

ДОДАТОК А

Апробація результатів дослідження

КОРЕКЦІЯ СИСТЕМИ КООРДИНАТ ПОЛЯРНОГО 3D ПРИНТЕРУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ДРУКУ

А.Д. Піхтерьов

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail andrii.pikhterov@nure.ua

Анотація: В роботі розглянуте актуальне питання підвищення якості 3D друку за технологією FFF/FDM на полярних 3D принтерах. Проведено аналіз можливих помилок зборки полярних 3D принтерів. Запропоновано систему автоматичного пошуку центру координат принтеру.

Ключові слова: 3D принтер, системи координат, САМ системи, G-код

CORRECTION OF THE COORDINATE SYSTEM OF A POLAR 3D PRINTER TO IMPROVE PRINTING QUALITY INDICATORS

A. Pikhterov

Kharkiv National University of Radioelectronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky av.,14

E-mail: andrii.pikhterov@nure.ua

Annotation: The paper considers the current issue of improving the quality of 3D printing using FFF/FDM technology on polar 3D printers. An analysis of possible assembly errors of polar 3D printers is carried out. A system for automatically searching for the printer's center of coordinates is proposed.

Key words: 3D printer, coordinate systems, CAM systems, G-code

Актуальність забезпечення точності друку на полярних 3D-принтерах полягає в їхній здатності оптимально працювати з нестандартними формами та забезпечувати ефективне використання матеріалу. Полярні 3D-принтери, на відміну від традиційних, застосовують циліндричну систему координат, що дозволяє друкувати складні геометричні структури з мінімальною кількістю рухів друкуючої головки. Це скорочує витрати на енергію та час друку, а також знижує механічне навантаження на обладнання. Але разом із тим вимоги до точності зборки таких принтерів значно вище.

Точність друку є критично важливою для створення деталей, що повинні відповідати суворим параметрам або ідеально поєднуватися з іншими компонентами. У разі використання полярних принтерів, навіть незначні похибки можуть призводити до порушення симетрії та геометрії кінцевого виробу. Тому забезпечення високої точності таких принтерів дозволяє досягти кращої якості та стабільності продукції, особливо в сферах, що потребують високої точності, таких як авіація, медицина та машинобудування.

Полярні 3D принтери не є дуже поширеними в наш час, особливо у порівнянні із тими, що працюють у декартовій системі координат. Вдосконалення технологій калібрування та контролю якості друку на полярних 3D-принтерах також сприяє зростанню попиту на них у промисловості, де точність є вирішальним фактором. Це відкриває нові можливості для застосування полярних принтерів у виробництві, знижуючи залежність від традиційних координатних систем та розширюючи можливості швидкого прототипування.

Тож розробка автоматизованої системи центрування принтеру з циліндричною системою координат є актуальною задачею.

Полярні 3D-принтери — це типи адитивних виробничих систем, які використовують циліндричну систему координат для переміщення екструдера та платформи під час створення об'єктів. На відміну від традиційних 3D-принтерів, які працюють у декартовій системі координат (з осями X , Y , Z), полярні 3D-принтери застосовують кутове обертання та радіальне переміщення, що відкриває нові можливості для конструкції та роботи таких пристроїв (рис. 1) [1].

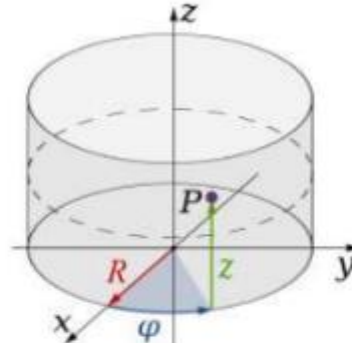


Рис. 1. Циліндрична система координат

Полярні 3D-принтери використовують дві основні координати для визначення положення друкуючої головки: радіус (R) і кут (θ). Третя координата - висота Z залишається такою ж, як і в інших принтерах. Основні елементи конструкції таких принтерів можна розбити на кілька складових.

Полярні 3D-принтери мають наступну кінематичну структуру. Вони працюють на основі кругових рухів, що істотно відрізняється від традиційної лінійної кінематики. Це досягається через два основні типи руху. Обертальний рух (кутове переміщення θ): У більшості конструкцій цей рух реалізується за допомогою повороту платформи, на якій розміщений об'єкт, що друкується. Екструдер може залишатися нерухомим або також рухатися уздовж радіуса платформи [2].

