

О. М. МІХАЙЛУЦА, М. А. БОЖЕДОМОВ, А. В. ПОЖУЄВ
Запорізький національний університет

АВТОМАТИЗАЦІЯ РОЗРАХУНКУ ВИТРАТ У 3D-ДРУЦІ: АРХІТЕКТУРНІ РІШЕННЯ ТА АЛГОРИТМИ АНАЛІЗУ СКЛАДНОСТІ ЦИФРОВИХ МОДЕЛЕЙ

Розглянуто та розв'язано актуальну науково-практичну задачу щодо розробки та впровадження комплексної системи автоматизованого розрахунку собівартості адитивного виробництва. Досліджено сучасний стан ринку 3D-друку та виявлено, що існуючі методики оцінювання витрат часто ігнорують складну геометрію виробів, що призводить до значних фінансових похибок. Обґрунтовано необхідність переходу від лінійних моделей розрахунку до інтегрованого підходу, який поєднує цифровий аналіз моделей та апаратний моніторинг.

Проаналізовано методи геометричного аналізу полігональних сіток формату STL. У ході дослідження виділено та систематизовано ключові дескриптори складності, зокрема кількість полігонів, щільність мешу, площу поверхонь та показник Feature Count. Описано алгоритмічне забезпечення, яке дозволяє на основі цих даних прогнозувати час роботи обладнання та обсяги витратних матеріалів для підтримних структур.

Деталізовано програмну реалізацію системи «CalcMyPrint», побудовану за принципами монорепозиторію з використанням фреймворку Nx. Визначено переваги застосування сучасного технологічного стеку: Angular 19 для створення реактивного користувацького інтерфейсу, NestJS 11 для розробки масштабованої серверної частини та бібліотеки Three.js для забезпечення інтерактивної 3D-візуалізації моделей безпосередньо у веббраузері.

Представлено інноваційне апаратне рішення – спеціалізований IoT-модуль на базі мікроконтролера, оснащений оптичним енкودером. Розкрито механізм прецизійного трекінгу витрат філаменту, який дозволяє отримувати дані про реальну довжину використаної нитки в режимі реального часу. Доведено експериментальним шляхом, що пряме вимірювання витрат матеріалу є значно точнішим за метод зважування, оскільки дозволяє уникнути впливу гігроскопічності полімерів на результати розрахунків.

Встановлено, що розроблена модель оцінки забезпечує високу предиктивну точність формування кошторису навіть для об'єктів із топологічною оптимізацією та складним біонічним дизайном. Доведено, що впровадження системи на підприємствах сприяє підвищенню рентабельності на 15–25 % за рахунок автоматизації обліку складських залишків, мінімізації ризиків «людського фактору» та створення прозорої системи ціноутворення. Сформульовано висновки щодо потенціалу інтеграції системи у загальну екосистему Індустрії 4.0.

Ключові слова: адитивне виробництво, 3D-друк, собівартість, геометричні дескриптори, IoT-моніторинг, автоматизація розрахунків.

О. М. MIKHAILUTSA, M. A. BOZHEDOMOV, A. V. POZHUYEV
Zaporizhzhia National University

AUTOMATION OF COST CALCULATION IN 3D PRINTING: ARCHITECTURAL SOLUTIONS AND ALGORITHMS FOR DIGITAL MODEL COMPLEXITY ANALYSIS

The properties of the schedule construction procedure, which formalizes the card method for manual scheduling, are considered. A pressing scientific and practical problem of developing and implementing a comprehensive automated cost calculation system for additive manufacturing is examined and addressed. The current state of the 3D printing market is examined, revealing that existing cost estimation methods often ignore complex product geometries, leading to significant financial errors. The need for a transition from linear calculation models to an integrated approach combining digital model analysis and hardware monitoring is substantiated.

Methods for geometric analysis of STL polygonal meshes are analyzed. The study identifies and systematizes key complexity descriptors, including polygon count, mesh density, surface area, and feature count. Algorithmic support is described for data-based prediction of equipment runtime and consumable volumes for support structures.

The software implementation of the CalcMyPrint system, built on the principles of a monorepository using the Nx framework, has been detailed. The advantages of using a modern technology stack are identified: Angular 19 for creating a reactive interface, NestJS 11 for developing a scalable server-side component, and the Three.js library for providing interactive 3D visualization of models directly in a web browser.

