

## РЕЦЕНЗІЯ

кандидата технічних наук, доцента, доцента кафедри комп'ютерних інтелектуальних технологій та систем Харківського національного університету радіоелектроніки Ілюніна Олега Олеговича 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.

**Актуальність теми** “Моделі і методи керування технологічним процесом виготовлення друкованих плат за технологією фотополімерного 3D-друку” полягає в необхідності адаптації до змін попиту на ринку та визначених перспектив використання технології для виготовлення друкованих плат.

Зростаюча якість друку. У сучасному світі спостерігається тенденція до збільшення якості друку. Цифрові технології досягають значних успіхів і конкурують з аналоговими методами. Однак, придбання більш технологічного обладнання може бути досить витратним, а заміна фотонаборних автоматів може бути ускладненою через фізичне та моральне застаріння обладнання та присутність на ринку великої кількості варіантів обладнання для модернізації виробництва.

Технологія фотолітографії для виробництва друкованих плат (ДП) найбільше відповідає поставленим вимогам. На базі фотолітографії розроблено різноманітні способи перенесення зображення топології ДП з урахуванням матеріалу підкладки, ступеня мініатюризації провідникової

структури та видів ДП: односторонніх, двосторонніх, багатошарових, гнучких та гнучко-жорстких, а також гнучких шлейфів.

Але, не зважаючи на опрацьованість даного підходу, виробництво плат за технологією фотолітографії і досі є ресурсомістким процесом, який включає витрати на створення трафаретів. Використання цих трафаретів ускладнює швидке переналагодження виробництва для створення нових продуктів.

Зважаючи на сучасні концепції кіберфізичних виробничих систем (CPPS), цей недолік – відсутність гнучкості виробництва при сучасних темпах автоматизації – є істотним. У зв'язку з цим потребує розв'язання актуальне науково-практичне завдання спрощення та здешевлення виробництва друкованих плат за допомогою сучасних підходів виробництва.

У дисертаційній роботі пропонується використання адитивних технологій фотополімерного 3D-друку DLP цифрова обробка світла (Digital Light Processing – DLP) та рідкокристалічний дисплей (Direct UV Printing – LCD) при виготовленні нескладних одношарових (ОДП) та двошарових (ДДП) друкованих плат як спосіб економії витратних матеріалів та скорочення трудовитрат.

Фотополімерний друк на даний час є доволі перспективним напрямком адитивного виробництва. Дана технологія по своїй суті подібна до фотолітографії, тому що в них обох використовуються підходи до експонування зображень моделі або топології. Розробка методів адаптації та оптимізації технологічних параметрів для експонування топології друкованих плат за допомогою адитивних технологій 3D-друку може вирішити вказані завдання, а також забезпечити необхідні параметри виробу, такі як:

- збереження геометричних розмірів топології ДП;
- точність позиціонування провідників;

- забезпечення електричної надійності ДП;
- збереження механічної стійкості провідників;
- уникнення дефектів в топології ДП.

При дослідженні можливості використання технологій фотополімерного друку у фотолітографії для виготовлення ОДП та ДДП необхідно розглянути такі питання:

- адгезія фотополімерної смоли (ФС) до матеріалу підкладки;
- вплив факторів експонування двовимірних зображень (потужність ультрафіолетового (УФ) випромінювання, час витримки, товщина шару фотополімерної маски) на топологію провідників при виготовленні друкованих плат методом тривимірних полімерних фотомасок;
- поява підтравлення провідникового шару ДП;

Використання методів адитивного фотополімерного прототипування в виготовленні простих односторонніх та двосторонніх друкованих плат дозволяє вирішити такі технічні завдання:

- значне скорочення витрат при використанні даного методу;
- автоматизація процесу виробництва за цією технологією.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій сформульованих у дисертації.** Дисертація характеризується класичним підходом до вивчення проблематики відповідно до теми та завдань, які поставлені перед здобувачем. Робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

Доцільно зазначити, що автором логічно й послідовно описані основні положення результатів дослідження з їх аналізом та висновками, що дозволяє розглянути всі окреслені проблеми у різних аспектах. Критичний аналіз, як вітчизняних, так і міжнародних наукових джерел, повною мірою підтверджують обґрунтованість наукових положень дисертації. Завдяки



всебічному та критичному аналізу отриманих результатів досліджень, а також використанню сукупності методів і прийомів наукового пізнання, дали змогу здобувачу, чітко та стисло викласти основні положення висвітлені у висновках. Висновки логічні та витікають із результатів особисто проведених дисертантом досліджень, достовірність яких підтверджується наведеним в дисертації табличним і графічним матеріалом.

**Аналіз структури і змісту дисертації.** Структура дисертації є загальноприйнятою. Матеріали дисертації викладені на 204 сторінках і складаються зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Дисертація містить 18 таблиць, 86 рисунків. Список літературних посилань містить 118 джерел, 98 з яких – латиницею.