Радіальний рух (R) це переміщення екструдера від центру до краю платформи або навпаки. Зазвичай воно забезпечується рейковим механізмом або системою напрямних. Ці дві координати дозволяють досягати тієї ж точності, що й у декартових принтерах, але з деякими особливостями.

У полярних принтерах платформа зазвичай має круглу форму, оскільки обертання відбувається навколо центра. Для обертання використовуються крокові двигуни. Крім того, поверхня платформи має можливість нагріву для забезпечити краще прилипання матеріалу під час друку.

Друкуюча головка або екструдер в полярному 3D-принтері може бути схожа на екструдери традиційних принтерів і мати функцію руху вгору-вниз уздовж осі Z . При цьому важливо, щоб механізм подачі матеріалу був адаптований для плавного радіального руху, оскільки швидкість переміщення головки в полярних координатах може відрізнятися залежно від поточного радіусу.

Управління полярними 3D-принтерами здійснюється за допомогою спеціальних прошивок і алгоритмів для роботи з полярною системою координат. Програмне забезпечення повинно правильно обробляти геометрію моделей, щоб перетворити декартові координати в полярні. Більшість сучасних прошивок підтримують цей тип принтерів, але для точного налаштування може знадобитися додаткова оптимізація.

Як і в традиційних принтерах, рама полярного 3D-принтера повинна бути жорсткою та

стабільною, щоб уникнути вібрацій під час друку. Механічна частина повинна бути адаптована для обертання платформи, тому часто використовуються міцні підшипники та напрямні з низьким коефіцієнтом тертя.

Полярні принтери поки що не мають такого широкого поширення як ті, що працюють у декартовій системі координат. Частина з цих принтерів є результатом проектування DIY майстрів, але існують промислові 3D принтери.

Полярні 3D-принтери мають наступну кінематичну структуру. Вони працюють на основі кругових рухів, що істотно відрізняється від традиційної лінійної кінематики. Це досягається через два основні типи руху. Обертальний рух (кутове переміщення θ): У більшості конструкцій цей рух реалізується за допомогою повороту платформи, на якій розміщений об'єкт, що друкується. Екструдер може залишатися нерухомим або також рухатися уздовж радіуса платформи [3].

Радіальний рух (R) це переміщення екструдера від центру до краю платформи або навпаки. Зазвичай воно забезпечується рейковим механізмом або системою напрямних. Ці дві координати дозволяють досягати тієї ж точності, що й у декартових принтерах, але з деякими особливостями.

У полярних принтерах платформа зазвичай має круглу форму, оскільки обертання відбувається навколо центра. Для обертання використовуються крокові двигуни. Крім того, поверхня платформи має можливість нагріву для забезпечити краще прилипання матеріалу під час друку.

Друкуюча головка або екструдер в полярному 3D-принтері може бути схожа на екструдери традиційних принтерів і мати функцію руху вгору-вниз уздовж осі Z. При цьому важливо, щоб механізм подачі матеріалу був адаптований для плавного радіального руху, оскільки швидкість переміщення головки в полярних координатах може відрізнятися залежно від поточного радіусу.

Управління полярними 3D-принтерами здійснюється за допомогою спеціальних прошивок і алгоритмів для роботи з полярною системою координат. Програмне забезпечення повинно правильно обробляти геометрію моделей, щоб перетворити декартові координати в полярні. Більшість сучасних прошивок підтримують цей тип принтерів, але для точного налаштування може знадобитися додаткова оптимізація.

Так до DIY проектів можна віднести полярний 3D принтер Pimaker 3D [4]. Його конструкцію наведено на рисунку 2. Pimaker 3D обрано у якості прикладу для аналізу полярних 3D принтерів через прозорість матеріалів його конструкції, що дає змогу детально розглянути основні компоненти.

