

Харківський національний університет радіоелектроніки
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

НІКІТІН ДМИТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.3.095.2


ДИСЕРТАЦІЯ

**МОДЕЛІ І МЕТОДИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ
ВИГОТОВЛЕННЯ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ
ФОТОПОЛІМЕРНОГО 3D-ДРУКУ**

151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Д. О. Нікітін

Науковий керівник:

Невлюдов Ігор Шакирович, доктор технічних наук, професор, лауреата
Державної премії в галузі науки і техніки України

Харків – 2024

АНОТАЦІЯ

Нікітін Д.О. Моделі і методи керування технологічним процесом виготовлення друкованих плат за технологією фотополімерного 3D-друку – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» – Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, 2024.

Дисертаційну роботу присвячено актуальній науково-практичній задачі, а саме розвитку кіберфізичних виробничих систем для виготовлення одно- та двосторонніх друкованих плат за допомогою автоматизованого технологічного процесу на базі адитивних технологій 3D-друку, яка дозволяє вирішити задачі: мінімізації витратних матеріалів; мінімізації операцій в структурі технологічного процесу; підвищення точності виготовлення топології друкованих плат.

Дисертаційна робота є продовженням досліджень, які проводяться на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки (КІТАР) Харківського національного університету радіоелектроніки під керівництвом завідувача кафедри КІТАР, доктора технічних наук, професора, заслуженого діяча науки і техніки України, лауреата Державної премії в галузі науки і техніки України, Невлюдова Ігоря Шакировича.

Мета дисертаційної роботи – підвищення точності виготовлення односторонні та двосторонні друкованих плат та зменшення витрат при виробництві, за рахунок використання моделей та методів керування технологічним процесом на базі фотополімерного 3D-друку.

Об'єкт дослідження – технологічний процес експонування топологічних зображень друкованих плат, отриманих за допомогою

фотополімерного друку.

Предмет дослідження – методи та моделі керування технологічним процесом експонування та нанесення топології друкованих плат за допомогою технологій фотополімерного виробництва на базі SLA, DLP та LCD.

Методи дослідження. В роботі застосовуються методи: факторного аналізу – для визначення впливу параметрів експонування топології друкованих плат на збереження геометричних розмірів провідників та контактних майданчиків; методи фільтрації зображень – для підготовки необхідного топологічного рисунку друкованих плат при використанні SLA, DLP та LCD експонування та порівняння заданої топології та отриманої за допомогою системи технічного зору та для розробки графічного інтерфейсу користувача для знаходження відхилень геометричних розмірів отриманої фотополімерної маски від початкового зображення топології; методи статистичного аналізу – для знаходження кореляції параметрів експонування топології на відхилення геометричних розмірів топології та отриманої регресійної моделі. Використані методи автоматизованого контролю температури фотополімерної смоли при LCD експонуванні.

Наукова новизна дисертаційної 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 0,03 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.

Проведений системний аналіз існуючих видів друкованих плат, методів виготовлення, матеріалів, які використовуються при виготовленні, та вимог до них, а також розглянуті особливості адитивних технологій фотополімерного друку, що дозволили зробити такі висновки:

- використання фотополімерних захисних масок замість сухого плівкового або аерозольного фоторезиста дозволяє зменшити витрати матеріалу та зменшити час виробництва друкованих плат;

- розвиток адитивних 3D-технологій дозволяє швидко переналаштовувати виробництво та заощаджувати витратні матеріали та робочі площі підприємства;

- використання методу фотополімерних масок дозволяє виконувати операції нанесення фоточутливого шару та експонування одночасно та на одній установці, що дає перевагу даному методу в порівнянні з класичним методом фотолітографії для виготовлення односторонніх та двосторонніх друкованих плат.

Виконано огляд видів друкованих плат, аналіз методів нанесення фоторезиста в фотолітографії, засобів експонування топології та витратних матеріалів для виготовлення односторонніх і двосторонніх друкованих плат. Проаналізовані методи фотополімерного 3D-друку за технологіями SLA, DLP та LCD, а також різновиди фотополімерних смол та їх вартість. На базі якої була побудована автоматизована модель керування для виготовлення топології друкованих плат за допомогою фотополімерного друку. Виходячи з

особливостей фотополімерного друку та моделі управління технологічним процесом були розглянуті методи фільтрації зображення отриманої топології для системи технічного зору. Також було проаналізовано вплив параметрів експонування на збереження геометричних розмірів топології друкованих плат та побудована регресійно-кореляційна модель впливу параметрів.

Досліджено вплив температури фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів топології ДП. Розроблено систему контролю нагрівання фотополімерної смоли під час експонування зображення топології. Розрахований економічний ефект при використанні фотополімерних адитивних технологій 3D-друку для виготовлення одно- та двосторонніх друкованих плат.

Сформульовано мету роботи та постановку задач дослідження.

Досліджено задачу автоматизованого виготовлення фотополімерного захисного шару топології друкованих плат з контролем геометричних відхилень провідників друкованих плат за допомогою системи технічного зору. Побудовано математичну модель впливу параметрів експонування фотополімерної маски на початково задані геометричні розміри топології, а також розглянуті методи обробки зображення для системи технічного зору для даного методу виготовлення друкованих плат. Запропоновано метод обробки початкової топології друкованих плат з урахуванням особливостей адитивного фотополімерного 3D-друку, за допомогою якого можливо створювати захисні фотополімерні маски з урахуванням відхилень геометричних розмірів провідників та контактних майданчиків після експонування та травлення друкованих плат. Результати чисельних експериментів показали ефективність запропонованого підходу для зменшення вартості виготовлення односторонніх та двосторонніх друкованих плат.

Проаналізовано задачу обробки зображення топологічного рисунку друкованих плат з урахуванням особливостей впливу параметрів фотополімерного експонування. Для аналітичного опису впливу параметрів

експонування була побудована регресійно-кореляційна модель впливу факторів на геометричні розміри топології після травлення друкованих плат.

Побудовано загальну модель керування автоматизованим технологічним процесом фотополімерного експонування друкованих плат. Залежно від геометричних відхилень розмірів провідників та контактних площадок, які аналізує система технічного зору, система керування вносить зміни до параметрів експонування у вигляді G-коду, в залежності від їх ступеню впливу на геометричні розміри топології та вносить зміни до вихідного файлу зображення топології у векторному форматі (*.svg).

Пропонується система порівняння заданої топології та отриманої за допомогою методів фільтрації: лінійних фільтрів, згладжувальних фільтрів, адаптивної бінаризації Otsu. Вдосконалено спосіб використання Block size для адаптивної бінаризації зображення, методами вирівнювання зображень та абсолютних різниць: AKAZE, BRISK, ORB, SAD. Зокрема, у випадку деталізації фотополімерної маски задача зводиться до контрастного збільшуючого фільтру.

Була удосконалена класична схема фотолітографії з використанням фотополімерного експонування, в якій можливо проводити операції нанесення захисного шару та експонування одночасно. Розроблено програмне забезпечення для контролю отриманих фотополімерних масок. Була вирішена задача контролю температури нагрівання фотополімерної смоли в процесі експонування зображення. Розглянуто вплив температури на температурний коефіцієнт об'ємного розширення фотополімерної смоли та на відхилення геометричних розмірів моделі під час експонування. Також були розраховані та порівняні витрати фотополімерної смоли з сухим плівковим фоторезистом та аерозольний фоторезист. При розрахунках використання фотополімерної смоли як захисного шару більш економічно вигідне, оскільки значно знижує обсяг коштів на витратні матеріали.

Практичне значення результатів роботи. Отримані в роботі математичні моделі та методи прогнозування відхилень геометричних

розмірів топології 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 роботизованих 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).

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

Ключові слова: фотолітографія, виробництво, друковані плати, адитивні технології, фотополімерний 3D-друк, виготовлення фотополімерних масок, експонування, травління, кіберфізичні системи, візуальний контроль, машинне навчання, комп'ютерний зір, ідентифікація, обробка зображень, фільтрація, ідентифікація відхилень, апаратні витрати, підтримка прийняття рішень, поверхневі дефекти, факторний аналіз, тепловіддача, детектори відстеження, система управління температурою, світловипромінювальні моделювання MatLab, вимірювання, регресійний аналіз.

Список публікацій здобувача

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

2. Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш., Близнюк Д. С., Гурін Д. В., Разумов-Фризюк Є.А., Стрілець Р.Є. Виготовлення друкованих плат за допомогою технологій 3D друку // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. № 4 (482), 2020. с. 79–86. [https://doi.org/10.15589/znp2020.4\(482\).9](https://doi.org/10.15589/znp2020.4(482).9). (фахове видання, категорія Б)

3. Нікітін Д. О., Невлюдов І. Ш., Близнюк Д. С., Разумов-Фризюк Є. А., Стрілець Р. Е. Створення топології друкованих плат за допомогою фотополімерних адитивних технологій 3D друку // Науково-технічний журнал «Проблеми тертя та зношування», № 1(90), (2021) с. 42-54. (фахове видання)

4. Nevlyudov I., Razumov-Fryziuk I., Nikitin D., Blyzniuk D., Strelets R.

Technology for creating the topology of printed circuit boards using polymer 3D masks. № 1 (15) (2021): Сучасний стан наукових досліджень і технології в промисловості. с. 120-131: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.120>. (фахове видання, категорія Б)

5. Nevliudov I., Bliznyuk D., Gurin D., Nikitin D., Razumov-Frizyuk E., Strelets R. Technology of laser exposure of topology of printed boards. International independent scientific journal. №27, VOL. 1, 2021. С. 27–32. (закордоне видання)

6. Nevliudov I., Bliznyuk D., Nikitin D., Razumov-Frizyuk E., Strelets R. Cost Estimation of Photopolymer Resin for 3D Exposure of Circuit Board // Technology Audit and Production Reserves № 2/2(64), 2022. Р.43-49. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.256538>. (фахове видання, категорія Б)

7. Разумов-Фризьюк Є. А., Гурін Д. В., Нікітін Д. О., Близнюк Д. С., Стрілець Р. Є. Моделювання шнекового екструдера для FFF 3D друку // Radiotekhnika, 2(209), 206–214. <https://doi.org/10.30837/rt.2022.2.209.21>. (фахове видання, категорія Б)

8. I. Badanyuk, I. Nevliudov, D. Nikitin. Topological image processing for comprehensive defect and deviation analysis using adaptive binarization // № 1 (23) (2023): Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 164 – 173 с. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.164>. (фахове видання, категорія Б)

9. Zharikova, I., Nevliudov, I., Novoselov, S., Nikitin, D., & Allakhveranov R., Simulation of flexible printed structures design for mobile robot platform // Vol. 2 No. 2 (2023): NasTech: Journal of Natural Sciences and Technologies, 2(2). pp.242-247: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10362385>. (фах. видання закордон)

10. Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш., Баданюк І. С. Методи фільтрації зображення топології друкованих плат // Вінниця, UKR – Вена, АУТ Випуск № 12-13 «ГРААЛЬ НАУКИ» за матеріалами III Міжнародної науково-практичної конференції "An Integrated Approach to Science Modernization: Methods, Models and Multidisciplinary". С. 351 – 355.

