досить абстрактні і не дають точного аналізу внутрішніх порожнин, кількості граней чи площі поверхні моделі. Таким чином, користувачу все одно доводиться робити значну частину розрахунків самостійно, і точність оцінки залежить від суб'єктивного визначення складності.

Проте недоліки такого підходу значні. По-перше, категорії складності не враховують детальні геометричні параметри моделі, такі як кількість граней, площа поверхні, внутрішні порожнини, тонкі стінки або наявність підтримок, що безпосередньо впливає на час друку та витрати матеріалу. По-друге, відсутність інтеграції з автоматичним аналізом файлів STL або CAD означає, що багато даних доводиться вводити вручну, що підвищує ризик помилок і знижує точність розрахунків. По-третє, такі програми зазвичай не враховують вплив складності конструкції на потребу в постобробці або на амортизацію обладнання, що може суттєво збільшувати фактичні витрати. Через ці обмеження отримана оцінка вартості часто залишається приблизною і не завжди відображає реальні витрати на друк складних моделей.

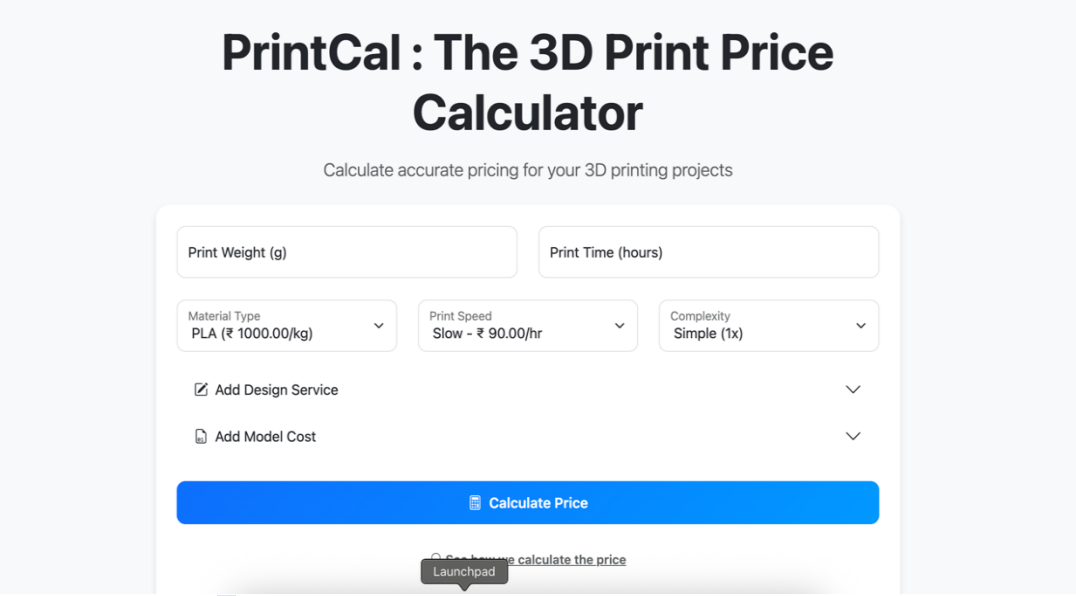


Рисунок 1.4 — Інтерфейс програмного застосунку «Printcalc»

Таким чином, підхід із абстрактною категорією складності підходить для швидкого попереднього планування і для простих моделей, але він не може замінити детальний аналіз для складних або критично точних виробів, де необхідно враховувати всі параметри геометрії, матеріалу та виробничих витрат.

1.5 Пропозиція покращеного алгоритму та фреймворку з урахуванням геометричної складності

Пропозиція покращеного алгоритму та фреймворку з урахуванням геометричної складності моделей 3D-друку передбачає створення більш точного та гнучкого підходу до розрахунку вартості виробів, який враховує не лише обсяг і матеріал, а й складність геометричної конструкції моделі. Існуючі комерційні рішення, такі як Volaryx, 3DFils або 3D Printing Cost Calculator дозволяють швидко оцінити вартість на основі об’єму та вибраного матеріалу, однак вони не завжди враховують кількість полігонів, внутрішні порожнини, тонкі стінки або деталі, що значно впливають на час друку та витрати матеріалу.

Запропонований алгоритм передбачає комплексну оцінку геометричних параметрів STL- або STEP-файлів за допомогою спеціалізованих скануючих модулів. Перший етап включає аналіз моделі на наявність критичних елементів, таких як надтонкі стінки, складні внутрішні порожнини та з’єднання, що потребують підтримок. Потім ці характеристики переводяться в числові коефіцієнти, які впливають на розрахунок машино-годин, кількості матеріалу та часу постобробки. Таким чином, алгоритм забезпечує більш точне прогнозування витрат і дозволяє уникнути перевитрат матеріалу чи непотрібного подовження часу друку.

Фреймворк пропонує модульну архітектуру, що включає окремі блоки для обробки геометрії, розрахунку матеріалів і часу, а також для генерації фінального кошторису. Користувач може інтегрувати його в існуючі системи управління ви-

робництвом або веб-калькулятори для клієнтів, що дозволяє забезпечити прозорість і точність оцінок без значного додаткового навантаження на персонал. Окрім цього, фреймворк передбачає можливість налаштування тарифів під різні матеріали, типи принтерів та складність конструкцій, що робить його універсальним інструментом для малих, середніх і великих 3D-друкарень.

Впровадження такого алгоритму та фреймворку дозволить поєднати переваги автоматизації з високою точністю оцінки, зменшити вплив людського фактора на розрахунок вартості та підвищити ефективність планування виробництва, особливо при роботі зі складними геометричними моделями, що значно перевищують базові показники об’єму та ваги.

Запропонована пропозиція покращеного алгоритму та фреймворку спрямована на подолання ключового недоліку існуючих комерційних рішень для 3D-друку — ігнорування геометричної складності моделей.

Впровадження даного алгоритму та модульного фреймворку дозволить створити більш точний, прозорий та гнучкий механізм ціноутворення для послуг 3D-друку. Це досягається завдяки комплексній оцінці критичних геометричних параметрів (таких як тонкі стінки, порожнини, кількість полігонів та необхідність у підтримках), які перетворюються на числові коефіцієнти для коригування розрахунку машино-годин і матеріальних витрат.

Реалізація цього підходу забезпечить такі ключові переваги:

- Зменшення ризику перевитрати матеріалу та часу друку, особливо для складних моделей.
- Поєднання автоматизації оцінки з високою точністю, зменшуючи вплив людського фактора.
- Модульна архітектура дозволяє легко інтегрувати фреймворк в існуючі системи та налаштовувати тарифи під різні матеріали, принтери та рівні складності.

.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ РОЗРАХУНКУ ВАРТОСТІ 3D-ДРУКУ

2.1 Фактори, що формують вартість 3D-друку

Формування вартості 3D-друку є складним багатофакторним процесом, у якому поєднуються технічні, матеріальні та організаційні аспекти виробництва. Цей процес не зводиться лише до ціни матеріалу, адже кінцева собівартість виробу визначається цілим ланцюгом взаємопов’язаних параметрів, що впливають один на одного.

Насамперед ключову роль відіграє тип матеріалу. Полілактид (PLA) і акрилонітрил-бутадієн-стирол (ABS) належать до найбільш доступних видів пластиків, які використовуються у технології FDM. Їхня вартість коливається в межах 15–30 $/кг. Натомість фотополімерні смоли для SLA чи DLP-друку коштують у кілька разів дорожче — від 70 до 150 $/л, а порошкові матеріали для SLS чи металічні сплави для DMLS можуть сягати сотень доларів за кілограм [3, 12]. Вибір матеріалу безпосередньо впливає на властивості готового виробу — міцність, гнучкість, термостійкість — що, своєю чергою, зумовлює вибір технології та підхід до друку.

Другим важливим компонентом є обсяг і вага моделі. Чим більший виріб, тим більше матеріалу потрібно для друку, що автоматично підвищує витрати не лише на сировину, а й на енергоспоживання, машинний час та охолодження обладнання. У промисловому 3D-друці цей параметр може стати вирішальним, особливо при серійному виробництві, де навіть невелика різниця в масі кожної деталі масштабно впливає на загальну собівартість партії.

Третім фактором є вибір технології друку. У FDM-принтерах процес є відносно дешевим, але менш точним; натомість SLA забезпечує високу деталізацію, проте має значно більшу вартість матеріалів і довший цикл обслуговування. SLS

та DMLS — це промислові технології, що потребують високотемпературного обладнання, контролю атмосфери та професійного калібрування, що значно збільшує собівартість виробу [8].

Також важливими є налаштування друку: товщина шару, швидкість друку, заповнення (infill), орієнтація деталі на платформі та кількість підтримок. Наприклад, зменшення товщини шару з 0,2 мм до 0,1 мм може подвоїти час друку, але покращити якість поверхні. Висока щільність заповнення (80–100 %) робить виріб міцнішим, проте вимагає більше матеріалу й часу. Таким чином, оптимізація цих параметрів є балансом між якістю, швидкістю та собівартістю [1, 2].

Окрему увагу слід приділити етапам підготовки та постобробки. Підготовка включає виправлення STL-файлу, масштабування, орієнтацію моделі та генерацію підтримок. Після друку виріб часто потребує зняття підтримок, шліфування, ґрунтування, фарбування чи полірування, що також збільшує трудомісткість і загальну вартість. У промислових масштабах постобробка може становити до 30 % від повної собівартості виробу [21, 22].

Нарешті, геометрична складність моделі є одним із найменш очевидних, але найбільш впливових чинників. Складні структури з численними кривими, порожнинами або тонкими елементами не лише збільшують час друку, а й підвищують ризик дефектів. Такі моделі часто потребують більшої кількості підтримок і повторного калібрування, що вимагає додаткових витрат часу та матеріалів [19, 23].

Таким чином, точний розрахунок вартості 3D-друку вимагає інтегрованого підходу, який враховує не лише матеріальні параметри, а й технологічні, часові та геометричні характеристики процесу. Це стає особливо важливим у контексті автоматизації виробничих розрахунків та створення інтелектуальних систем оцінки собівартості у сучасних CAD/CAE середовищах.

2.2 Методи автоматизованого аналізу CAD/STL-моделей

Для ефективного планування витрат на 3D-друк надзвичайно важливо мати інструменти, які дозволяють об’єктивно оцінити геометричну складність моделі. Від цього залежить не лише собівартість виготовлення виробу, але й стабільність процесу друку, ризик виникнення дефектів та потреба в додатковій постобробці. Одним із базових підходів до кількісної оцінки складності є геометричний аналіз STL- або CAD-файлу, який враховує кількість полігонів, площу поверхні, обсяг і співвідношення габаритів об’єкта. Ці показники формують основу для розрахунку навантаження на систему нарізання (slicing) та визначають час, необхідний для обробки файлу. Зокрема, чим більша кількість полігонів у моделі, тим більше обчислювальних ресурсів потрібно для її підготовки до друку [19, 21].

Крім кількості полігонів, значення мають площа поверхні та внутрішній обсяг моделі. Моделі з великою площею зовнішніх поверхонь потребують більшої кількості шарів для побудови, що подовжує час друку. У той час як моделі зі складною внутрішньою структурою або численними порожнинами вимагають створення додаткових підтримок і можуть бути складними для охолодження та постобробки. Таким чином, навіть за однакового об’єму, дві моделі з різною топологічною складністю можуть суттєво відрізнятися у вартості виготовлення.

Інші методи включають створення індексів складності, таких як Complexity Index, Mesh Complexity або Feature Count, які дозволяють порівнювати моделі за рівнем структурної насиченості та прогнозувати потенційні витрати часу й матеріалу. Ці індекси базуються на характеристиках геометрії — кількості виступів, отворів, вигинів і внутрішніх каналів, що безпосередньо впливають на стабільність процесу друку. Наприклад, високий показник Feature Count свідчить про необхідність більшої кількості проходів друкувальної головки та збільшення ймовірності похибок у формуванні дрібних елементів. Такі параметри активно використовуються у промислових CAD/CAM системах, наприклад Siemens NX,

SolidWorks та Autodesk Fusion 360, де реалізовано автоматичний аналіз складності моделей на етапі підготовки до виробництва [23].

Використання автоматизованих інструментів аналізу дає змогу визначити вплив складності моделі на час друку та ймовірність браку. Програмне забезпечення може оцінювати, скільки шарів знадобиться для створення моделі, чи буде потрібно створювати підтримки, який відсоток матеріалу піде у відходи та як зміна параметрів (товщина шару, орієнтація, інфіл) вплине на тривалість друку. Такі алгоритми все частіше інтегруються у програми для комерційного розрахунку собівартості, наприклад у Simplify3D, Cura або Netfabb, де складність моделі враховується під час оцінки загальних виробничих витрат [24].