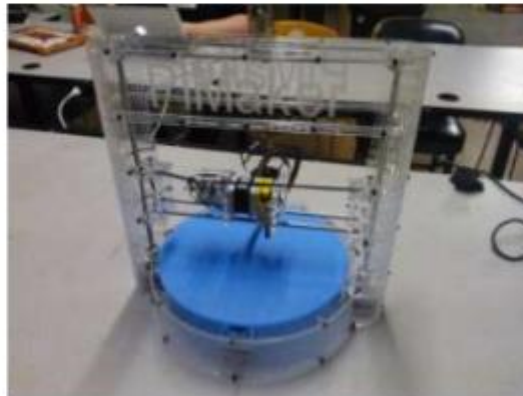


Рис. 2. Полярний 3D принтер Pimaker 3D

За рух вздовж осі θ в даному принтері відповідає платформа, що обертається. Ця особливість притаманна всім полярним 3D принтерам, що було проаналізовано. З одного боку обертання столу дозволяє забезпечити швидкий рух за координатою θ , що є перевагою даної конструкції. Але з іншого боку така конструкція передбачає переважно велику масу самої платформи, поверхні друку, нагріваючих елементів і як наслідок цей рух має достатньо високу інерцію. Вплив ваги стає більш значущим при збільшенні розмірів робочої платформи. Що у свою чергу ускладнює рух платформи на високих прискореннях та швидкостях і вимагає збільшення часу друку. По-друге розмір кроку переміщення по осі θ значно збільшується при віддаленні по осі R від центру обертання платформи (рис.3).

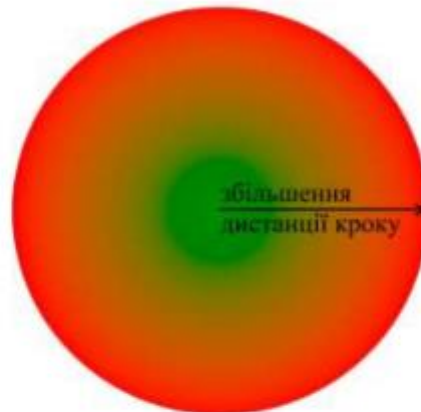


Рис. 3. Візуалізація зменшення точності переміщення по осі θ

Ця особливість полярного 3D принтеру пов'язана з тим що рух платформи забезпечується кроковим двигуном, іноді із редуктором. Тож при повороті платформи принтеру коли екструдер по осі R знаходиться в зоні, що на рисунку 3 зображено зеленим кольором, мінімальна дистанція переміщення при одному кроці двигуна по осі θ буде значно менша ніж при розташуванні екструдера у «червоній» зоні. Таким чином робоча платформа має різну дискретність і як наслідок точність переміщення у різних частинах робочої зони.

Переміщення вздовж осі R забезпечується лінійним переміщенням екструдера вздовж осі, що має проходити через центр обертання платформи. Конструкційне виконання даної осі може бути різним: з опорою з двох боків або у вигляді консолі. Даний тип лінійного переміщення може відбуватися на високій швидкості та прискоренні, в залежності від типу направляючих та приводу, маси екструдера та жорсткості конструкції. Найбільший вплив на точність друку має значення відхилення реального положення осі R відносно від ідеальної осі, що проходить через центр обертання платформи (рис. 4). Навіть при максимально точному проектуванні і зборці принтеру ці відхилення будуть присутні, вони будуть змінюватися навіть при заміні сопла екструдера. Ці зміщення можуть бути достатньо невеликими, до 1 мм, але вони призведуть до значної деформації виробу, що друкується.

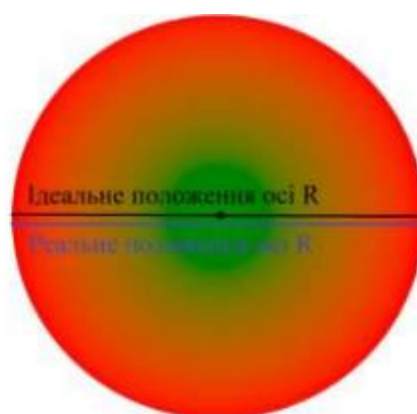


Рис. 4. Зміщення реального положення осі R

Деформації моделі будуть тим більше чим далі від нульової координати осі R знаходиться екструдер. Якщо у декартових 3D принтерів це призводить лише до зміщення моделі в робочому просторі, то у полярних 3D принтерів це призведе до зміни розмірів і форми моделі.

Окремим випадком такого типу виродження моделі, що друкується є невірне визначення нульової координати осі R (рис. 5), це також приведе до деформації як у попередньому випадку.