<https://doi.org/10.36074/grail-of-science.29.04.2022.058>. (тези доповіді)

11. Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш., Разумов-Фризюк Є.А. 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», 16 – 19 лютий 2021 г., Рим, Італія. с. 606 – 611. (тези доповіді, закордоне відання)

12. Нікітін Д.О., Стрілець Р.Є., Близнюк Д.С. Порівняльний аналіз технологій 3D прототипування SLA, DLP та LCD. Розробка автоматизованої станції для 3D друку // Матеріали VII Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 26 листопада 2020. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2020. С. 55 – 56. (тези доповіді)

13. Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш. Використання 3D-експонування полімерних фотомасок // Одеська національна академія харчових технологій Університет Інформатики і прикладних знань, м. Лодзь, Польща Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» Навчально-науковий інститут комп'ютерних систем і технологій «Індустрія 4.0» ім. П.М. Платонова XXI Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів «Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій». 137 – 138 с. (тези доповіді)

14. Гурін Д.В., Нікітін Д.О. Моделювання математичної моделі отримання наноструктурованих діелектричних плівок // VII Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка»: Тези доповідей. – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2022. С. 47-48. ISSN 2222-4386. (тези доповіді)

15. Невлюдов І.Ш., Нікітін Д.О., Стрілець Р.Є. Вплив фотополімерних смол для виготовлення друкованих плат // VII Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні

технології та фотовольтаїка»: Тези доповідей. – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2022. С. 94-95. ISSN 2222-4386. (тези доповіді)

16. Nevlyudov I., Razumov-Frizyuk E., Nikitin D., Badaniuk I., Strelets R. // Practical results of the study of photopolymer exposure of printed circuit board topology. ISBN 978-9984-891-22-4 UDC 658.012.32 Information systems in project and program management, [Text]: Collective monograph edited by I. Linde. European University Press. Riga: ISMA, 2023. 317 p. Recommended for publication by the Kharkiv National University of Radio Electronics (protocol No. 10 of October 06, 2023). (розділ монографії)

17. Нікітін Д.О., Редькін К.С. Аналіз технології Polyjet для адитивного виробництва // The 9th International scientific and practical conference “Science and innovation of modern world” (May 18-20, 2023) Cognum Publishing House, London, United Kingdom. 2023. p. 231 – 237. ISBN 978-92-9472-194-5. (закордонне видання)

18. Невлюдов І.Ш. Нікітін Д.О. Мижирицький В.В. The influence of technological parameters of milling on the geometric dimensions of printed circuit boards // SWorld &D.A. Tsenov Academy of Economics – Svishtov, Bulgaria Issue No10 Part 1 November 2021, p. 15 – 20: ISSN 2663-5712. <https://doi.org/10.30888/2663-5712>. (стаття в закордонному виданні)

19. Нікітін Д.О., Балабанов І.В. 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: International Center of Scientific Research. p. 197 – 203. ISBN 979-8-88955-774-6. <https://doi.org/10.36074/scientia-26.01.2024>. (стаття в закордонному виданні)

20. Нікітін Д.О., Коротун Є.В. Дослідження параметрів фотополімерної смоли для адитивного 3D-друку // Період трансформаційних процесів в

світовій науці: задачі та виклики: матеріали II Міжнародної наукової конференції, м. Кривий Ріг, 10 січня, 2024р. / Міжнародний центр наукових досліджень. Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп, 2024. 292 – 294 с. ISBN 978-617-8126-97-1. <https://doi.org/10.30888/2663-571210.36074/mcnd-19.01.2024>. (тези доповіді)

21. Нікітін Д.О. Розробка моделі керуванням температурою фотополімерної смоли на базі LCD-технології 3D-друку // Системи управління, навігації та зв'язку, Національний університет “Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка” – Полтава 2024: Збірник наукових праць, випуск 1 (75). С. 31 – 37. ISSN 2073-7394. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.031>. (фахове видання, категорія Б)

ABSTRACT

Nikitin D.O. Models and methods of controlling the technological process of manufacturing printed circuit boards using photopolymer 3D printing technology - Qualification scientific work on the rights of a manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in speciality 151 "Automation and computer-integrated technologies" – Kharkiv National University of Radio Electronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, 2024.

The dissertation is devoted to an urgent scientific and practical problem, that is development of cyber-physical production systems for the manufacture of single- and double-sided printed circuit boards using an automated technological process based on additive 3D printing technologies, which allows solving the following tasks: minimisation of consumables; minimisation of operations in the structure of the technological process; printed circuit boards topology manufacturing accuracy increasing.

The thesis is a continuation of the research conducted at the Department of Computer-Integrated Technologies, Automation and Robotics (CITAR) of the Kharkiv National University of Radio Electronics under the supervision of the Head of the CITAR Department, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honoured Worker of Science and Technology of Ukraine, Laureate of the State Prize in Science and Technology of Ukraine; Laureate of the State Prize of Ukraine in Education; Member of the Academic Council, Nevliudov Ihor Shakyrovych.

The purpose of the thesis the purpose of the thesis is to improve the accuracy of single-sided and double-sided printed circuit boards manufacturing and to reduce production costs by using models and methods of process control based on photopolymer 3D printing.

The object of research is the technological process of exposing topological images of printed circuit boards obtained by photopolymer printing.

Subject of research – methods and models for controlling the technological

process of exposing and applying the topology of printed circuit boards using photopolymer production technologies based on SLA, DLP and LCD.

Research methods. The following methods are used in the work: factor analysis – to determine the influence of the parameters of PCB topology exposure on the preservation of the geometric dimensions of conductors and contact pads; image filtering methods - to prepare the required topological drawing of printed circuit boards using SLA, DLP and LCD exposure and to compare the specified topology with the one obtained using a vision system and to develop a graphical user interface for finding deviations in the geometric dimensions of the resulting photopolymer masses methods of automated control of the temperature of photopolymer resin during LCD exposure were used.

The scientific novelty of the dissertation is as follows:

1. For the first time, a method of exposing single- and double-sided printed circuit boards using additive 3D printing technologies is developed with the use of photopolymer masks, which, unlike existing methods of applying photoresist, allows to reduce the cost of materials by 37% (compared to the use of film photoresist) and the labor intensity of PCB production.

2. The technological process of creating photopolymer masks of the topology has been improved, taking into account the influence of temperature conditions of the photopolymer resin, which makes it possible to increase the accuracy of manufacturing the topology of the PCB mask by an average of 0,03 mm (depending on the exposure modes).

3. For the first time, a mathematical model of the influence of SLA- and DLP-exposure parameters on the geometric dimensions of the PCB topology during the exposure of photopolymer masks has been developed, which makes it possible to reduce the deviation of geometric dimensions by 15%.

4. The method of adaptive binarisation of image processing was further developed by using the size of the scanning matrix when scanning an image according to the Otsu threshold, which reduces noise in binarised processing.

A systematic analysis of the existing types of printed circuit boards,

manufacturing methods, materials used in the manufacture and requirements for them, as well as the features of additive photopolymer printing technologies, was carried out, which allowed us to draw the following conclusions:

- the use of photopolymer protective masks instead of dry film or aerosol photoresist allows to reduce material consumption and reduce the time of PCB production;
- the development of additive 3D technologies allows to quickly reconfigure production and save consumables and workspace;
- the use of the photopolymer mask method allows performing photosensitive layer deposition and exposure operations simultaneously and on the same machine, which gives this method an advantage over the classical photolithography method for the production of single-sided and double-sided printed circuit boards.

There is provided an overview of the types of printed circuit boards, analyses the methods of applying photoresist in photolithography, means of exposing topology and consumables for the manufacture of single-sided and double-sided printed circuit boards. The methods of photopolymer 3D printing using SLA, DLP and LCD technologies, as well as the types of photopolymer resins and their cost were analysed. On the basis of which an automated control model was built for the production of printed circuit board topology using photopolymer printing. Based on the peculiarities of photopolymer printing and the process control model, the methods of filtering the image of the resulting topology for the technical vision system were considered. The influence of exposure parameters on the preservation of the geometric dimensions of the PCB topology was also analysed and a regression-correlation model of the parameters' influence was built.

The influence of the temperature of photopolymer resin on the deviation of the geometric dimensions of the DP topology is investigated. A system for controlling the heating of photopolymer resin during the exposure of the topology image was developed. The economic effect of using photopolymer additive 3D

printing technologies for the manufacture of single- and double-sided printed circuit boards is calculated.

The aim of the work and the statement of research tasks are formulated.

The problem of automated manufacturing of the photopolymer protective layer of the printed circuit board topology with control of geometric deviations of the PCB conductors using a vision system is investigated. A mathematical model of the influence of the exposure parameters of the photopolymer mask on the initially specified geometric dimensions of the topology is built, and image processing methods for a vision system for this method of manufacturing printed circuit boards are considered. A method for processing the initial topology of printed circuit boards, taking into account the features of additive photopolymer 3D printing, is proposed, which makes it possible to create protective photopolymer masks taking into account deviations in the geometric dimensions of conductors and contact pads after exposure and etching of printed circuit boards. The results of numerical experiments have shown the effectiveness of the proposed approach in reducing the cost of manufacturing single-sided and double-sided printed circuit boards.

The paper analyses the problem of printed circuit boards topological pattern image processing, taking into account the peculiarities of the photopolymer exposure parameters influence. A regression-correlation model of the influence of factors on the geometric dimensions of the topology after etching of printed circuit boards was built to describe the influence of exposure parameters analytically.

A system for comparing a given topology with the one obtained using filtering methods is proposed: linear filters, smoothing filters, adaptive Otsu binarisation. The method of using Block size for adaptive image binarisation, image alignment and absolute difference methods have been improved: AKAZE, BRISK, ORB, SAD. In particular, in the case of detailing a photopolymer mask. the task is reduced to a contrast enhancing filter.

A classical photolithography scheme using photopolymer exposure was improved, in which it is possible to perform protective layer application and

exposure operations simultaneously. Software was developed to control the resulting photopolymer masks. The problem of controlling the heating temperature of the photopolymer resin during image exposure was solved. The effect of temperature on the temperature coefficient of volume expansion of photopolymer resin and on the deviation of the geometric dimensions of the model during exposure was considered. The consumption of photopolymer resin with dry film photoresist and aerosol photoresist was also calculated and compared. In the calculations, the use of photopolymer resin as a protective layer is more cost-effective, as it significantly reduces the amount of money spent on consumables.

Practical significance of the results. The mathematical models and methods for predicting deviations in the geometric dimensions of the topology and the developed software for visual control and comparison of the topology were implemented in the educational process of the Department of Information Technology of Electronic Means of the National University «Zaporizhzhya Polytechnic» during lectures and laboratory classes in the discipline «Fundamentals of Production» and «Automated Process Control Systems» (bachelor's degree) and «Digital Signal and Image Processing» (master's degree). Also, these methods and results have been implemented in the educational process of the Department of Computer Engineering and Electronics of the Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University during lectures, in the methodological instructions for laboratory and practical classes in the courses «Technology of Electronic Devices», «Electronic Devices of Robotic Systems», «Electronic Devices of Cybernetic Systems» for the speciality 171 – Electronics (act of 15.03.2024). The proposed methods of manufacturing single-sided and double-sided printed circuit boards and algorithms for recognising geometric deviations in topology using a vision system were used to reduce the cost of manufacturing printed circuit boards, namely, reducing the price of consumables and additional equipment. The obtained results on modern computer technologies (mathematical models, methods, algorithms and programs) focused on solving problems of the impact of technological processes of PCB manufacturing are used

in the educational process of Kharkiv National University of Radio Electronics at the CITAR Department in the laboratory of additive technologies and 3D prototyping, in particular in teaching the discipline «Computer Numerically Controlled Systems» for applicants for the first (bachelor's) level of higher education (act of 07.02.2024). The developed software module «Niki» for automated image processing of printed circuit board topology was implemented at LLC «Research and Production Enterprise «LTU» (act of 11.03.2024).

The materials of the dissertation are sufficiently fully presented in 18 scientific works of the author on the topic of the dissertation, including: 2 articles in professional journals, 2 in foreign journals (Poland, Finland), 6 scientific professional journals of Ukraine (category "B"), 7 abstracts, 1 chapter of the monograph. Works are indexed in Index Copernicus, Google Scholar, Research Bible; Index Copernicus (World of Papers), CrossRef, OUCI, ResearchGate, OpenAIRE.

Keywords: photolithography, manufacturing, printed circuit boards, additive technologies, photopolymer 3D printing, photopolymer mask manufacturing, exposure, etching, cyber-physical systems, visual inspection, machine learning, computer vision, identification, image processing, filtration, deviation detection, hardware costs, decision support, surface defects, factor analysis, heat dissipation, tracking detectors, temperature control system, MatLab light emission modelling, measurements, regression analysis.

List of the applicant's publications

1. Нікітін Д. О., Невлюдов І. Ш., Разумов-Фризюк Є. А. Аналіз технології лазерного експонування друкованих плат // Технологія приладобудування. 2020, № 1. с. 56–59.

2. Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш., Близнюк Д. С., Гурін Д. В., Разумов-Фризюк Є.А., Стрілець Р.Є. Виготовлення друкованих плат за допомогою технологій 3D друку // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. № 4 (482), 2020. с. 79–86.

[https://doi.org/10.15589/znp2020.4\(482\).9](https://doi.org/10.15589/znp2020.4(482).9).

3. Нікітін Д. О., Невлюдов І. Ш., Близнюк Д. С., Разумов-Фризюк Є. А., Стрілець Р. Е. Створення топології друкованих плат за допомогою фотополімерних адитивних технологій 3D друку // Науково-технічний журнал «Проблеми тертя та зношування», № 1(90), (2021) с. 42-54.

