

УДК 681.3

А.В. Шнира, Б.В. Чапалюк, А.І. Алімов, М.В. Добролюбова

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

**СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ 3D-ПРИНТЕРУ З ТЕХНОЛОГІЄЮ ДРУКУ FDM**

Викладені проблеми моніторингу 3D-друку та шляхи досягнення найкращих показників якості кінцевих моделей за допомогою удосконалення конструкції та стандартного програмного забезпечення типових 3D-принтерів конструкції RepRap з FDM-технологією друку.

**Ключові слова:** 3D-друк, моніторинг, дефект, якість, контрольні карти, логістична регресія, Дзидока.

**Постановка задачі**

Завдяки швидкому розвитку новітніх технологій на теперішній час знайдено спосіб подолати традиційні обмеження виробництва, і цей спосіб – 3D-друк [1 – 4].

Він надає можливість випробовувати велику кількість ідей, вдосконалювати їх шляхом виправлення помилок моделі на ранніх стадіях проектування без значних фінансових витрат та створювати дуже міцні, стабільні і легко відтворювальні компоненти, розробляти тільки перспективні проекти.

Важливо відзначити, що переважна більшість доступних за ціновим критерієм 3D-принтерів працює під керуванням свого власного програмного забезпечення (ПЗ), в деяких випадках відкритого та безкоштовного.

Але таке ПЗ не завжди задовольняє всього спектру вимог до точності друку та якості моделей, особливо при необхідності виготовлення деталі, яка майже на 100 % відповідатиме за всіма характеристиками своїй цифровій моделі, оскільки необхідно враховувати комплекс параметрів, починаючи з калібрування механіки принтера до параметрів друку і швидкості подачі пластикової нитки. Не забезпечується стандартним ПЗ і зупинка друку при виявленні невідповідностей фізичного об'єкту цифровій моделі, що веде до матеріальних втрат. Тим самим, удосконалення якості продукції і процесів вимагає скрупульозної роботи оператора по виявленню причин дефектів.

Названі недоліки стандартного ПЗ стали підставою для розробки власної системи моніторингу 3D-друку принтерів типу RepRap (Replicating Rapid-prototyper – відновлювальний механізм для швидкого прототипування) з FDM-технологією друку (технологія адитивного синтезу, яка будує прототипи і кінцеві вироби пошарово з термопластику інженерного класу).

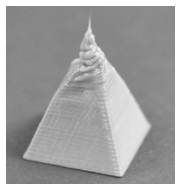
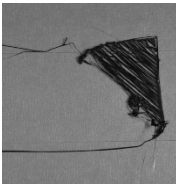
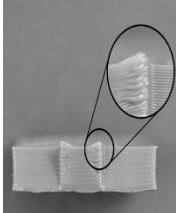
**Мета статті** – розробка методик та підходів, які на високому рівні дозволяють контролювати якість надрукованої моделі.

**Основна частина**

Під час проведення моніторингу 3D-друку були виявлені та проаналізовані фактори, що впливають на точність друку, зроблено їх класифікацію: за кількістю надрукованих деталей; за швидкістю з якою відбувається друк; за рівнем відповідності фізичного об'єкту цифровій моделі, а також виявленні основні дефекти друку (табл. 1).

Таблиця 1

Основні дефекти 3D-друку

Зображення дефекту	Опис	Методи вирішення
	Перегрів: малі деталі (частини) моделі перегріваються та деформуються.	1. Потрібно домогтися балансу між температурою і охолодженням пластику під час друку. 2. Спробувати друкувати декілька деталей одночасно.
	Роздруковка не прилипає до платформи: перший шар не прилипає до платформи і весь процес швидко дає збій.	1. Правильно розігріти платформу столу. 2. Відкалібрувати відстань сопло-стіл.
	Загинання: кути роздруковки по закінченні процесу мають тенденцію загинатися і деформуватися через нерівномірний нагрів.	1. Забезпечити рівномірний нагрів столу, та підтримки рівномірної температури під час друку – термостабілізація.