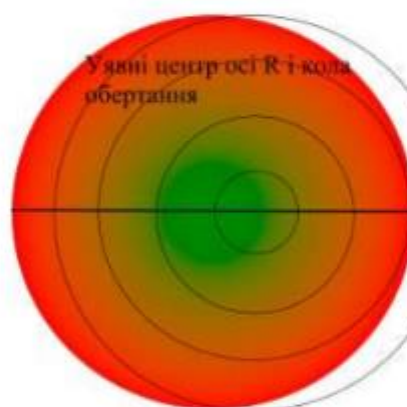


Рис. 5. Зміщення нульової координати осі R

Це порушення циліндричної системи координат може бути викликане неточністю встановлення датчиків початку координат 3D принтеру – кінцевих вимикачів. Перед початком друку більшість принтерів виконує команду g-коду G28 – рух у «домашнє» положення, яке визначається положенням кінцевих вимикачів із урахуванням офсетів – зміщень «нуля» відносно положення датчиків. У більшості випадків це питання вирішується в процесі калібровки принтеру після його виготовлення.

Ось Z забезпечує вертикальне переміщення екструдера 3D принтеру. У випадку Printaker 3D даний рух забезпечується двома гвинтовими передачами та двома кроковими двигунами. Даний тип вертикального переміщення не є унікальним, притаманним лише полярним 3D принтерам. Але через те що крокових двигуна використовується два, у випадку перекосу лівої і правої кареток осі Z виникає втрата паралельності між рухом сопла екструдера і

33

поверхнею платформи друку, рис. 6.

Якщо у випадку декартових 3D принтерів даний дефект вирішується або механічним налаштуванням рівня платформи, або створенням калібровочної сітки платформи, тобто програмним корегуванням осі Z в процесі переміщення сопла в горизонтальній площині. То у випадку з полярними принтерами необхідно або робити автоматичне вирівнювання лівого и правого крокових двигунів, або створювати сітку столу.



Рис. 6. Вертикальний перекос осі R

Якщо даний тип дефекту принтеру не усунути, це може призвести до гальмування оборотів столу навколо осі θ , що у свою чергу може призвести до пропуску кроків крокового двигуна і браку друку.

Для автоматичного пошуку центра осі θ пропонується система, що працює наступним чином. По периметру робочої платформи, що має форму кола розташовано 16 неодимових магнітів, ця кількість може бути зміненою. Менша кількість магнітів пришвидшить процес пошуку центру платформи та зробить платформу трохи легше, більша – підвищить точність системи. Обчислення буде провести легше і точніше при парній кількості магнітів. На каретці осі R розташовується датчик Холла таким чином щоб його чутливий елемент знаходився чітко у на одній вертикальній осі із отвором екструдеру.

Для розуміння алгоритму роботи системи необхідно навести візуалізацію алгоритму. Позначення частин системи умовне, так екструдер та датчик Холла зображене як єдине ціле, а за чутливий елемент датчику приймається вершина конусу екструдеру, умовне сопло [5]. На рис. 7 – екструдер із датчиком Холлу, 2 – платформа друку, 3 – система магнітів.

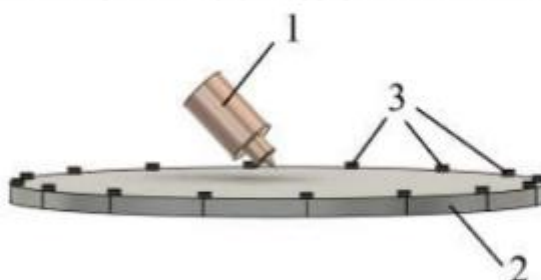


Рис. 7. Частина системи

На початку процесу пошуку каретка осі R рухається до спрацювання кінцевого вимикача, який знаходиться поза межами робочої платформи (рис. 8).



Рис.8 – Рух екструдеру до кінцевого вимикачу осі R

На другому кроці екструдер рухається на один крок по напрямку до платформи (рис. 9). Розмір кроку руху визначається конструкцією принтеру, розмірами платформи, налаштуваннями чутливості датчику Холла, магнітним полем магнітів.



Рис. 9 – Рух екструдеру до платформи на один крок

Через те, що положення платформи, а саме магнітів, може бути не визначеним, на наступному кроці алгоритму платформа починає обертатися покроково на кут $22,5^\circ$, це відстань між сусідніми магнітами платформи. Обертання відбувається або до спрацювання датчику Холла, тобто коли датчик фіксує наявність магніту, або на повний кут – $22,5^\circ$. У першому випадку алгоритм переходить до виконання наступного кроку, у другому – до попереднього [6].