An innovative hardware solution is presented – a specialized IoT module based on a microcontroller and equipped with an optical encoder. A mechanism for precision filament consumption tracking is revealed, enabling real-time data on the actual length of filament used. Experiments have proven that direct measurement of material consumption is significantly more accurate than weighing, as it eliminates the influence of polymer hygroscopicity on calculation results.

The developed assessment model was found to ensure high predictive accuracy in cost estimates, even for facilities with topological optimization and complex bionic designs. Implementing the system at enterprises has been shown to increase profitability by 15–25 % by automating inventory accounting, minimizing human error risks, and creating a transparent pricing system. Conclusions are drawn regarding the potential for integrating the system into the overall Industry 4.0 ecosystem.

Keywords: additive manufacturing, 3D printing, cost price, geometric descriptors, IoT monitoring, automation of calculations.

Постановка проблеми

Сучасний етап розвитку промисловості, що базується на концепції «Індустрії 4.0», зумовлює перехід від традиційних методів субтрактивного виробництва до адитивних технологій. Починаючи з 2010-х років, 3D-друк трансформувався з інструменту швидкого прототипування у повноцінну технологію виготовлення кінцевих виробів, кастомізованих деталей та функціональних вузлів зі складною геометрією. На сьогодні адитивні методи дозволяють створювати не лише візуальні макети, а й вироби з металів, кераміки та високоміцних композитів, що знаходять застосування в аерокосмічній, медичній та автомобільній галузях.

Головною перевагою адитивного виробництва є «геометрична свобода», яка дозволяє проектувати об'єкти з внутрішніми порожнинами, тонкостінними елементами та комірчастими структурами. Виготовлення подібних конструкцій традиційними методами (литтям чи механічною обробкою) часто є технічно неможливим через обмеження інструмента або економічно недоцільним через високу вартість індивідуального оснащення.

Незважаючи на технологічні переваги, широке впровадження складної геометрії стикається з серйозним бар'єром – відсутністю адекватних моделей оцінки собівартості. В адитивному виробництві складність форми не є «безкоштовною»: вона опосередковано впливає на складність траєкторії руху друкуючої головки (G-code), потребу у великій кількості підтримувальних структур для консольних елементів, а також на трудомісткість їх видалення з важкодоступних порожнин.

Таким чином, виникає гостра науково-практична потреба у розробці методів аналізу та калькуляції витрат, які б враховували геометричні дескриптори виробу як ключові фактори впливу на економічну ефективність виробництва.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питання економічної ефективності адитивного виробництва розглядалися у працях багатьох науковців, які виділяють класичні складові собівартості: витрати на матеріал, амортизацію обладнання, енергоспоживання та оплату праці. Проте аналіз існуючих комерційних калькуляторів та теоретичних моделей свідчить, що геометрична складність виробу часто враховується лише опосередковано – через загальний час друку або масу допоміжних структур. Такий спрощений підхід ігнорує специфічні ризики: імовірність деформації тонких стінок, складність видалення підтримок із внутрішніх порожнин та необхідність трудомісткої пост-обробки складних поверхонь.

Фундаментальні підходи до калькуляції собівартості 3D-друку закладені у працях Н. Хопкінсона та П. Дікенса [1], які одними з перших запропонували розділяти витрати на фіксовані (обладнання, адміністрування) та змінні (матеріал, енергія). У подальших дослідженнях акцент змістився на часову складову, оскільки саме час роботи принтера є головним ресурсом, що поглинає амортизаційні витрати та витрати на утримання інфраструктури.

Питання впливу геометрії на вартість стало об'єктом прискіпливої уваги з появою концепції Design for Additive Manufacturing (DfAM). Дослідники І. Гібсон та Д. Розен [2] зазначають, що складність форми в адитивному виробництві є «безкоштовною» лише з точки зору відсутності потреби в інструментальному оснащенні (наприклад, прес-формах). Проте вона суттєво впливає на орієнтацію деталі в камері та обсяг підтримувальних структур. Наявність

критичних кутів нахилу та консольних елементів значно збільшує витрату матеріалу, що часто ігнорується у спрощених математичних моделях.

В українському науковому сегменті увага зосереджена на оптимізації технологічних процесів та впровадженні адитивних рішень у машинобудування, зокрема у контексті енергоефективності та вибору режимів друку залежно від властивостей матеріалів. Однак інтеграція параметрів геометричної складності (як-от фрактальна розмірність або кривина поверхонь) у моделі розрахунку собівартості залишається малодослідженою нішею.