За результатами проведених досліджень було виявлено, що однією з головних проблем, які вини-

кають при друці моделі на типових 3D-принтерах FDM-технології та не розв'язуються за допомогою стандартного ПЗ, є невідповідність розмірів роздрукованої моделі розмірам, заданим програмно, та нерівномірне нагрівання площ робочої поверхні і екструдера принтера.

Разом з цим було проведено оцінку якості технологічного процесу, яка показала, що ймовірність отримання дефекту  $P_h$  за верхньою границею допуску та  $P_l$  за нижньою границею допуску дорівнює:

$$P_h = 0,5 - \Phi(z_h) = 0,5 - \Phi(0,0187) = 0,5 - 0,008 = 0,492;$$

$$P_l = 0,5 - \Phi(z_l) = 0,5 - \Phi(-1,5108) = 0,5 - 0,4345 = 0,0655,$$

де  $\Phi(z)$  – функція Лапласа.

Таким чином, 49,2 % значень виміряні з перевищенням верхньої границі допуску по температурним показникам, що призводить до браку, а також 6,55 % значень виміряно з температурою менше нижньої границі допуску. Сумарний брак продукції становить 55,75 %.

Оскільки ймовірність виникнення дефекту виявилася незадовільною, була розроблена система моніторингу, яка складається з двох підсистем [6], що забезпечують достатньо високу точність друку та надають можливість уникнути зайвих витрат часу і матеріалу, а саме:

- підсистема вимірювання температури (визначення температури екструдера та температури робочої поверхні плити-столу);
- підсистема вимірювання переміщення каретки принтеру.

**Підсистема вимірювання температури.** У типовому 3D-принтері конструкції RepRap використовуються 2 датчики температури. Один з них – це термістор, який вимірює температуру нижньої частини (hot-end) екструдера, другий – термістор, що вимірює температуру нагрітої поверхні. В результаті експериментальних досліджень виявлено дефект нагрівання, який полягає у тому, що модель під час друку може охолоджуватися нерівномірно, що призводить до її деформації та невідповідності розмірів надрукованого об'єкту встановленим розмірам віртуальної моделі.

Для запобігання вищезазначених проблем та визначення оптимальних параметрів друку моделей головна система 3D-принтера була оснащена додатковими датчиками температури. DS18B20. Для регулювання температури було оптимізовано конструкцію 3D-принтера і за рахунок нанесення на внутрішню сторону робочої поверхні теплопровідної пасти, до якої прикріплено алюмінієву пластину, та виготовлення корпусу, покритого всередині фольгою. Це забезпечило більш повільне охолодження

столу та підтримку температури по всьому об'єму об'єкту, що друкується.

Окрім модернізації конструкції 3D-принтера виникла потреба і у вдосконаленні програмного забезпечення для керування 3D-друком. Особливістю розробленого ПЗ є те, що у разі виникнення невідповідності фізичного об'єкта цифровій моделі не потрібно буде чекати закінчення друку або зупинити процес та охолоджувати модель для отримання точних даних про її розміри – друк припиниться автоматично. При цьому забезпечується створення бази даних з результатами моніторингу 3D-друку в принтері, що взагалі не притаманно стандартним ПЗ (рис. 1).