4. Nevlyudov I., Razumov-Fryziuk I., Nikitin D., Blyzniuk D., Strelets R. Technology for creating the topology of printed circuit boards using polymer 3D masks. № 1 (15) (2021): Сучасний стан наукових досліджень і технології в промисловості. с. 120-131: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.120>.

5. Nevliudov I., Bliznyuk D., Gurin D., Nikitin D., Razumov-Frizyuk E., Strelets R. Technology of laser exposure of topology of printed boards. International independent scientific journal. №27, VOL. 1, 2021. С. 27–32.

6. Nevliudov I., Bliznyuk D., Nikitin D., Razumov-Frizyuk E., Strelets R. Cost Estimation of Photopolymer Resin for 3D Exposure of Circuit Board // Technology Audit and Production Reserves № 2/2(64), 2022. P.43-49. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.256538>.

7. Разумов-Фризюк Є. А., Гурін Д. В., Нікітін Д. О., Близнюк Д. С., Стрілець Р. Є. Моделювання шнекового екструдера для FFF 3D друку // Radiotekhnika, 2(209), 206–214. <https://doi.org/10.30837/rt.2022.2.209.21>.

8. I. Badanyuk, I. Nevliudov, D. Nikitin. Topological image processing for comprehensive defect and deviation analysis using adaptive binarization // № 1 (23) (2023): Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 164 – 173 с. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.164>.

9. Zharikova, I., Nevliudov, I., Novoselov, S., Nikitin, D., & Allakhveranov R., Simulation of flexible printed structures design for mobile robot platform // Vol. 2 No. 2 (2023): NasTech: Journal of Natural Sciences and Technologies, 2(2). pp.242-247: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10362385>.

10. Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш., Баданюк І. С. Методи фільтрації зображення топології друкованих плат // Вінниця, UKR – Вена, АУТ Випуск № 12-13 «ГРААЛЬ НАУКИ» за матеріалами III Міжнародної науково-

практичної конференції "An Integrated Approach to Science Modernization: Methods, Models and Multidisciplinary". С. 351 – 355.
<https://doi.org/10.36074/grail-of-science.29.04.2022.058>

11. Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш., Разумов-Фризюк Є.А. 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», 16 – 19 лютий 2021 г., Рим, Італія. с. 606 – 611.

12. Нікітін Д.О., Стрілець Р.Є., Близнюк Д.С. Порівняльний аналіз технологій 3D прототипування SLA, DLP та LCD. Розробка автоматизованої станції для 3D друку // Матеріали VII Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 26 листопада 2020. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2020. С. 55 – 56.

13. Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш. Використання 3D-експонування полімерних фотомасок // Одеська національна академія харчових технологій Університет Інформатики і прикладних знань, м. Лодзь, Польща Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» Навчально-науковий інститут комп'ютерних систем і технологій «Індустрія 4.0» ім. П.М. Платонова XXI Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів «Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій». 137 – 138 с.

14. Гурін Д.В., Нікітін Д.О. Моделювання математичної моделі отримання наноструктурованих діелектричних плівок // VII Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка»: Тези доповідей. – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2022. С. 47-48. ISSN 2222-4386.

15. Невлюдов І.Ш., Нікітін Д.О., Стрілець Р.Є. Вплив фотополімерних

смола для виготовлення друкованих плат // VII Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка»: Тези доповідей. – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2022. С. 94-95. ISSN 2222-4386.

16. Nevlyudov I., Razumov-Frizyuk E., Nikitin D., Badaniuk I., Strelets R. // Practical results of the study of photopolymer exposure of printed circuit board topology. ISBN 978-9984-891-22-4 UDC 658.012.32 Information systems in project and program management, [Text]: Collective monograph edited by I. Linde. European University Press. Riga: ISMA, 2023. 317 p. Recommended for publication by the Kharkiv National University of Radio Electronics (protocol No. 10 of October 06, 2023).

17. Нікітін Д.О., Редькін К.С. Аналіз технології Polyjet для адитивного виробництва // The 9th International scientific and practical conference “Science and innovation of modern world” (May 18-20, 2023) Cognum Publishing House, London, United Kingdom. 2023. p. 231 – 237. ISBN 978-92-9472-194-5.

18. Невлюдов І.Ш. Нікітін Д.О. Мижирицький В.В. The influence of technological parameters of milling on the geometric dimensions of printed circuit boards // SWorld &D.A. Tsenov Academy of Economics – Svishtov, Bulgaria Issue No10 Part 1 November 2021, p. 15 – 20: ISSN 2663-5712. <https://doi.org/10.30888/2663-5712>.

19. Нікітін Д.О., Балабанов І.В. 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: International Center of Scientific Research. p. 197 – 203. ISBN 979-8-88955-774-6. <https://doi.org/10.36074/scientia-26.01.2024>.

20. Нікітін Д.О., Коротун Є.В. Дослідження параметрів фотополімерної смоли для адитивного 3D-друку // Період трансформаційних процесів в

світовій науці: задачі та виклики: матеріали II Міжнародної наукової конференції, м. Кривий Ріг, 10 січня, 2024р. / Міжнародний центр наукових досліджень. Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп, 2024. 292 – 294 с. ISBN 978-617-8126-97-1. <https://doi.org/10.30888/2663-571210.36074/mcnd-19.01.2024>.

21. Нікітін Д.О. Розробка моделі керуванням температури фотополімерної смоли на базі LCD-технології 3D-друку // Системи управління, навігації та зв'язку, Національний університет “Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка” – Полтава 2024: Збірник наукових праць, випуск 1 (75). С. 31 – 37. ISSN 2073-7394. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.031>.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	26
ВСТУП.....	28
1 Сучасний стан автоматизації технологій виготовлення друкованих плат... 37	
1.1 Види друкованих плат	37
1.2 Аналіз сучасних технологій виготовлення ДП	39
1.3 Технологія фотолітографії	41
1.3.1 Нанесення фоторезисту в автоматизованому виробництві	43
1.3.2 Експонування та суміщення.....	48
1.3.3 Витратні матеріали та обладнання для нанесення та експонування фоторезиста.....	51
1.4 Технології адитивного фотополімерного 3D-друку.....	55
1.5 Використання адитивних технологій 3D-друку під час експонування топології ДП. Опис реалізації даної технології виготовлення	60
1.6 Аналіз моделі керування технологічним процесом виготовлення фотополімерних масок.....	61
1.7 Висновки до першого розділу.....	64
2 Розробка програмного забезпечення для контролю розмірів фотополімерних масок топології.....	66
2.1 Етапи підготовки реального зображення для розроблення ПЗ	66
2.2 Метод фільтрації зображень	68
2.2.1 Лінійна фільтрація	68
2.2.2 Згладжувальні фільтри	69
2.2.3 Бінаризація.....	72
2.2.4 Метод Otsu	75
2.2.5 Адаптивна бінаризація з визначенням «Block size».....	78
2.3 Методи вирівнювання зображення	84
2.3.1 Метод AKAZE	86

2.3.2	Метод BRISK.....	88
2.3.3	Метод ORB	95
2.4	Порівняння зображень за методом SAD.....	99
2.5	Висновки до другого розділу	102
3	Автоматизоване управління технологічним процесом нагрівання фотополімерної смоли під час експонування топології ДП	103
3.1	Постановка задачі.....	103
3.2	Фізичний опис технологічного процесу нагрівання фотополімерної смоли під час експонування моделі	105
3.3	Розробка математичної моделі впливу температури в пакеті Matlab Simulink	108
3.4	Дослідження впливу температури фотополімерної смоли на геометричні відхилення розмірів ДП.....	121
3.5	Висновки до третього розділу	126
4	Експериментальні дослідження.....	128
4.1	Факторний аналіз фотополімерних смол.....	128
4.2	Дослідження адгезії до поверхні заготовки та відхилення геометричних розмірів.....	134
4.3	Перевірка базових припущень множинної лінійної регресії.....	138
4.3.1	Змінні вимірювань у шкалах інтервалів та відносин та мінімальна кількість вимірювань	139
4.3.2	Відсутність похибок у вимірюваннях	139
4.3.3	Відсутність мультиколінеарності між незалежними змінними ..	141
4.3.4	Нормальний розподіл залишків.....	144
4.3.5	Гомоскедастичність дисперсії залишків.....	147
4.3.6	Лінійність зв'язку.....	150
4.4	Побудова моделі множинної регресії впливу параметрів експонування на геометричні розміри топології.....	152
4.5	Оцінка різниці відхилень геометричних розмірів провідників ДП за різних товщин провідників	156

4.6 Оцінка витрат фотополімерної смоли під час 3D-експонування друкованих плат	158
4.7 Висновки до четвертого розділу.....	162
ВИСНОВКИ.....	165
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	172
Додаток А. Підключення бібліотеки нормалізації зображення	182
Додаток Б. Підключення бібліотеки згладжування зображень.....	183
Додаток В. Підключення бібліотеки бінарізації.....	184
Додаток Г. Підключення бібліотеки адаптивної бінарізації	186
Додаток Д. Підключення бібліотеки вирівнювання зображення.....	188
Додаток Е. Підключення бібліотеки «Sum of absolute differences»	191
Додаток Ж. Вимірювання впливу технологічних параметрів експонування на відхилення геометричних розмірів топології ДП	192
Додаток З. Порівняння відхилень розмірів провідників ДП при різних товщинах	195
Додаток І. Список публікацій здобувача.....	198
Додаток Ї. Акти впровадження	202

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АСУ ТП – автоматична система управління технологічним процесом;
- БДП – багатошарова друкована плата;
- ГДП – гнучка друкована плата;
- ДДП – двосторонні друкована плата;
- ДП – друкована плата;
- ОДП – односторонні друкована плата;
- ПЗ – програмне забезпечення;
- СПФ – сухий плівковий фоторезист;
- СТЗ – системи технічного зору;
- ТКОР – температурний коефіцієнт об’ємного розширення матеріалу;
- ТП – технологічний процес;
- ФН – фоторезист негативний;
- ФП – фоторезист позитивний;
- ФС – фотополімерна смола;
- ФШ – фотошаблон;
- AGAST – (Adaptive and Generic Accelerated Segment Test) адаптивний оператор виявлення кутів;
- AKAZE – (Accelerated-Keypoint Aligned Zone Extractor) прискорений пошук зон з вирівнюванням за ключовими точками;
- BRIEF – (Binary Robust Independent Elementary Features) бінарні стійкі незалежні елементарні функції;
- BRISK – (Binary Robust Invariant Scalable Keypoints) бінарні стійкі інваріантні масштабовані ключові точки;
- CAD – (Computer-Aided Design) система автоматизованого проектування;
- CPPS – (Cyber-Physical Production Systems) кіберфізична виробнича система;

- EBM – (Electron Beam Melting) електронно-променева плавка;
- DLP – (Digital Light Processing) цифрова обробка світла;
- DMLS – (Direct Metal Laser Sintering) пряме лазерне спікання металу;
- 3DP – (Three-Dimensional Printing) тривимірний друк;
- FDM – (Fused Deposition Modeling) моделювання плавленого осадження;
- FFF – (Fused Filament Fabrication) виробництво плавленої нитки;
- FAST – (Features from Accelerated Segment Test) прискорений сегментарний тест;
- FED – (Feature Enhanced Descriptor) дескриптор з розширеними можливостями;
- KAZE – (Keypoint Aligned Zone Extractor) виділення вирівняних зон за ключовими точками;
- LOM – (Laminated Object Manufacturing) виготовлення ламінованих об'єктів;
- LCD – (Liquid Crystal Display) рідкокристалічний дисплей;
- ORB – (Oriented FAST and Rotated BRIEF) орієнтований FAST і повернутий BRIEF;
- PID – (Proportional Integral Differential Controller) пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор;
- SAD – (Sum of Absolute Differences) сума абсолютних різниць;
- SIFT – (Scale-Invariant Feature Transform) масштабна-інваріантне перетворення ознак;
- SHS – (Selective Heat Sintering) селективне термічне спікання;
- SLA – (Stereolithography) лазерна стереолітографія;
- SLM – (Selective Laser Melting) селективне лазерне плавлення;
- SLS – (Selective Laser Sintering) селективне лазерне спікання;
- SURE – (Steerability Uniformity and Robustness Evaluation) оцінка рівномірності керованості та надійності.

ВСТУП

Актуальність теми дослідження.

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 переналаджування 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.

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:

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

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

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в період з 2020 по 2024 р. 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.

