

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професор, професора кафедри конструкції повітряних суден, авіадвигунів та підтримання льотної придатності, Льотної академії Національного авіаційного університету Осадчого Сергія Івановича на дисертаційну роботу Нікітіна Дмитра Олександровича «Моделі і методи керування технологічним процесом виготовлення друкованих плат за технологією фотополімерного 3D-друку», поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування

Актуальність теми дисертації

Сучасне виробництво електронної техніки пов'язано із постійною зміною асортименту продукції, що виготовляється. З'являються нові вироби, на зміну старим моделям приходять нові. Таким чином життєвий цикл продукції постійно скорочується і регулярно виникає необхідність виготовлення нових електричних компонентів. Виробництво друкованих плат не є винятком. Якщо процес встановлення та пайки компонентів на друковану плату виконується на автоматизованому обладнанні яке не потребує при переналагодженні великих затрат часу та ресурсів, то в процесі виготовлення самої друкованої плати ситуації дещо інша. Сучасні автомати трафаретного друку вимагають виготовлення трафаретів під кожен друковану плату та нанесення шару фоторезисту.

Використання сучасних адитивних технологій фотополімерного 3D-друку, що запропоновані у роботі, дозволять забезпечити вкрай швидке переналагодження обладнання для створення друкованих плат, виготовлення на одній установці почергового виготовлення продукції, зменшать витрати часу та ресурсів, дозволять забезпечити швидке переналагодження обладнання та оперативний контроль кості виробництва.

Отже, дисертаційне дослідження Нікітіна Д. О., яке присвячене розробці моделей і методів керування процесом виготовлення друкованих плат із використанням фотополімерного 3D-друку є актуальною задачею для сучасної автоматизації виробництва компонентів електронної техніки.

Загальна характеристика дисертаційної роботи

Дисертаційна робота містить чотири розділи. Наведені дослідження викладено на високому науково-технічному рівні, у повному обсязі та зрозуміло.

Інформація наведена у розділах є послідовною, актуальність роботи відповідає сучасним світовим дослідженням, задачі, що поставлено, вирішено у повному обсязі.

Перший розділ присвячено аналізу сучасному стану технологій виготовлення друкованих плат: типам друкованих плат, технологіям виготовлення друкованих плат та зокрема технології фотолітографії. Розглянуто матеріали та обладнання, що використовуються, переваги та недоліки існуючих технологій. До основних недоліків віднесено: велика кількість обладнання та його вартість для етапів нанесення фоторезисту та експонування топології ДП, необхідність виготовляти окремі трафарети топології для непрямого експонування, велика кількість витратних матеріалів, низька гнучкість виробництва.

Також розглянуто технології сучасного фотополімерного 3D друку та можливість використання адитивних технологій для експонування топології друкованих плат. Зокрема розглянуто технології SLA, DLP і LCD. Проведено аналіз моделі керування технологічним процесом виготовлення фотополімерних масок.

Визначено, що для реалізації даного підходу необхідно розробити систему оцінки якості одержаних виробів, яка оцінюватиме відхилення геометричних розмірів одержуваної фотополімерної маски від вихідного зображення. Для цього заплановано розробку система технічного зору.

Другий розділ присвячений розробці програмного забезпечення контролю розмірів. Розглянуто етапи підготовки реального зображення для подальшої обробки системою технічного зору. Проведено аналіз методів лінійної фільтрації та згладжування зображення: лінійна фільтрація, згладжувальні фільтри, бінаризація, метод Otsu, Адаптивна бінаризація з визначенням «Block size». Також проведено аналіз методи вирівнювання зображення: AKAZE, BRISK, ORB.

На основі аналізу, що проведено, розроблено програмне забезпечення для контролю відхилень фотополімерної маски та порівняння отриманих топологій з еталонним зображеннями у процесі експонування топології ДП.

Третій розділ присвячено проблемі зміні розмірів провідникової системи із зміною температури фотополімерної смоли, що формує маску та автоматизації управління процесом нагрівання смоли під час експонування топології друкованої плати.

