

## **ВИСНОВОК**

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення  
результатів дисертації «Моделі і методи керування технологічним  
процесом виготовлення друкованих плат за технологією фотополімерного  
3D-друку»**

**здобувача ступеня доктора філософії**

**Нікітіна Дмитра Олександровича**

**за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування**

Науковий семінар проведений на засіданні кафедри КІТАР 01.04.2024 р.,  
протокол № 32.

### **1. Актуальність теми дисертації**

Бурхливий розвиток сучасних технологій, дозволив здійснити четверту промислову революцію (Industry 4.0) [1-3]. В основу Industry 4.0 покладені передові дослідження в галузях: штучного інтелекту, робототехніки, хмарних обчислень, адитивних технологій, тощо. Синтез застосування яких дозволив удосконалити виробничі технологічні процеси, шляхом розробки нового підходу у вигляді кіберфізичних виробничих систем (CPPS) [4-5]. Особливістю застосування CPPS є синтез фізичного та кібернетичного світу в єдиному інформаційному еко-просторі, який дозволяє створювати дуже гнучкі переналаштування виробничої лінії [6]. Однією з перспективних сфер застосування CPPS вважається їх впровадження у виробництво високотехнологічних виробів радіоелектронного призначення. Багато великих корпорацій, таких як Lenovo, Samsung, замовляють виробництво друкованих плат (ДП) у фірм контрактної радіоелектроніки, таких як Jabil Circuit Ukraine LLC, через економічність виробництва, що дозволяє не створювати нові заводи та виробничі лінії, а використовувати існуючі потужності [7]. Вартість виробництва ДП розраховується з безлічі факторів: використання і амортизація верстатів і установок, необхідна кількість витратних матеріалів та ресурсів, клас точності друкованої плати, трудомісткість виробництва та багато іншого [8-10].

Різноманіття радіоелектронної техніки та всезростаючий масовий попит на неї висувають нові технічні вимоги до кіберфізичних виробничих систем, такі як: мініатюризація апаратури, багатомодульність пристроїв. Виробникам стає важко вирішувати складні завдання, такі як задоволення вимог ринку та дотримання існуючих стандартів виробництва. При аналізі сучасних технологічних тенденцій в галузі приладобудування, акцентується увага на мініатюризацію пристроїв та інтеграцію багатьох модулів в одному пристрої. Це призводить до потреби мініатюризації як самих виробів, так і їх окремих компонентів, вузлів і друкованих плат, включаючи зменшення розмірів радіоелектронних елементів та габаритів друкованих плат.

При цьому слід зазначити, що мініатюризація пристроїв призводить до ускладнення та здорожчання технологічного процесу виготовлення базових елементів пристрою, а саме друкованої плати. Це пов'язано з тим, що для більшої роздільної здатності ДП (ширини струмопровідних доріжок та щільності провідників) необхідно використовувати більш дороге обладнання та витратні матеріали. Данні виклик нажаль торкнулася не тільки складних багатошарових або гнучких ДП, а і простих односторонніх та двосторонніх ДП. Дана залежність виникла через те, що виробникам обладнання та витратних матеріалів необхідно модернізувати свій модельний ряд і збільшувати апаратні витрати (більш дорогі комплектуючі з більш високими характеристиками), що відображається на вартості виготовлення навіть нескладної ДП. Класичним підходом для вирішення поставлених задач виготовлення ДП є удосконалення обладнання для технології фотолітографії.

Технологія фотолітографії для виробництва 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 цією технологією і досі є ресурсомістким процесом, який включає витрати на створення трафаретів. Використання цих трафаретів ускладнює швидке переналадування виробництва на створення нових продуктів.

Зважаючи на сучасні концепції 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 топології друкованих плат за допомогою сучасних підходів виробництва. У дисертаційній роботі пропонується використання адитивних технологій фотополімерного 3D-друку DLP (Digital Light Processing) та LCD (Direct UV Printing) при виготовленні нескладних одношарових (ОДП) та двошарових друкованих плат (ДДП) 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 обох з них 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.

Отже, актуальними є розробка та розвиток методу створення топології ОДП та ДДП за допомогою адитивних технологій 3D-друку для зменшення витрат при виробництві ДП та з урахуванням впливу технологічних параметрів експонування на геометричні розміри топології.

## **2. Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямами університету та кафедри**

Робота виконана в період з 2020 по 2024 рр. на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР) Харківського національного університету радіоелектроніки в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи (НДР) (ДР №0121U109909) «Інтелектуальна багатоцільова робототехнічна платформа з удосконаленими маніпуляційними можливостями» та НДР за замовленням підприємств та установ: №20-07 «Виготовлення координатної платформи з ЧПК та можливістю друку за технологією FFF»; №21-06 «Модифікація установки SLA-500 для 3D-друку за технологією DLP»; №21-12 «Заміна системи прямої (direct) подачі пластика на віддалену»; №23-02 «Налаштування 3D-принтеру, що працює за технологією FDM/FFF, та навчання оператора використанню 3D принтеру», в яких автор брав участь як виконавець.