**Перший розділ** присвячено класифікації друкованих плат за їх типами, характеристиками та класами точності, огляду сучасних етапів фотолітографії, зокрема етапів нанесення та експонування провідникового рисунка, установкам та витратним матеріалам для перенесення топологічного рисунка, фотополімерному 3D-друку та використання його у фотолітографії ДП на етапах нанесення фоторезиста та експонування зображення на підкладку, моделі управління технологічним процесом створення фотополімерних масок та впровадження автоматизації у цей процес.

Зроблено висновки щодо виробництва ОДП і ДДП, а також виділено основні недоліки класичного методу фотолітографії для виготовлення ОДП та ДДП.

**Другий розділ** висвітлює, як спростити процес дослідження на етапі вимірювання відхилень фотполімерних масок під час експонування топології ДП та порівнянні отриманої топології з початковим зображенням провідникової структури.

У **третьому розділі** вирішено наступні поставлені завдання та зроблені такі висновки:

– зі збільшенням часу експонування шару спостерігається зростання температури фотополімерної смоли, що призводить до збільшення відхилень розмірів моделі. Це може бути обумовлено тим, що зі збільшенням часу експонування збільшується час друку моделі, що у свою чергу призводить до збільшення часу впливу УФ-випромінювання на фотополімерну смолу та її нагрівання, а також збільшення значення температурного коефіцієнта розширення;

– температура нагрівання фотополімерної смоли у значною мірою залежить не лише від часу друку, але й від інтенсивності УФ-випромінювання. Це можна визначити через відмінність між початковою температурою фотополімерної смоли та температурою після друку. Зміна інтенсивності випромінювання призводить до збільшення теплового впливу на фотополімер;

– оцінюючи значення відхилень геометричних розмірів топології, можна прийти до висновку, що час експонування у межах від 17 с до 20 с є надто великим, оскільки вони перевищують допустимі відхилення  $\pm 0,02$  мм. Це особливо відчутно за інтенсивності випромінювання при 2800 Лм та вище. Таким чином, для наступного етапу досліджень рекомендується користуватися діапазоном часу експонування від 7 с до 16 с;

– за умови збільшення температури фотополімерної смоли зростають значення відхилень геометричних розмірів моделі;

– за температур у діапазоні від 10°C до 20°C, середнє відхилення розмірів менше ніж у попередніх дослідах за тих же значень часу експонування.

При порівнянні відхилень розмірів провідників під час експонування топології без контролю температури та з контролем, різниці у відхиленнях зменшилися в середньому на 0,03 мм.

**Четвертий розділ** присвячений експериментальним дослідженням. На основі всіх проведених досліджень та обробленої статистики можна зробити висновок, що використання адитивних технологій 3D-друку дозволяє:

- значно спростити і здешевити виготовлення ДП, виключивши з виробничого процесу етап та кількість обладнання для нанесення фоторезисту на заготовку;
- ефективніше використовувати виробничі площі;
- адаптувати вихідну топологію ДП, враховуючи вплив технологічних факторів (за наявності відповідного програмного забезпечення);
- досягти високої точності виготовлення друкованих провідників;

Подальший розвиток запропонованої технології дозволить виготовляти жорсткі та гнучкі електронні плати повністю – зі струмопровідними доріжками, діелектричною основою, радіoeлектронними елементами, які можуть застосовуватися у різних пристроях.

У ході проведення експериментів були отримані дані, що дозволили розробити регресійно-кореляційну модель витрат фотополімерної смоли під час створення топології ДП та розрахувати коефіцієнти регресії. Це дає можливість зменшити витрати матеріалів на виготовлення ДП методом фотополімерних 3D-масок та дає позитивний економічний ефект від використання на підприємствах у рамках концепцій кіберфізичних виробничих систем.

Виходячи з досліджень, на друковану плату з розмірами 80 мм×72 мм за технологічних параметрів фотополімерного експонування, таких як: час експонування 9 с та висота шару 0,25 мкм, економія на витратні матеріали (фотополімерна смола) складає 37% у порівнянні з фоторезистивною плівкою. Це доводить доцільність використання фотополімерного 3D-друку для виготовлення ДП.



При цьому запропонований метод виготовлення топологій ДП дає можливість об'єднати в один процес нанесення і експонуванням топології на заготовку, скорочує тривалість виробництва і дозволяє зменшити кількість технологічного обладнання в структурі технологічного процесу. Крім того, запропонований підхід також демонструє економічні вигоди використання адитивних технологій 3D-друку під час виготовлення ДП.