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

Для досягнення цієї мети поставлено такі задачі:

1. Провести аналіз сучасних досліджень в галузі виготовлення ДП за допомогою адитивних технологій.

2. Розробити метод адаптації вхідного двовимірного зображення топології ДП в тривимірну модель для створення фотополімерних масок топології.

3. Розробити експериментальний макет для експонування ОДП та ДДП за допомогою фотополімерного 3D-друку за технологією DLP.

4. Провести дослідження адгезії захисної фотополімерної маски до заготовки ДП.

5. Провести дослідження впливу температури фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів фотополімерних масок.

6. Розробити регресійно-кореляційну модель багатокритеріальної оцінки впливу факторів експонування на збереження геометричних розмірів топології ДП.

7. Провести моделювання контролю температури фотополімерної смоли при експонуванні топології ДП.

8. Розробити програмне забезпечення для перевірки запропонованих моделей та методів визначення відхилень розмірів отриманої топології від початкової.

Об'єкт дослідження – технологічний процес експонування топологічних зображень друкованих плат отриманих за допомогою фотополімерного друку.

Предмет дослідження – методи та моделі керування технологічним процесом експонування та нанесення топології друкованих плат за допомогою технологій фотополімерного виробництва на базі SLA, DLP та LCD.

Методи дослідження. В роботі застосовуються методи: факторного аналізу – для визначення впливу параметрів експонування топології друкованих плат на збереження геометричних розмірів провідників та контактних майданчиків; методи фільтрації зображень – для підготовки необхідного топологічного рисунку друкованих плат при використанні SLA, DLP та LCD експонування та порівняння заданої топології та отриманої за

допомогою системи технічного зору та для розробки графічного інтерфейсу користувача для знаходження відхилень геометричних розмірів отриманої фотополімерної маски від початкового зображення топології; методи статистичного аналізу – для знаходження кореляції параметрів експонування топології на відхилення геометричних розмірів топології та отриманої регресійної моделі. Використані методи автоматизованого контролю температури фотополімерної смоли при LCD експонуванні.

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 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 бінарізації обробки зображень за рахунок використання розміру скануючої матриці при скануванні зображення за пороговим значенням Otsu, що дозволяє зменшити шуми при бінарізованій обробці.

Практичне значення результатів роботи. Отримані в роботі математичні моделі та методи прогнозування відхилень геометричних

розмірів топології 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 роботизованих 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).

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи представлено в тезах та конференціях:

– Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш., Баданюк І. С. Методи фільтрації зображення топології друкованих плат // Вінниця, UKR – Вена, AUT Випуск № 12-13 «ГРААЛЬ НАУКИ» за матеріалами III Міжнародної науково-практичної конференції "An Integrated Approach to Science Modernization: Methods, Models and Multidisciplinary". С. 351 – 355. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.29.04.2022.058>;

– Нікітін Д. О., Невлюдов І. Ш., Разумов-Фризюк Є. А. 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», 16 – 19 лютого 2021 р., Рим, Італія, 606 – 611 с.;

– Нікітін Д.О., Стрілець Р.Є., Близнюк Д.С. Порівняльний аналіз технологій 3D прототипування SLA, DLP та LCD. Розробка автоматизованої станції для 3D друку // Матеріали VII Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», 26 листопада 2020. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2020. С. 55 – 56.;

– Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш. Використання 3D-експонування полімерних фотомасок // Одеська національна академія харчових технологій Університет Інформатики і прикладних знань, м. Лодзь, Польща Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» Навчально-науковий інститут комп'ютерних систем і технологій «Індустрія 4.0» ім. П.М. Платонова XXI Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів «Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій». 137 – 138 с.;

– Гурін Д. В., Нікітін Д. О. Моделювання математичної моделі отримання наноструктурованих діелектричних плівок // VII Міжнародна

науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка»: Тези доповідей. – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2022. С. 47 – 48. ISSN 2222-4386;

– Невлюдов І. Ш., Нікітін Д. О., Стрілець Р. Є. Вплив фотополімерних смол для виготовлення друкованих плат // VII Міжнародна науково-практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка»: Тези доповідей. – Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2022. С. 94 – 95. ISSN 2222-4386;

– Нікітін Д. О., Коротун Є. В. Дослідження параметрів фотополімерної смоли для адитивного 3D-друку // Період трансформаційних процесів в світовій науці: задачі та виклики: матеріали II Міжнародної наукової конференції, м. Кривий Ріг, 10 січня, 2024р. / Міжнародний центр наукових досліджень. —Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп, 2024. 292 – 294 с. ISBN 978-617-8126-97-1. <https://doi.org/10.30888/2663-571210.36074/mcnd-19.01.2024>.

Публікації. Матеріали дисертації досить повно викладено у 18 наукових працях автора за темою дисертації, у тому числі: 2 статі в фахових виданнях, 2 в закордонних виданнях (Польща, Фінляндія), 6 науково фахових виданнях України (категорії «Б»), 7 тез доповідей, 1 розділ монографії. Праці індексуються базах Index Copernicus, Google Scholar, Research Bible; Index Copernicus (World of Papers), CrossRef, OUCI, ResearchGate, OpenAIRE.

Структура та обсяг дисертації роботи. Дисертаційна робота містить: вступ, чотири розділи, висновки, список використаної літератури, 10 додатків. Повний обсяг дисертації становить 205 сторінок тексту (з них 145 сторінок основного тексту), містить 85 рисунків, 19 таблицю, список використаних джерел із 117 найменувань.

1 СУЧАСНИЙ СТАН АВТОМАТИЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЙ ВИГОТОВЛЕННЯ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ

1.1 Види друкованих плат

Друкована плата (ДП) є незмінною складовою сучасних радіоелектронних пристроїв. Вона являє собою плоску ізоляційну основу з отворами, пазами, вирізами і металевими струмопровідними смужками (провідниками), які використовуються для встановлення та з'єднання електронних та радіо-компонентів та функціональних вузлів, відповідно до схеми електронних принципів, як показано на рисунку 1.1 [11].

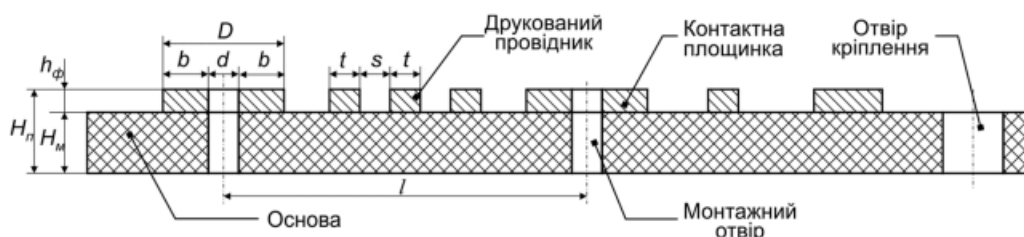


Рисунок 1.1 – Структура друкованої плати

У сфері приладобудування використовують різноманітні типи ДП. Вибір конкретного типу ДП під час проектування залежить від низки факторів, таких як температурний режим роботи пристрою, кліматичні умови, вплив ударів і вібрацій, розміри та маса пристрою. Також враховуються вимоги до ДП, такі як вологостійкість, стійкість до хімічно активних середовищ, міцність і захист від шкідників, таких як комахи і гризуни [12-13].

Також ДП можна класифікувати за матеріалом підкладки, її розмірами та призначенням (рис. 1.2).

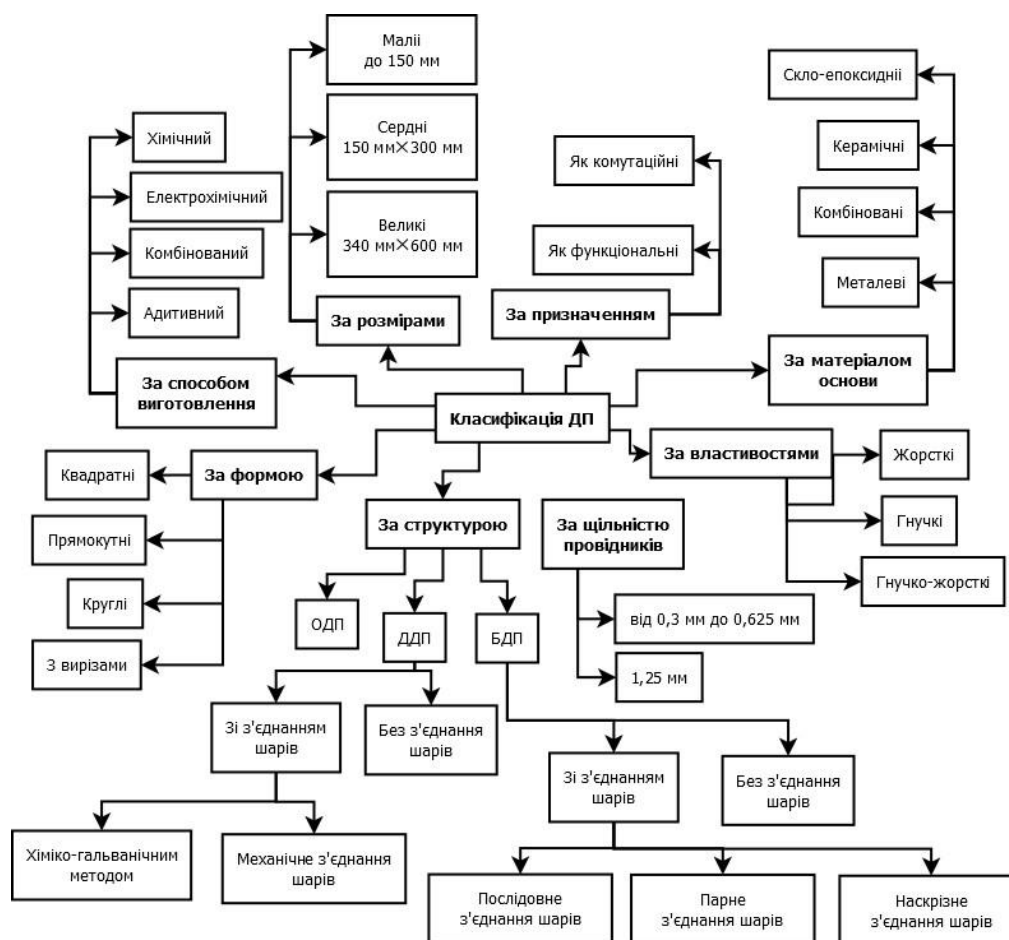


Рисунок 1.2 – Класифікація ДП

Найпоширенішими є односторонні, двосторонні та багатошарові ДП.

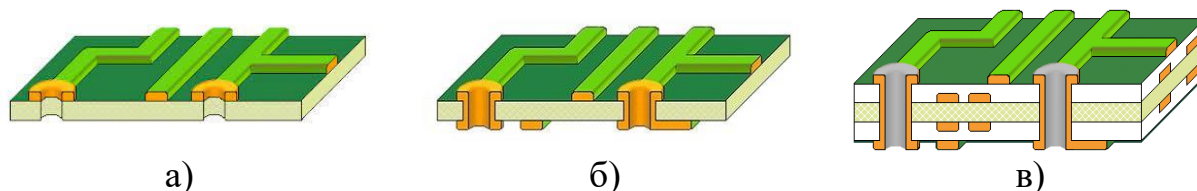
Одностороння друківана плата (ОДП) – це плата, на якій провідниковий малюнок виконаний лише на одній стороні. ОДП відрізняються простотою конструкції і економічністю у виготовленні. Цей вид плат використовується у виготовленні побутової апаратури, блоків живлення та пристроїв техніки зв'язку (рис. 1.3, а).

Двостороння друківана плата (ДДП) – це плата, на якій струмопровідний рисунок і всі необхідні з'єднання виконані з обох сторін, відповідно до електричної принципової схеми пристрою. Електричний зв'язок між сторонами досягається за допомогою металізованих отворів. Розміщення електронних компонентів може виконано з обох сторін ДДП або лише з однієї. Двосторонні ДП використовуються у вимірювальній техніці, системах управління, автоматичного регулювання та ін. (рис. 1.3, б).

Багатошарова друкована плата (БДП) – це плата, яка складається з послідовно розташованих шарів з ізоляційним матеріалом і струмопровідними шарами на двох або більше рівнях. Між цими шарами виконані необхідні з'єднання (рис. 1.3, в).