Наведено опис фізичного процесу нагрівання фотополімерної смоли під час експонування моделі. Розглянуто процес передачі теплового потоку від ультрафіолетового випромінювання діодної матриці до фотополімерної

смоли смолисмоли. Тим саме описується виникнення теплового коефіцієнту об'ємного розширення фотополімерної смоли під час друку моделі;

За результатами розроблено модель впливу температури в середовищі Matlab Simulink та схема керування тепловим потоком при фотополімерному експонування, що дало змогу зменшити різницю у відхиленні розмірів в середньому на 0,03 мм.

Четвертий розділ присвячений експериментальним дослідженням, що дозволяють провести перевірку запропонованих моделей і методів. А саме:

- факторний аналіз фотополімерних смол;
- дослідження адгезії фотополімера до поверхні заготовки та відхилення геометричних розмірів струмопровідних доріжок друкованої, після травління топології.

Також на основі експериментальних даних побудовано модель множинної регресії впливу параметрів експонування на геометричні розміри топології.

Експериментальні дослідження та побудована модель дають змогу стверджувати, що запропонована топологія дозволяє виготовляти друковані плати з високою точністю.

Наукова новизна результатів, отриманих у дисертаційній роботі

Під час виконання дисертаційних досліджень Нікітіним Дмитром отримані такі нові наукові результати:

- вперше впроваджено метод експонування топології одно- та двосторонніх друкованих плат з використанням технології адитивного фотополімерного 3D-друку. Суть методу полягає виготовленні фотополімерних масок, який на відміну існуючих методів нанесення фоторезиста у фотолітографії, дозволяє зменшити витрати на матеріали та трудоемність виробництва друкованих плат;

- запропоноване удосконалення процесу створення фотополімерних масок топології з урахуванням впливу температурних режимів фотополімерної смоли при експонуванні поверхні друкованих плат, що дає можливість зменшити відхилення геометричних розмірів провідникової структури та підвищити точність виготовлення топології маски друкованих плат;

- вперше розроблено математичну модель впливу параметрів експонування моделі топології при SLA, DLP та LCD технології на геометричні розміри провідників топології друкованих плат. Це дає можливість прогнозувати відхилення розмірів провідників та зменшити відхилення геометричних розмірів провідникової системи на етапі розробки топології CAD системах та при підготовці топології до друку;

- отримав подальший розвиток метод адаптивної бінарizaції обробки зображень за рахунок використання оптимізованого розміру скануючої матриці при скануванні зображення за пороговим значенням Otsu, що дозволяє зменшити шуми при бінаризованій обробці, да покращити використання подальших фільтрів для обробки.

Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами та темами

Тематика дисертаційних досліджень і результати роботи відповідають напрямам дербюджетних і госпдоговірних НДР, що було виконано у 2020-2024 рр. на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки ХНУРЕ. До них відносяться наступні науково-дослідні роботи: «Інтелектуальна багатоцільова робототехнічна платформа з удосконаленими маніпуляційними можливостями»; «Виготовлення координатної платформи з ЧПК та можливістю друку за технологією FFF»; «Модифікація установки SLA-500 для 3D-друку за технологією DLP»; «Заміна системи прямої (direct) подачі пластика на віддалену»; «Налаштування 3D-принтеру, що працює за технологією FDM/FFF, та навчання оператора використанню 3D принтеру».

Також отримані результати відповідають переліку Цілей сталого розвитку, зокрема цілі 9 Інновації та інфраструктура (п. 9.4, 9.5 та інші).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, та їх достовірність

Отриманні наукові положення, висновки і рекомендації відзначається їх обґрунтованістю та достовірністю через декілька факторів: відсутність суперечностей між теоретичними положеннями та результатами експериментів; правильне застосування методів моделювання; адекватні умови проведення експериментів та аналіз їх результатів; широку апробацію на конференціях; використання результатів декількох НДР, а також їхнє впровадження на виробничому підприємстві та у навчальному процесі трьох ВНЗ України. Крім того, здобувачем був проведений ретельний огляд і аналіз великої кількості наукових джерел, що включають дослідження як вітчизняних, так і зарубіжних авторів.