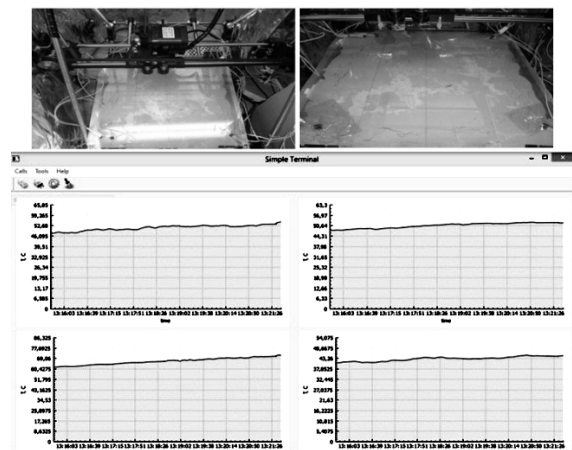


Рис. 1. Підсистема вимірювання температури

На теперішній час існує декілька методів статистичного регулювання технологічних процесів [5]. Найбільш поширений і ефективний з них – метод з використанням контрольних карт (карт Шухарта), на яких відзначають границю регулювання, що обмежує область допустимих значень, обчислених на підставі статистичних даних. Вихід точки за границю регулювання (або поява її на самій границі) служить сигналом про те, що процес не контролюваний. Контрольна карта дозволяє не тільки виявити якість відхилення від нормального ходу процесу, а й, значною мірою, пояснити причини цього відхилення. Саме цей метод був покладений в основу модернізованого ПЗ.

Реалізація статистичного методу регулювання процесу друку здійснюється в три етапи:

- проводиться попереднє дослідження стану процесу і визначається ймовірна частка дефектної продукції, а також індекс відтворюваності;
- будується контрольна карта і вибирається план контролю;
- проводиться статистичне регулювання технологічного процесу.

При цьому для вбудовування контролю якості в процес виконання друку і розподілення функцій людей і машин (автономізації) застосовано японсь-

кий підхід Дзидока, який забезпечує автономність устаткування, його здатність відрізняти якісні деталі від дефектних без участі оператора, за допомогою контрольних карт.

У автономізації принтер наділяється інтелектуальними здібностями, через що його називають розумною автоматизацією. На протипагу повній автоматизації на передньому плані тут стоїть не обсяг випуску, а якість і «здатність автономно запуститися і зупинитися».

Отже, за допомогою розробленого програмного забезпечення зазначеної підсистеми можна вимірювати температурні показники у 4 точках робочої поверхні одночасно та відобразити їх графічно під час спостереження. При цьому, коли принтер виявляє відхилення за температурними показниками під час друку, то відразу зупиняється і сигналізує про необхідність надання допомоги.

Після стабілізації столу, була проведена додаткова оцінка якості технологічного процесу.

Результатом вимірювання фактичних значень температури став той факт, що всі значення вклалися в діапазон від 95 °С (мінімум) до 112 °С (максимум). Для зручності побудови гістограми весь діапазон значень розділений на 11 інтервалів з розміром одного інтервалу 1, 5454 °С.

Результати фактичних вимірів температури представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати фактичних вимірів

Номер інтервалу	Діапазон інтервалу, °С		Середина інтервалу, °С	Частота (m) попадання в інтервал
1	95	96,54	95,77	14
2	96,54	98,09	97,31	26
3	98,09	99,63	98,86	27
4	99,63	101,18	100,409	43
5	102,72	102,72	101,95	72
6	102,72	104,27	103,50	495
7	104,27	105,81	105,04	151
8	105,81	107,36	106,59	62
9	107,36	108,90	108,13	44
10	108,91	110,45	109,68	35
11	110,45	112	11,22	19

На основі цих даних будується графік розсіювання фактичних значень температури стовпчастого типу – гістограма (рис. 2).

Для розрахунку середнього арифметичного температури скористаємося формулою

$$T_{m.v.} = \frac{\sum T_{i.m.v.} \cdot m_i}{\sum m_i} = \frac{102612,2}{988} = 103,8585, \quad (1)$$

де  $T_{i.m.v.}$  – середнє значення інтервалу,

$m_i$  – частота попадань вимірювань в і-й інтервал.

Результати розрахунків представлені в табл. 3.

Таблиця 3

Розрахункові дані

Номер інтервалу	Частота ( $m_i$ ) попадання	$T_{i.m.v.}$ , °С	$(T_{m.v.} - T_{i.m.v.})^2$	$m_i (T_{m.v.} - T_{i.m.v.})^2$
1	14	95,77	65,37	915,30
2	26	97,31	42,77	1112,13
3	27	98,86	24,94	673,57
4	43	100,41	11,89	511,57
5	72	101,95	3,62	260,93
6	495	103,50	0,128	63,51
7	151	105,04	1,41	212,85
8	62	106,59	7,46	463,02
9	44	108,13	18,30	805,36
10	35	109,68	33,91	11187,07
11	19	111,22	54,30	1031,75

