

РЕЦЕНЗІЯ

кандидата технічних наук, доцента, декана факультету комп'ютерної інженерії та управління Харківського національного університету радіоелектроніки Ляшенка Олексія Сергійовича на дисертаційну роботу Нікітіна Дмитра Олександровича «Моделі і методи керування технологічним процесом виготовлення друкованих плат за технологією фотополімерного 3D-друку», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології з галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування.

1. Актуальність теми дисертації

Ринок 3D-друку зростає і попит на нові технології виготовлення друкованих плат також зростає. Впровадження фотополімерного 3D-друку в цю сферу відповідає сучасним тенденціям розвитку ринку, таким як Інтернет речей (IoT), розумні пристрої та інші високотехнологічні галузі. Технологія фотополімерного 3D-друку забезпечує значні переваги в порівнянні з традиційними методами виготовлення друкованих плат. Вона дозволяє створювати складні структури з високою точністю та мінімальними відходами матеріалу. Це відкриває нові можливості для дизайну електронних компонентів та їх інтеграції в пристрої. Однією з основних переваг фотополімерного 3D-друку є можливість швидкого створення прототипів. Це особливо важливо для стартапів та науково-дослідних установ, де швидкість розробки нових продуктів грає вирішальну роль. Здатність швидко виготовляти та тестувати нові прототипи дозволяє скоротити час виходу на ринок. Фотополімерний 3D-друк дозволяє легко налаштовувати та виготовляти індивідуальні замовлення. Це корисно в таких галузях, як медична електроніка, де кожна друкована плата може вимагати унікальних характеристик відповідно до конкретних потреб пацієнта. Хоча початкові інвестиції в обладнання для фотополімерного 3D-друку можуть бути високими, довгострокові витрати можуть бути нижчими через зменшення

відходів матеріалів та економію часу на виробничих процесах. Крім того, можливість виробництва малих партій без необхідності створення дорогих форм та інструментів також знижує витрати. Технологія 3D-друку зазвичай використовує менше матеріалу, ніж традиційні методи виробництва, що зменшує кількість відходів і, відповідно, негативний вплив на навколишнє середовище. Це робить фотополімерний 3D-друк більш екологічно чистою технологією. Фотополімерний 3D-друк дозволяє створювати дуже малі деталі з високою роздільною здатністю, що є критично важливим для сучасних електронних пристроїв, які стають все меншими та складнішими.

Таким чином, розробка методів і моделей для керування технологічним процесом виготовлення друкованих плат за технологією фотополімерного 3D-друку є актуальною через його численні переваги, такі як швидкість прототипування, зменшення витрат, індивідуалізація виробництва, екологічність та здатність створювати складні геометрії.

2. Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає у наступному:

Вперше запропоновано:

- метод експонування одно- та двосторонніх друкованих плат за допомогою адитивних технологій 3D-друку з використанням фотополімерних масок, які, на відміну від існуючих методів нанесення фоторезиста, дозволяють зменшити витрати на матеріали на 37% (в порівнянні з використанням плівкового фоторезиста) та трудоемність виробництва друкованих плат;

- математичну модель впливу параметрів SLA та DLP-експонування на геометричні розміри топології друкованих плат під час експонування фотополімерних масок.

Удосконалено:

– технологічний процес створення фотополімерних масок топології з урахуванням впливу температурних режимів фотополімерної смоли, що дає можливість підвищити точність виготовлення топології маски друкованих плат в середньому на 0,03 мм;

– метод адаптивної бінарizaції обробки зображень за рахунок використання розміру скануючої матриці при скануванні зображення за пороговим значенням Otsu.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому, що в роботі були отримані математичні моделі та методи прогнозування відхилень геометричних розмірів топології та розроблено програмне забезпечення для візуального контролю та порівняння топології.

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та висновків підтверджується їхньою апробацією на міжнародних наукових конференціях і публікаціях у провідних фахових наукових виданнях України та за її кордоном.

3. Оцінка змісту дисертації, її завершеності, дотримання принципів академічної доброчесності

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, структура якого складається із вступу, 4 розділів, висновків, анотацій та додатків.

У **вступі** доводиться актуальність обраної теми дослідження, визначається мета та задачі дослідження; обирається об'єкт і предмет дослідження; визначаються методи дослідження; формулюється наукова новизна дослідження, описується практичне значення отриманих результатів роботи; наводиться перелік тез доповідей у конференціях, а також підбивається підсумок щодо кількості публікацій та статистичної інформації про роботу.