Застосування цих підходів дозволяє не лише прогнозувати витрати, а й зменшувати ризик браку, оптимізувати орієнтацію моделі на платформі друку та покращувати використання матеріалів. Врахування геометричної складності ще на ранніх етапах проектування дає змогу підвищити точність оцінки вартості, спростити процес планування виробництва та забезпечити більш ефективне використання ресурсів. Такий підхід є основою для створення інтелектуальних фреймворків оцінки складності, які автоматично аналізують моделі, прогнозують ризики та пропонують оптимальні параметри друку.

2.3 Програмні засоби та алгоритми планування для оцінки вартості 3D-друку

Сьогодні існує широкий спектр програмних рішень для розрахунку вартості 3D-друку. CAD-програми, такі як Fusion 360 або SolidWorks, включають модулі оцінки витрат, що дозволяють автоматично підраховувати обсяг матеріалу, час друку та вартість виробу на основі заданих параметрів. Крім того, існують спеціалізовані калькулятори та програми для 3D-друку, наприклад Cura, PreForm,

3DPrinterOS, які надають попередню оцінку витрат матеріалу та часу друку з урахуванням типу принтера та матеріалу.

Деякі програми, наприклад Simplify3D або Slic3r, дозволяють додатково моделювати витрати на підтримки, постобробку та покриття. Перевага цих інструментів у точності розрахунків та можливості порівняти різні варіанти технологій друку. Однак вони мають обмеження, пов’язані з типом моделі та складністю геометрії, що іноді вимагає ручної перевірки або корекції [6, 8].

Таким чином, використання програмних засобів дозволяє прискорити оцінку вартості, зменшити ризики браку та забезпечити більш точне планування ресурсів, що особливо важливо для серійного виробництва чи індивідуальних замовлень.

Алгоритми планування друку з урахуванням складності виробу

На основі оцінки складності моделі розробляються алгоритми, які оптимізують процес друку. Нарізка моделі на шари (slicing) є ключовим етапом, що впливає на час виготовлення та якість виробу. Алгоритми нарізки враховують товщину шару, розташування підтримок, щільність заповнення та орієнтацію моделі, що дозволяє скоротити час друку та витрати матеріалу.

Крім цього, алгоритми можуть оптимізувати розташування виробу на платформі друку, зменшувати кількість підтримок для складних геометрій та враховувати механічні обмеження принтера. Застосування таких алгоритмів дозволяє досягати балансу між економічністю виробництва та якістю готового виробу. Використання автоматизованих алгоритмів планування особливо важливе для складних моделей з великою кількістю деталей, оскільки ручне налаштування займає значно більше часу [15].

Порівняльний аналіз точності та ефективності методів

Дослідження показують, що точність розрахунку вартості та ефективність планування сильно залежать від обраного інструменту та методики оцінки складності. Програмні калькулятори та CAD-модулі дозволяють швидко отримувати

приблизну вартість виробу, але для складних моделей з великою кількістю полігонів може виникати значне відхилення від реальної вартості друку.

Порівняльний аналіз показує, що поєднання автоматизованих інструментів з ручною перевіркою дозволяє досягти найкращих результатів. Це дозволяє підвищити точність оцінки, зменшити витрати матеріалу та скоротити час друку. Отже, сучасні підходи до калькуляції вартості 3D-друку повинні включати багаторівневий аналіз, який враховує як геометричну складність виробу, так і параметри конкретного обладнання [11].

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ВАРТОСТІ 3D-ДРУКУ

3.1 Загальний опис та архітектура системи

Розроблений програмний продукт CalcMyPrint являє собою комплексну веб-орієнтовану систему для розрахунку вартості 3D-друку, яка поєднує сучасні підходи до ціноутворення з урахуванням геометричної складності моделей, витрат матеріалів, часу друку, енергоспоживання та супутніх витрат. Система побудована на основі монорепозиторію з використанням інструменту Nx (версія 21.1.2), що забезпечує ефективне управління залежностями, модульну архітектуру та можливість масштабування проєкту.

Загальна структура проєкту включає наступні компоненти:

- `apps/dashboard` — основний клієнтський застосунок для управління розрахунками;
- `apps/landing` — лендінг-сторінка продукту з SSR (Server-Side Rendering);
- `apps-backend/main-api` — серверна частина API на базі NestJS;
- `libs` — бібліотеки спільного використання (auth, ui, models, config, services).

Архітектура системи побудована за принципом розділення відповідальностей (Separation of Concerns) та реалізує трирівневу модель: презентаційний рівень (Angular-застосунки), бізнес-логіка (NestJS API) та рівень даних (Supabase PostgreSQL). Такий підхід забезпечує високу масштабованість, тестованість та можливість незалежного розгортання окремих компонентів системи.

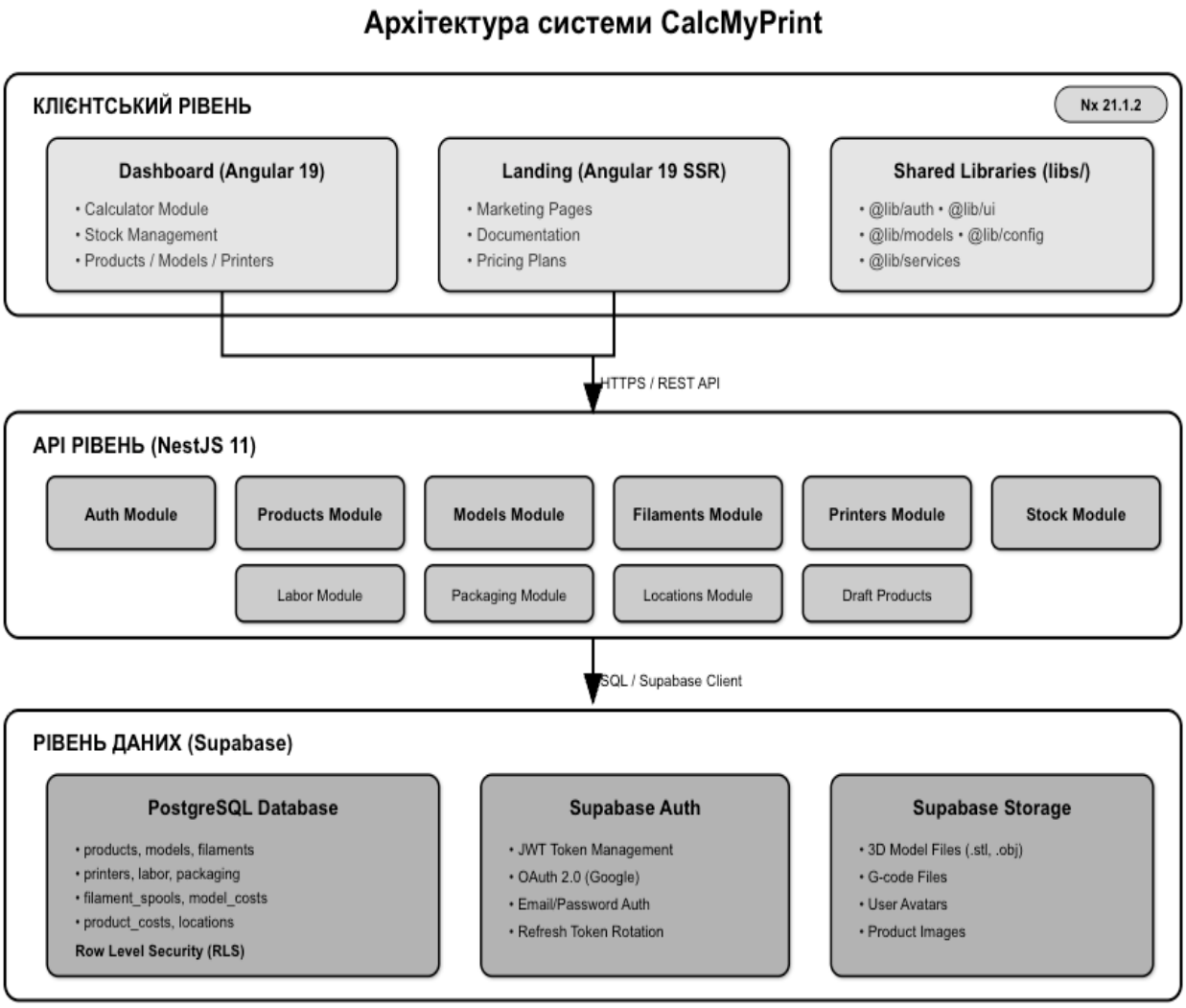


Рисунок 3.1 — Архітектура системи CalcMyPrint

3.2 Використані технології

Для розробки програмного продукту було обрано сучасний стек технологій, що забезпечує високу продуктивність, надійність та зручність розробки. Вибір технологій обґрунтовується їхньою актуальністю, активною підтримкою спільнотою та відповідністю вимогам проєкту. Технологічний стек CalcMyPrint наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 — Технологічний стек CalcMyPrint

Категорія	**Технологія**	**Версія**	**Призначення**
Frontend	Angular	19.2	Основний фреймворк UI
Frontend	Angular Material	19.2	Бібліотека UI-компонентів
Frontend	TailwindCSS	3.4	Утилітарний CSS-фреймворк
Frontend	DaisyUI	4.12	Компонентна бібліотека
Frontend	RxJS	7.8	Реактивне програмування
Frontend	Three.js	0.180	3D-візуалізація моделей
Backend	NestJS	11.0	Серверний фреймворк
Backend	Supabase	—	БД PostgreSQL + Auth
Backend	Passport.js	—	Автентифікація
Backend	Swagger	—	Документація API
Інфраструктура	Nx	21.1.2	Монорепозиторій
Інфраструктура	Firebase Hosting	—	Хостинг
Тестування	Jest	—	Unit-тестування
Тестування	Cypress	—	E2E-тестування

3.3 Архітектура бази даних

Система використовує Supabase PostgreSQL як основну СУБД з Row Level Security (RLS) для мультитенантної ізоляції даних. Така архітектура забезпечує безпечне зберігання та доступ до даних окремих користувачів без можливості несанкціонованого доступу до чужих записів. ER-діаграма бази даних CalcMyPrint представлена на рисунку 3.2. Структуру бази даних CalcMyPrint наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 — Структура бази даних CalcMyPrint

Таблиця	**Опис**	**Ключові поля**
auth.users	Користувачі системи	id (UUID), email, created_at
profiles	Профілі користувачів	id (FK users), display_name, avatar_url
models	3D-моделі	id, user_id, name, print_time, weight, defect_rate
model_filament_usage	Використання філаменту	model_id (FK), filament_id (FK), weight_g
model_costs	Історія розрахунків моделей	model_id, printer_id, filament_cost, total_cost
products	Продукти для продажу	id, user_id, name, markup_percentage, fees
product_models	Зв'язок продуктів з моделями	product_id (FK), model_id (FK), quantity
product_costs	Історія розрахунків продуктів	product_id, final_price, profit_margin
filaments	Філаменти	id, brand_id, material_id, color_id, price_per_kg
filament_spools	Котушки філаменту	filament_id, weight_grams, initial_weight_grams
printers	3D-принтери	id, name, purchase_cost, lifetime_hours, power_wattage
labor	Види робіт	id, name, cost_per_hour, estimated_time
packaging	Пакування	id, name, cost_per_unit, weight_grams
locations	Локації зберігання	id, user_id, name, description

Основні зв'язки між таблицями

База даних реалізує реляційну модель з наступними ключовими зв'язками:

Користувач → Моделі (1:N). Один користувач може мати необмежену кількість 3D-моделей. Зв'язок реалізовано через зовнішній ключ models.user_id → auth.users.id.

Модель → Філаменти (M:N). Одна модель може використовувати декілька філаментів різних типів та кольорів. Зв'язок реалізовано через проміжну таблицю model_filament_usage.

Продукт → Моделі (M:N). Один продукт може складатися з декількох моделей у різній кількості. Зв'язок реалізовано через проміжну таблицю product_models з додатковим полем quantity.

Філамент → Котушки (1:N). Один тип філаменту може мати багато фізичних котушок в інвентарі для відстеження залишків матеріалу.

Row Level Security (RLS)

Всі таблиці захищені політиками RLS для мультитенантної ізоляції даних. В лістингу 3.1 наведено приклад RLS-політики для таблиці models.