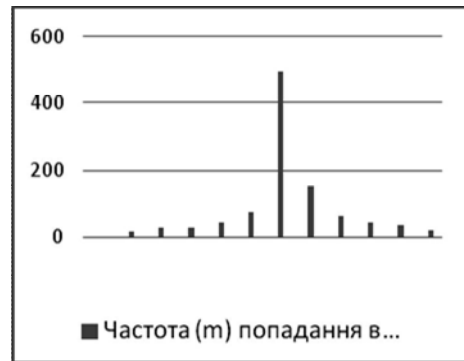


Рис. 2. Графік розсіювання фактичних значень температури

Характер отриманої гістограми дозволяє допустити, що отриманий розподіл наближений до нормального. Середнє квадратичне відхилення  $\sigma$  досліджуваних температурних показників ( $x$ ) можна визначити за формулою

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (T_{m.v.} - T_{i.m.v.})^2 m_i}{\sum m_i}}. \quad (2)$$

Підставивши в (2) необхідні розрахункові дані з табл. 3, отримаємо:

– середнє квадратичне відхилення  $\sigma$ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{7237,111697}{988}} = 2,7064;$$

– величину поля розсіювання  $\omega_{max}$ :

$$\omega_{max} = \pm 3\sigma = 2,7064 \cdot 3 = 8,1192.$$

Визначимо точне значення величини дефектів. Для цього спочатку необхідно знайти величину зміщення центру поля розсіювання від середини поля допуску за формулою

$$\Delta T_c = T_{m.v.} - \frac{T_h - T_l}{2} = 103,8585 - \frac{100 + 110}{2} = -1,1415.$$

Значення величини зсуву можна порівняти з похибкою вимірювання температури і знехтувати в подальших розрахунках. Для оцінки величини дефектів скористаємося функцією Лапласа  $\Phi(z)$ , де

$$z = \frac{x}{\sigma}$$

Визначимо верхнє і нижнє значення аргументу  $z$ :

$$z_h = \frac{T_h - T_{\text{mean}}}{\sigma} = \frac{110 - 103,8585}{2,7064} = 2,2693,$$

$$z_l = \frac{T_l - T_{\text{mean}}}{\sigma} = \frac{100 - 103,8585}{2,7064} = -1,4256.$$

Ймовірність отримання дефекту  $P_h$  за верхньою границею допуску та  $P_l$  нижньою границею допуску дорівнює:

$$P_h = 0,5 - \Phi(z_h) = 0,5 - \Phi(2,2693) = 0,5 - 0,49653 = 0,00347 \text{ (або } 0,347 \%);$$

$$P_l = 0,5 - \Phi(z_l) = 0,5 - \Phi(-0,4218) = 0,5 - 0,42220 = 0,078 \text{ (або } 7,8 \%)$$

Таким чином, сумарна ймовірність браку продукції становить 8,147 %.

Розроблена підсистема дозволяє зменшити похибку вимірювання температурних показників друку до 0,2 °C, а похибку друку до 0,1 мм.

**Підсистема вимірювання переміщення каретки.** В рамках системи моніторингу також було розроблено підсистему вимірювання переміщення каретки 3D-принтера.

Дана підсистема не входить до складу стандартного програмного забезпечення [5]. В її основу покладено використання методу контактних та безконтактних вимірювань необхідних параметрів моделі, з метою їх порівняння та виявлення більш прийнятної для контролю та корегування якості і точності моделі в процесі друку.

При застосуванні методу контактних вимірювань переміщення та швидкості обертів каретки до складу підсистеми входять спеціальні датчики кута повороту (механічні, інкрементні енкодери моделі № EC12-20-20F-S) та мікроконтролер на платі STM32-Discovery. ПЗ даної підсистеми розроблено за допомогою технології Java та Android (рис. 3).

Підсистема дозволяє в процесі друку отримати точні габаритні розміри об'єкту та порівняти їх з розмірами цифрової моделі. Для статистичного регулювання процесу 3D-друку використано метод контрольних карт.