**3. Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення точності виготовлення одношарових та двошарових друкованих плат та зменшення витрат при виробництві, за рахунок використання моделей та методів керування технологічним процесом на базі фотополімерного 3D-друку.

## **4. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів.**

Здобувачем було запропоновано технологічний процес створення фотополімерних масок топології з урахуванням температурних режимів фотополімерної смоли. Запропоновано метод експонування односторонніх та двосторонніх друкованих плат за допомогою адитивних технологій 3D-друку, з використанням фотополімерних масок, який на відміну існуючих методів нанесення фоторезиста, дозволяє зменшити витрати на витратні матеріали та трудоемкість виробництва ДП.

Також здобувачем розроблено математичну модель впливу параметрів SLA та DLP експонування на геометричні розміри топології ДП при виготовленні фотополімерних масок. Здобувачем удосконалено метод адаптивної бінарізації для обробки зображень за рахунок використання розміру скануючої матриці при обробці зображення по значенням порогу Otsu.

## **5. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій**

Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій у роботі забезпечена ефективними методами перевірки отриманих емпіричних значень, які використовувалися в дослідженнях. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів гарантується за допомогою наступних факторів.

1. Використання відомих та апробованих підходів. У роботі використані відомі та перевірені методи обробки цифрових зображень, а саме розроблено

метод порівня початкового зображення топології друкованої плати з зображенням отриманої провідникової структури після фотополімерного експонування. Це підвищить надійність та стабільність отриманих вимірювань відхилень геометричних розмірів провідників, а також гарантує їхню адекватність відомим науковим стандартам.

2. Узгодженість результатів. Отримані результати у вигляді розроблених моделей і технології задовольняють сучасним вимогам до засобів виготовлення друкованих плат, фотополімерним технологіям адитивного 3D-друку та обробки зображень зі стоїчністю прогнозування відхилень геометричних розмірів топології друкованих плат. Використання зазначених результатів дає можливість швидко та з меншими витратами виготовляти односторонні та двосторонні друковані плати.

3. Апробація результатів, Отримані наукові результати представлені у 18 працях автора за темою дисертації та обговорені на міжнародних наукових конференціях. Це свідчить про важливість та визнання отриманих висновків у науковому середовищі, а також підтверджує їхню актуальність та інтерес до них з боку наукової спільноти.

## **6. Ступінь новизни основних результатів дисертації порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру**

Здобувачем були отримано наступні нові наукові результати:

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 SLA- та DLP-експонування на геометричні розміри топології друкованих плат під час експонування фотополімерних масок, яка дає можливість зменшити відхилення геометричних розмірів на 15%.

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

## **7. Практична цінність результатів дослідження та їх впровадження**

Отримані в роботі математичні моделі та методи прогнозування відхилень геометричних розмірів топології та розроблене програмне забезпечення для візуального контролю та порівня 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», «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).

**8. Перелік наукових праць, які відображають основні результати дисертації.** Матеріали дисертації досить повно викладено у 18 наукових працях автора за темою дисертації, у тому числі: 2 статті у фахових виданнях, 2 статті у закордонних виданнях (Польща, Фінляндія), 6 статей у наукових фахових виданнях України (категорія «Б»), 7 тез доповідей, 1 розділ монографії. Праці індексуються у базах Index Copernicus, Google Scholar, Research Bible; Index Copernicus (World of Papers), CrossRef, OUCI, ResearchGate, OpenAIRE.

Основні результати роботи наведені в наступних працях:

1. Нікітін Д.О., Невлюдов І. Ш., Разумов-Фризюк Є. А. (2020). Аналіз технології лазерного експонування друкованих плат. *Технологія приладобудування*. № 1. С. 56–59 (Наукове фахове видання);

2. Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш., Близнюк Д.С. та ін. (2020). Виготовлення друкованих плат за допомогою технологій 3D друку. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. № 4 (482). С. 79–86. (Наукове фахове видання, категорія Б);

3. Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш., Разумов-Фризюк Е.А. та інш. (2021). Створення топології друкованих плат за допомогою фотополімерних адитивних

технологій 3D друку. *Проблеми тертя та зношування*. № 1(90). С. 42–54. (Наукове фахове видання, категорія Б);

4. Nevlyudov I., Razumov-Fryziuk I., Nikitin D., et al. (2021). Technology for creating the topology of printed circuit boards using polymer 3D masks. *Сучасний стан наукових досліджень і технології в промисловості*. № 1 (15). С. 120–131. (Наукове фахове видання, категорія Б);