Лістинг 3.1 — Приклад RLS-політики для таблиці models

```
-- Політика для перегляду власних моделей
CREATE POLICY "Users can view their own models" ON models
  FOR SELECT USING (auth.uid() = user_id);

-- Політика для створення власних моделей
CREATE POLICY "Users can insert their own models" ON
models
  FOR INSERT WITH CHECK (auth.uid() = user_id);

-- Політика для оновлення власних моделей
CREATE POLICY "Users can update their own models" ON
models
  FOR UPDATE USING (auth.uid() = user_id);

-- Політика для видалення власних моделей
CREATE POLICY "Users can delete their own models" ON
models
  FOR DELETE USING (auth.uid() = user_id);
```

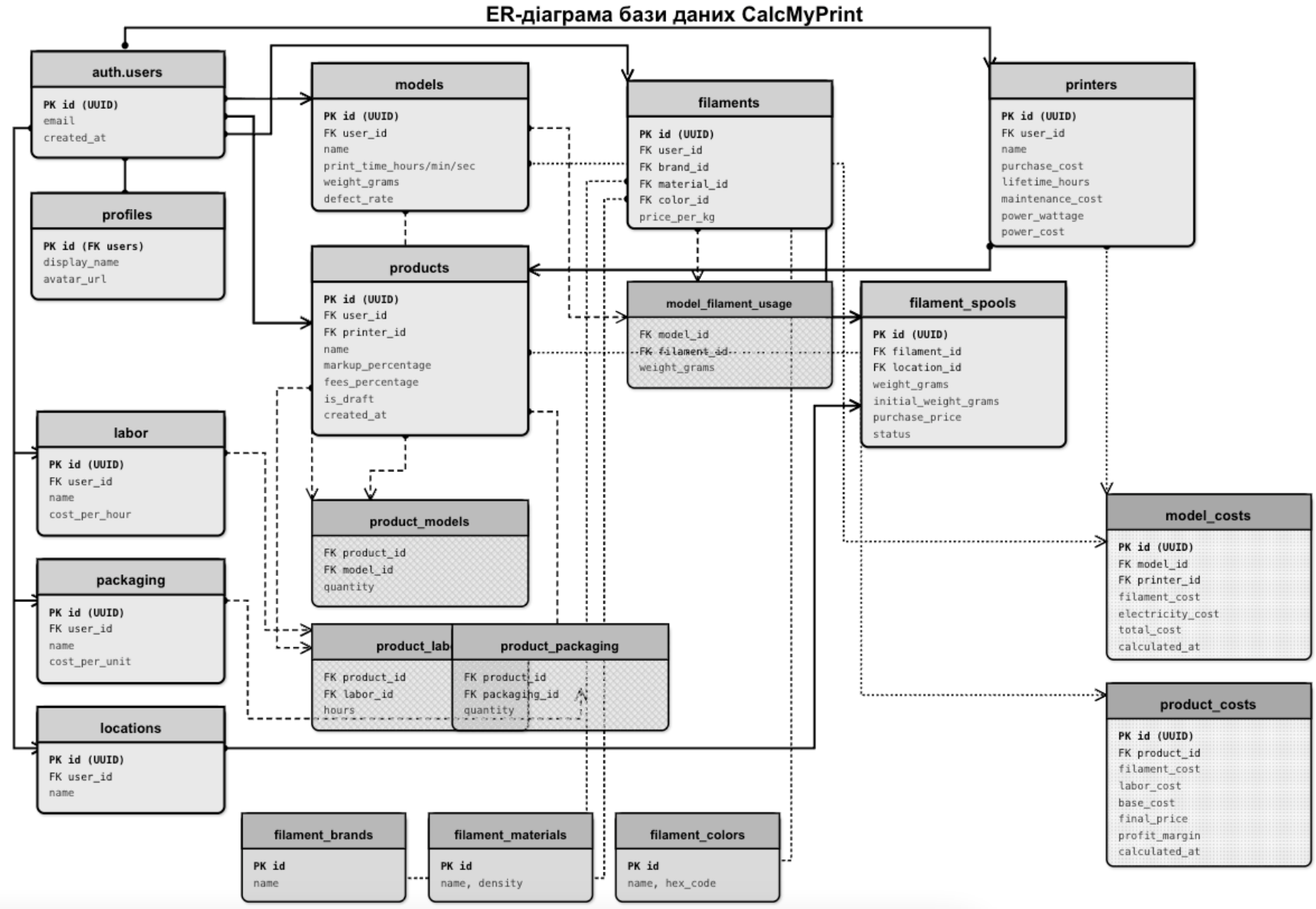


Рисунок 3.2 — ER-діаграма бази даних CalcMyPrint

3.4 Функціональні модулі системи

Модуль калькулятора вартості друку

Центральним елементом системи є модуль калькулятора (Calculator), який реалізує комплексний підхід до розрахунку собівартості 3D-друку. Калькулятор побудований на основі архітектурного паттерну Facade, що забезпечує централізоване управління станом розрахунку через сервіс CalculatorFacadeService.

Калькулятор включає наступні компоненти розрахунку:

- `Model` — параметри 3D-моделі (вага, час друку, відсоток браку);
- `Filament` — вартість філаменту з урахуванням типу матеріалу та бренду;
- `Electricity` — витрати на електроенергію на основі потужності принтера;
- `Printer` — амортизація обладнання та витрати на обслуговування;
- `Labor` — витрати на працю оператора;
- `Packaging` — вартість пакування;
- `Other Materials` — додаткові матеріали та компоненти.

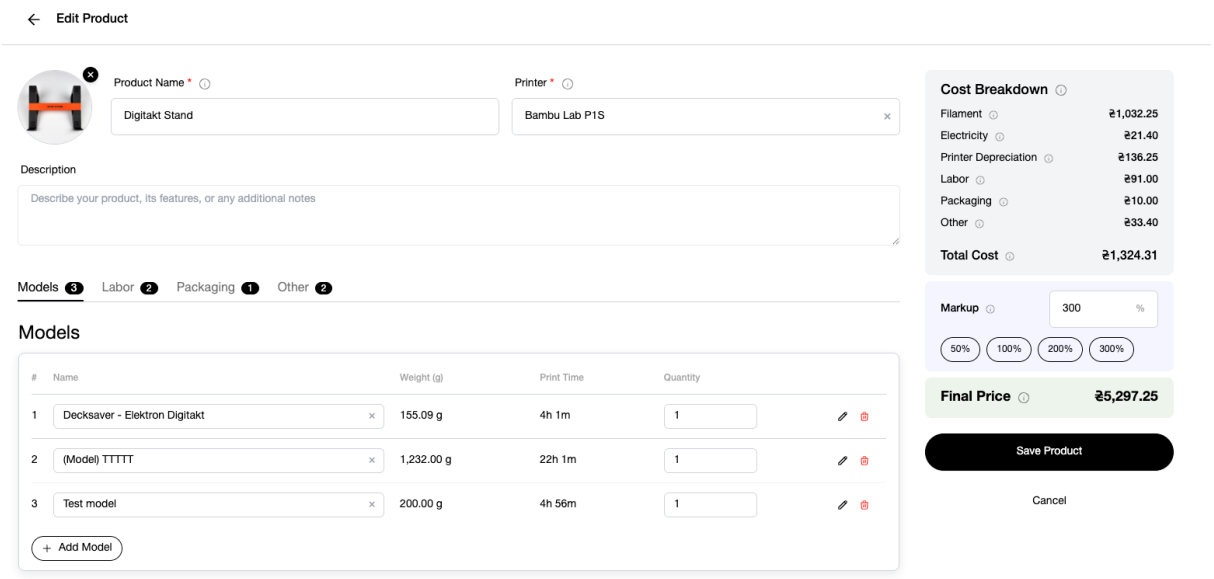


Рисунок 3.3 — Інтерфейс калькулятора вартості друку

Лістинг 3.2 — Фрагмент компонента калькулятора (calculator.component.ts)

```
@Component({
  selector: 'app-calculator',
  standalone: true,
  imports: [
    ModelFormComponent,
    FilamentFormComponent,
    ElectricityFormComponent,
    CalculatorPrinterFormComponent,
    LaborCostFormComponent,
    PackagingFormComponent,
    NotPrintedPartsFormComponent,
  ],
  templateUrl: './calculator.component.html',
})
export class CalculatorComponent implements OnInit {
  private calculatorFacade =
inject(CalculatorFacadeService);

  menuItems$ = this.calculatorFacade.menuItems$;
  costs$ = this.calculatorFacade.costs$;
tabs = [
    { id: 'model', label: 'Model' },
    { id: 'filament', label: 'Filament' },
    { id: 'electricity', label: 'Electricity' },
    { id: 'printer', label: 'Printer' },
    { id: 'labor-cost', label: 'Labor' },
    { id: 'packaging', label: 'Packaging' },
    { id: 'not-printed-parts', label: 'Other' }
  ];
```

```
  onModelChange(model: ModelForm): void {
    this.calculatorFacade.updateModel(model);
  }
  onFilamentChange(filament: FilamentForm): void {
    this.calculatorFacade.updateFilament(filament);
  }
}
```

Модуль управління філаментами

Система підтримує повний цикл управління філаментами з наступними можливостями: каталог брендів філаментів; типи матеріалів (PLA, ABS, PETG, TPU та інші) з їхніми фізичними властивостями (щільність); кольорова палітра з HEX-кодами для візуалізації; облік цін за кілограм матеріалу. Модуль забезпечує нормалізовану структуру даних, де бренди, матеріали та кольори зберігаються в окремих довідникових таблицях з підрахунком кількості філаментів кожного типу.

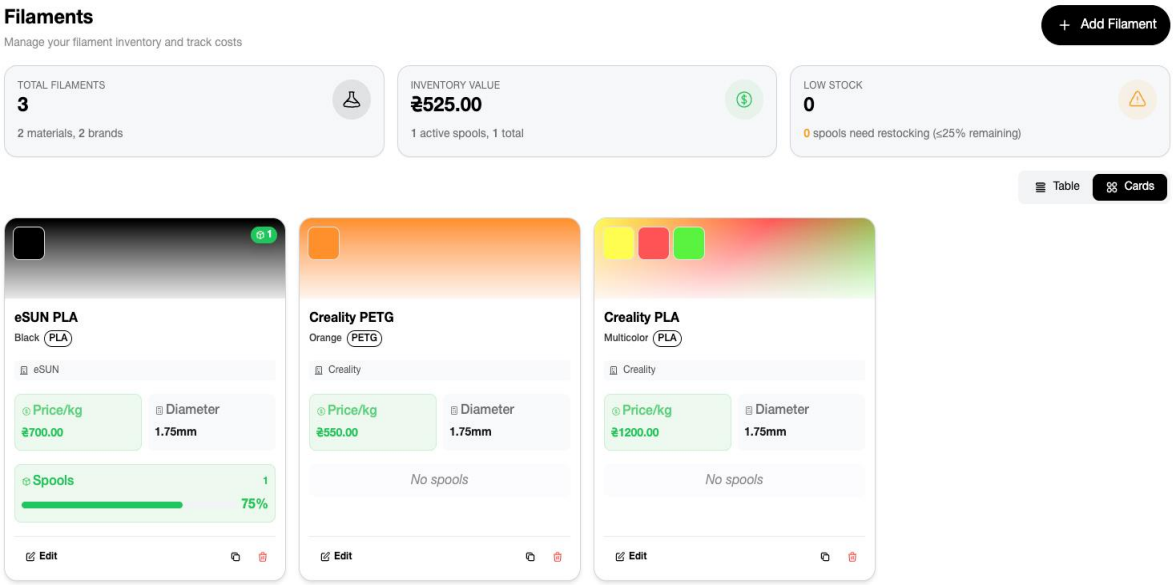


Рисунок 3.4 — Інтерфейс управління філаментами

Модуль управління принтерами

Модуль дозволяє вести облік 3D-принтерів з повним набором параметрів для точного розрахунку витрат: вартість придбання та очікуваний термін експлуатації (у годинах); споживання електроенергії (потужність у Ватах); автоматичний розрахунок амортизації на годину роботи; інтервал та вартість технічного обслуговування; бібліотека типових принтерів для швидкого вибору.