У **першому** розділі – Сучасний стан автоматизації технологій виготовлення друкованих плат – розглянуто види друкованих плат; проведено аналіз сучасних технологій виготовлення друкованих плат;

детально розглянуто технологію фотолітографії; описано технології адаптивного фото полімерного 3D-друку; описано технологію використання адитивних технологій 3D-друку під час експонування топології друкованих плат; проаналізовано моделі керування технологічним процесом виготовлення фотополімерних масок

У **другому розділі** – Розробка програмного забезпечення для контролю розмірів фотополімерних масок топології – наведено етапи підготовки реального зображення для розроблення програмного забезпечення; детально розглянуто метод фільтрації зображень; описано методи вирівнювання зображення; розглянуто порівняння зображень за методом SAD.

Третій розділ – Автоматизоване управління технологічним процесом нагрівання фотополімерної смоли під час експонування топології друкованих плат – містить постановку задачі; фізичний опис технологічного процесу нагрівання фотополімерної смоли під час експонування моделі; розробку математичної моделі впливу температури в пакеті Matlab Simulink; дослідження впливу температури фотополімерної смоли на геометричні відхилення розмірів друкованих плат.

У **четвертому розділі** – Експериментальні дослідження – наведено факторний аналіз фотополімерних смол; досліджено адгезію до поверхні заготовки та відхилення геометричних розмірів; перевірено базові припущення множинної лінійної регресії; побудовано модель множинної регресії впливу параметрів експонування на геометричні розміри топології; проведено оцінку різниці відхилень геометричних розмірів провідників ДП за різних товщин провідників; оцінено витрати фотополімерної смоли під час 3D-експонування друкованих плат.

У **висновках** узагальнено отримані результати.

У **додатках** наведено лістинги програм, результати вимірювання впливу технологічних параметрів експонування на відхилення геометричних розмірів топології друкованих плат, порівняння відхилень розмірів провідників друкованих плат при різних товщинах, а також список

публікацій здобувача та акти впровадження результатів дисертаційного дослідження.

Оформлення дисертаційної роботи відповідає Наказу МОН України від 12.01.2017 №40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації».

У дисертації та публікаціях автора не виявлено фактів порушення академічної доброчесності (академічного плагіату, фабрикації та фальсифікації результатів).

4. Оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Результати дисертаційної роботи висвітлено здобувачем у 21 науковій праці, серед яких: 9 – у наукових фахових виданнях України (категорії «Б»), 5 – у закордонних виданнях (Польща, Фінляндія, Італія, Болгарія та Туреччина), 1 розділ монографії, 6 тез доповідей. Праці проіндексовано у базах Index Copernicus, Google Scholar, Research Bible, CrossRef, OUCI, ResearchGate, OpenAIRE.

5. Зауваження та дискусійні питання до дисертаційної роботи.

- з тексту дисертації не дуже чітко зрозуміло, чому запропоновані технології підходять саме для CPPS;
- лістинги кодів, наведених у розділі 2 доцільно було б супроводжувати детальними поясненнями;
- з тексту дисертаційної роботи не дуже чітко зрозуміло, як і в якому порядку використовуються описані алгоритми обробки зображень;
- в роботі не описано, чому саме використано середовище MatLab/Simulink, в чому його переваги перед іншими;
- доцільно було більше уваги приділити інтерфейсу розробленої системи контролю температури та опису роботи цієї системи;
- в тексті дисертації наявні незначні стилістичні помилки, зокрема неузгодженість слів у деяких реченнях.

6. Висновок про дисертаційну роботу.

Вважаю, що дисертаційна робота Нікітіна Дмитра Олександровича «Моделі і методи керування технологічним процесом виготовлення друкованих плат за технологією фотополімерного 3D-друку», представлена на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології є актуальною, завершеною науковою працею, що виконана на належному науково-теоретичному рівні з логічно та доступно викладеним матеріалом. Основні положення роботи не викликають заперечень. Вона містить наукові результати досліджень, які дисертант виконав особисто. Оформлення дисертації відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (з наступними змінами) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12.01.2022 (із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 341 від 21.03.2022). Здобувач Нікітін Дмитро Олександрович заслуговує присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

Рецензент,
декан факультету комп'ютерної
інженерії та управління
Харківського національного університету
радіоелектроніки
кандидат технічних наук, доцент,



Олексій ЛЯШЕНКО

Підпис засвідчую
Учений секретар



Ірина ЖАРИКОВА