5. Nevliudov I., Gurin D., Nikitin D., Razumov-Frizeyuk E., et al. (2021). Technology of laser exposure of topology of printed boards. *International independent scientific journal*. VOL. 1, №27. pp. 27–32 (закордонне видання ЕС);

6. Nevliudov I., Bliznyuk D., Nikitin D., et al. (2022). Cost Estimation of Photopolymer Resin for 3D Exposure of Circuit Board. *Technology Audit and Production Reserves*. № 2/2(64). pp. 43–49. (Наукове фахове видання, категорія Б);

7. Разумов-Фризюк Є.А., Гурін Д.В., Нікітін Д.О., та ін. (2022). Моделювання шнекового екструдера для FFF 3D друку. *Radiotekhnika*, 2(209), С. 206–214. (Наукове фахове видання, категорія Б);

8. Nevlyudov I., Razumov-Frizeyuk E., Nikitin D., et al. (2023). Practical results of the study of photopolymer exposure of printed circuit board topology. *Information systems in project and program management: Collective monograph edited by I. Linde. European University Press. Riga: ISMA*. P. 262–280. ISBN 978-9984-891-22-4. (розділ монографії);

9 I. Nikitin D., Nevliudov I., Badanyuk I. (2023). Topological image processing for comprehensive defect and deviation analysis using adaptive binarization. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. № 1 (23). С. 164–173. (Наукове фахове видання, категорія Б);

10. Нікітін Д.О., Балабанов І.В. (2024). Дослідження впливу температури фотополімерної смоли на збереження геометричних розмірів моделі під час 3D-друку. *Science of XXI century: development, main theories and achievements: collection of scientific papers «SCIENTIA» with Proceedings of the V International Scientific and Theoretical Conference (January 26, 2024. Helsinki, Republic of Finland)*. p. 197–203. ISBN 979-8-88955-774-6 (стаття в закордонному виданні);

11. Nikitin, D. (2024). Розробка моделі керуванням температурою фотополімерної смоли на базі LCD-технології 3D-друку. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 1(75), 31-37. (Наукове фахове видання, категорія Б).

## **9. Апробація основних результатів дослідження**

– Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш., Баданюк І.С. (2022). Методи фільтрації зображення топології друкованих плат. *За матеріалами III Міжнародної науково-практичної конференції «An Integrated Approach to Science Modernization: Methods, Models and Multidisciplinary» (Вінниця, UKR – Вена)*. С. 351–355

– Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш., Разумов-Фризюк Е.А. (2021). Regression analysis of the influence of technological parameters of 3D printing on product quality. *V Міжнародна наукова конференція з нових тенденцій у науці та освіті*

«Theoretical and scientific bases of development of scientific thought», (Рим, Італія 16–19 лютого 2021). С. 606–611;

– Нікітін Д.О., Стрілець Р.Є., Близнюк Д.С. (2020). Порівняльний аналіз технологій 3D прототипування SLA, DLP та LCD. Розробка автоматизованої станції для 3D друку. *VII Міжнародна науково-технічна Internet-конференція «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами»* (Київ, 26 листопада 2020). С. 55–56.;

– Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш. (2021). Використання 3D-експонування полімерних фотомасок. *XXI Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів «Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій»*. (Одеса, 22-23 квітня 2021 р.). С. 137–138;

– Гурін Д.В., Нікітін Д.О. (2022). Моделювання математичної моделі отримання наноструктурованих діелектричних плівок. *VII Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка»* (Кременчук, 14-16 травня 2022 р.). С. 47–48. ISSN 2222-4386;

– Невлюдов І.Ш., Нікітін Д.О., Стрілець Р.Є. (2022). Вплив фотополімерних смол для виготовлення друкованих плат. *VII Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка»* (Кременчук, 14-16 травня 2022 р.). С. 94–95. ISSN 2222-4386;

– Нікітін Д.О., Коротун Є.В. (2024). Дослідження параметрів фотополімерної смоли для адитивного 3D-друку. *II Міжнародна наукова конференція «Період трансформаційних процесів в світовій науці: задачі та виклики»* (Кривий Ріг, 10 січня, 2024р.). С. 292–294. ISBN 978-617-8126-97-1.

#### **10. Оцінка структури дисертації, її мови та стилю викладення**

Дисертація має наступну структуру: вступ, чотири розділи, висновки, список використаних джерел, додатки.

В першому розділі було розглянуто методи фотолітографії які використовуються для виготовлення ДП. За результатами аналізу були знайдені певні недоліки в класичних етапах виготовлення плат за допомогою фотолітографії. В ході розгляду даних проблем було запропоновано удосконалення класичного методу фотолітографії на етапах нанесення та експонування топологічного зображення провідників за допомогою фотополімерного 3D-друку. Методи фотополімерного порипування такі як, SLA, DLP та LCD, дозволяють спростити ці етапи виготовлення, за допомогою поєднання цих етапів в один та виготовлення фотополімерної захисної маски.