З'єднання між струмопровідними шарами багатошарових ДП може бути створено різними методами, такими як: спеціальні об'ємні деталі, друковані елементи або хіміко-гальванічна металізація отворів. Багатошарові ДП вирізняються високою надійністю, компактним монтажем, стійкістю до впливів навколишнього середовища та механічних впливів, а також меншими розмірами та кількістю з'єднань. Однак їх виготовлення є трудомістким процесом і вимагає високої точності в топології та суміщенні шарів, що призводить до високих витрат і складності технологічного обладнання, а також потребує контролю на кожному етапі технологічного процесу (ТП). Крім того, вони мають низьку ремонтпридатність [14].

БДП застосовують для вже відпрацьованих конструкцій електронно-обчислювальної, авіаційної та космічної апаратури.



а – ОДП; б – ДДП; в – БДП.

Рисунок 1.3 – Види друкованих плат

1.2 Аналіз сучасних технологій виготовлення ДП

Тенденція розвитку автоматизованого виробництва друкованих плат характеризується зменшенням ширини провідників і збільшенням кількості міжшарових переходів за рахунок зменшення їх розмірів та використання поверхневих контактних майданчиків для монтажу виводів компонентів. Найбільш загальними показниками рівня роздільної здатності друкованих

плат є ширина провідників та діаметр міжшарових переходів (табл. 1.1) [11-13].

Таблиця 1.1 – ДСТУ 53429-2009 для друкованих плат [13]

Найменування параметру	Найменші номінальні значення розмірів для класу точності						
	1	2	3	4	5	6	7
Ширина провідника	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10	0,075	0,050
Відстань між провідниками	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10	0,075	0,050
Гарантійний поясок контактної площадки	0,30	0,20	0,10	0,05	0,025	0,020	0,015
Наявність металевого покриття	Граничне відхилення розмірів струмопровідного рисунка для класу точності						
	1	2	3	4	5	6	7
Без покриття	±0,15	±0,10	±0,05	±0,03	±0,03	±0,02	±0,015
З покриттям	+0,25	+0,15	±0,10	±0,05	+0,03	±0,02	±0,015
	-0,15	-0,10					
Вид друкованої плати	Позиційний допуск розташування друкованого провідника для класу точності						
	1	2	3	4	5	6	7
ОДП, ДДП, МДП (зовнішній шар)	0,20	0,10	0,05	0,03	0,02	0,01	0,005
МПП (внутрішній шар)	0,30	0,15	0,10	0,08	0,05	0,02	0,01

Найчастіші класи точності для ОДП та ДДП, які використовуються у побутових приладах і простих схемах – з першого по третій.

Використовують два види технологій для отримання струмопровідного рисунку шарів ДП (рис. 1.4):

- на основі субтрактивних методів (видалення із заготовки ДП зайвого матеріалу);
- на основі адитивного формування (нарощування матеріалу на заготовці відповідно до заданої топології).

У субтрактивних методах, які також називають методами віднімання (subtraction methods) як основу використовують фольговані діелектрики. На цих фольгованих діелектриках створюється струмопровідний рисунок, шляхом видалення фольги з не струмопровідних областей. Для поліпшення з'єднань часто застосовують додаткову хіміко-гальванічну металізацію

монтажних отворів. Це призвело до розвитку комбінованих методів виготовлення друкованих плат [15].

Методи адитивного (additio-додавання) характеру ґрунтуються на вибіркового осадженні струмопровідного покриття на діелектричну основу, якому може передувати нанесення шару клейової композиції.

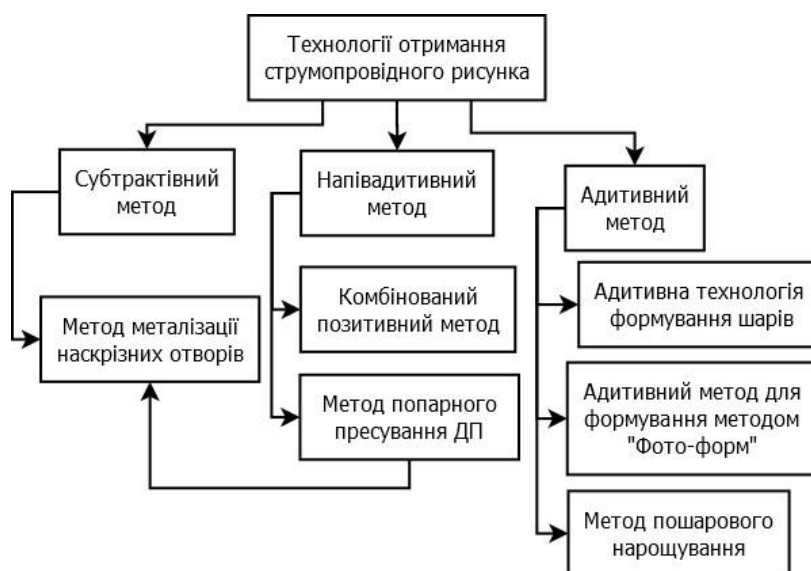


Рисунок 1.4 – Технології отримання струмопровідних рисунків

Незважаючи на відмінності цих підходів, дані методи базуються на принципах та технологіях фотолітографії.

1.3 Технологія фотолітографії

Фотолітографія – це технологія, яка дозволяє створювати зображення на поверхні твердого матеріалу і широко застосовується у виробництві різноманітних мікроелектронних пристроїв, плат і інших виробів. Цей метод має широкий спектр застосувань, особливо у виробництві напівпровідникових приладів [16-17]. Основою фотолітографії є використання спеціального світлочутливого матеріалу, який наноситься на поверхню як захисне рельєфне покриття. Зазвичай на цьому матеріалі створюється зображення, що може бути схемою або рисунком друкованої

плати, яке потім переноситься на підкладку. Такі світлочутливі матеріали, які використовуються у фотолітографії, називаються фоторезистами. Основні етапи фотолітографії наведено на рисунку 1.5.

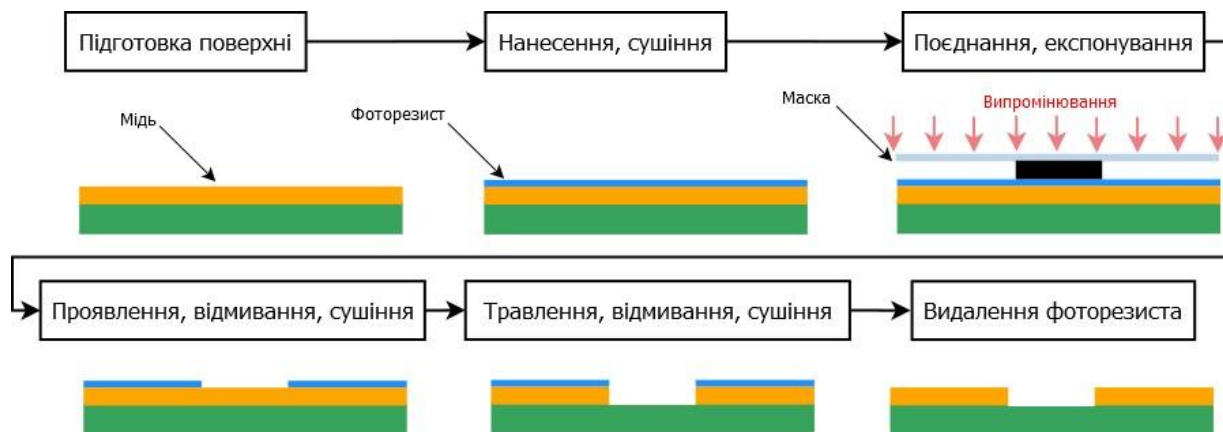


Рисунок 1.5 – Етапи фотолітографії

Як випливає зі схеми, перенесення зображення фотошаблону на поверхневий шар пластини відбувається в три стадії:

- експонування фотошару через фотошаблон та утворення прихованого зображення;
- проявлення і задублювання рисунка, тобто формування захисної фотографії маски;
- травлення поверхневого шару пластини на незахищених ділянках.

Кожен з етапів процесу фотолітографії підлягає впливу факторів, які можуть спричинити викривлення початкового зображення фотошаблону. Наприклад, під час експонування спостерігаються явища дифракції, заломлення та відбиття світла, які можуть призвести до зміни розмірів елементів рисунка і розмитості країв. На етапі проявлення та задублювання спотворення розмірів можуть бути обумовлені набуханням фоторезисту та його усадкою під дією бічних підтравлювань під час процесу маскування.

Умови, в яких проводиться обробка на різних стадіях, можуть варіюватися як між різними пластинами, так і в межах однієї групової пластини, що призводить до відхилення розмірів елементів топології. Якщо

розмір найменших елементів рисунка приблизно дорівнює розмірам цих похибок, то їх чіткість не можна гарантувати при відтворенні на фотолітографічній пластині. Тому, для досягнення точного перенесення малих елементів рисунка з фотошаблону на пластину, весь фотолітографічний процес повинен мати високу роздільну здатність. Роздільну здатність оцінюють за допомогою максимальної кількості ліній, які можна відокремити в межах 1 мм: $R = 1000/(2a_{min})$, де a_{min} – ширина лінії в мікрометрах. На практиці роздільну здатність зазвичай характеризують просто значенням a_{min} .

Для об'єктивного аналізу та вдосконалення фотолітографічного процесу цілком розумно враховувати роздільну здатність, яка визначається за виявленим рельєфом (фотошаблоном) та втратами в рельєфі. Ефективність досягнення певної роздільної здатності при виявленні рельєфу переважно залежить від властивостей матеріалу фоторезисту та його характеристик. Розглянемо процес перенесення топологічного рисунка на заготовку друкованої плати поетапно.

1.3.1 Нанесення фоторезисту в автоматизованому виробництві

Фоторезисти – світлочутливі полімерні суміші, в яких під впливом світла відбуваються незворотні хімічні реакції, що призводять до зміни їх фізичних та хімічних властивостей. Однією з особливостей фотохімічних реакцій є те, що фотони впливають на речовину селективно, активуючи одну молекулу і залишаючи інші недоторканими [17-18].

Етапність кінематичного процесу полімеризації фоторезисту можна представити наступним чином: поглинання фотона молекулою; перехід молекули в збуджений стан; первинні фотохімічні процеси за участю активних молекул; вторинні процеси між молекулами або комплексами, що утворюються в результаті первинних процесів. Реакції, що протікають у фоторезистах, можна розбити на чотири стадії: фотоліз (збудження молекули та її розпад під впливом світла); фотоперегрупування (перестановка атомів

чи радикалів у головному ланцюзі молекули під впливом світла); фотопрієднання (прієднання активованою молекулою іншої молекули чи молекул); фотосенсибілізація (передача електронної енергії збудження від однієї молекули (або її частини) до іншої молекули (або її частини)).

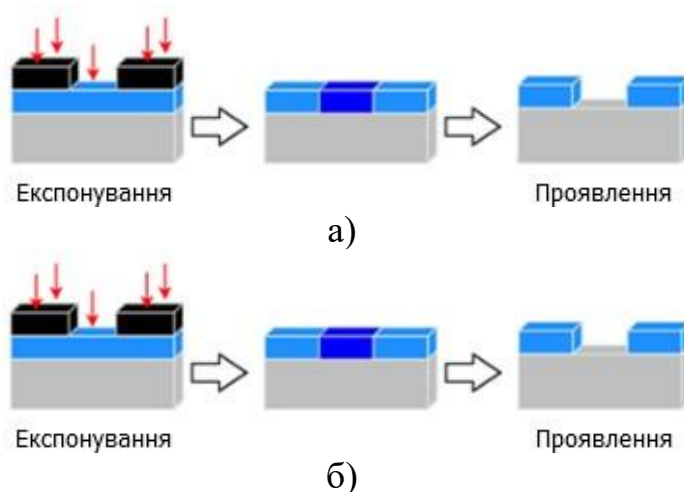
Існують дві групи фоторезисторів:

– позитивні фоторезисти (ФП) – сульфо-ефіри ортонафтохінон діазиду як світлочутливі речовини та новолачні, феноло- або крезолоформальдегідні смоли як плівкоутворювачі;

– негативні фоторезисти (ФН) – циклоолефінові каучуки, що використовують як з'єднувальні агенти діазиди; шари полівінілового спирту із солями хромових кислот або ефірами коричної кислоти; полівінілціннамат.

Основними відмінностями є те, що при використанні ФП експоновані області стають розчинними та після проявлення руйнуються. Такі фоторезисти, як правило, дозволяють отримувати вищі роздільні здатності, ніж ФН, але коштують дорожче.

