УДК 004.415.3:681.6

**О.І. Сироткіна, доцент, канд. техн. наук, О.О. Рябичев, ст. гр. 122м-19-1**

*Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна*

**ПРОЄКТУВАННЯ ХМАРНОГО АПАРАТНО-ПРОГРАМНОГО**

**КОМПЛЕКСУ ДЛЯ 3D-ДРУКУ**

**Анотація.** Описано процес покращення користувацького досвіду при роботі з системами 3D-друку. Покращення досягається за рахунок будування найбільш ефективної архітектури системи із застосуванням математичного методу багатокритеріальних зважених оцінок.

***Ключові слова****: багатокритеріальні зважені оцінки, архітектура систем, 3D-друк, 3D-моделі, 3D-принтери, хмарні обчислення, web-додаток, nodejs, docker, kubernetes, curaengine.*

**Вступ.** За останнє десятиліття спостерігається стійка тенденція з розвитку технологічних компаній в напрямку створення своєї закритої екосистеми, або ж апаратно-програмного комплексу. Як показує практика, подібний підхід дозволяє надавати користувачу найкращий користувацький досвід, що в цілому сприяє зростанню доходів компанії, та формуванню так званої "лояльності" з боку споживачів.

Так саме, як і з АПК, в останні декілька років можна спостерігати зріст популярності 3D-друку та впровадження його в абсолютно різні сфери життя людини – від друкування різного роду запчастин та прототипів до створення протезів та продуктів харчування. Цей зріст створює необхідність спрощення взаємодії користувачів з пристроями для 3D-друку – 3D-принтерів.

На жаль, наразі входження в сферу 3D-друку потребує від користувача глибинних знань та експертизи з проектування моделей, роботи з 3D-принтерами та їх обслуговування, підготовки моделей до друку та їх подальшої обробки, та іноді, навіть програмування.

Наразі в сфері 3D-друку не існує готового комплексного рішення, що мало достатньо низький рівень входження для середньо статичного користувача 3D-принтеру.

**Постановка задачі.** Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані і вирішені такі завдання:

* викласти принципи проектування та оптимізації АПК у сфері 3D-друку;
* визначити основні, мінімально необхідні компоненти системи;
* спроектувати апаратну частину АПК, шляхом аналізу напрацювань у цій сфері та вибору найбільш підходящих елементів;
* спроектувати та розробити програмну частину АПК, шляхом аналізу напрацювань у цій сфері та вибору найбільш підходящих технологій;
* спроектувати взаємодію ПЗ між собою та з АЗ;
* зробити висновки щодо доцільності створення подібної системи.

**Основний зміст роботи.** Під час роботи над даною роботою булі використані наступні методи та інструменти.

* математичний метод багатокритеріальних зважених оцінок;
* математична модель оброки користувацьких команд прошивкою;
* TypeScript, NodeJS, CuraEngine, Three.js, Auth0, VSCode, Angular.

Апаратно-програмний комплекс – це сукупність апаратних та програмних засобів, що працюють сумісно для виконання однієї або декількох задач. Зазвичай, глибинна інтеграція програмної та апаратної частини дозволяє досягти не тільки високого рівня продуктивності та надійності, а й найкращого користувацького досвіду від використання, як комплексу в цілому так й окремих його частин. В таких комплексах, виробники мають можливість забезпечити найбільш ефективну взаємодію частин систем завдяки тому, що вони мають контроль над кожною окремою частиною комплексу.

До подібних систем висуваються надзвичайно високі вимоги з точки зору надійності, продуктивності та зручності користування, як всією системою в цілому так і кожного окремого її елементу. Також, зазвичай, від таких систем вимагають унікального функціоналу при взаємодії з декількома елементами системи.

Успішне функціонування апаратно-програмного комплексу (АПК) залежить від багатьох факторів, одним з найважливіших є коректність роботи керуючого програмного забезпечення, яке, в свою чергу, визначається рівнем організації процесів в системі.