**Значення одержаних результатів** для науки й практики та рекомендацій щодо їх практичного використання полягає у наступному. Отримані в роботі математичні моделі та методи прогнозування відхилень геометричних розмірів топології, які розглянуті у третьому та четвертому розділі, та розроблене програмне забезпечення для візуального контролю та порівняння топології були впроваджені у навчальний процес кафедри «Інформаційні технології електронних засобів» Національного університету «Запорізька політехніка» при проведенні лекційних та лабораторних занять з дисципліни «Основи виробництва» та «Автоматизовані системи управління технологічними процесами» (бакалаврат) та «Цифрова обробка сигналів та зображень» (магістратура) для спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології (акт від 23.02.2024). Також ці методи та результати впроваджені у навчальний процес кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки «Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського» при проведенні лекцій, у методичних вказівках щодо виконання лабораторних та практичних занять з курсів «Технологія електронних пристроїв», «Електронні пристрої роботизованій систем», «Електронні пристрої кібернетичних систем» для спеціальності 171 – Електроніка (акт від 15.03.2024). Запропоновані методи виготовлення односторонніх і двосторонніх друкованих плат та алгоритми розпізнавання геометричних відхилень топології за допомогою системи технічного зору

були використані для зменшення витрат на виготовлення друкованих плат, а саме, зменшення ціни на витратні матеріали та додаткове обладнання. Отримані результати щодо сучасних комп'ютерних технологій (математичних моделей, методів, алгоритмів та програм), орієнтованих на розв'язання задач впливу технологічних процесів виготовлення друкованих плат використовуються в освітньому процесі Харківського національного університету радіоелектроніки на кафедрі КІТАР в лабораторії адитивних технологій та 3D-прототипування, зокрема при викладанні навчальної дисципліни «Системи з числовим програмним керуванням» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти (акт від 07.02.2024). Розроблений програмний модуль «Niki» для автоматизованої обробки зображень топології друкованих плат, було впроваджено у ТОВ «Науково-виробниче підприємство «ЛТУ» (акт від 11.03.2024).

**Наукова новизна результатів дисертаційної роботи.** Наукова новизна роботи полягає в наступному:

1. Вперше запропоновано метод експонування одно - та двосторонніх друкованих плат за допомогою адитивних технологій 3D-друку з використанням фотополімерних масок, яка на відміну існуючих методів нанесення фоторезиста, дозволяє зменшити витрати на матеріали на 37% (в порівнянні з використанням плівкового фоторезиста) та трудоемність виробництва друкованих плат.

2. 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 0.08 мм (залежності від режимів експонування).

3. Вперше розроблено математичну модель впливу параметрів лазерної стереолітографії (SLA) та цифрової обробки світлом (DLP) при



експонуванні геометричних розмірів топології друкованих, яка дає можливість зменшити відхилення геометричних розмірів на 15%.

4. Отримав подальший розвиток метод адаптивної бінарizaції обробки зображень за рахунок використання розміру скануючої матриці при скануванні зображення за пороговим значенням Otsu, що дозволяє зменшити шуми при бінаризованній обробці.

**Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності.** У дисертації Д.О. Нікітіна відсутні порушення академічної доброчесності. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів містять посилання на відповідне джерело.

**Питання для дискусійного обговорення та недоліки дисертації щодо її змісту та оформлення.** Водночас з позитивною оцінкою роботи вважаю доцільним виділити окремі дискусійні питання, зауваження та побажання:

1. У роботі зустрічаються деякі стилістичні, технічні та граматичні помилки, пов'язані з комп'ютерним набором;

2. В дисертації зустрічаються русизми: «дозволяє», що доцільно було б змінити на більш літературний варіант – «дає змогу/підстави»;

3. У другому розділі не обґрунтовано вибір бібліотек для розроблення програмного забезпечення підготовки вхідного зображення

4. Якість деяких зображень має не дуже високий рівень деталізації

5. У третьому розділі не дуже зрозуміло, який кінцевий вигляд має математична модель і яким буде її практичне використання

Побажання та дискусійні питання не є принциповими і жодним чином не зменшують позитивної оцінки роботи, її наукової цінності, актуальності та практичного значення.

**Загальний висновок.** Дисертація Нікітіна Дмитра Олександровича на тему: «Моделі і методи керування технологічним процесом виготовлення друкованих плат за технологією фотополімерного 3D-друку» є завершеним науковим дослідженням, виконаним самостійно. Наукові положення, висновки та рекомендації характеризуються новизною, теоретичним і практичним значенням, а також достатньо обґрунтовані. Зміст дисертації повністю розкриває тему, за якою виконувалася робота, відповідає меті й поставленим завданням. За змістом і оформленням дисертація відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 року «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», 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 січня 2022 року, а Нікітін Дмитро Олександрович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування» та спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Рецензент,  
доцент кафедри комп'ютерних  
інтелектуальних технологій та систем  
Харківського національного університету  
радіоелектроніки  
кандидат технічних наук, доцент,



Олег ІЛЮШІН

Підпис засвідчую  
Учений секретар



Ірина ЖАРІКОВА