У ФН експоновані області полімеризуються і стають нерозчинними, тому після проявлення розчиняються тільки не експоновані області. Негативні фоторезисти, як правило, мають більш високу адгезію в порівнянні з позитивними і більш стійкі до травлення (рис. 1.6).



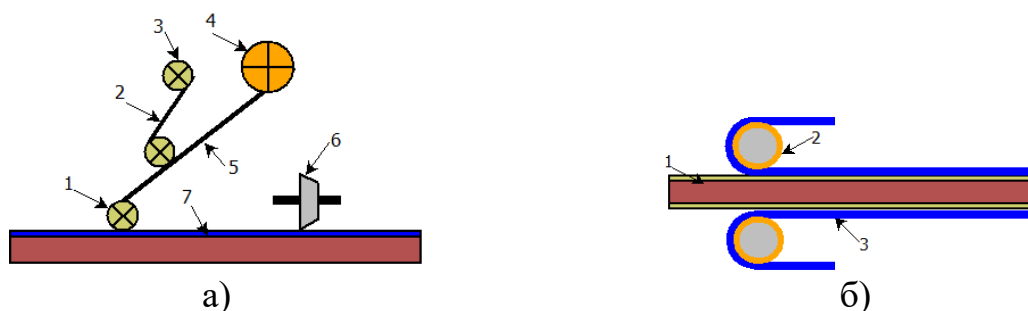
а) – позитивний фоторезист; б) – негативний фоторезист.

Рисунок 1.6 – Характеристики експонування фоторезистів

Існує безліч марок фоторезистів ФН або ФП типу, всі вони відрізнятимуться своїми характеристиками, їх можна розділити за методом нанесення на заготовку, а саме [18]: сухі плівкові фоторезисти; рідинні фоторезисти, до них можна віднести і аерозольні фоторезисти.

Сухі фоторезисти використовуються при виробництві багат шарових друкованих платах, гнучких друкованих платах (ГДП), смужкових платах та інших платах, де вимагається висока точність та висока роздільна здатність. Сухі плівкові фоторезисти (СПФ) складаються з трьох шарів: захисної поліетиленової плівки, середнього шару, який чутливий до УФ-випромінювання, і оптично прозорої лавсанової плівки, призначеної для захисту фоторезисту від окислення на повітрі.

Технологічний процес нанесення фоторезиста в автоматизованому виробництві ДП відбувається валиком, нагрітим від 100 °С до 120 °С на установках для ламінування – ламінаторах (рис. 1.7, а). При цьому поліетиленова плівка намотується на бобіну (рис. 1.7, б).



а) схема ламінатора: 1 – притискний валик; 2 – поліетиленова плівка;
3 – бобіна; 4 – рулон фоторезиста; 5 – СПФ; 6 – ніж для різання СПФ;
7 – заготовка плати;

б) нанесення сухого плівкового фоторезиста: 1 – ДП; 2 – бобіна; 3 – СПФ.

Рисунок 1.7 – Нанесення сухого плівкового фоторезиста

Для контролю температури використовуються термодатчики, також використовуються оптичні системи для позиціонування фоторезистивної стрічки. Все це впливає на систему контролю виготовлення ДП на цьому

етапі. Таким чином автоматизована система управління технологічним процесом (АСУ ТП) виготовлення ДП стає дорожче та потребує додаткових каналів зворотного зв'язку.

Переваги СПФ: висока роздільна здатність (дозволяє отримувати ширину провідників і зазори між ними від 0,04 мм до 0,1 мм); висока стійкість у травильних розчинах та електролітах гальванічного міднення та нанесення сплаву олово-свинець та олова виключають потрапляння (затікання) фоторезиста в отвори.

Недоліки СПФ: виділення при ламінуванні токсичних хлористого метилену та трихлоретилену, наявність внутрішніх напружень та усадкових процесів у плівці.

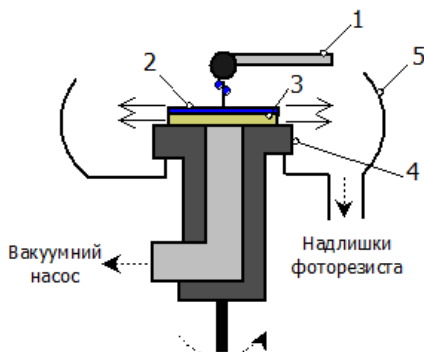
Рідкі фоторезисти наносяться у два шари загальною товщиною від 12 мкм до 15 мкм за допомогою методу занурення, а потім повільно витягують заготовку друкованої плати з розчину, щоб досягти однорідності товщини на поверхні. Сушіння після нанесення фоторезисту є обов'язковим кроком для видалення летючих речовин, стиснення структури шару, зменшення внутрішнього напруження та поліпшення адгезії фоторезисту до основи друкованої плати.

Операції, пов'язані з нанесенням рідкого фоторезиста, передбачають створення рівномірного шару на поверхні підкладки, зазвичай товщиною від 1 мкм до 3 мкм. Для цього існують три основних методи нанесення рідкого фоторезиста: центрифугування, занурення в рідкий фоторезист та аерозольне розпилення.

В автоматизованій системі для контролю шару також використовуються системи комп'ютерного зору, які в залежності від рівномірності шару, керують швидкістю обертання заготовки, тиском подачі рідкого фоторезиста та температурою всередині центрифуги.

Спосіб нанесення фоторезиста за допомогою центрифугування набув найбільшого поширення в промисловості, як показано на рисунку 1.8. Під час увімкнення центрифуги фоторезист розподіляється по поверхні

підкладки під впливом відцентрової сили. Формування шару фоторезиста товщиною h вздовж межі з підкладкою відбувається завдяки рівновазі між цією силою та силою опору, яка залежить від молекул фоторезиста.



1 – дозатор фоторезисту (крапельниця); 2 – шар фоторезисту;
3 – підкладка; 4 – диск центрифуги; 5 – збірник фоторезисту
Рисунок 1.8 – Схема центрифужного нанесення фоторезисту

При використанні поверхонь, що не підходять для центрифугування, використовується нанесення зануренням у фоторезист. Недоліками цього способу є велика витрата фоторезисту і неоднорідність одержуваних плівок.

За необхідності нанести резист на складні поверхні використовується аерозольне розпилення, проте товщина плівки за такого методу нанесення не є однорідною. Для аерозольного напилення зазвичай використовують спеціально призначені фоторезисти.

Завершальним етапом у процесі нанесення фоторезисту на підкладку, як для сухого, так і для рідкого фоторезисту, є етап сушіння. Під час сушіння з фоторезисту видаляється розчинник, і відбуваються складні релаксаційні процеси, які зміцнюють молекулярну структуру шару, зменшують внутрішні напруження і підвищують його адгезію до підкладки. Основними параметрами сушіння є наступні: температура сушіння (в діапазоні від 90 °С до 120 °С), тривалість сушіння (від 10 хв. до 30 хв.) та швидкість підйому і зниження температури.

За способом підведення тепла розрізняють три види сушіння: конвективне сушіння (в термостаті), інфрачервоне сушіння,

надвисокочастотне сушіння. Незалежно від виду та способу нанесення фоторезисти повинні відповідати переліченим вимогам [14]:

- висока світлочутливість у необхідному діапазоні довжин хвиль;
- висока роздільна здатність (на сучасному рівні виробництва НВІС – від 5000 ліній/мм до 10000 ліній/мм за товщину шару фоторезисту до 0,1 мкм);
- висока адгезія до підкладки (напівпровідника, оксиду, нітриду або металу, інших функціональних шарів);
- висока контрастність (отримання різко диференційованої межі між експонованими та неекспонованими ділянками);
- висока стійкість у хімічно агресивних середовищах;
- однорідність властивостей по всій поверхні шару;
- стабільність властивостей у часі;
- відсутність забруднень продуктами хімічних перетворень;
- доступність матеріалів, відносна простота, надійність та безпека застосування, можливість різних способів нанесення та ін.

1.3.2 Експонування та суміщення

Процес експонування полягає в опроміненні фоторезиста за допомогою світла у видимому або ультрафіолетовому діапазоні, що відрізняє процес фотолітографії від інших методів літографії. Наприклад, у рентгенівській, іонно-променевої та електронній літографії для експонування використовуються відповідно рентгенівські промені, іони та електрони [19].

Найбільш стандартними довжинами хвилі експонування у фотолітографії є і-лінія (365 нм), h-лінія (405 нм) та g-лінія (436 нм). Більшість фоторезистів можуть бути проекспоновані і широким спектром ультрафіолетового діапазону (інтегральне експонування), для чого зазвичай застосовується ртутна лампа. У разі фотолітографії в глибокому (жорсткому) ультрафіолеті використовуються довжини хвиль близько 13,5 нм та

спеціальні фоторезисти. Основними параметрами експонування є: довжина хвилі, час експонування, потужність джерела випромінювання.

Серед джерел випромінювання, що використовуються у фотолітографії, найбільш поширені: ртутна лампа (близько 400 нм), ексимерний лазер KrF (248 нм), ексимерний лазер ArF (193 нм), ексимерний лазер F2 (157 нм; тільки експериментальні установки).

Фотошаблон (ФШ) – це скляна пластина, на поверхні якої нанесений шар маскувального покриття, що створює шаблон з прозорими і непрозорими областями для оптичного випромінювання. Фотошаблони мають відповідати низці вимог, включаючи високу оптичну щільність маскувального матеріалу, товщину маскувального матеріалу не більше 100 нм, відбивну здатність не більше 15 %, високу роздільну здатність, мінімальну кількість мікродефектів і стійкість до стирання.

Для успішного нанесення топології на заготовки майбутньої ДП потрібна операція суміщення. Сутність даної операції полягає в позиціонуванні ФШ щодо підкладки та джерела випромінювання.

Поєднання зображень з фотошаблону та підкладки відбувається у два етапи. На першому етапі використовуються реперні модулі, так звані «порожні кристали», де виконується грубе вирівнювання в межах поля підкладки. На другому етапі за допомогою мікроскопа і спеціальних маркерів, які вказують на фігури суміщення, передбачені на рисунки кожного топологічного шару, проводиться точне вирівнювання. Форму фігур суміщення, такі як хрести, кола або квадрати, вибирають залежно від типу фоторезиста, що використовується в процесі фотолітографії. Оскільки елементи мають малі розміри і розташовані на великій площі, операція суміщення вимагає високої точності, і для цього потрібно збільшення мікроскопа не менше ніж 200 разів [16-18].

Існують два способи суміщення фотошаблонів з підкладками: візуальний, якого контроль суміщення виконується за допомогою мікроскопа (точність досягає від 0,25 мкм до 1 мкм, залежно від можливостей

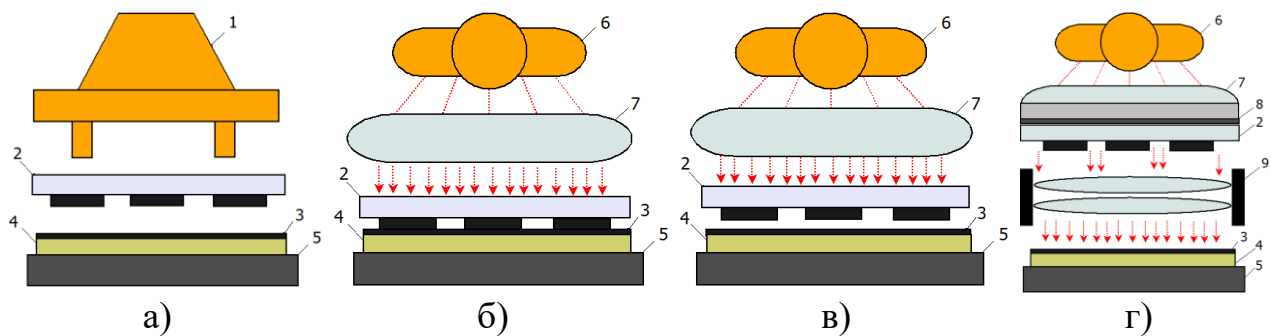
установки); і автоматизований фотоелектричний, який використовує фотоелектронний мікроскоп і забезпечує точність суміщення в межах від 0,1 мкм до 0,3 мкм.

Розрізняють контактний, безконтактний та проекційний способи фотолітографії:

– при контактному способі фотошаблон та пластина стикаються (рис. 1.9, а);

– при безконтактному між фотошаблоном та пластиною залишають зазор 10 – 25 мкм (рис. 1.9, б);

– при проекційному способі контакту між фотошаблоном та підкладкою немає (рис. 1.9, в).