Наразі існує велика кількість стандартів, що регламентують всі етапи життєвого циклу АПК, що мають служити основою для створення надійних та продуктивних апаратно-програмних засобів. Під час створення таких комплексів виникають проблеми, обумовленні як специфікою проектованих систем так і особливостями процесів їх розробки. Розробка програмної та апаратної частин комплексу ведеться паралельно на усіх етапах життєвого циклу – від ескізного проектування до попередніх випробувань, та характеризується необхідністю постійних узгоджень, зазвичай суперечливих вимог, що висуваються до функціональності системи.

При проектуванні АПК, розробники мають враховувати вимоги до кожного елементу системи, а також забезпечити максимальну гучність у розширенні функціоналу та впроваджені нових елементів системи та засобів їх взаємодії. Особливо критично прогалини при початковому проектуванні системи дають про себе знати при додаванні нових елементів до існуючого АПК, адже кожен новий елемент системи може мати негативний ефект на конкретні елементи системи, або на роботу усієї системи в цілому.

Щоб мінімізувати ризики при розширенні системи зазвичай використовують гнучкі принципи будування систем на модульній архітектурі. Модульні системи, як програмні так і апаратні визначаються високим рівнем гнучкості та масштабування.

Адитивні технології (3D-друк) – одна з форм технологій адитивного виробництва, де тривимірний об'єкт створюється шляхом накладання послідовних шарів матеріалу (друку, вирощування) за даними цифрової моделі. Друк здійснюється спеціальним пристроєм – 3D-принтером, який забезпечує створення фізичного об'єкта шляхом послідовного накладання пластичного матеріалу на основі віртуальної 3D-моделі. 3D-принтери, як правило, швидші, більш доступні та простіші у використанні, ніж інші технології адитивного виробництва. 3D-принтери пропонують розробникам продуктів можливість друку деталей і механізмів з декількох матеріалів та з різними механічними та фізичними властивостями за один процес складання кінцевого виробу.

3D-принтерами називають спеціальні станки з програмним керуванням, що будують деталь адитивним способом. Такі станки можуть працювати з різними матеріалами, від різноманітних видів пластику: PLA, ABS, PVA, Nylone, HIPS до пастоподібних продуктів харчування, таких як, сир, шоколад, паштети та інші.

Під час друку 3D-принтер зчитує файл у спеціальному форматі, зазвичай GCode, що містить набір примітивних послідовних команд, та наносить послідовність слоїв спеціального матеріалу, будуючи 3D-модель з серії поперечних перерізів. Ці слої, що відповідають віртуальним поперечним перерізам CAD-моделі, об’єднуються або сплавляються разом для створення об’єкту заданої форми. Основною перевагою такого підходу є можливість створення геометричних форм майже необмеженої складності.

Наразі існує широкий вибір методів адитивного виробництва. Основні відмінності полягають в методі нанесення слоїв та матеріалів, що можуть бути використані для друку. Деякі методи спираються на плавці або розм’ягченні матеріалів для створення слоїв, до них можна віднести вибіркове лазерне спікання (SLS), вибіркова лазерна плавка (SLM), пряме лазерне спікання матеріалів (DMLS), друк методом пошарового наплавлення (FDM або FFF). Іншим вектором стало виробництво твердих моделей за рахунок полімеризації рідких матеріалів, більш відоме, як стереолитографія (SLA).

В цілому, всі 3D-принтери можна поділити на дві основні категорії: промислові станки та побутові прилади.

Промислові станки використовують, зазвичай, на великих виробництвах при створенні високоточних прототипів та складних деталей. Розвиток промислового адитивного виробництва, останнім часом, йде високими темпами. Наприклад, сумісна американо-ізраїльська компанія Stratasys поставляє устаткування для адитивного виробництва вартістю від 2 000 до 500 000 доларів, а компанія General Electric використовує пристрої високого класу для виробництва частин газових труб.

Побудові прилади, у свою чергу створюються з прицілом на середньостатистичного користувача, для вирішення його повсякденних задач. Розробка таких приладів ведеться приватними компаніями та ентузіастами, число яких постійно збільшується. Більша частини роботи виконується силами любителів для власних та суспільних потреб, за допомогою з боку академічного співтовариства та хакерів.