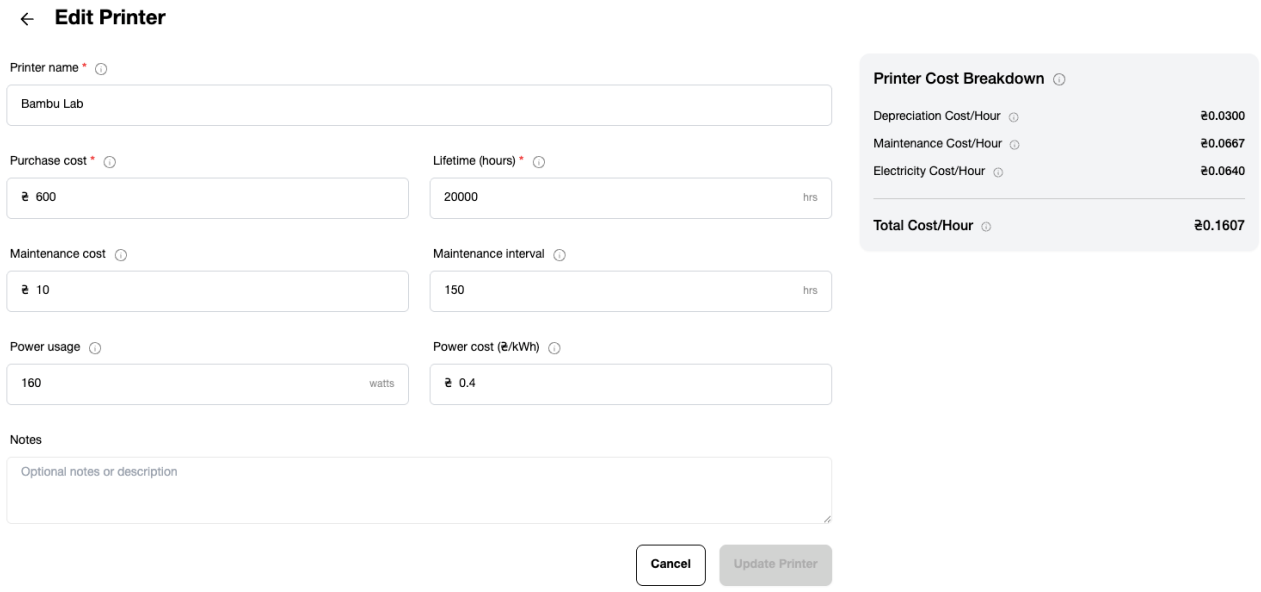


Рисунок 3.5 — Інтерфейс управління принтерами

Модуль продуктів та моделей

Модуль дозволяє створювати 3D-моделі з параметрами друку, готові продукти з розрахунком собівартості та чернетки розрахунків.

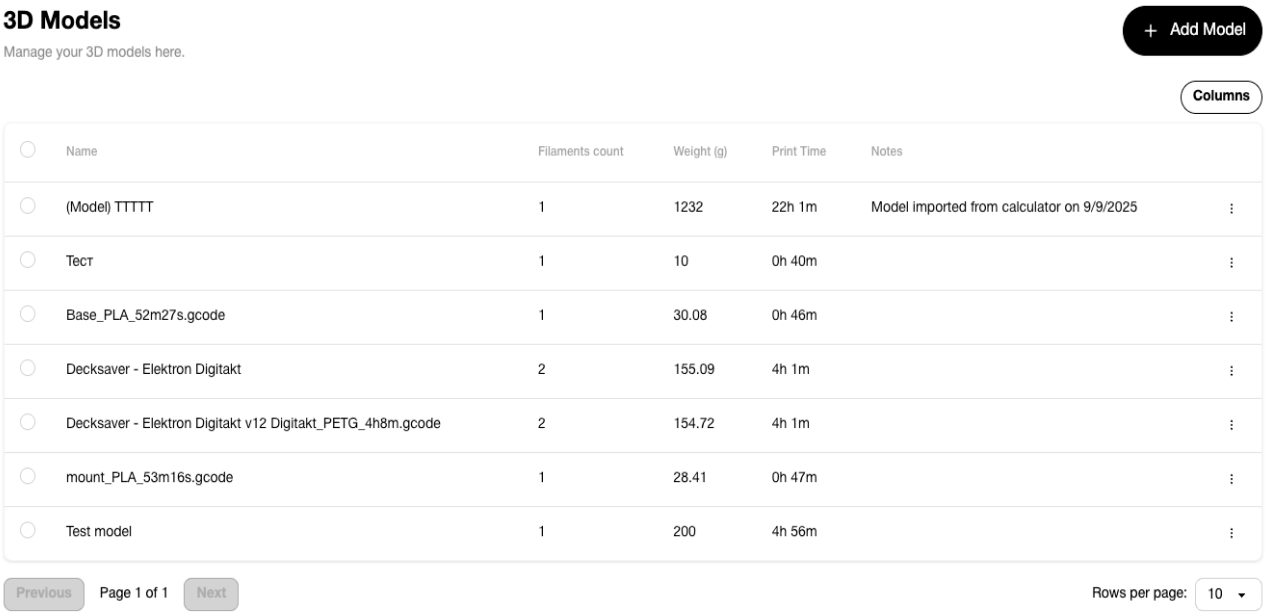


Рисунок 3.6 — Список моделей з параметрами друку

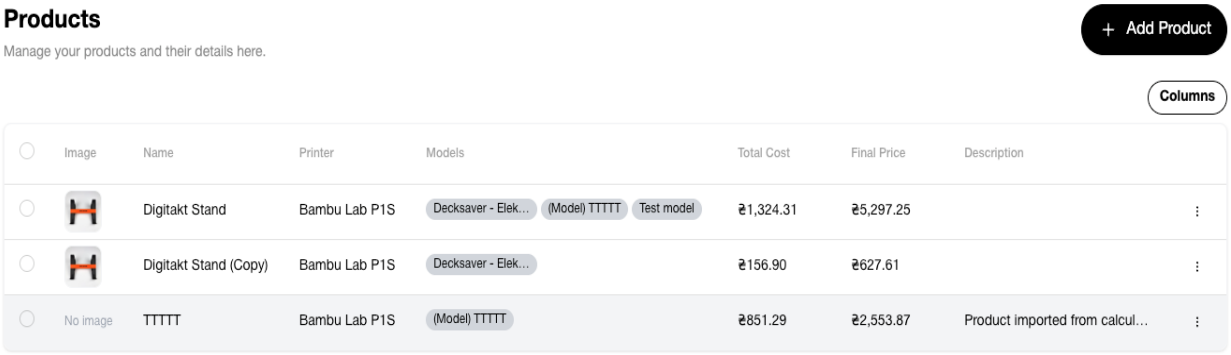


Рисунок 3.7 — Список продуктів із розрахованою собівартістю

3.5 REST API

Серверна частина реалізує RESTful API з документацією Swagger. Основні ендпоінти системи наведено в таблиці 3.3. Документація API у Swagger UI представлена на рисунку 3.8.

Таблиця 3.3 — Основні API ендпоінти

Метод	Ендпоінт	Опис
GET	/api/filaments	Отримати список філаментів користувача
POST	/api/filaments	Створити новий філамент
GET	/api/filament-brands	Отримати бренди філаментів
GET	/api/filament-materials	Отримати типи матеріалів
GET	/api/printers	Отримати список принтерів
POST	/api/printers	Додати новий принтер
GET	/api/products	Отримати продукти користувача
POST	/api/products	Створити новий продукт
GET	/api/filament-spools	Отримати котушки філаменту
GET	/api/labor	Отримати типи робіт
GET	/api/models	Отримати 3D-моделі
POST	/api/draft-products	Зберегти чернетку розрахунку

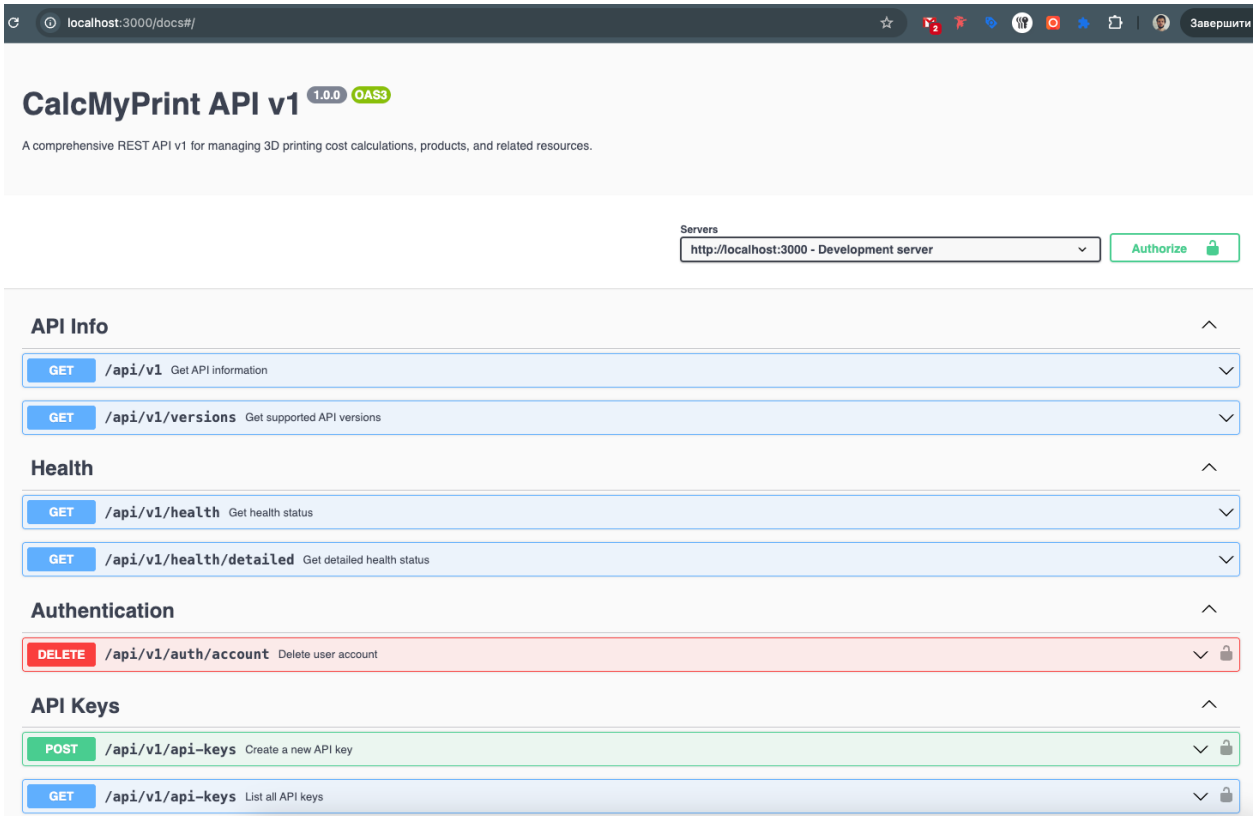


Рисунок 3.8 — Документація API у Swagger UI

Система автентифікації

Система використовує JWT-токени через Supabase Auth з підтримкою: Email/password автентифікації; OAuth провайдерів (Google); API ключів для зовнішніх інтеграцій; Role-based access control (RBAC) для розмежування доступу. Токени автоматично оновлюються на клієнті через механізм refresh token, що забезпечує безперервну роботу користувача без необхідності повторної автентифікації.

3.6 Формули розрахунку вартості

Система реалізує комбіновану модель розрахунку вартості, що враховує всі основні фактори собівартості 3D-друку. Загальна формула собівартості має вигляд:

$$C_{totl} = C_{mat} + C_{el} + C_{dep} + C_{ma\,\mathrm{int}} + C_{labor} + C_{pack} + C_{add},$$

де:

C_{mat} — вартість матеріалу (філаменту);

C_{el} — вартість електроенергії;

C_{dep} — амортизація принтера;

C_{maint} — витрати на обслуговування;

C_{labor} — вартість праці;

C_{pack} — вартість пакування;

C_{add} — вартість додаткових компонентів.

Детальні формули розрахунку:

1. Вартість матеріалу:

$$C_{\mathrm{mat}} = (P_{\mathrm{spool}} / W_{\mathrm{spool}}) \times W_{\mathrm{model}},$$

де P_{spool} — ціна котушки; W_{spool} — вага котушки; W_{model} — вага моделі.

2. Вартість електроенергії:

$$C_{\mathrm{el}} = (P_{\mathrm{power}} / 1000) \times P_{\mathrm{kWh}} \times T_{\mathrm{print}},$$

де P_{power} — потужність принтера (Вт); P_{kWh} — тариф за кВт·год; T_{print} — час друку (год).

3. Амортизація принтера:

$$C_{dep} = (C_{purchase} / H_{lifetime}) \times T_{print},$$

де $C_{purchase}$ — вартість придбання принтера; $H_{lifetime}$ — очікуваний ресурс роботи (год).