а – суміщення; б – контактне експонування; в – експонування із мікрозазором; г – проекційний метод експонування.

1 – двопільний мікроскоп; 2 – ФШ; 3 – ФР; 4 – підкладка; 5 – столик;

6 – джерело експонування; 7 – конденсор; 8 – фільтр; 9 – об'єктив

Рисунок 1.9 – Способи експонування

Основною задачею автоматизованого керування при трафаретному експонуванні є позиціонування трафарету відносно міток на поверхні заготовки ДП. Для цього використовуються автоматичний оптичний контроль на основі лазерного або спектрального сканування. Також до системи керування додаються пристрої позиціонування (маніпулятори, координатні столи), що в свою чергу здорожчує систему.

Експонування може проводитися як із використанням фотошаблону, так і без нього (безмаскова літографія). В останньому випадку рисунок на фоторезисті формується безпосередньо переміщенням лазерного або електронного променя або їх групою, сфокусованим на поверхні фоторезиста [20-21].

У разі застосування фотошаблонів частіше використовуються проєкційні методи експонування, коли малюнок з фотошаблону переноситься на фоторезист з використанням системи оптичних лінз (рис. 1.10). У деяких варіантах літографії маска може перебувати в контакті з фоторезистом або в безпосередній близькості, за наявності мікроазору [22, 23].

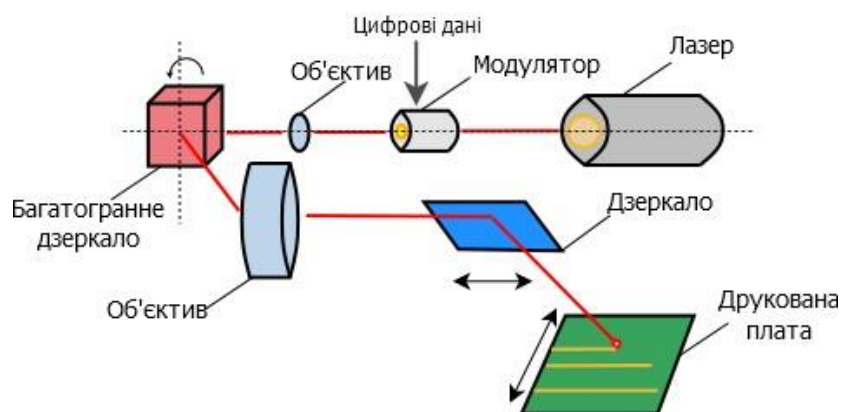


Рисунок 1.10 – Схема прямого експонування

1.3.3 Витратні матеріали та обладнання для нанесення та експонування фоторезиста

Під час виробництва ДП на етапах, пов'язаних із нанесенням фоторезистивного шару на підкладку та експонуванням провідникового малюнка, основними витратними матеріалами є [12]: сухий плівковий або рідкий фоторезист; плівка для виготовлення трафаретів; фарба для трафаретів; рідини для видалення фоторезиста; засоби для знежирення та підготовки поверхні заготовки перед нанесенням фоторезисту.

Для роботи з витратними матеріалами використовується дороге вузькоспеціалізоване обладнання: установки для ламінування плівкового фоторезистору або центрифуги для нанесення рідкого фоторезисту; принтери для виготовлення трафаретів топології ДП; мікроскопи або автоматизовані установки для суміщення трафарету та заготовки; лампи, установки для прямого експонування топології чи установки для лазерного чи рентгенівського експонування; ванни для очищення ДП від фоторезисту.

Собівартість готового виробу складається з ціни на витратні матеріали, вартості устаткування, виготовлення, енерговитрати і трудовитрати. Беручи до уваги ці факти, необхідно оцінити витрати на матеріали та ціни на установки (для оцінки їх амортизації) для роботи з ним.

Орієнтовані ціни на плівковий та рідкий фоторезист для виготовлення ОДП та ДДП станом на рік представлені в таблиці 1.2. Рідкий фоторезист часто використовується для ДП з більш високим класом точності, тому ціна на нього вище.

Таблиця 1.2 – Вартість плівкових та рідких фоторезистів

№	Назва	Вартість, грн/м ²	Назва	Вартість, грн/м ²
Плівковий фоторезист			Рідкий фоторезист	
1	ФПС 2107-02975	242,00	XR-7000	2244,00
2	FF-9040S	143,38	ФРЖ	2902,80
3	Фоторезист OEM	304,00	XR-3602	532,80
4	СПФ-1	208,00	Positiv 20	2436,00
5	СПФ-2	224,00	Transparent 21	1015,00
6	СПФ-ВЩ (ТУ6-17-359-77)	411,74		
7	Ordyl Alpha 350	57,60		
8	Riston-200	160,00		
9	Orajjet 3165G	434,00		
10	CX-1000	49,52		
11	Rexant 09-3480	439,00		
12	Photec PH-2000	605,00		

Вартість установок для нанесення фоторезисту залежить не тільки від типу нанесення, але й від розміру робочої зони. Чим більша площа

нанесення, тим вищою є вартість установки, і при цьому задіяна велика робоча площа приміщення (табл. 1.3).

Таблиця 1.3 – Вартість установок для ламінування та центрифужного нанесення фоторезисту

Верстат для ламінування			
№	Назва	Розміри верстата, мм	Вартість, грн
1	YDFM 920 - AT210042	1900×1500×1600	174963,00
2	YDFM 720 - AT000641	1900×1300×1600	196082,00
3	FMY-720B - AT000635	1450×1125×1300	158558,00
4	Guang Ming YDFM 720A - AT000647	700×1200×1300	119230,00
Верстат для центрифужного нанесення фоторезисту			
№	Назва	Розміри верстата, мм	Вартість, грн
1	Osiris VARIXX 804	1300×1300×2100	182843,00
2	HO-TH-05	200×150×380	182843,00
3	Avanti JXN-30	650×875×1200	112506,92
4	УАРЭС-2	290×200×380	138570,00

Для простих плат типу ОДП або ДДП здебільшого використовують технологію експонування топології за допомогою трафарету. У порівнянні з прямим експонуванням, перенесення зображення через трафарет більш дешево, хоча і має певні недоліки. Одним з цих недоліків є необхідність у принтерах для виготовлення трафаретів. Ціни принтерів та виготовлення трафаретів представлені у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Характеристики принтерів для виготовлення трафаретів ДП

№	Назва	Поле для друку, мм	Вартість, грн
1	Go LED	1200×350	16450,00
2	Go29	600×450	31968,00

Замість принтерів можна використовувати установки для прямого експонування топології на підкладці, оскільки ці установки більш технологічні. Порівняно дешевими варіантами апаратури для високотехнологічного експонування є установки лазерного або рентгенівського експонування. Ціни на них вище (табл. 1.5).

Таблиця 1.5 – Характеристики установок для експонування ДП

№	Назва	Розміри робочої зони верстата, мм	Вартість, грн
1	UVE-M500	1340×2100	318284,30
2	C SUN UVE-M720	1807×1672	217466,00
3	COLIGHT DMVL 1630	610×762	138567,00
4	UV-P50	460×615	169480,34
5	Cirgraphics T4000	830×975	213808,24

Найдешевшим джерелом світла для експонування є УФ-лампи. Однак вони в основному використовуються для виготовлення плат з невисоким класом точності.

Таким чином, процес фотолітографії складається з послідовних етапів: нанесення фоторезиста на виріб і подальше експонованого через фотошаблону для фіксації на оброблюваній поверхні з наступним травленням.

Кожен етап виробництва вимагає спеціалізованого обладнання та матеріалів. Використання дорогого, складного в обслуговуванні та габаритного обладнання, такого як установки для прямого експонування, наприклад, UVE-M500, UVE-M720, COLIGHT DMVL 1630, неможливе для невеликих підприємств. При виробництві великих партій кожен етап забирає значний час, особливо при використанні аерозольного нанесення фоторезисту, яке потребує часу для сушіння виробів. На будь-якому етапі можуть виникнути дефекти виробу внаслідок помилок оператора чи технічних збоїв обладнання. Для мінімізації цих негативних аспектів необхідний вищий рівень автоматизації, який забезпечить контроль та синхронізацію роботи основного та допоміжного обладнання. Крім того, на етапі травлення можливі геометричні відхилення в отриманому зображенні у порівнянні з вихідною топологією друкованої плати, наприклад, підтравлювання провідникових доріжок.

Поява технологій адитивного виробництва (3D-друку) дозволяє повному подивитися на вирішення цієї задачі. Технології DLP (Digital Light

Processing), SLA (Laser stereolithography) та LCD-друку можливо використовувати для маскуванню окремих ділянок фольгованого діелектрика для подальшого травлення провідникової системи. Дане обладнання дає можливість швидкого переналаштування для виробництва нових виробів, забезпечуючи при цьому високу точність виготовлення.

1.4 Технології адитивного фотополімерного 3D-друку

На даний час існує велика кількість адитивних технологій 3D-друку, таких як:

- екструзійна: FDM (Fused Deposition Modeling) та FFF (Fused Filament Fabrication) [24];
- порошкова: DMLS (Direct Metal Laser Sintering), EBM (Electron Beam Melting), SLM (Selective Laser Melting), SHS (Selective Heat Sintering) та SLS (Selective Laser Sintering);
- струменева: 3DP (Three-Dimensional Printing);
- ламінування: LOM (Laminated Object Manufacturing).

Технології засвічування полімеру в фотополімерних принтерах є одними з найточніших та поширених. З них можна виділити три основних (рис. 1.11) [25].

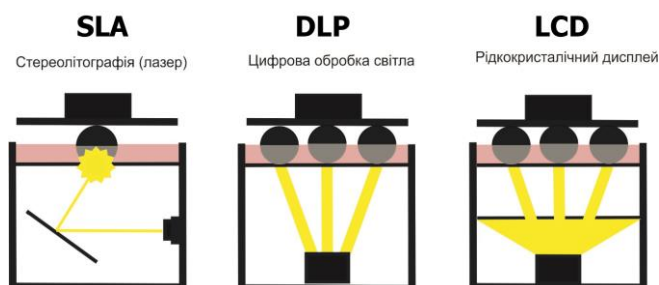


Рисунок 1.11 – Технології фотополімерного 3D-друку

Технологія SLA (Selective Laser Sintering), відома також як «стереолітографія», є методом адитивного виробництва або 3D-друку. Цей

метод передбачає послідовну полімеризацію тонких шарів рідкого fotocутливого полімеру за допомогою проміння ультрафіолетового лазера малої потужності. У робочій камері 3D-принтера розташована платформа, яка занурена в рідку смолу. Спочатку платформа знаходиться близько до поверхні полімеру і покрита тонким шаром від 20 мкм до 150 мкм, на якому лазер починає формувати шар деталі [26 – 28].

Модель розбивається на тонкі шари, які відповідають роздільній здатності принтера по вертикальній осі. Після створення кожного шару принтер опускає платформу на товщину нового шару моделі (від 10 мкм до 150 мкм) і продовжує процес, формуючи наступний шар (рис. 1.12).

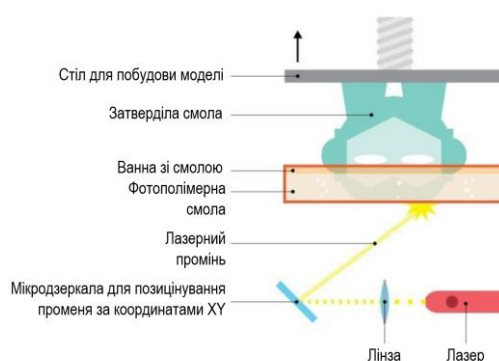


Рисунок 1.12 – Схема роботи SLA-принтера

Під впливом лазера, потужність якого може бути відносно невеликою, що робить принтер більш доступним порівняно з апаратами, які використовують порошкові матеріали у технологіях SLS, SLM і інші, полімер затвердіває, формуючи стінки майбутнього виробу. Таким чином, шар за шаром, створюється повна модель. Якщо модель включає навісні елементи, для них додаються підтримки з того ж полімеру, які потім механічно видаляються [29 – 32]. Проектування та створення підтримок у моделі здійснюються за допомогою CAD-програм на етапі проектування.