Розроблена підсистема дозволяє зменшити похибку друку до 0,4 мм.

При застосуванні методу безконтактних вимірювань переміщення та швидкості обертів каретки дефекти надрукованої моделі виявляються за допо-

могою технологій комп'ютерного зору. При цьому використовуються активнопіксельні датчики – це оптичні датчики, що по своїй суті є камерами, які зараз широко розповсюджені, наприклад, на смартфонах. Такі датчики базуються на сенсорах, створених на компліментарних структурах металоксидний-напівпровідник (КМОН), тобто чіпах, побудованих за схемою, в якій р-канальні і n-канальні польові транзистори використовуються парами і взаємно доповнюють один одного (рис. 4).

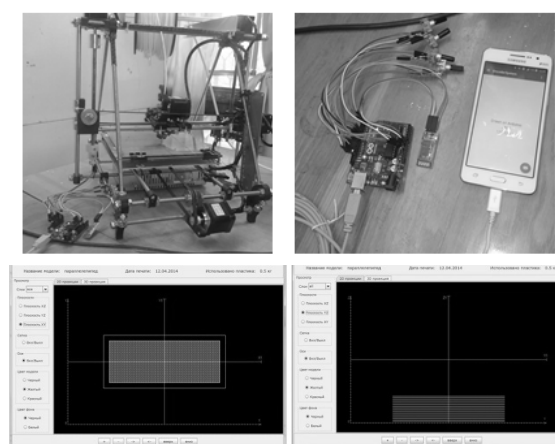


Рис. 3. Підсистема переміщення та швидкості обертів каретки (метод контактних вимірювань)

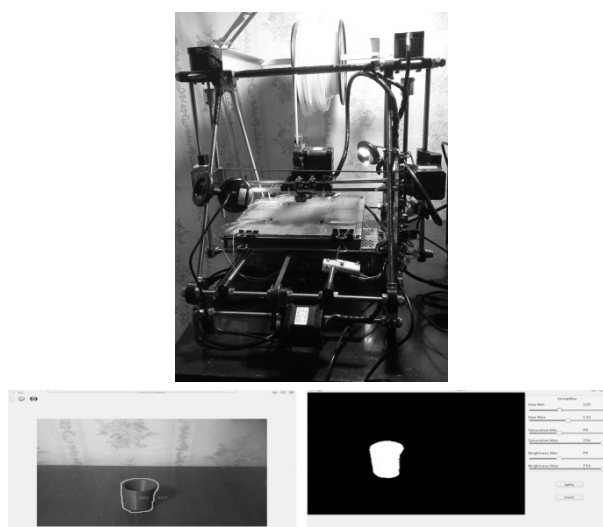


Рис. 4. Підсистема переміщення та швидкості обертів каретки (метод безконтактних вимірювань)

Ідея підсистеми полягає в тому, що необхідно побудувати власний класифікатор, за допомогою якого можна було би з високою ймовірністю класифікувати наявний дефект на деталі, що друкуються. Після побудови такого класифікатора стало можливим отримання з високою ймовірністю сигналу, що при даному конкретному друці має місце дефект. Це дозволяє удосконалити роботу системи Дзидока, а також зменшити кількість хибних спрацювань системи.

Для побудови класифікатора використано ідею логістичної регресії. Але оскільки функція гіпотези доволі складна і нелінійна, буде застосовуватись нейронна мережа з сігмоїдною функцією активації для навчання класифікатора [7].

Отже, завдяки застосованим методикам та засобам модернізації конструкції принтера вдалося забезпечити більш якісний друк моделі. На рис. 5, 6 наведено результати роботи 3D-принтера типу RepRap з FDM-технологією друку при його стандартному (промисловому) та удосконаленому виконанні, що дозволяє наочно переконалися у доцільності застосування розробленої системи моніторингу.