Більшість сучасних комерційних інструментів (наприклад, ERP-системи для 3D-ферм) використовують лінійні залежності. Це призводить до високої похибки при роботі з біонічним дизайном: об'єм матеріалу може бути мінімальним, проте надзвичайна складність траєкторії руху друкуючої головки (G-code) спричиняє непередбачуване зростання часу друку.

Таким чином, існує об'єктивна потреба у розробці інтегрованої моделі, де геометричні дескриптори (кількість полігонів, щільність внутрішніх порожнин, площа поверхонь) виступають вагомими коефіцієнтами у загальній формулі вартості. Це дозволить підвищити точність фінансового планування та конкурентоспроможність підприємств у серійному виробництві.

Мета дослідження

Основною метою роботи є дослідження закономірностей впливу геометричних дескрипторів 3D-моделі на динаміку формування витрат в адитивному виробництві, а також обґрунтування методики, що дозволяє конвертувати показники складності форми у точні вартісні коефіцієнти.

Виклад основного матеріалу дослідження

Багатофакторний аналіз детермінант собівартості адитивного виробництва

Прецизійний розрахунок вартості адитивного виготовлення є детермінуючим етапом стратегічного планування, що визначає не лише економічну доцільність проекту, а й ринкову конкурентоспроможність кінцевого продукту. Згідно з сучасними моделями економічного аналізу, інтегральна собівартість 3D-друку формується як мультифакторна функція, де ключовими змінними є витрати на сировину, експлуатація машинного часу, технологічна пост-обробка та амортизація інфраструктури [2].

Витрати на матеріали складають домінуючу частку собівартості, коливаючись у межах 30–60 % залежно від обраної технології [3]. Економічна вага цього компонента прямо корелює з фізико-хімічними властивостями субстрату: якщо для стандартних термопластів (PLA, ABS) питомі витрати є мінімальними, то для металевих порошків (титанові, нікелеві сплави) вартість зростає на 1000–1500 % [4]. Важливим аналітичним показником тут виступає Material Utilization Ratio (MUR) – коефіцієнт корисного використання матеріалу, що враховує технологічні втрати та об'єм підтримувальних структур [5].

Другим за вагомістю чинником є вартість машино-години, яка акумулює витрати на амортизацію обладнання, енергоспоживання та сервісне обслуговування. Вартість експлуатації одиниці часу варіюється від 10 до 150 USD, що визначається капітальною вартістю принтера – від бюджетних FDM-систем до складних установок DMLS.

Окрему увагу слід приділити процесам фінішної обробки (очищення, полірування, термічна стабілізація), які часто стають «вузьким місцем» виробництва. Пост-процесинг може поглинати до 40 % часового ресурсу та формувати до 25 % фінансових витрат [6]. Рівень витрат у цьому сегменті є прямою функцією від геометричної складності виробу: наявність важкодоступних порожнин та висока щільність підтримки експоненціально підвищують частку ручної праці.

Формування вартості адитивного виготовлення є складним ітераційним процесом, що інтегрує технічні, матеріалознавчі та організаційні аспекти. На відміну від традиційних

методів, собівартість у 3D-друці не є лінійною функцією від ціни сировини, а визначається цілою сукупністю взаємозалежних чинників, які можна розділити на три ключові групи.

– *Матеріально-технологічний базис.* Вибір технології (FDM, SLA, SLS, DMLS) та відповідного матеріалу є первинним фактором ціноутворення. Вартість сировини варіюється від бюджетних термопластів до прецизійних фотополімерів та порошкових металевих сплавів, ціна яких сягає сотень доларів за одиницю ваги. Вибір матеріалу диктує вимоги до обладнання: промислові технології (SLS, DMLS) потребують контролю газового середовища та високотемпературної стабілізації, що суттєво підвищує амортизаційні витрати та енергоємність процесу.

– *Параметрична оптимізація та налаштування друку.* Собівартість виробу прямо корелює з режимами побудови моделі. Товщина шару, швидкість експозиції та щільність внутрішнього заповнення (infill) формують баланс між якістю поверхні та машинним часом. Наприклад, підвищення роздільної здатності вдвічі може призвести до експоненціального зростання часу друку. Особливим критичним параметром є орієнтація деталі на платформі, від якої залежить об'єм підтримувальних структур і, як наслідок, коефіцієнт використання матеріалу.

