

ВІДГУК офіційного опонента

директора Інституту сцинтиляційних матеріалів НАН України,
доктора технічних наук, професора Гриньова Бориса Вікторовича
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

Актуальність теми дослідження пояснюється високою затребуваністю впровадження сучасних технологій для виготовлення компонентів електронних засобів, особливо з огляду на постійне зростання вимог до щільності монтажу за суттєвого зменшення розмірних параметрів. Це стосується у першу чергу і друкованих плат (ДП), які є базовою конструктивною та комутаційною основою для багатьох електронних виробів. Однак багато технологій виробництва таких плат є застарілими, трудомісними та не відповідають вимогам щодо високої точності виготовлення, що впливає на економічні фактори використання таких технологій. Тож пошук нових підходів щодо створення сучасних ДП із забезпеченням їх високої роздільної здатності, особливо в рамках тенденцій до мікромініатюризації, підвищення рівня автоматизації виробництва, забезпечить не тільки підвищення конкурентоздатності приладобудівних підприємств України у світі, а й суттєво підвищить можливості вирішення питання забезпечення ресурсозберігання й екологічності.

Отже, дисертаційне дослідження Нікітіна Д. О., спрямоване на впровадження технологій фотополімерного 3D-друку на етапі фотолітографії для виготовлення односторонніх і двосторонніх ДП, а також розробку моделей і методів керування даним технологічним процесом, є актуальним.

Загальна характеристика дисертаційної роботи

Дисертаційна робота містить чотири розділи, у них доволі повно викладено на високому науково-технічному рівні отримані здобувачем наукові результати.

Структура дисертаційної роботи є послідовною та логічно вибудованою. Достатньо обґрунтована актуальність досліджень, яка повною

мірою відповідає сучасному стану досліджень у галузі впровадження автоматизованих технологій у приладобудуванні та зокрема у автоматизації технологічних процесів виробництва комутаційних плат для друкованого монтажу.

У **першому розділі** проведено детальний аналіз сучасного стану технологічного процесу виготовлення друкованих плат і засобів автоматизації окремих операцій. Зокрема, розглянуто класифікацію ДП, особливості операції фотолітографії та її основні етапи, у тому числі етапи нанесення фоторезисту в автоматизованому виробництві, його експонування, суміщення. Наведено опис витратних матеріалів і технологічного обладнання, використовуваного для нанесення й експонування фоторезиста.

Також проаналізовано технології адитивного фотополімерного 3D-друку та засади й особливості реалізації використання адитивних технологій 3D-друку під час експонування топології ДП. За результатами виконаного аналізу запропоновано удосконалення класичного методу фотолітографії на етапах нанесення та експонування топологічного зображення провідників ДП за допомогою фотополімерного 3D-друку. Визначено, що такі методи фотополімерного 3D-друку, як SLA, DLP і LCD дозволяють спростити процес виготовлення ДП на основі об'єднання цих етапів в один та виготовлення фотополімерної захисної маски для ДП.

Другий розділ присвячений вибору методів фільтрації, вирівнювання та порівняння зображень і розробці програмного забезпечення для контролю розмірів фотополімерних масок топології ДП на основі обраних методів. Розглянуто етапи підготовки реального зображення для розроблення програмного забезпечення.

Наведено результати розробки програмного забезпечення для контролю відхилень фотополімерної маски та порівняння отриманих топологій друкованих плат з еталонним зображеннями провідникових структур під час операції експонування топологій, алгоритм дії якого базується на реалізації методу суми абсолютних різниць (SAD) для обробки цифрових зображень.

Наведений інтерфейс програми, фрагменти програмного коду для підключення бібліотек: нормалізації зображень, згладжування зображень, бінаризації, застосування адаптивної бінаризації, вирівнювання зображень і бібліотеки для реалізації методу SAD, а також приклади реалізації бінаризації зображень, розроблений алгоритм пошуку розмірів скануючої ділянки «Block size» у бінаризації технологічних зображень топології ДП і результати його роботи, підсумки реалізації методу AKAZE, знаходження

ключових точок за методом BRISK та інші результати роботи розробленого програмного забезпечення.