4. Витрати на обслуговування:

$$C_{maint} = (C_{service} / H_{interval}) \times T_{print},$$

де $C_{service}$ — вартість обслуговування; $H_{interval}$ — інтервал обслуговування (год).

5. Фінальна ціна з урахуванням націнки та комісій:

$$P_{final} = (C_{total} + M_{amount}) / (1 - F_{\%}),$$

де $M_{amount} = C_{total} \times M_{\%}$ — сума націнки; $F_{\%}$ — відсоток комісій маркетплейсу.

Лістинг 3.4 — Сервіс розрахунку вартості друку (print-price-calculator.service.ts)

```
@Injectable({ providedIn: 'root' })
export class PrintPriceCalculatorService {
  private currencyService = inject(CurrencyService);
  private costs$ = new BehaviorSubject<PrintCosts>({
    filamentCost: 0,
    laborCost: 0,
    notPrintedPartsCost: 0,
    printerCost: 0,
    electricityCost: 0,
    packagingCost: 0,
    totalCost: 0,
    markupAmount: 0,
    markupPercentage: 0,
    feesAmount: 0,
```

```
        feesPercentage: 0,
        finalPrice: 0,
        finalPriceWithFees: 0
      });
      updateAllCosts(
        model?: ModelForm,
        filamentForm?: FilamentForm,
        electricityForm?: ElectricityForm,
        printerData?: CalculatorPrinterForm,
        laborArray?: LaborCostItem[],
        notPrintedPartsArray?: NotPrintedPartsItem[],
        packagingArray?: PackagingFormArray
      ): void {
        const printTimeHours = this.calculatePrintTime(model);

        // Розрахунок вартості філаменту
        let filamentCost = 0;
        if (model && filamentForm) {
          const spoolPrice = filamentForm.spoolPrice || 0;
          const spoolWeight = filamentForm.spoolWeight || 0;
          if (spoolWeight > 0) {
            filamentCost = (spoolPrice / spoolWeight) *
(model.weight || 0);
          }
        }
        // Розрахунок вартості електроенергії
        let electricityCost = 0;
        if (electricityForm && printTimeHours > 0) {
          const powerConsumption =
electricityForm.powerConsumption || 0;
```

```
          const pricePerKwh = electricityForm.pricePerKwh ||
0;
          if (powerConsumption > 0 && pricePerKwh > 0) {
            const powerInKw = powerConsumption / 1000;
            electricityCost = powerInKw * pricePerKwh *
printTimeHours;
          }
        }
        // Розрахунок витрат на принтер
        let printerCost = 0;
        if (printerData && printTimeHours > 0) {
          const lifetimeHours = printerData.lifetimeHours ||
0;
          if (lifetimeHours > 0) {
            const depreciationCost =
              (printerData.purchaseCost / lifetimeHours) *
printTimeHours;
            const maintenanceCost =
              printerData.maintenanceIntervalHours > 0
                ? (printerData.maintenanceCost /
                   printerData.maintenanceIntervalHours) *
printTimeHours
                : 0;
            printerCost = depreciationCost + maintenanceCost;
          }
        }

        this.updateCosts({
          filamentCost,
          electricityCost,
          printerCost,
```

```
          laborCost: this.calculateLaborCost(laborArray),
          notPrintedPartsCost:
this.calculatePartsCost(notPrintedPartsArray),
          packagingCost:
this.calculatePackagingCost(packagingArray)
        });
        this.recalculateTotalCost();
      }
      /**
       * Формула розрахунку фінальної ціни з урахуванням комі-
сій
       * Final Price = (Cost + Markup) / (1 - Fees%)
       */
      calculatePricingWithFees(
        baseCost: number,
        markupPercentage: number,
        feesPercentage: number
      ) {
        const markupAmount = (baseCost * markupPercentage) /
100;
        if (feesPercentage >= 100) {
          return { markupAmount: 0, feesAmount: 0, finalPrice:
baseCost };
        }
        const finalPrice = (baseCost + markupAmount) / (1 -
feesPercentage / 100);
        const feesAmount = (finalPrice * feesPercentage) / 100;
        return { markupAmount, feesAmount, finalPrice };
      }
    }
```

Лістинг 3.4 Демонструє безпечне зберігання API ключів (хешування SHA-256), показує валідацію ключів з перевіркою терміну дії, включає трекінг використання (usage_count, last_used_at).

Лістинг 3.4 — Хешування SHA-256

```
@Injectable()
export class ApiKeyStrategy extends PassportStrategy(Strategy,
'api-key') {
  constructor(private readonly supabaseService:
SupabaseService) {
    super();
  }

  async validate(req: Request): Promise<any> {
    const apiKey = req.headers['x-api-key'] as string;

    if (!apiKey) {
      throw new UnauthorizedException('API key is missing');
    }

    // Extract prefix (first 8 characters)
    const keyPrefix = apiKey.substring(0, 8);

    // Hash the full API key for comparison
    const keyHash = this.hashApiKey(apiKey);

    // Query the api_keys table to find a matching key
    const { data: apiKeyData, error } = await
this.supabaseService.admin.from('api_keys').select('*').eq('ke
y_prefix', keyPrefix).eq('key_hash', keyHash).eq('is_active',
true).single();

    if (error || !apiKeyData) {
      throw new UnauthorizedException('Invalid API key');
    }

    // Check if the key has expired
    if (apiKeyData.expires_at && new
Date(apiKeyData.expires_at) < new Date()) {
      throw new UnauthorizedException('API key has expired');
    }
```

```
    // Update last_used_at and usage_count
    await this.supabaseService.admin
      .from('api_keys')
      .update({
        last_used_at: new Date().toISOString(),
        usage_count: apiKeyData.usage_count + 1,
      })
      .eq('id', apiKeyData.id);

    // Return user information with API key metadata
    return {
      id: apiKeyData.user_id,
      apiKeyId: apiKeyData.id,
      apiKeyName: apiKeyData.name,
      permissions: apiKeyData.permissions || {},
      scopes: apiKeyData.scopes || ['read'],
    };
  }

  private hashApiKey(apiKey: string): string {
    return createHash('sha256').update(apiKey).digest('hex');
  }
}
```

Лістинг 3.5 демонструє бізнес-логіку, включає розрахунок амортизації, електроенергії, матеріалів, показує обробку дефектів та відходів.

```
static calculateModelCost(input: ModelCostInput):
ModelCostBreakdown {
  const printTimeHours =
this.convertPrintTimeToHours(input.printTime);

  const filamentCost =
this.calculateFilamentCost(input.filaments);
  const printerDepreciationCost =
this.calculatePrinterDepreciation(
    input.printer,
    printTimeHours
  );
  const printerMaintenanceCost =
this.calculateMaintenanceCost(
```

```
    input.printer,
    printTimeHours
  );
  const electricityCost = this.calculateElectricityCost(
    input.printer,
    printTimeHours
  );

  const printerCost = printerDepreciationCost +
printerMaintenanceCost + electricityCost;
  const baseCost = filamentCost + printerCost;
  const defectRatePercent =
this.normalizePercentage(input.defectRatePercent ?? 0);
  const defectWasteCost =
this.calculateDefectWasteCost(baseCost, defectRatePercent);
  const totalCost = baseCost + defectWasteCost;

  return {
    filamentCost,
    printerDepreciationCost,
    printerMaintenanceCost,
    electricityCost,
    printerCost,
    baseCost,
    defectRatePercent,
    defectWasteCost,
    totalCost,
  };
}

/**
 * Calculate filament cost from usage and prices
 */
static calculateFilamentCost(filaments: ModelFilamentUsage[]):
number {
  return filaments.reduce((total, filament) => {
    if (!filament.pricePerKg) return total;
    const pricePerGram = filament.pricePerKg / 1000;
    return total + filament.weightG * pricePerGram;
  }, 0);
}

/**
 * Calculate printer depreciation cost
 */
static calculatePrinterDepreciation(
```

```
  printer: PrinterCostData,
  printTimeHours: number
): number {
  if (!printer.purchaseCost || !printer.lifetimeHours ||
printer.lifetimeHours === 0) {
    return 0;
  }

  const costPerHour = printer.purchaseCost /
printer.lifetimeHours;
  return costPerHour * printTimeHours;
}
/**
 * Calculate electricity cost
 */
static calculateElectricityCost(
  printer: PrinterCostData,
  printTimeHours: number
): number {
  if (!printer.powerWattage || !printer.powerCost) {
    return 0;
  }

  // Convert watts to kilowatts
  const powerKw = printer.powerWattage / 1000;
  // Calculate cost: power (kW) × price per kWh × hours
  return powerKw * printer.powerCost * printTimeHours;
}
```

3.7 Користувацький інтерфейс

Інтерфейс системи побудований на принципах Material Design з адаптивним дизайном для різних пристроїв. Система використовує Angular Material 19.2 як основну бібліотеку UI-компонентів у поєднанні з TailwindCSS 3.4 для гнучкого стилізування та DaisyUI 4.12 для додаткових компонентів.

Інтерфейс реалізує responsive дизайн з брейкпоінтами для мобільних пристроїв (< 768px), планшетів (768px - 1024px) та десктопів (> 1024px). На мобільних пристроях використовується гамбургер-меню, на десктопі — бічна панель навігації.

Основні екрани системи:

- **Головна панель калькулятора** — покрокове введення параметрів друку з вкладками для кожного компонента вартості та відображенням поточної собівартості в реальному часі.
- **Панель управління запасами** — таблиці з фільтрацією для котушок філаменту, пакувальних матеріалів та компонентів із візуальними індикаторами рівня запасів.
- **Список продуктів** — таблиця з розрахованою собівартістю, кінцевою ціною та маржею прибутку з можливістю перегляду детальної інформації про склад.
- **Каталог філаментів** — структурована база матеріалів з фільтрами за брендом, типом матеріалу (PLA, ABS, PETG, TPU) та кольором.
- **Управління принтерами** — картки з характеристиками обладнання та автоматично розрахованою погодинною вартістю експлуатації.

Всі форми введення мають валідацію в реальному часі з інформативними повідомленнями про помилки.

Отже, розроблений програмний продукт CalcMyPrint для розрахунку вартості 3D-друку включає:

- Сучасну архітектуру на базі Angular 19 та NestJS 11 з використанням монорепозиторію Nx, що забезпечує модульність, масштабованість та зручність підтримки коду.
- Комплексний калькулятор вартості, який враховує всі основні фактори ціноутворення: матеріали, електроенергію, амортизацію обладнання, працю оператора, пакування та додаткові компоненти.
- Систему управління запасами (Stock Management) з автоматичним моніторингом залишків філаменту та сповіщеннями про низький рівень запасів.
- RESTful API з JWT-автентифікацією та документацією Swagger для забезпечення інтеграції з зовнішніми системами.

- Адаптивний користувацький інтерфейс на базі Angular Material та TailwindCSS з підтримкою мобільних пристроїв.
- Реляційну базу даних PostgreSQL (Supabase) з нормалізованою структурою та Row Level Security для ефективного та безпечного зберігання даних.

Зовнішній вигляд лендінг-сторінки для неавторизованих користувачів відображено на рисунку 3.9.