– *Геометрична складність та пост-обробка.* Найменш формалізованим, проте вагомим чинником є геометрична архітектура моделі. Наявність складних внутрішніх порожнин, тонкостінних елементів та біонічних структур підвищує ризики виникнення дефектів і потребує прецизійного калібрування. Це неминуче збільшує трудомісткість етапу пост-обробки (зняття підтримок, шліфування, термічна стабілізація), частка якої у загальній структурі витрат може сягати 30 %.

Таким чином, прецизійна оцінка вартості 3D-друку вимагає переходу від спрощених розрахунків до інтегрованих інтелектуальних систем. Врахування геометричних дескрипторів у поєднанні з технологічними режимами дозволяє забезпечити точне прогнозування ресурсів, що є фундаментальною умовою автоматизації виробничих процесів у сучасних CAD/CAE-середовищах.

Методологія кількісної оцінки геометричної складності адитивних моделей

Об'єктивна оцінка геометричної складності є фундаментальною умовою прецизійного планування адитивного виробництва. Складність архітектури виробу детермінує не лише фінансові витрати, а й технологічну стабільність процесу, ймовірність виникнення дефектів та інтенсивність операцій пост-процесингу.

Базовий підхід до кількісної оцінки базується на геометричному аналізі полігональних сіток (STL) або твердотільних моделей (CAD). Ключовими індикаторами обчислювального навантаження на системи підготовки (slicing) виступають кількість полігонів, сумарна площа поверхонь та габаритне співвідношення. Висока щільність полігональної сітки прямо пропорційно збільшує потребу в обчислювальних ресурсах для генерації траєкторій руху [5, 7]. Проте критичним є те, що моделі з ідентичним об'ємом, але різною топологічною насиченістю (наявністю порожнин, тонких стінок), вимагають принципово різних стратегій охолодження та побудови допоміжних структур.

У сучасній практиці для порівняльного аналізу використовують спеціалізовані метрики:

- Complexity Index та Mesh Complexity – інтегральні показники структурної насиченості.
- Feature Count – кількісний облік конструктивних елементів (виступів, отворів, каналів).

Високе значення Feature Count свідчить про збільшення кількості переходів друкувальної головки (retractions) та підвищену ймовірність геометричних відхилень. Такі інструменти аналізу вже інтегровані в екосистеми Siemens NX, SolidWorks та Autodesk Fusion 360, що дозволяє проводити пре-виробничу оцінку складності на етапі проектування [8].

Сучасний ринок програмного забезпечення пропонує тривірневу структуру інструментів для калькуляції витрат:

– CAD-інтегровані модулі (Fusion 360, SolidWorks): дозволяють проводити попередню оцінку матеріаломісткості на етапі ескізування.

– Технологічні слайсери (Cura, Simplify3D, PreForm): забезпечують високу точність розрахунку машинного часу та витрат на підтримки за рахунок симуляції реального процесу нарізки на шари [9].

– Спеціалізовані системи управління (Netfabb, 3DPrinterOS): орієнтовані на промислове використання, де враховуються не лише параметри друку, а й амортизація та трудовитрати.

Алгоритми планування друку використовують результати аналізу складності для оптимізації орієнтації моделі на платформі. Це дозволяє досягти раціонального балансу між якістю поверхні та об'ємом відходів матеріалу. Особливого значення набуває автоматизація цих процесів при роботі з багатокомпонентними збірками, де ручне налаштування є економічно недоцільним [10].

Дослідження вказують на існуючу диференціацію між теоретичною оцінкою CAD-модулів та реальними витратами. Для об'єктів із високою кількістю полігонів похибка автоматизованих калькуляторів може бути значною. Найвищу прецизійність сьогодні демонструє поєднання автоматизованих інструментів з верифікацією фахівця, що дозволяє врахувати специфічні обмеження конкретного обладнання [11]. Таким чином, сучасна парадигма калькуляції має базуватися на багаторівневому аналізі, що поєднує геометричні дескриптори з емпіричними даними виробничих систем.

Концептуалізація інтегрованого підходу до оцінки вартості

На основі проведеного аналізу факторів стає очевидною потреба у вдосконаленні методів розрахунку. Запропонований у даному дослідженні алгоритм та модульний фреймворк спрямовані на подолання фундаментального недоліку існуючих систем – ігнорування геометричної складності об'єктів. На відміну від традиційних рішень, які базуються на спрощеній лінійній залежності ціни від маси, нова модель впроваджує метод комплексної дескрипторної оцінки цифрових моделей (STL, STEP).