У **третьому розділі** наведено результати дослідження впливу температури фотополімерної смоли під час експонування топології ДП на геометричні відхилення розмірів ДП. Запропонована система автоматизованого управління технологічним процесом нагрівання фотополімерної смоли під час операції експонування. Наведено фізичний опис технологічного процесу нагрівання фотополімерної смоли під час експонування та розроблену у пакеті Matlab Simulink математичну модель впливу температури. У розділі наведено схему прийняття рішень АСУ ТП у процесі передачі тепла від верстату фотополімерній смолі під час експонування топології ДП; подано результати розрахунку повного та ємнісного теплового опору елементів моделі; розглянуто принцип роботи керуючого сигналу АСУ ТП для контролю нагрівання фотополімерної смоли. Представлені дані щодо результатів роботи схеми контролю температури фотополімерної смоли, зокрема зміни температури у процесі роботи верстату за різних періодів експонування. Також наведено зображення тестових зразків і відхилення розмірів топологій ДП за різних значень температури фотополімерної смоли.

Четвертий розділ відображає результати проведених експериментальних досліджень для перевірки запропонованих дисертантом моделей і методів.

Проведено факторний аналіз фотополімерних смол, які найчастіше використовуються у процесі фотополімерного 3D-друку. На основі цього аналізу визначено, які фотополімерні смоли є більш доцільними для виготовлення фотополімерних масок, зокрема з досліджуваних дев'яти марок смоли обрано дві. Виконано дослідження адгезії до поверхні заготовки та відхилення геометричних розмірів топологій ДП під час експерименту з виготовлення ДП за допомогою LCD-технології. Побудована модель лінійної регресії, яка відображає зв'язок величини відхилення геометричних розмірів топології ДП під час експонування від параметрів: часу експонування; товщини шару; інтенсивності випромінювання; довжини хвилі, а також наведено результати статистичної обробки експериментальних даних, для якої використано програмне середовище IBM SPSS Statistics.

На основі проведених дисертантом досліджень сформульовано висновок про те, що застосування адитивних технологій 3D-друку для виробництва ДП дозволить: значно спростити та здешевити виготовлення виробів, за рахунок виключення з технологічного процесу операції нанесення

фоторезисту на заготовку, а також досягти високої точності виготовлення друкованих провідників на ДП.

Наукова новизна результатів, отриманих у дисертаційній роботі

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

- запропоновано метод експонування одно- та двосторонніх ДП на основі застосування адитивних технологій 3D-друку, зокрема із використанням фотополімерних масок, який на відміну від існуючих методів нанесення захисного рисунку на заготовку ДП дозволяє зменшити витрати на технологічні матеріали та трудомісткість виробництва ДП;

- вдосконалено технологічний процес створення фотополімерних масок топологій ДП з урахуванням впливу температурних режимів фотополімерної смоли, що дає можливість підвищити точність виготовлення топології маски ДП, яка у свою чергу залежить від режимів експонування;

- вперше розроблено математичну модель впливу параметрів SLA- та DLP-експонування на геометричні розміри топології ДП у процесі експонування фотополімерних масок, яка дозволяє зменшити відхилення геометричних розмірів елементів топології ДП;

- отримав подальший розвиток метод адаптивної бінаризації обробки зображень, за рахунок використання розміру сканувальної матриці під час сканування зображення за пороговим значенням (Otsu), що дозволяє зменшити шуми у процесі бінаризованої обробки зображення топології ДП.

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

Тематика дисертаційних досліджень і результати роботи відповідають напрямам дербюджетних і госпдоговірних науково-дослідних робіт (НДР), які виконувалися у ХНУРЕ протягом 2020-2024 рр. на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки, зокрема НДР: «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

Обґрунтованість і достовірність отриманих наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується: відсутністю протиріч теоретичних положень і результатів експериментальних досліджень; коректністю застосування методів моделювання; відповідними умовами проведення експериментів та аналізом їх результатів; достатнім рівнем апробації на конференціях; використанням результатів роботи декількох НДР, а також на виробничому підприємстві та у навчальному процесі трьох ВНЗ України. Також здобувачем виконано ґрунтовний огляд і аналіз більше ніж 100 наукових джерел посилань, які включають дослідження як вітчизняних, так і зарубіжних авторів за темою дисертації.