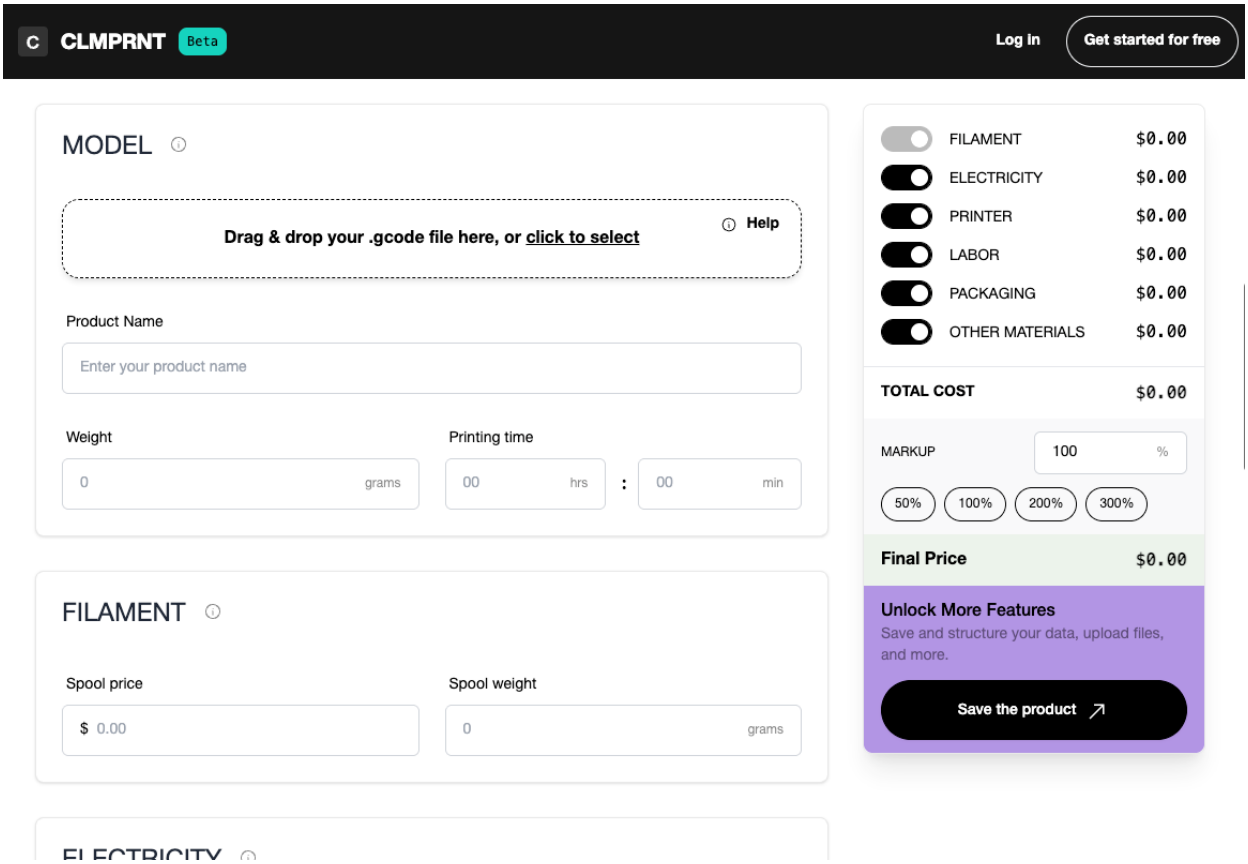


Рисунок 3.9 — Лендінг сторінка для неавторизованих користувачів

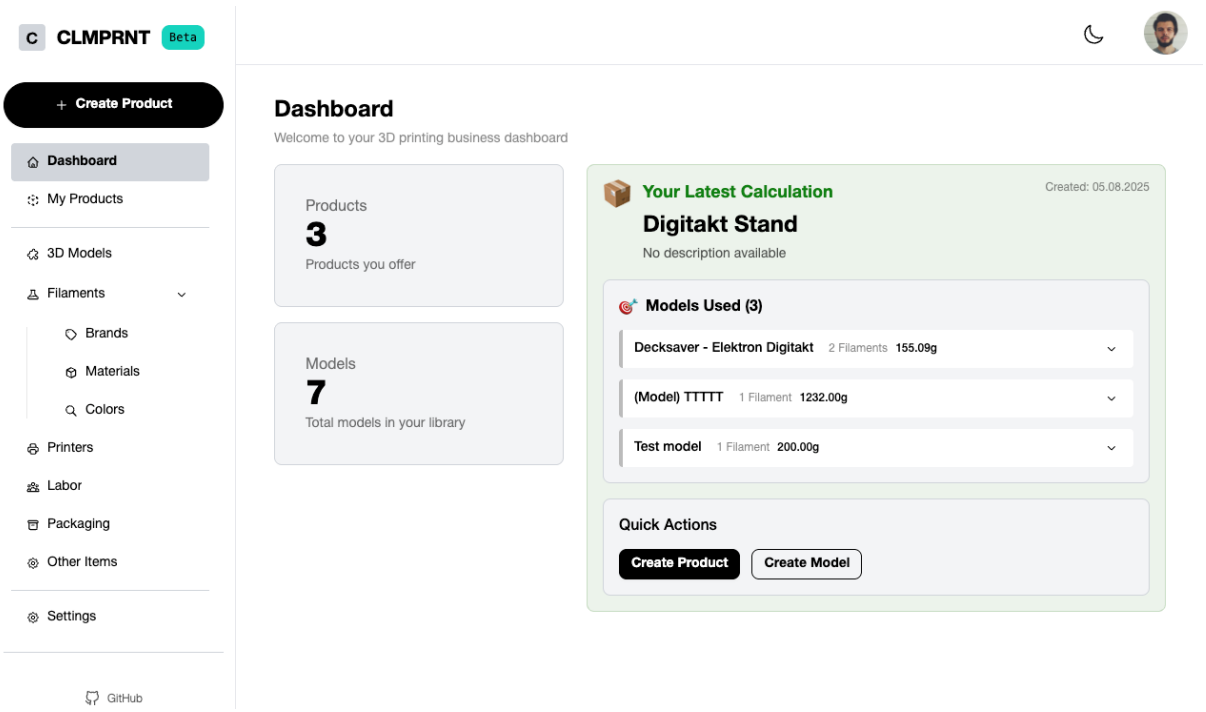


Рисунок 3.10 — Дашборд сторінка

Головна панель управління надає авторизованому користувачеві комплексний огляд ключових метрик, стану системи та швидкий доступ до основних функцій сервісу. Слугує «домашньою сторінкою» після входу в обліковий запис (див. Рис. 3.10).

Сторінка «Створення нової моделі» є ключовим етапом у робочому процесі користувача, який має на меті завантаження, конфігурування та підготовку 3D-моделі до подальшої обробки (наприклад, слайсингу, розрахунку вартості або друку) (див. Рис. 3.11).

Сторінка «Редагування філаменту» є інструментом для точного контролю матеріалознавчої складової процесу 3D-друку. Вона забезпечує гнучкість у використанні різних типів і брендів матеріалів, що прямо впливає на якість, міцність та економічність готового виробу (див. Рис. 3.12).

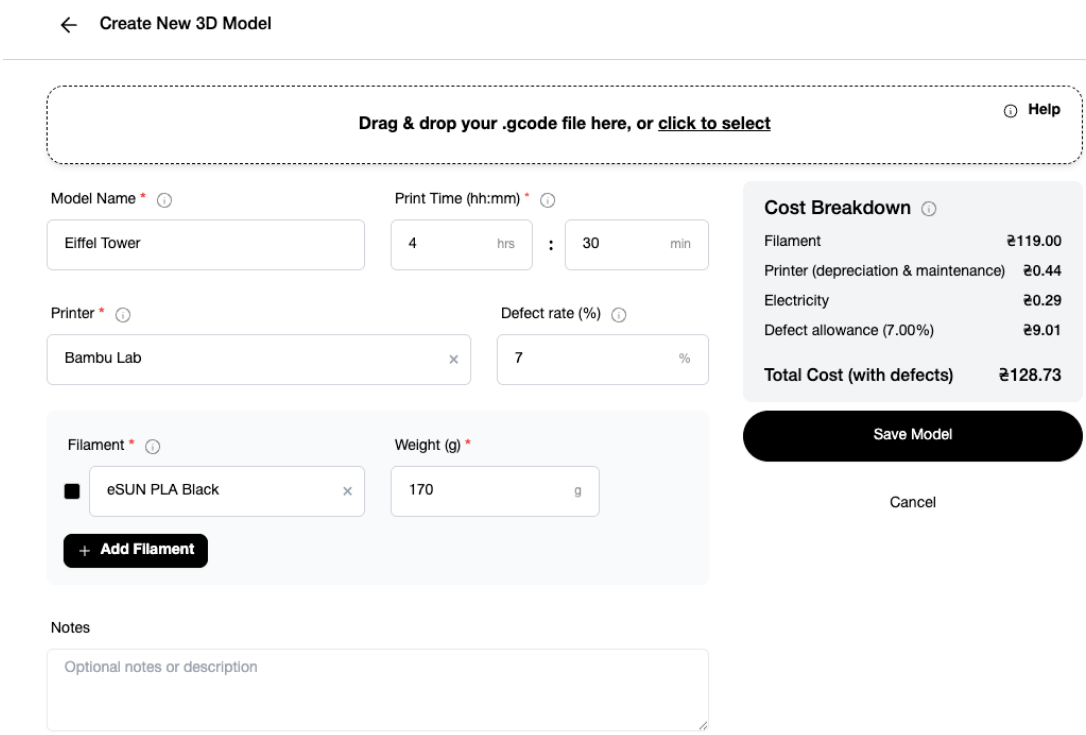


Рисунок 3.11 — Сторінка створення нової моделі

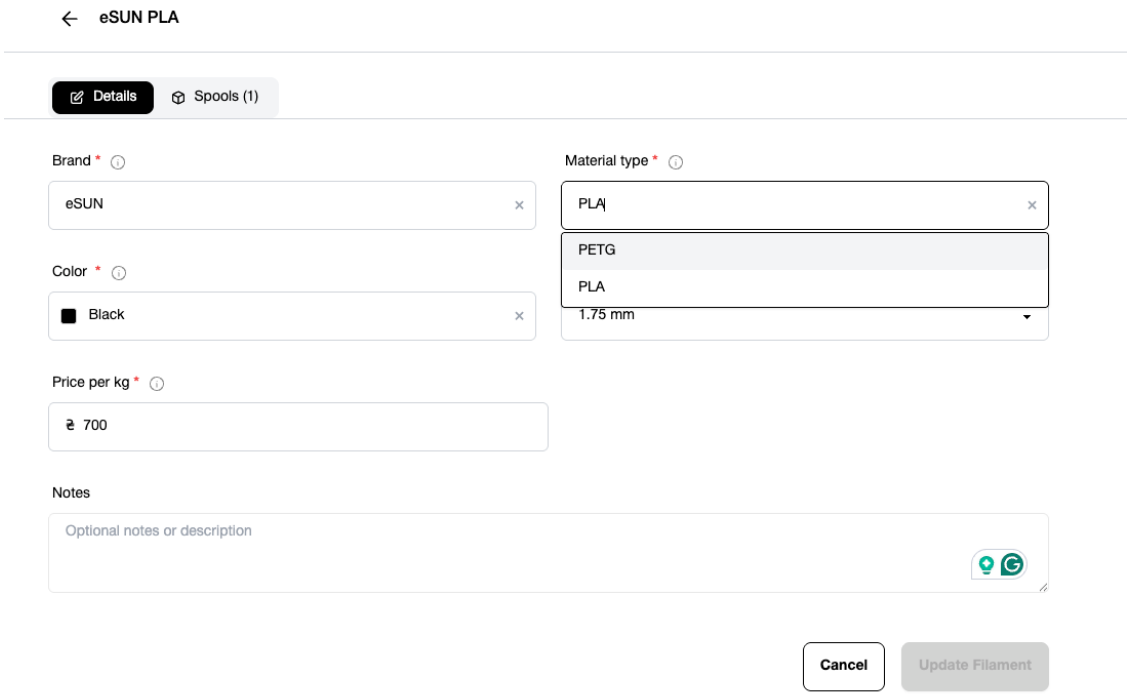


Рисунок 3.12 — Сторінка редагування філаменту

Сторінка «Налаштування» (див. Рис. 3.13) є ключовим інтерфейсом для персоналізації (валюта, мова) та контролю безпеки (видалення акаунту), забезпечуючи користувачеві повний суверенітет над його даними та взаємодією із системою.