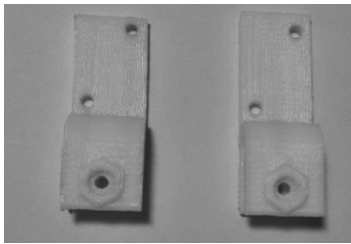
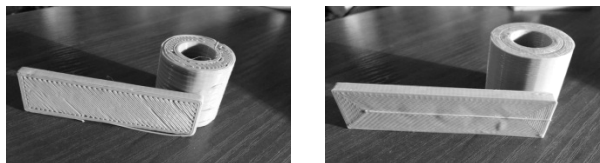


Рис. 5. Зліва надрукована модель без застосування розробленої системи, справа – із застосуванням



1 – при стандартному виконанні 2 – при удосконаленому виконанні

Рис. 6. Результати 3D-друку

## Висновки

Розглянуто проблеми, що виникають при друці моделі 3D-принтером типу RepRap на основі FDM технології та шляхи їх розв'язання за рахунок розширення можливостей стандартного програмного забезпечення та вдосконалення апаратної частини, що сприяє підвищенню точності 3D-друку.

Завдяки розробленим підсистемам з'явилась можливість контролювати процес друку (мати чітке уявлення про похибки, які при цьому виникають), вносити поправки ще на початковій стадії розробки моделі і при підготовці 3D-принтеру до роботи, автоматично припинити друк у разі виникнення невідповідності фізичного об'єкта цифровій моделі.

За результатами впровадження розроблених підсистем вдалося покращити якість та точність друку і уникнути зайвих матеріальних витрат.

Розроблена система моніторингу стає особливо актуальною при малих обсягах виробництва.

## Список літератури

1. Что такое 3D-печать и 3D-принтер // Проект «make-3d.ru». [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://make-3d.ru/articles/что-такое-3d-pechat/> – Дата доступу: 19.11.15 – Что такое 3D-печать и 3D-принтер.
2. Все о 3D-печати // 3D Industry. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.3dindustry.ru/faq/#technologies> – Дата доступу: 19.11.15 – Технологии 3D-печати.
3. Конструкция FDM-принтеров / Илья Холодов. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: [http://www.ixbt.com/printer/3d/3d\\_fdm.shtml](http://www.ixbt.com/printer/3d/3d_fdm.shtml) – Дата доступу: 22.11.15 – Конструкция FDM-принтеров.
4. RepRap wiki. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: [http://www.reprap.org/wiki/Main\\_Page](http://www.reprap.org/wiki/Main_Page) – Дата доступу: 22.11.15 – RepRap wikipedia.
5. Ефимов В.В. Статические методы в управлении качеством: учебное пособие / В.В. Ефимов – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 134 с.
6. Шнира А.В. Підвищення точності 3D-друку / А.В. Шнира, Б.В. Чапалюк, А.І. Алімов // Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2015», 2-6 лютого 2015 р., м. Славське, 2015. – С. 112-115.
7. Trevor Hastie, Robert Tibshirani, Jerome Friedman *The Elements of Statistical Learning Data Mining, Inference, and Prediction – Second Edition, Springer, 2014 – 764.*

Надійшла до редколегії 6.05.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.П. Захаров, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

## СИСТЕМА МОНИТОРИНГА 3D-ПРИНТЕРА С ТЕХНОЛОГИЕЙ ПЕЧАТИ FDM

А.В. Шныра, Б.В. Чапалюк, А.И. Алимов, М.В. Добролюбова

*Изложены проблемы мониторинга 3D-печати и пути достижения лучших показателей качества конечных моделей с помощью усовершенствования конструкции и стандартного программного обеспечения типовых 3D-принтеров конструкции RepRap с FDM-технологией печати.*

**Ключевые слова:** 3D-печать, мониторинг, дефект, качество, контрольные карты, логистическая регрессия, Дзюда.

## MONITORING SYSTEM FOR 3D-PRINTER WITH FDM PRINTING TECHNOLOGY

A.V. Shnyra, B.V. Chapaliuk, A.I. Alimov, M.V. Dobroliubova

*The problems of 3D-printing process monitoring and the ways of achievement of the best results of quality for 3D-printed models by improving the design and software for RepRap 3d-printers with FDM printing technology are considered.*

**Keywords:** 3D-printing, monitoring, defect, quality, control cards, logistic regression.