Практичне значення результатів, отриманих в дисертаційній роботі

Математичні моделі та методи прогнозування відхилень геометричних розмірів топології, а також розроблене програмне забезпечення для візуального контролю та порівняння топології ДП використовуються у навчальному процесі в трьох ЗВО, зокрема для студентів бакалаврату та магістратури 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.

Запропоновані методи виготовлення односторонніх і двосторонніх друкованих плат та алгоритми розпізнавання геометричних відхилень топології за допомогою системи технічного зору можуть бути використані для зменшення витрат на виготовлення ДП, а саме, зменшення ціни на витратні матеріали та додаткове обладнання. Розроблений програмний модуль «Niki» для автоматизованої обробки зображень топології ДП впроваджено на ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ», що також 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 (Польща, Фінляндія та Болгарії та Туреччині), 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) Наявні неточності при формулюванні мети дисертаційного дослідження та пунктів наукової новизни.

2) Під час аналізу предметної області, у розділі 1, варто було б більше уваги приділити технічним характеристикам наявного технологічного обладнання для нанесення захисних рисунків на заготовки ДП з метою подальшого порівняння наявних методів із запропонованим. Також можна було вказати на переваги запропонованої автоматизованої технології у порівнянні з методами трафаретного й офсетного друку.

3) На рисунку 1.15 слід було б зробити підписи українською мовою для більш наочної демонстрації етапів експонування масок для виготовлення ДП.

4) Для опису значущості отриманих у роботі результатів можна було вказати також, чи може запропонований метод використовуватися для виготовлення ядер для багат шарових друкованих плат і у цьому випадку вказати, за якими саме методами ці плати виготовлятимуться після отримання окремих шарів і наскільки впровадження результатів дисертаційного дослідження у технологічний процес дає переваги по трудомісткості, зменшенню матеріальних витрат тощо.

5) У тексті дисертаційної роботи є деякі незначні помилки та неточності, наприклад у підписах до рис. 3.10 і висновках до розділу 3, нумерації додатків тощо.

6) У другому розділі слід було б описати детальніше інтерфейс і функціонал розробленого програмного забезпечення, а також вказати, чи планується подання заявки на оформлення свідоцтва про авторське право на цю розробку.

7) У підрозділі 4.7 (стор. 163) коректніше було б у абзаці «значно спростити і здешевити виготовлення ДП, виключивши з виробничого процесу етап нанесення фоторезисту на заготовку» вказати «з технологічного процесу».

Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому й оформлення

Дисертаційна робота Нікітіна Д. О. представляє собою закінчене та цілісне дослідження з чіткою структурою та логічним викладенням матеріалу, повною мірою відображає зміст етапів досліджень. Її зміст і оформлення в цілому відповідають встановленим МОН України вимогам.

Застосована у роботі наукова термінологія є загальновизнаною, стиль викладення автором результатів теоретичних і практичних досліджень, нових наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття та використання.

Загальний висновок

Вважаю, що дисертаційна робота Дмитра Олександровича Нікітіна є завершеним науковим дослідженням, виконана на високому науковому та теоретичному рівні. Отримані нові наукові результати вирішують актуальні проблеми розробки нових методів і моделей для технологічного процесу виготовлення односторонніх і двосторонніх друкованих плат за адитивними технологіями фотополімерного 3D-друку, що у свою чергу дозволяє підвищити точність відтворення топологічного рисунку на ДП, а також зменшити витрати на технологічні матеріали. 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:

директор Інституту сцинтиляційних
матеріалів НАН України,
академік НАН України,
доктор технічних наук, професор



Борис ГРИНЬОВ