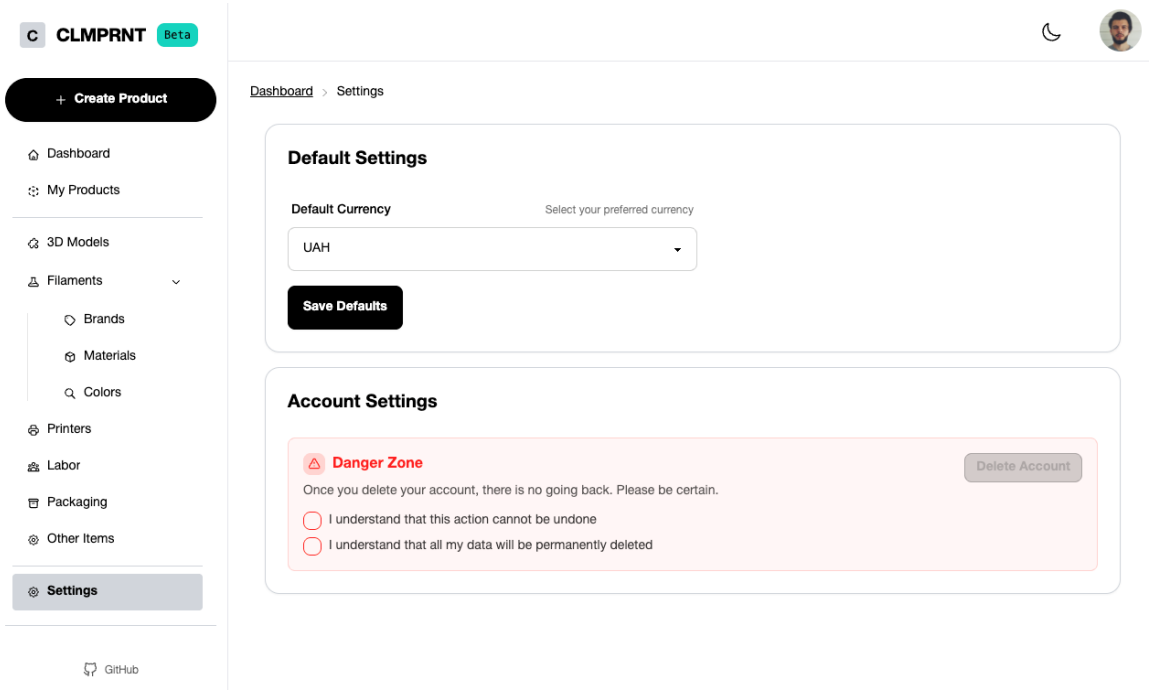


Рисунок 3.13 — Сторінка налаштувань зміна валюти видалення акаунту

Розроблений програмний продукт дозволяє автоматизувати процес розрахунку собівартості 3D-друку, зменшити вплив людського фактору та підвищити точність оцінки витрат на виробництво, що відповідає поставленим цілям дослідження. Система доступна за адресою https://calcmyprint.com/ та готова до використання як індивідуальними користувачами, так і малими 3D-друкарнями.

4 ОЦІНКА ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ВАРТОСТІ ВИРОБІВ, СТВОРЕНИХ МЕТОДОМ 3D-ДРУКУ

4.1 Модуль управління запасами (Stock Management)

Система управління запасами (Stock management) у розроблюваному програмному продукті відіграє ключову роль у підвищенні точності розрахунків собівартості та оптимізації використання матеріалів у процесі 3D-друку. Вона поєднує автоматизований облік витрат філаменту та допоміжних матеріалів, що забезпечує користувачеві візуальне уявлення про ресурси, витрати та ефективність виробництва в режимі реального часу.

Модуль Stock Management забезпечує комплексний облік матеріалів для 3D-друку. На відміну від більшості існуючих рішень, таких як PrintCalc або ResinCalc, новий підхід дозволяє не лише розраховувати вартість друку, але й відстежувати історію використання матеріалів. Це забезпечує точніше прогнозування потреб у закупівлях, зменшує ризики простоїв через нестачу сировини та допомагає оптимізувати логістику.

Функціональність модуля включає (рис. 4.1):

- облік котушок філаменту з відстеженням залишків у відсотках;
- моніторинг пакувальних матеріалів та їх кількості;
- контроль додаткових компонентів (кріплення, магніти тощо);
- автоматичні сповіщення про низький рівень запасів;
- управління локаціями зберігання.

Завдяки інтеграції з даними друкарського обладнання або ручному вводу витрат, користувач може бачити повну картину — скільки матеріалу використано, скільки залишилося на складі, який принтер витрачає найбільше ресурсів, а

також які проекти є найбільш затратними. У модулі статистики ці дані відображаються через зрозумілий Dashboard із графіками, діаграмами й індикаторами ефективності. Наприклад, система може автоматично повідомляти користувача про критичний рівень залишку певного типу пластику, вказуючи, що його кількість є недостатньою для виготовлення запланованих виробів. У повідомленні також може відображатися список моделей, для яких розрахункова витрата матеріалу перевищує наявний залишок. Це дає змогу своєчасно оновити запаси або змінити параметри друку, щоб уникнути переривання виробничого процесу.

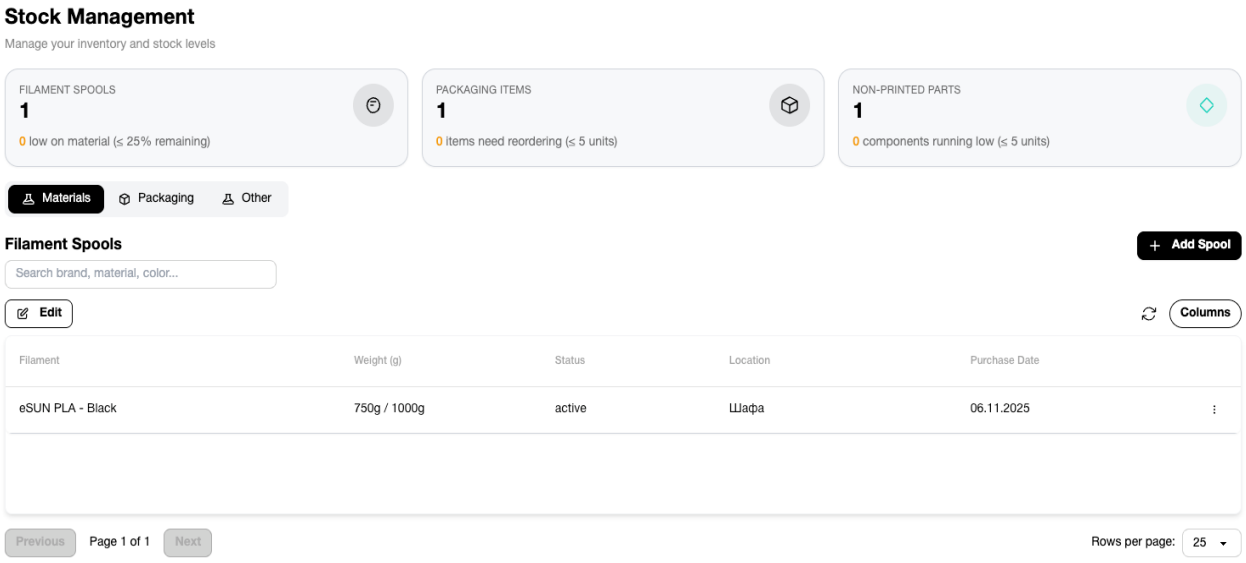


Рисунок 4.1 — Панель управління запасами матеріалів

Таким чином, впровадження Stock management підвищує рівень аналітичності програмного продукту, дозволяючи користувачам не просто калькулювати витрати, а управляти ними на стратегічному рівні. Це відкриває можливість для майбутньої інтеграції з системами ERP або хмарними сервісами для обліку виробництва, формуючи повноцінну екосистему контролю вартості 3D-друку.

4.2 Модуль автоматизованого обліку філамента, інтегрований із програмним середовищем

Одним із ключових завдань у сфері адитивного виробництва є точне визначення кількості використаного матеріалу, адже від цього безпосередньо залежить коректність розрахунку собівартості 3D-друку, планування закупівель і управління ресурсами. З метою автоматизації цього процесу у межах розробки було створено спеціальний пристрій — прототип сенсорного блока трекінгу витрат пластику, інтегровану з програмним забезпеченням системи обліку.

Конструктивно блок являє собою невеликий модуль (рис. 4.2), виготовлений вручну з екологічних матеріалів і обладнаний вимірювальною платою, через яку проходить філамент (стрижень пластику), перш ніж потрапити у сопло 3D-принтера. Усередині корпусу розміщено датчики оптичного типу (або енкодерний механізм), які фіксують переміщення філамента з точністю до 1 мм. Ця інформація у реальному часі передається на мікроконтролер, який виконує перетворення довжини у вагу з урахуванням щільності матеріалу (PLA, ABS, PETG тощо).



Рисунок 4.2 — Прототип модулю автоматизованого обліку філамента

Отримані дані передаються до програмного модуля, де за формулою: ***Кількість закупленого пластику − Кількість використаного пластику = Залишок*,** розраховується фактичний залишок матеріалу на котушці. Результати візуалізуються у вигляді графічного інтерфейсу, що дозволяє користувачу бачити кількість доступного матеріалу для подальших завдань друку.

Додатково система може зберігати історію використання, що дає змогу відстежувати динаміку споживання різних типів пластиків залежно від завантажених моделей, їх геометричної складності, кількості підтримок та налаштувань принтера (швидкість, товщина шару, заповнення). Такі дані формують основу для статистичного аналізу ефективності використання матеріалів і для прогнозування потреб у закупівлі.

Перевагою цієї системи є її висока точність порівняно з традиційними ручними методами (зважування котушки до та після друку), що часто супроводжуються похибками через вологість, залишки підтримок чи неточність побутових ваг. Оскільки вимірювання здійснюються в процесі друку, система мінімізує людський фактор і забезпечує автоматичний контроль у реальному часі.

Крім того, пристрій може бути масштабований для використання з різними типами матеріалів — не лише з пластиком, а й з флекс- або композитними філаментами. Завдяки використанню відкритих протоколів передачі даних (наприклад, MQTT або Serial Communication) пристрій може бути інтегрований у локальну мережу підприємства або систему ERP для централізованого контролю витрат матеріалів.

Водночас, недоліком поточної версії є обмежена точність калібрування, зумовлена ручним виготовленням корпусу та варіаціями у розмірах філаменту. Це може створювати незначні похибки при підрахунку витрат. Також система поки не враховує втрати матеріалу під час друку підтримок або очищення сопла, які

можуть становити 3–7% загальної витрати. Подальший розвиток системи передбачає впровадження автоматичного калібрування сенсорів, а також алгоритму компенсації втрат залежно від типу моделі й параметрів друку.

В наукових дослідженнях підтверджується доцільність використання подібних апаратних рішень. Зокрема, у роботі [20] описується система моніторингу електроспоживання 3D-принтера, яка також використовує датчики руху філамента для контролю ефективності друку. Подібні принципи виявлено й у роботі [22], де сенсори використовуються для вимірювання вологості філаментів у реальному часі, що впливає на якість друку.

Таким чином, впровадження системи фізичного обліку матеріалів дозволяє створити фундамент для точної автоматизованої оцінки собівартості 3D-друку, що в поєднанні з програмними аналітичними модулями створює передумови для комплексної цифровізації виробничого процесу.

4.3 Практичне застосування в 3D-друкарні OH MY STAND

Розробка модуля Stock Management була безпосередньо мотивована реальними потребами бізнесу OH MY STAND — 3D-друкарні, що спеціалізується на виготовленні підставок для смартфонів, планшетів та настільних органайзерів. До створення системи облік матеріалів велося в електронних таблицях Google Sheets, що створювало ряд проблем:

- Неточність обліку залишків — після кожного друку необхідно було вручну вводити витрачену вагу філаменту, що часто забувалося або вводилося з похибками. Це призводило до ситуацій, коли котушка виявлялася порожньою посеред друку замовлення.
- Відсутність попереджень — не було автоматичних сповіщень про низький рівень матеріалів, тому закупівлі здійснювалися реактивно, а не

проактивно. Доставка нового філаменту із закордонних постачальників займала 2-4 тижні, що призводило до втрати потенційних продажів.

- Складність розрахунку собівартості — для кожного нового продукту доводилося вручну розраховувати витрати на філамент, електроенергію, амортизацію принтера, пакування та працю. Це займало 15-20 хвилин на один продукт та створювало високу ймовірність помилок у розрахунках.
- Відсутність історії використання — не було можливості проаналізувати, які матеріали використовуються найчастіше, які продукти є найбільш затратними, або як змінюється споживання філаменту в залежності від сезону.

Впровадження системи CalcMyPrint у виробничий процес OH MY STAND принесло відчутні покращення:

- Економія часу на облік — автоматичне списання матеріалів при створенні продукту зменшило час на ведення обліку з 30-40 хвилин на день до 5-10 хвилин на тиждень (лише для введення нових закупівель). Це вивільнило близько 3 годин на тиждень для інших завдань.
- Зменшення простоїв — завдяки попередженням про низький рівень запасів вдалося скоротити простої через нестачу матеріалів з 4-5 днів на місяць до 0-1 дня. Система попереджає про необхідність закупівлі за 7-10 днів до повного вичерпання запасів, що дає достатньо часу для оформлення замовлення.
- Точність розрахунків — автоматизація розрахунку собівартості зменшила похибки у ціноутворенні. Раніше траплялися випадки, коли продукт продавався дешевше собівартості через неврахування всіх витрат (наприклад, забували додати вартість пакування або амортизацію принтера). Після впровадження CalcMyPrint всі випадки збиткових продажів були усунуті.