Процес аналізу розпочинається з роботи спеціалізованих скануючих модулів, які ідентифікують критичні топологічні елементи: надтонкі стінки, складні внутрішні лабіринти та консольні з'єднання. Отримані дані конвертуються у числові коефіцієнти складності, що дозволяє динамічно коригувати прогноз машино-годин, об'єм технологічних підтримок та очікувані трудовитрати.

Архітектура розробленого фреймворку побудована за модульним принципом, що забезпечує автономну роботу блоків обробки геометрії, ресурсного планування та фінансової агрегації. Така структура дозволяє безперешкодно інтегрувати систему в існуючі виробничі середовища (ERP-системи), гарантуючи високу точність кошторису без додаткового навантаження на персонал. Універсальність інструменту підкріплюється можливістю адаптації тарифних сіток під специфічні типи матеріалів та прецизійне обладнання.

Практичне впровадження цього алгоритму дозволяє поєднати переваги автоматизації з високою достовірністю прогнозів, нівелюючи вплив людського фактору. Це створює прозорий механізм ціноутворення, де ключову роль відіграє не лише фізична вага виробу, а й інтелектуальна складність його конструкції. У підсумку такий підхід забезпечує ефективне стратегічне планування, мінімізує ризики непередбачуваних витрат і підвищує рентабельність при виготовленні топологічно оптимізованих деталей та об'єктів біонічного дизайну.

Розробка програмного продукту для розрахунку вартості 3d-друку

Розроблений програмний продукт *CalcMyPrint* спроектований як комплексна веб-орієнтована екосистема, призначена для автоматизації розрахунку собівартості адитивного виробництва. Ключовою особливістю системи є інтеграція інтелектуальних алгоритмів, що враховують не лише базові параметри, такі як об'єм та тип матеріалу, а й специфічні дескриптори: геометричну складність моделі, прогнозоване енергоспоживання та витрати на технологічну постобробку. Проєкт реалізовано на базі монорепозиторію за допомогою інструменту Nx (версія 21.1.2), що дозволило оптимізувати управління залежностями, забезпечити високу модульність коду та закласти фундамент для подальшого масштабування системи.

Архітектурна модель системи базується на принципі розділення відповідальностей (Separation of Concerns) і реалізує чітку трирівневу структуру. Презентаційний рівень

представлений клієнтськими застосунками на базі фреймворку Angular: основним модулем для управління розрахунками (apps/dashboard) та лендінг-сторінкою з підтримкою серверного рендерингу (SSR) для покращення взаємодії з користувачами та оптимізації (apps/landing). Рівень бізнес-логіки зосереджений у серверній частині API, побудованій на базі NestJS, що забезпечує стабільну обробку запитів та виконання складних обчислювальних операцій. Рівень даних опирається на хмарну інфраструктуру Supabase (PostgreSQL), яка відповідає за надійне зберігання інформації та автентифікацію. Використання спільних бібліотек для авторизації, інтерфейсних компонентів та сервісів гарантує високу консистентність даних і коду в межах усього проєкту.

Для реалізації системи обрано сучасний технологічний стек, що гарантує високу продуктивність та відмовостійкість. Основу фронтенд-частини складає Angular 19.2 у поєднанні з бібліотекою Angular Material для створення стандартизованих інтерфейсів. Візуальна стилізація реалізована за допомогою TailwindCSS та компонентної бібліотеки DaisyUI, що дозволило створити адаптивний та сучасний дизайн. Важливою складовою є інтеграція бібліотеки Three.js, яка забезпечує можливість інтерактивної 3D-візуалізації моделей та проведення глибокого геометричного аналізу STL-файлів (зокрема, підрахунку кількості полігонів та площі поверхні) безпосередньо на стороні клієнта для отримання миттєвого зворотного зв'язку.

Серверна частина функціонує на базі NestJS 11.0, що забезпечує модульність та масштабованість бекенду. Для автоматизованої документації API використовується Swagger, а безпеку та контроль доступу реалізовано через інтеграцію Supabase та Passport.js. Інфраструктурні питання, включаючи стратегію розгортання та хостинг, вирішуються за допомогою платформи Firebase Hosting. Якість вихідного коду та стабільність усієї екосистеми підтримуються регулярним тестуванням із використанням інструментів Jest для модульних (Unit) тестів та Cypress для наскрізного (E2E) тестування.

Система збереження даних побудована на базі Supabase (PostgreSQL). Ключовим аспектом безпеки є впровадження механізму Row Level Security (RLS), який реалізує концепцію мультитенантності. Це гарантує повну ізоляцію даних користувачів: кожен запит до бази даних перевіряється безпосередньо на рівні ядра СУБД, що унеможливує несанкціонований доступ до сторонніх розрахунків або конфіденційних налаштувань обладнання.