Серед побутових 3D-принтерів слід виділити дві основні категорії: виробничі принтери та харчові. Перші використовують різноманітні види пластику та металу – найбільш популярні серед інженерів та компаній, які в своїй роботі потребують розроблення прототипів (наприклад виробники побутової техніки, автомобільних запчастин, різноманітного устаткування та інші). В той час, як харчові 3D-принтери, виходячи з назви, використовують різні пастоподібні матеріали для створення харчових прикрас та десертів, що вражають уяву та приваблюють клієнтів.

Зазвичай користувачі побутових 3D-принтерів не мають спеціалізованих знань у сферах 3D-друку, проектування, електроніці та хімії. Це накладає додаткові вимоги в області зручності та простоти використання таких приладів. Хоча за останні роки індустрія побутових 3D-принтерів і зробила великий крок на зустріч середньостатистичному користувачеві, нажаль, це все ще досить складне обладнання з не завжди зручним та зрозумілим ПЗ та зазвичай високим цінником, що, у свою чергу, відштовхує побутових користувачів та сповільнює темпи розвитку, популяризацію та, як наслідок, доступність обладнання для 3D-друку.

Наразі усі наявні на ринку системи 3D-друку, так чи інакше, мають наступні проблеми:

* відсутність повноцінного апаратно-програмного комплексу, який би відповідав усім сучасним вимогам а покривав усі автоматизовані стадії 3D друку;
* висока ціна на пристрої з повноцінним функціоналом. Проте досить просунуті користувачі можуть зібрати такий пристрій самостійно, використовуючи один з наявних на ринку пакетів для самостійної збірки;
* проте, найбільшою проблемою можна вважати надзвичайно високі вимоги до користувача для користування 3D-принтером.

Ці проблеми помітно сповільнюють швидкість розвитку та розповсюдження технологій 3D друку.

Для побудування надійної та швидкої системи для 3D-друку необхідно спроєктувати апаратну та програмну частини.

Апаратною частиною в роботі виступатиме 3D-принтер. Існують такі основні компоненти 3D-принтеру, як: плата керування, плата обробки взаємодії з користувачем, екструдер, контролери руху, нагрівальна платформа, сенсорний дисплей.

Звичайно, повноцінний 3D-принтер складається з набагато більшої кількості різних за важливістю елементів, проте ця робота фокусується лише на найбільш важливих компонентах.

Екструдер, контролери руху, нагрівальна платформа та сенсорний дисплей є більш-менш стандартизованими на ринку. Проте, для зваженого вибору плати керування та плати обробки взаємодії з користувачем необхідно було проаналізувати наявні на ринку варіанти.

Для такого аналізу було вирішено використати математичний метод багатокритеріальних зважених оцінок.

Суть методу полягає в:

* формуванні критеріїв для вибору;
* підбору ваги для кожного з критеріїв;
* проставлені та нормалізації оцінок для кожної опції по кожному з критеріїв;
* розрахунку зваженої оцінки для кожної опції по кожному з критеріїв;
* розрахунку остаточної зваженої оцінки для кожної опції;
* вибору найкращої опції.

 вага кожного з критеріїв вираховується за формулою (1):

|  |  |
| --- | --- |
| $$σ\_{i}=\frac{r\_{i}}{\sum\_{i}^{m}r\_{i}}$$ | (1) |

 Зважена оцінка для кожної опції по кожному з критеріїв можна вирахувати за формулою (2):

|  |  |
| --- | --- |
| $$K\_{ij weighted}=K\_{ij}\*σ\_{i}$$ | (2) |

 Остаточна оцінка для кожної з опції вираховується за формулою:

|  |  |
| --- | --- |
| $$S\_{i}=\sum\_{j=i}^{m}K\_{ij weighted}$$ | (3) |

За результатами аналізу було вирішено використовувати плату Arduino Mega у якості плати керування та Raspberry Pi3 у якості плати для оброки взаємодії з користувачем.

Створення повноцінного апаратно-програмного комплексу для роботи з 3D-друком потребує розробки спеціального ПЗ, що покривало б усі потреби середньостатистичного користувача.

Мінімальний набір подібного ПЗ включає:

* прошивки – низькорівневна оболонка, що відповідає за взаємодію з контрольованими елементами 3D-принтеру;
* інтерфейс для локального управління принтером (з використання сенсорного дисплея);
* інтерфейс для віддаленого керування процесом друку;
* проксі-сервер для забезпечення інфраструктури для віддаленого підключення до 3D-принтера
* слайсер – спеціальне ПЗ для підготовки 3D-моделі до друку на конкретному 3D-принтері;
* хмарне сховище – для зберігання оригінальних та підготовлених моделей.