В другому розділі було розглянуто етапи підготовки реального зображення для обробки СТЗ. Дане завдання складається з наступних етапів: фільтрація; згладжування зображення; виділення реперних точок; нормалізація (масштабування та поворот) та порівняння отриманого зображення з еталонним. Були розглянуті методи лінійної фільтрації та згладжування

зображення. Розглянуто просту та адаптивну бінарizaцію з використанням методу порогового значення Otsu, вдосконалено спосіб використання (Block size) для адаптивної бінарizaції зображення.

Також здобувачем надається велика увага до методів вирівнювання зображення на базі AKAZE, BRISK, ORB. Розглянуті методи порівняння зображень на основі суми абсолютних різниць SAD;

Наведена інформація щодо розробки програмного забезпечення для контролю відхилень фотополімерної маски та порівнянню отриманні топології з еталонним зображень при експонуванні топології ДП.

У третьому розділі розглядаються та вирішуються завдання фізичного опису процесу нагріву фотополімерної смоли в процесі експонування моделі. Розглянуті особливості фотополімерного експонування за LCD технологією, а саме процес передачі теплового потоку від УФ-випромінювання діодної матриці до фотополімерної смоли та пояснюється виникнення теплового коефіцієнту об'ємного розширення фотополімерної смоли під час друку моделі.

Була розроблена схема керування тепловим потоком при фотополімерному експонуванні на основі задачі теплообміну між трьома стінками з різними коефіцієнтами теплопровідності. Описані формули та побудована електрична схема нагріву за яким відбуваються процес нагріву фотополімерної смоли. Наведена побудова моделі впливу температури за результатами симуляції в програмному середовищі Matlab Simulink.

Проведені дослідження впливу температури фотополімерної на геометричні відхилення розмірів ДП та дослідження впливу температурного коефіцієнта об'ємного розширення (ТКОР) на відхилення геометричних розмірів провідникової структури друкованої плати. Дослідження в даному розділі відбувалися в два етапи:

- дослідження впливу часу експонування та інтенсивності випромінювання УФ на нагрів фотополімерної смоли (оцінка впливу часу експонування на температуру фотополімеру та аналіз впливу інтенсивності випромінювання УФ на температурні параметри фотополімерної смоли);

- дослідження впливу температури фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів (вивчення залежності відхилень геометричних розмірів від температури фотополімеру).

Також в даному розділі описаний метод переводу 2D-зображення топології в 3D-модель формату (\*.stl) з подальшою конвертацією файлу G-code та відправкою моделі на друк.

У четвертому розділі, в рамках проведення експериментів, були отримані дані, що дозволили розробити регресійно-кореляційну модель, знайдені коефіцієнти кореляції параметрів експонування, які впливають на відхилення геометричних розмірів провідникової структури друкованих плат. Проведені розрахунки витрат фотополімерної смоли при створенні топології ДП.

Дисертація є завершеною науковою працею, має чітку логічну структуру, написана сучасною українською мовою, її оформлення відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення



разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 №44) та «Вимогам до оформлення дисертації» (затверджено наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 №40).

У ході обговорення дисертації до неї не було висунуто жодних зауважень щодо самої суті роботи.

З урахуванням зазначеного, на науковому семінарі кафедри КІТАР **ухвалили:**

1. Дисертація Нікітіна Дмитра Олександровича «Моделі і методи керування технологічним процесом виготовлення друкованих плат за технологією фотополімерного 3D-друку» є завершеною науковою працею, у якій розв'язано конкретне наукове завдання контролю відхилень геометричних розмірів топології друкованих плат при виробництві, що має важливе значення для галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування.

2. У 18 наукових публікаціях повністю відображені основні результати дисертації, з них 2 стаття у наукових фахових виданнях України; 6 статей, які входять до міжнародних наукометричних баз.

3. Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017р. «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.

4. З урахуванням наукової зрілості та професійних якостей Нікітіна Д.О. дисертація «Моделі і методи керування технологічним процесом виготовлення друкованих плат за технологією фотополімерного 3D-друку» рекомендується для подання до розгляду та захисту у разовій спеціалізованій вченій раді.

Рішення прийнято одногосно.

**Головуючий на науковому семінарі кафедри КІТАР**

**доктор технічних наук,  
професор**



*Олександр ЦИМБАЛ*

**Експерти:**

**доктор технічних наук,  
професор**



*Ігор ГРЕБЕННИК*

**доктор технічних наук,  
професор**



*Віктор ЛЕВИКІН*