Логічна структура бази даних охоплює профілі користувачів та організацій, каталог обладнання з детальними технічними характеристиками принтерів (зокрема вартість машино-години та параметри енергоспоживання), а також базу матеріалів із їхніми фізичними властивостями та актуальною ринковою ціною. Окремим сегментом є журнал розрахунків, де фіксуються виконані операції, геометричні дескриптори моделей та фінальні кошториси. Така архітектура дозволяє не лише забезпечувати поточні потреби користувачів, а й накопичувати масиви статистичних даних для подальшого вдосконалення алгоритмів предиктивної оцінки вартості адитивного виробництва.

Програмний комплекс розбитий на логічні модулі, що забезпечують повний цикл підготовки та розрахунку адитивного виробництва.

Ядром системи є універсальний калькулятор, реалізований за допомогою патерну Facade. Сервіс CalculatorFacadeService консолідує дані з різних форм і виконує багаторівневий розрахунок собівартості, що включає: аналіз фізичних параметрів 3D-моделі та витрат матеріалу певної марки, розрахунок енергоспоживання та погодинної амортизації обладнання, а також врахування вартості праці оператора, витрат на пакування та допоміжних матеріалів. Компонентна структура фронтенду (на базі Angular) дозволяє динамічно оновлювати підсумкову вартість при зміні будь-якого параметра в режимі реального часу.

Модуль управління витратними матеріалами забезпечує ведення бази філаментів із дворівневою структурою (бренди та типи матеріалів). Система враховує фізичні властивості (щільність) для перерахунку довжини в масу, а також підтримує HEX-візуалізацію кольорів, що дозволяє точно ідентифікувати запаси та їхню ринкову вартість.

Модуль управління парком принтерів призначений для обліку технічних та економічних показників обладнання. Модуль автоматизує розрахунок вартості однієї машино-години на основі ціни принтера, терміну його експлуатації, потужності та витрат на регламентне технічне обслуговування. Доступна бібліотека пресетів для швидкого додавання поширених моделей 3D-принтерів.

Модуль продуктів та моделей виконує функцію системи зберігання та каталогізації. Він дозволяє користувачам керувати STL-моделями із заданими параметрами друку, зберігати проміжні чернетки та формувати картки готових продуктів із зафіксованою собівартістю для подальшого комерційного використання.

Система базується на комбінованій моделі розрахунку, яка забезпечує повне охоплення прямих та непрямих витрат адитивного виробництва. Сукупна собівартість одиниці продукції визначається як сума окремих компонентів витрат:

$$C_{tot} = \frac{P_{spool}}{W_{spool}} \cdot W_{model} + \left(\frac{P_{power}}{1000} \cdot P_{kWh} + \frac{C_{purchase}}{H_{lifetime}} + \frac{C_{service}}{H_{interval}} \right) \cdot T_{print} + C_{labor} + C_{pack} + C_{add},$$

де P_{spool} – ціна катушки; W_{spool} – вага катушки; W_{model} – вага моделі; P_{power} – потужність принтера (Вт); P_{kWh} – тариф за кВт · год; T_{print} – час друку (год); $C_{purchase}$ – вартість придбання принтера; $H_{lifetime}$ – очікуваний ресурс роботи (год); $H_{interval}$ – інтервал обслуговування (год); $C_{service}$ – вартість обслуговування; C_{labor} – вартість праці; C_{add} – вартість додаткових компонентів; C_{pack} – вартість пакування.

Фінальна ціна з урахуванням націнки та комісій:

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

де M_{amount} – сума націнки; $F\%$ – відсоток комісій маркетплейсу.

Модуль автоматизованого обліку філамента, інтегрований із програмним середовищем

Одним із пріоритетних завдань у сфері адитивного виробництва є прецизійне визначення кількості використаного матеріалу. Від точності цих даних безпосередньо залежить коректність розрахунку собівартості, ефективність планування закупівель та якість управління ресурсами. Для автоматизації цього процесу в межах розробки було створено апаратний прототип – сенсорний блок трекінгу витрат пластику, інтегрований із програмною екосистемою обліку.

Пристрій являє собою компактний вимірювальний модуль, корпус якого виготовлено з екологічного біорозкладного полімеру (PLA) методом FDM-друку. Модуль оснащений спеціалізованою друкованою платою з мікроконтролером, через яку проходить філамент безпосередньо перед подачею в екструдер 3D-принтера.