Практичне значення результатів, отриманих в дисертаційній роботі

Отримані в результаті досліджень математичні моделі та методи прогнозування відхилень геометричних розмірів топології, а також програмне забезпечення для візуального контролю та порівняння топології ДП, що розроблено використовуються у навчальному процесі в трьох вищих навчальних закладах: Національного університету «Запорізька політехніка»

(спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології), Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського (спеціальність 171 Електроніка), Харківського національного університету радіоелектроніки на кафедрі КІТАР у лабораторії адитивних технологій та 3D-прототипування, про що є відповідні акти впровадження.

Представлені методи виготовлення односторонніх і двосторонніх друкованих плат, а також алгоритми розпізнавання відхилень у геометричних розмірах топології за допомогою системи технічного зору, можуть сприяти зниженню витрат на виробництво друкованих плат. Розроблений програмний модуль "Niki" для автоматизованої обробки зображень топології друкованих плат впроваджено на ТОВ "Науково-виробниче підприємство "ЛТУ", що підтверджено відповідним актом.

Повнота викладу основних результатів дисертації у фахових виданнях

Дисертаційна робота Нікітіна Д. О. достатньо апробована, матеріали дисертації доповідались на міжнародних та всеукраїнських конференціях і опубліковані у 18 наукових працях, серед яких: 1 розділ монографії, 2 статті у фахових виданнях, 2 – у закордонних виданнях (Болгарія, Польща, Фінляндія та Туреччина), 6 – у наукових фахових виданнях України (категорії «Б»), 7 тез доповідей. Праці проіндексовано у базах Index Copernicus, Google Scholar, Research Bible, CrossRef, OUCI, ResearchGate, OpenAIRE.

Зауваження та недоліки до дисертації

1) Помилкове дублювання зображень на рисунку 1.6, для демонстрації позитивного і негативного фоторезистів помилково використовується однакове зображення.

2) У підрозділі 3.4 наведено експериментальне дослідження відхилень розмірів маски за різних температур фотополімерної смоли. Обрано досить різні за значенням температури, які виходять за межі температуру експлуатації фотополімерного обладнання.

3) Мало графічних матеріалів практичних результатів досліджень, таких як, фотографії зразків.

4) Не наведено схему устаткування на якому проводилося дослідження.

5) Розрахована тільки економія на витратних матеріалах в порівнянні з методами фотолітографії, а витрати на устаткування не наведені.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому й оформлення

Дисертаційна робота Нікітіна Д. О. є високоякісним і систематичним дослідженням з послідовним та логічним викладенням матеріалу. Вона повністю охоплює всі етапи досліджень і відповідає усім вимогам,

встановленим МОН України. У роботі використовується наукова термінологія, яка має широке визнання, а стиль презентації результатів теоретичних і практичних досліджень, а також нових наукових висновків і рекомендацій автора, сприяє їх зрозумінню та застосуванню.

Загальний висновок

Вважаю, що дисертаційна робота Дмитра Олександровича Нікітіна є завершеним науковим дослідженням, виконана на високому науковому рівні. Отримані нові наукові результати вирішують актуальні проблеми розробки нових методів і моделей для технологічного процесу виготовлення друкованих плат з використанням технологій фотополімерного 3D-друку, що у свою чергу дозволяє підвищити точність відтворення топологічного рисунку на ДП, а також зменшити час на переналаштування обладнання. У цілому представлена робота за своєю формою, обсягом і змістом, рівнем наукової новизни та практичної значущості досягнутих результатів дисертація відповідає вимогам Постанови Кабінету Міністрів України № 44 від 12.01.2022 «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії». Загалом здобувач Нікітін Д. О. за рівнем своєї підготовки та кваліфікації заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри конструкції повітряних суден,
авіадвигунів та підтримання льотної придатності,
Льотної академії національного
авіаційного університету



Сергій ОСАДЧИЙ

Підпис Осадчого С. І. засвідчую.

Вчений секретар Льотної академії Національного
авіаційного університету



Віталій БАРАНОВ