- Оптимізація закупівель — аналіз історичних даних показав, що найпопулярнішими кольорами філаменту є чорний (45% споживання), білий (30%) та сірий (15%), тоді як яскраві кольори (жовтий, помаранчевий, рожевий) використовуються рідко (разом близько 10%). Це дозволило оптимізувати закупівлі: тепер чорного та білого PLA купується по 3-4 котушки за раз, а яскравих кольорів — по 1 котушці.
- Прогнозування витрат — система дозволяє прогнозувати щомісячні витрати на матеріали. Аналіз показав, що середнє споживання філаменту становить близько 8-10 кг на місяць (вартість ~$200-250), пакувальних матеріалів — близько $50-70 на місяць. Ці дані використовуються для планування бюджету та прийняття рішень про розширення виробництва.

4.4 Вплив точного розрахунку собівартості на прибутковість бізнесу

Одним із найважливіших аспектів успішного 3D-друку на замовлення є правильне ціноутворення. Занадто низька ціна призводить до збитків, а занадто висока — до втрати конкурентоспроможності. Ситуація до впровадження CalcMyPrint:

На ранніх етапах розвитку OH MY STAND ціни встановлювалися інтуїтивно або на основі цін конкурентів на Etsy. Типовий підхід виглядав так:

- Подивитися ціну аналогічного продукту у конкурентів.
- Встановити трохи нижчу ціну «щоб бути конкурентоспроможним».
- Додати націнку «на око» (~50-100%).

Результати після впровадження CalcMyPrint:

Система CalcMyPrint дозволила перейти від інтуїтивного до науково обґрунтованого ціноутворення:

- Точний розрахунок собівартості — для кожного продукту система розраховує повну собівартість з урахуванням всіх компонентів: вартість

філаменту (включно з відходами на підтримки), електроенергія, амортизація принтера, витрати на обслуговування, праця (час на налаштування, постобробку, пакування), пакувальні матеріали, додаткові компоненти (магніти, гвинти тощо).

- Гнучке ціноутворення — система дозволяє встановлювати різні рівні націнки залежно від каналу продажу.
- Виявлення збиткових продуктів — після впровадження системи було виявлено, що 3 з 15 продуктів в асортименті продавалися зі збитком або мінімальним прибутком (менше 50% маржі). Це були складні багатокольорові моделі з великою кількістю підтримок. Ціни на ці продукти були підвищені на 40-60%, що призвело до зменшення кількості замовлень на 20%, але збільшення загального прибутку на 35%.
- Обґрунтування цін для клієнтів — наявність детального розрахунку собівартості дозволяє пояснювати клієнтам, чому ціна на кастомний продукт вища, ніж на стандартний. Це підвищує довіру та зменшує кількість скарг на «завищені ціни».
- Прийняття рішень про доцільність виробництва — система допомагає швидко оцінити, чи варто братися за нове замовлення. Наприклад, клієнт запропонував замовлення на 50 підставок із знижкою 40%. Введення параметрів у калькулятор показало, що навіть з урахуванням економії на масштабі (зменшення відсотка браку, оптимізація часу налаштування) маржа складе лише 15%, що нижче мінімально прийнятного порогу (25%). Замовлення було відхилено, що дозволило сфокусуватися на більш прибуткових проектах.

Модуль Stock Management програмного продукту CalcMyPrint довів свою ефективність у реальних умовах 3D-друкарні OH MY STAND. Система забезпечила:

- автоматизацію обліку — зменшення часу на ведення обліку матеріалів на 80%;
- підвищення точності розрахунків — усунення помилок у розрахунку собівартості;
- оптимізацію закупівель — зменшення витрат на матеріали на 20%;
- зменшення простоїв — скорочення простоїв через нестачу матеріалів з 4-5 днів до 0-1 дня на місяць;
- збільшення прибутковості — виявлення та усунення збиткових продуктів, оптимізація ціноутворення.

Впровадження системи дозволило перейти від реактивного управління запасами (закупівля «коли закінчилося») до проактивного (закупівля «перед тим, як закінчиться»), що є критично важливим для невеликих виробництв з обмеженим оборотним капіталом.

Інтеграція Stock Management з калькулятором вартості створює синергетичний ефект: точний облік матеріалів дозволяє точніше розраховувати собівартість, а детальний розрахунок собівартості дозволяє краще прогнозувати потреби у матеріалах. Така комплексна система управління є унікальною особливістю CalcMyPrint, що відрізняє її від конкурентів.

Перспективи подальших досліджень: розширення алгоритму для технологій SLA, SLS, DMLS; інтеграція з CAD-системами; розробка ML-системи прогнозування часу друку; створення хмарної платформи обміну даними про вартість друку.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було поставлено та виконано наступні задачі:

1. Проведено аналіз чинників формування вартості 3D-друку. Встановлено, що собівартість складається з вартості матеріалів (30–60 %), машинного часу, витрат на постобробку (до 25 %), енергоспоживання та інфраструктури. Виявлено, що геометрична складність моделі є одним із найбільш впливових чинників.

2. Виконано порівняльний аналіз існуючих систем розрахунку вартості 3D-друку. Встановлено, що більшість калькуляторів не забезпечують детального аналізу геометричної складності моделі.

3. Розроблено підхід до оцінки геометричної складності 3D-моделі з використанням кількісних параметрів: кількості полігонів, площі поверхні, обсягу, внутрішніх порожнин. Створено алгоритм комплексної оцінки геометричних параметрів STL/STEP-файлів з переведенням характеристик у числові коефіцієнти для розрахунку витрат.

4. Створено програмний продукт CalcMyPrint — веб-систему для розрахунку вартості 3D-друку на базі Nx-монорепозиторію.

5. Реалізовано модуль калькулятора з покроковим розрахунком собівартості, що включає вартість матеріалу, час друку, електроенергію, амортизацію, постобробку, пакування. Забезпечено гнучке ціноутворення залежно від каналу продажу.

6. Розроблено модуль Stock Management для автоматизованого обліку матеріалів з відстеженням у реальному часі, попередженнями про низький рівень запасів.

7. Здійснено практичне впровадження CalcMyPrint у 3D-друкарні OH MY STAND. Результати: зменшення часу обліку на 80 %, економія на матеріалах 20

%, скорочення простоїв з 4–5 днів до 0–1 дня на місяць, виявлення та усунення збиткових продуктів.

8. Доведено економічну ефективність точного розрахунку собівартості. Перехід від інтуїтивного до науково обґрунтованого ціноутворення забезпечив проактивне управління запасами та оптимізацію виробничих процесів.

Отже, у результаті виконаної кваліфікаційної роботи проведено комплексне дослідження алгоритмів розрахунку вартості 3D-друку з урахуванням геометричної складності моделі та розроблено програмний продукт CalcMyPrint.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Himanshu M., Omkar G., Ajinkya M. Design and optimization of 3D printing process parameters. 2024. URL: https://www.researchgate.net/publication/382560722_DESIGN_AND_OPTIMIZATION_OF_3D_PRINTING_PROCESS_PARAMETERS
2. Sood A. K., Ohdar R. K., Mahapatra S. S. Parametric Appraisal of Mechanical Property of Fused Deposition Modelling Processed Parts. Materials & Design. 2010. № 31. P. 287-295.
3. Gibson I., Rosen D., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer, 2021.
4. On the Impact of Additive Manufacturing Processes Complexity on Modelling. URL: https://www.mdpi.com/2076-3417/11/16/7743 (дата звернення: 20.11.2025).
5. Baumers M., Beltrametti L., Gasparre A., Hague R. Informing Additive Manufacturing technology adoption: total cost and the impact of capacity utilisation. Taylor & Francis Journals, 2017. Vol. 55(23), P. 6957-6970.
6. Berman, B. 3-D printing: The new industrial revolution. Business Horizons, 2012. Vol. 55 (2), 2012. P. 155-162.
7. Almaghariz E., Conner B., Lenner L. Quantifying the Role of Part Design Complexity in Using 3D Sand Printing for Molds and Cores. 2016. Vol. 10, P. 240-252. URL: https://link.springer.com/article/ 10.1007/s40962-016-0027-5 (дата звернення: 20.11.2025).
8. Huang S. H., Liu P., Mokasdar A., Hou L. Additive manufacturing and its societal impact: A literature review. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013. Vol. 25, P. 1169-1181. URL: http://dx.doi.org/10.1080/09537287.2013.808835.

9. Methodology for complexity and cost comparison between subtractive and additive manufacturing processes. URL: https://ideas.repec.org/a/spr/joinma/v35y2024i2d10.1007_s10845-022-02059-z.html (дата звернення: 20.10.2025).
10. Top 8 3D Printing Cost Calculators, Tested and Reviewed. URL: https://www.eufymake.com/ca-fr/blogs/buying-guides/3d-printing-cost-calculator?srsltid=AfmBOorNfFX0ndVAwzs0Xx1pZde6tOMgumV9I6ZXt7RAksNYuypgTO9s (дата звернення: 20.10.2025).
11. Gao W., Zhang Y. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. Computer-Aided Design, 2015. Vol. 69, P. 65-89.
12. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K.T.Q., Hui D. Additive Manufacturing (3D Printing): A Review of Materials, Methods, Applications and Challenges. Composites Part B: Engineering, 2018. Vol. 143, P. 172-196. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
13. Conner B., Manogharan G. Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services. Additive Manufacturing, 2014. Vol. 1–4, P. 64-76.
14. Chua C. K., Leong K. F., Lim C. S. Rapid Prototyping: Principles and Applications. World Scientific, 2010. 540 p.
15. Study and comparison of the different costs' schema associated to geometry, material and processing between 3D printing, injection molding and machining manufacturing technologies. URL: https://upcommons.upc.edu/entities/publication/e241a25d-d67d-452b-bf22-ff678ed06569 (дата звернення: 20.10.2025).
16. Saputro A. K., Rochmakhayatin F. A., Electrical Power Consumption Monitoring on Filament 3D Printer Using Web Based E3S Web Conf., Vol. 328, 2021.

17. Budiono H. D. S., Hadiwardoyo F. A. Development of product complexity index in 3D models using a hybrid feature recognition method with rule-based and graph-based methods . Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2021. Vol. 3 No. 1 (111), P. 47–61. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.227848
18. Paśnikowska-Łukaszuk M. The Use of 3D Printing Filaments to Build Moisture Sensors in Porous Materials. URL: https://www.mdpi.com/1996-1944/18/1/115.
19. Thompson, M. K., Moroni G., Vaneker T. Design for additive manufacturing: trends, opportunities, considerations, and constraints. CIRP Annals, 2016. Vol. 65(2), P. 737–760. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.05.004.
20. Cost Model Framework for Pieces Additively Manufactured in Fused Deposition Modeling for Low to Medium Batches. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38389673/ (дата звернення: 20.10.2025).
21. Alam Z., Iqbal F., Khan D. Post-processing techniques for additive manufacturing: A review. Journal of Manufacturing Processes, 2019. Vol. 47(11), P. 1-19.
22. Gebhardt A. Understanding Additive Manufacturing: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing. München : Hanser, 2020. 167 c.
23. Rosen D. W. Design for additive manufacturing: past, present, and future directions. Journal of Mechanical Design, 2014. Vol. 136(11), P. 15. DOI:10.1115/1.4028073
24. Simplify3D. Print time and cost estimation features. Retrieved from. 2024. URL: https://www.simplify3d.com (дата звернення: 20.10.2025).

Декларація
академічної доброчесності
здобувача ступеня вищої освіти ЗНУ

Я, Божедомов Михайло Андрійович, студент 2 курсу, денної форми навчання, Інженерного навчально-наукового інституту ім. Ю.М. Потебні ЗНУ, спеціальність 121 Інженерія програмного забезпечення, адреса електронної пошти mike.bozhedomov@gmail.com,

- підтверджую, що написана мною кваліфікаційна робота на тему: «**Дослідження алгоритмів розрахунку вартості 3D–друку з урахуванням геометричної складності моделі**» відповідає вимогам академічної доброчесності та не містить порушень, що визначені у ст. 42 Закону України «Про освіту», зі змістом яких ознайомлений;

- заявляю, що надана мною для перевірки електронна версія роботи є ідентичною її друкованій версії;

- згоден на перевірку моєї роботи на відповідність критеріям академічної доброчесності у будь-який спосіб, у тому числі за допомогою Інтернет - системи, в також архівування моєї роботи у базі даних цієї системи.

Дата 30.11.2025 Підпис_____ Божедомов Михайло Андрійович
(студент)

Дата 30.11.2025 Підпис _____ Міхайлуца Олена Миколаївна
(науковий керівник)