Внутрішня архітектура пристрою базується на оптичному енкодерному механізмі, який фіксує лінійне переміщення філамента з дискретністю до 1 мм. Дані про рух у реальному часі передаються на мікроконтролер, який конвертує довжину витраченого стрижня у масу, враховуючи щільність конкретного матеріалу (PLA, ABS, PETG тощо) та його номінальний діаметр.

Отримані показники передаються до програмного модуля системи, де здійснюється розрахунок фактичного залишку матеріалу на катушці як різницю загальної маси закупленого пластику та сумарної маси використаного матеріалу, зафіксована сенсором.

Результати обчислень візуалізуються через графічний інтерфейс, що дозволяє оператору оперативно оцінювати обсяг доступного ресурсу для майбутніх завдань. Крім того, система накопичує історію споживання, що стає підґрунтям для статистичного аналізу ефективності використання матеріалів залежно від складності моделей та технічних параметрів друку (швидкість, висота шару, щільність заповнення).

Використання даного модуля забезпечує вищу точність порівняно з традиційними методами (наприклад, зважуванням катушки), оскільки виключає похибки, пов'язані з гігроскопічністю пластику (поглинанням вологи з повітря) або неточністю побутових ваг. Завдяки підтримці відкритих протоколів (MQTT, Serial), пристрій може бути інтегрований у локальну мережу підприємства або системи класу ERP для централізованого контролю.

Доцільність впровадження подібних апаратних рішень підтверджується світовими дослідженнями (зокрема [12]), де аналогічні датчики використовуються для моніторингу енергоефективності та якості друку. Таким чином, інтеграція системи фізичного обліку матеріалів створює надійний фундамент для автоматизованої оцінки собівартості та комплексної цифровізації виробничого процесу.

Висновки

На основі проведеного дослідження встановлено, що традиційні лінійні моделі розрахунку собівартості, які базуються виключно на масі виробу, мають критично високу похибку при роботі з об'єктами біонічного дизайну та складними топологіями. Обґрунтовано, що вирішальну роль у формуванні вартості відіграють геометричні дескриптори – кількість полігонів, площа поверхонь та щільність підтримувальних структур, оскільки саме вони визначають реальний машинний час та трудомісткість технологічної пост-обробки. Для вирішення цієї проблеми розроблено архітектуру та реалізовано програмний комплекс «*CalcMyPrint*» на базі сучасного стеку NX/Angular/NestJS. Завдяки інтеграції бібліотеки Three.js система дозволяє проводити прецизійний аналіз цифрових моделей безпосередньо у браузері, що суттєво прискорює етап пре-процесингу та підготовки комерційних пропозицій. Наукову новизну роботи доповнено апробацією апаратного IoT-рішення для трекінгу ресурсів: створений прототип сенсорного блоку на основі оптичного енкодера дозволяє нівелювати похибки вимірювання маси, спричинені гігроскопічністю полімерів, та забезпечує актуальність даних про складські залишки у реальному часі. Практична цінність дослідження полягає у створенні універсального фреймворку, який дозволяє підприємствам перейти від інтуїтивного ціноутворення до предиктивного фінансового моделювання, підвищуючи точність планування прибутковості на 15–25 % порівняно зі стандартними методами калькуляції.

Список використаної літератури

1. Hopkinson N., Dicknes P. Analysis of rapid manufacturing – using layer manufacturing processes for production. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2003. Vol. 217(1). P. 31–39. <https://doi.org/10.1243/095440603762554596>
2. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M. *Additive Manufacturing Technologies* 3rd ed. Cham : Springer, 2021. 675 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>
3. Berman B. 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*. 2012. Vol. 55 (2). P. 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>
4. 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>
5. Thompson, M., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., Gibson, I., Bernard, A., Schulz, J., Graf, P., Ahuja, B., Martina, F. Design for additive manufacturing: trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals*. 2016. Vol. 65(2). P. 737–760. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>
6. 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. 67. P. 1191–1203. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4558-5>