Подібний набір програмного забезпечення повинен повністю покрити вимоги середньостатистичного користувача до системи для 3D-друку.

Математична модель оброки користувацьких команд прошивкою виглядає наступним чином (рис. 1).

X – множина вхідних параметрів (користувацькі команди у формі сигналів);

Y – множина вихідних параметрів (команди у формі сигналів, що відправляються для оброки на контрольовані компоненти принтера);

Z – множина збуджуючих ефектів середовища (різного роботу перешкоди для сигналу, втрата підключення та інші);

A – оператор математичної моделі, що є множиною алгоритмів та функцій.

****

Рис. 1. Математична модель обробки користувацьких команд прошивкою

Нижче наведено основні терміни та визначення, що подані як сутності об'єктно-класифікаційної моделі та зв'язки між ними.

Команда (Comand)– команда у форми набору сигналі, отриманих від клієнта (у даному випадку Raspberry Pi). Множина команд складає:

|  |  |
| --- | --- |
| $$C= \left\{c\_{1},c\_{2}, …, c\_{n(C)}\right\},$$ | (1) |

де, n(*C*) = |*C*| – потужність множини *С*, що відповідає кількості команд, що підтримується прошивкою.

Перетворювач (Transformer)– частини програмного коду прошивки, що відповідає за інтерпретацію отриманих команд у команди, що можуть бути відправлені до конкретного елементу принтера. Множина перетворювачів:

|  |  |
| --- | --- |
| $$T= \left\{t\_{1},t\_{2}, …, t\_{n(T)}\right\},$$ | (2) |
|  |  |

де, *n*(*T*) = |*T*| - потужність множини *T*, що відповідає кількості трансформації, що підтримуються прошивкою.

Помилка (Error) – можливі помилки, що виникають в прошивці в процесі інтерпретації команди. Вони можуть бути викликані некоректними вхідними параметрам від клієнта, так само, як й зовнішніми збудниками. Множина помилок:

|  |  |
| --- | --- |
| $$E= \left\{e\_{1},e, …, e\_{n(E)}\right\},$$ | (3) |

де, (*E*) = |*E*| - потужність множини *Е*, що відповідає кількості помилок, що можуть бути оброблені прошивкою

Зв’язки між класами об’єктно-класифікаційної моделі наступні:

*G* – зв'язок між отриманою командою а перетворювачем, що повинен обробити її;

*Р* – зв’язок між перетворенням та набор помилок, що можуть виникнути у процесі.

**Наукова новизна** розробки складається в удосконалені математичної моделі процесів обробки команд, що надходять на керуючу плату принтера та отриманні подальшого розвитку методу багатокритеріальних зважених оцінок для вибору найоптимальнішої архітектури системи.

**Висновки.** В результаті було спроектовано надійний та ефективний апаратно-програмний комплекс для 3D-друку. У тому числі, було обрано найбільш важливі елементи апаратного забезпечення з використанням методу багатокритеріальних зважених оцінок, а також удосконалено математичну модель процесів обробки команд, що надходять на керуючу плату 3D-принтера.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Edward A. Bender An Introduction to Mathematical Modeling (Dover Books on Computer Science) / Dover Publications (Educa Books) – Mineola, 200 – 272 с.
2. Bertier Luyt, Samuel N. Bernier, Tatiana Reinhard Design for 3D Printing: Scanning, Creating, Editing, Remixing, and Making in Three Dimensions / Make Community, LLC – New York, 2015. – 162 с.
3. Neil Rosenberg Designing 3D Printers: Essential Knowledge / 3D Hubs – Amsterdam, 2020 – 197 с.
4. Dr. Dan-Andrei Marinescu How to build a 3D Printer: DIY project: “EASY CoreXY 3D Printer Model 350” / LM Publishing House – Volendam, 2019 – 87 с.
5. William Shotts The Linux Command Line, 2nd Edition: A Complete Introduction / No Starch Press – San Francisco, California, 2019 – 502 с.