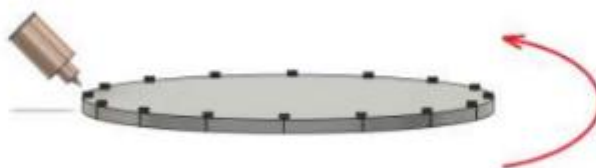


Рис. 10 – Обертання платформи

На четвертому кроці відбувається налаштування датчику Хола на максимальне магнітне поле від магнітів (рис. 11). Тобто відбувається переміщення по осі R та осі θ доки сигнал на датчику не досягне необхідного рівня. Рівень визначається чутливістю датчику та типом магніту. Координати центру магніту фіксуються системою



Рис. 11 – Налаштування датчику на центр магніту

Після чого кроки три та чотири алгоритму повторюються для всіх магнітів платформи. З результатами пошуку центру магнітів будується карта платформи (рис. 12). І знаходиться центр обертання.

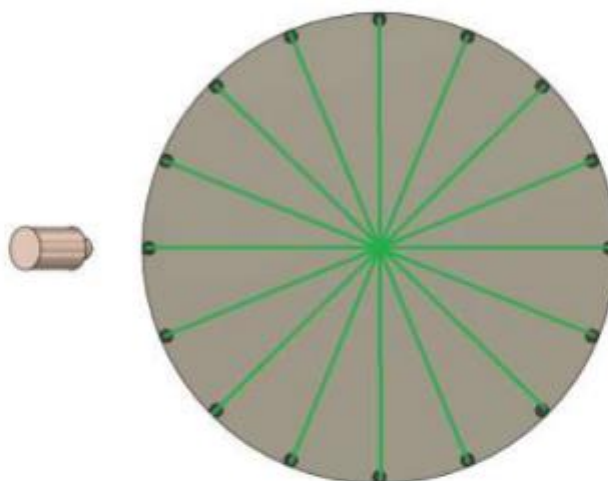


Рис. 12 – Побудова карти платформи для знаходження центру

Кількість магнітів не може бути занадто великою для запобігання їх взаємному впливу на магнітне поле. Датчик Холла в конструкції є зйомним, тобто використовують для визначення так званих офсетів осі R, Офсет – відстань від датчику кінцевого положення до нуля системи координат.

ВИСНОВКИ. Надвлячись на велику кількість недоліків циліндрична система координат, у якій працюють сучасні полярні 3D принтери, має значні переваги. Ці переваги повною мірою можна оцінити у випадку реалізації 3D друку кінчними перетинами без підтримок.

Головні проблеми реалізації полярних 3D принтерів є забезпечення точного і коректного переміщення навколо осі θ циліндричної системи координат, тобто обертання платформи друку. Умовно ці проблеми можна поділити на ті, що можна виправити за допомогою електронного модулю системи центрування принтеру та на програмну корекцію G-коду.

ЛИТЕРАТУРА

1. Alan Overby CNC Machining Handbook: Building, Programming, and Implementation 2nd Edition. McGraw Hill TAB 2019. p. 251.

2. Офіційний сайт Pressbooks // Сайт Manufacturing Processes. URL.: <https://openoregon.pressbooks.pub/manufacturingprocesses45/front-matterintroduction/> (дата

36

звернення 22.11.2023).

3. Diy3dprinting // Сайт Pimaker 3D URL.: <https://diy3dprinting.blogspot.com/2013/08/pimaker-diy-3d-printer-with-circular.html> (дата звернення 23.11.2023).

4. Офіційний сайт Polar3d // Сайт Polar3d URL.: <https://polar3d.com> (дата звернення 23.11.2023).

5. Fusion 360 // Сайт Autodesk. URL.: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription> (дата звернення 25.12.2023).

6. Hall Effect Sensors: A Comprehensive Guide // Сайт Monolithicpower. URL.: https://www.monolithicpower.com/en/learning/resources/hall-effect-sensors-a-comprehensive-guide?srsltid=AfmBOopQRcduXdaD-OrHRzCPbKOsU_wfIS76_XS23tAByD7K4L65bTYoo (дата звернення 20.11.2023)

7. Edward Ramsden Hall-Effect Sensors 2nd Edition. Newnes. 2016. p. 249.

***Науковий керівник:** Разумов-Фризюк Євгеній, доцент кафедри КІТАР Харківського національного університету радіоелектроніки*

ДОДАТОК Б

Демонстраційний матеріал у вигляді презентації