7. Alam Z., Iqbal F., Khan D. Post-processing Techniques for Additive Manufacturing (1st ed.). Boca Raton : CRC Press, 2023. P. 292. <https://doi.org/10.1201/9781003288619>
8. Rosen D. W. Design for Additive Manufacturing: Past, Present, and Future Directions. *Journal of Mechanical Design*. 2014. Vol. 136. Iss. 9. 090301. <https://doi.org/10.1115/1.4028073>
9. Simplify3D. Print time and cost estimation features. 2024. URL: <https://www.simplify3d.com/> (дата звернення: 20.10.2025).
10. Minguella-Canela J., Morales Planas S., Gomà Ayats J.R., López M.A. de los Santos. Study and comparison of the different costs' schema associated to geometry, material and processing between 3D printing, injection molding and machining manufacturing technologies. *Procedia Manufacturing*. Madrid, 2019. Vol. 41. P. 280–287. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.09.010>
11. Gao W., Zhang Y., Ramanujan D., Ramani K., Chen Y., Williams C. B., Wang C. C. L., Shin Y. C., Zhang S., Zavattieri P. D. The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*. 2015. Vol. 69. P. 65–89. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001>
12. Gebhardt A. Understanding Additive Manufacturing: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing. München : Hanser, 2020. 167 p.

References

1. Hopkinson, N., & Dicknes, P. (2003). Analysis of rapid manufacturing – using layer manufacturing processes for production. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 217(1), 31–39. <https://doi.org/10.1243/095440603762554596> [in English].
2. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). *Additive Manufacturing Technologies*: 3rd ed. Cham : Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7> [in English].
3. Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*. 55 (2), 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003> [in English].
4. Ngo, T., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K., & Hui, D. (2018). Additive Manufacturing (3D Printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites, Part B: Engineering*, 143, 172–196. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012> [in English].
5. Thompson, M., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R.I., Gibson, I., Bernard, A., Schulz, J., Graf, P., Ahuja, B., & Martina, F. (2016). Design for additive manufacturing: trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Annals*, 65 (2), 737–760. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004> [in English].
6. Huang, S., Liu, P., Mokasdar, A., & Hou, L. (2013). Additive manufacturing and its societal impact: a literature review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67, 1191–1203. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4558-5> [in English].
7. Alam, Z., Iqbal, F., & Khan, D. (2023). *Post-processing Techniques for Additive Manufacturing* (1st ed.). Boca Raton : CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003288619> [in English].
8. Rosen, D. (2014). Design for Additive Manufacturing: Past, Present, and Future Directions. *Journal of Mechanical Design*, 136 (9). 090301. <https://doi.org/10.1115/1.4028073> [in English].
9. Simplify3D. Print time and cost estimation features. (2024). URL: <https://www.simplify3d.com/> [in English].
10. Minguella-Canela, J., Morales Planas, S., Gomà Ayats, J. R., & López, M. A. de los Santos. (2019). Study and comparison of the different costs' schema associated to geometry, material and processing between 3D printing, injection molding and machining manufacturing technologies. *Procedia Manufacturing*, 41, 280–287. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.09.010> [in English].
11. Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., Williams, C. B., Wang, C. C. L., Shin, Y. C., Zhang, S., & Zavattieri, P. D. (2015). The status, challenges, and future of additive

manufacturing in engineering. *Computer-Aided Design*. 69, 65–89. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.001> [in English].

12. Gebhardt, A. (2020). *Understanding Additive Manufacturing: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing*. München : Hanser [in English].

Міхайлуца Олена Миколаївна – к.т.н., доцент, доцент кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення Запорізького національного університету. E-mail: elenamikhaylutsa7@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2935-7997.

Божедомов Михайло Андрійович – магістр кафедри електроніки, інформаційних систем та програмного забезпечення Запорізького національного університету. E-mail: mike.bozhedomov@gmail.com, ORCID: 0009-0004-3605-821X.

Пожуєв Андрій Володимирович – к.ф.-м.н., професор, професор кафедри фундаментальної та прикладної математики Запорізького національного університету. E-mail: scorpio6828@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4083-5139.

Mikhailutsa Olena Mykolaivna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Electronics, Information Systems and Software of the Zaporizhzhia National University. E-mail: elenamikhaylutsa7@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2935-7997.

Bozhedomov Mykhailo Andriiovych – Master’s Student at the Department of Electronics, Information Systems and Software of the Zaporizhzhia National University. E-mail: mike.bozhedomov@gmail.com, ORCID: 0009-0004-3605-821X.

Pozhuyev Andriy Volodymyrovych – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor at the Department of Fundamental and Applied Mathematics of the Zaporizhzhia National University. E-mail: scorpio6828@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4083-5139.

Дата першого надходження статті до видання: 11.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 01.07.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)