Така технологія має перевагу перед іншими з точки зору можливості створення моделей великих розмірів, високої точності, спроможності виготовлення моделей будь-якої форми та конструкції, низького відсотку втрат зайвого матеріалу та малого рівня шуму під час роботи [33].

Недоліками використання цієї технології є використання дорогого фотополімеру, висока вартість самого принтера, потреба в забезпеченні високої точності при його конструкції, щоб забезпечити правильний кут виставлення дзеркал, а також необхідність точної механіки для розташування ванни на рівні одного шару від поверхні до платформи [34].

DLP-технологія (Digital Light Processing) використовує принцип, аналогічний роботі проєктора [35, 36] у 3D-принтерах, що використовують технологію DLP для 3D-друку. Під впливом світла видимого спектру полімер переходить у твердий стан, але в цьому випадку весь шар засвічується одночасно. Потік світла регулюється системою мікромеханічними дзеркалами, кожне з яких керується індивідуально. Залежно від положення дзеркала, світло може проходити через конкретну точку шару або ні. Таким чином, у принтера є фіксоване логічне розширення, яке визначається кількістю точок по координатах XY [36]. Фізичний розмір цих точок залежить від відстані, на якій модель знаходиться від джерела випромінювання в системі мікродзеркал, як показано на рисунку 1.13.

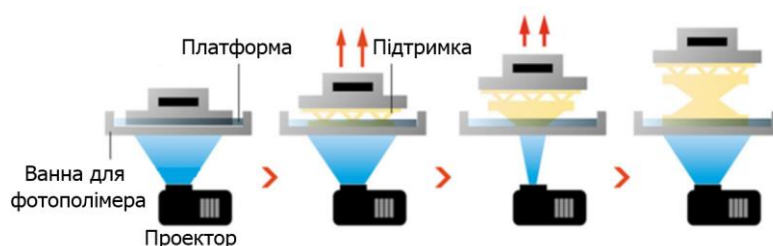


Рисунок 1.13 – Схема роботи DLP принтера

Розмір робочої зони принтера визначається параметрами проєктора, зокрема його мінімальною проєкційною відстанню, за якої зображення має найменший розмір пікселя. Точність принтера залежить від роздільної здатності та розміру робочої зони. Для його побудови може використовуватися дзеркало, яке відбиватиме зображення на платформу з полімером [37].

Недоліками цієї технології є залежність від проектора, який визначає розмір робочої зони та точність по осях X і Y. Проектори такого типу є дорогими, що також є недоліком. Використання цієї технології обмежено лише персональним комп'ютером або мікрокомп'ютером, які керують проектором та платою управління. Технологія може вимагати значних розмірів при обмеженій робочій зоні через необхідність великої відстані від лінзи проектора до ванни.

Перевагами є невелика вартість порівняно з SLA-технологією, менші вимоги до точності виготовлення компонентів та можливість високої швидкості друку за рахунок потужного лампового проектора.

LCD технологія подібна до DLP, але включає LCD-екран, який відображає шар моделі, та світлодіод, що освітлює фотополімер. Процес побудови моделей відбувається лише знизу вгору, де екран розташований безпосередньо під ванною з фотополімером. Екран відображає весь шар моделі, відкриваючи світлі області – пікселі, через які проходить ультрафіолетове випромінювання, і освітлює фотополімер.

Використовується принтер із засвіченням фотополімера світлодіодною УФ-матрицею з використанням як маски LCD-дисплея (рис. 1.14).

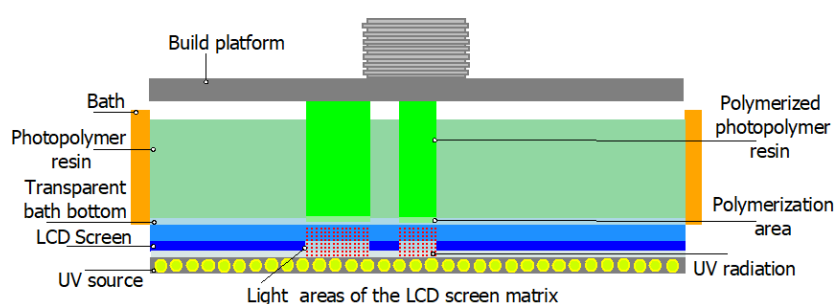


Рисунок 1.14 – Схема роботи LCD-принтера

Фотополімер активується світлодіодною матрицею, а зображення формується за допомогою LCD-дисплея, який поетапно виводить переріз створеної деталі. Відмінності між класичною SLA-технологією та DLP і LCD-технологіями засвічування є очевидними. Проте DLP і LCD-технології засвічування часто сплутуються, що є неправильним, оскільки кожна з цих

технологій має свої властивості, що впливають на можливості принтера та якість друку [36].

Недоліками цієї технології є залежність розміру робочої області від екрана, точність, що залежить від розміру екрана, і відсутність на ринку екранів розміром понад 10 дюймів. Навіть за умови використання екрану з розширенням 8K отримати розмір пікселя менше 50 мкм є неможливим. Також є недоліком розташування екрана безпосередньо під ванною. Структура ванни, яка складається з алюмінієвого корпусу та плівки товщиною від 50 мкм до 150 мкм, може пропускати фотополімерну смолу при механічних пошкодженнях, що може призвести до проблем з принтером, таких як загоряння або пошкодження електроніки.

Перевагами цієї технології є невелика вартість, простота обслуговування та широкі можливості модернізації. В порівнянні з технологією DLP, відсутність спотворення зображення на робочій області є ще однією перевагою.

Узагальнюючи, можна зробити висновок, що ці три різновиди технологій мають широкі можливості використання в побуті та на виробництві, і кожна з них займає своє місце на ринку. На сьогодні технологія LCD є найбільш розвинутою, що сприяє великому інтересу в наукових дослідженнях і вдосконаленні цієї технології та її застосуванні [37, 38].

Основні матеріали для друку в фотополімерних технологіях – фотополімерні смоли. На даний момент існує безліч виробників і марок фотополімерних смол [39]. Їх ціни обумовлені точністю друку і мінімально допустимою висотою шару, додатковими характеристиками. Також їх можливо умовно поділити на такі види, як: стандартні фотополімери; силіконові фотополімери; фотополімери високої температури; фотополімери для медичних застосувань; кольорові фотополімери; фотополімери для високошвидкісного друку; біорезорбовані фотополімери.

Основними характеристиками фотополімеру, які впливають на точність виготовлення деталі під час 3D-друку, є: час експонування шару (час дії УФ-випромінювання на фотополімер), s ; товщина шару, μm ; довжина хвилі полімеризації, nm ; інтенсивність випромінювання, Lm ; коефіцієнт усадки фотополімеру, %.

Для кожного фотополімеру ці значення різні, тому дослідження впливу цих параметрів експонування моделі, є актуальною задачею.

1.5 Використання адитивних технологій 3D-друку під час експонування топології ДП. Опис реалізації даної технології виготовлення

Використання технологій 3D-друку надає можливість створювати маскувальних шар на фольгованому діелектрику для подальшого травлення. У ролі матеріалу для маскуванню використовують фотополімерні смоли, які хімічно інертні відносно більшості протравлювачів. Таким чином, за допомогою технології фотополімерного 3D-друку можна створювати повністю готову маску з необхідною товщиною і конфігурацією [40, 41].

При використанні технологій фотополімерного 3D-друку можливо одночасно виконувати етап нанесення маски та експонування (рис. 1.15).

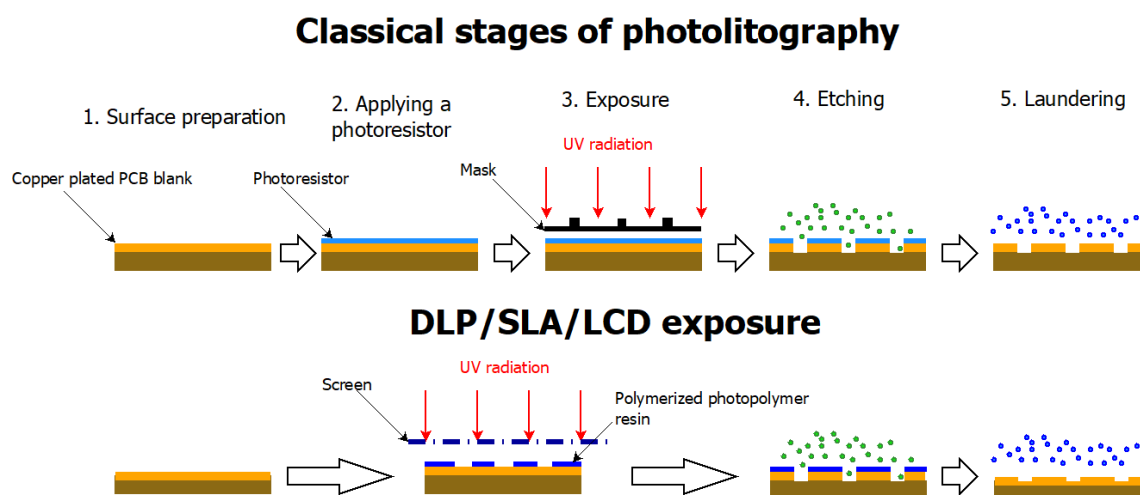


Рисунок 1.15 – Етапи 3D-експонування масок

Такий підхід може бути реалізований за допомогою SLA або LCD-технологій друку та має переваги [42]:

- установка безпосередньо експонує задану топологію на заготовку, без попереднього нанесення фоторезистивних плівок або аерозолів;
- немає необхідності в двох окремих установках для нанесення фоторезиста й експонування – все здійснюється одночасно на одній установці, це дозволяє розвантажити виробничі площі;
- оскільки час засвічення фотополімера в середньому 6-14 с, що менше часу засвічення фоторезистивних плівок, збільшується продуктивність.

1.6 Аналіз моделі керування технологічним процесом виготовлення фотополімерних масок

Для реалізації запропонованої технології експонування ОДП та ДДП на принципах фотополімерного 3D-друку та створення автоматизованого процесу виготовлення ДП за допомогою кіберфізичних систем необхідно визначити модель керування технологічним процесом виробництва та розробити принцип автоматизації даного процесу для виробничого цеху. Запропонована модель керування включає наступні ієрархічні рівні керування [43]:

- фізичний рівень (технологічний процес експонування топології ДП);
- апаратний рівень (установка на базі LCD 3D-принтера);
- програмний рівень (програма для конвертації двовимірного зображення на код керування установкою (G-код));
- рівень керування (система комп'ютерного зору контролю відповідності отриманої топології ДП до вихідної).

На програмному рівні вихідне двовимірне зображення топології із зазначеними розмірами та формами провідників зберігається у форматі (*.png) або (*.svg) та завантажується у програму для підготовки до друку NanoDLP або Chitubox.

Дана програма перетворює растрове або векторне зображення у формат (*.stl), з яким працюють усі 3D-принтери. З отриманого (*.stl) файлу в тій же програмі можна отримати код керування друку (G-code), в якому внесені параметри та характеристики самої установки, а також вказуються параметри друку, які впливають на якість отриманої топології, такі як: загальні розміри фотополімерної маски, мм; висота шару друку, мкм; час засвічення одного шару, с; потужність УФ-випромінювання, Лм.

Після генерації G-code програма через Wi-Fi направляє одержаний код на 3D-принтер.

Далі на апаратному рівні керуючий код розсилає команди на відповідні системи та вузли установки, а саме: система захоплення та позиціонування заготовки ДП; система переміщення заготовки по осі Z, яка відповідає за занурення заготовки у фотополімерну смолу та за висоту шару маски; УФ-лампа LCD-принтера, який засвічує фотополімерну смолу; екран, на якому проектується зображення шару маски; система очищення заготовки від надлишків фотополімерної смоли після друку топології.

Окремим компонентом апаратного рівня є система комп'ютерного зору для контролю поверхневих дефектів отриманої топології та ідентифікації відхилень.

На фізичному рівні відбувається безпосередній процес нанесення та експонування топології на заготовки ДП. У ході даного технологічного процесу на вихідну топологію та заготовку впливають параметри друку, зазначені в G-code, та властивості фотополімерної смоли. Геометричні відхилення розмірів зображення обумовлені різними комбінаціями зазначених факторів. Аналіз отриманих результатів дозволяє побудувати регресійно-кореляційну модель, яка автоматично поповнює базу знань вже на рівні керування.

На рівні управління система технічного зору за допомогою системи розпізнавання елементів топології ДП вимірює геометричні розміри отриманої топології. Після цього порівнюються розміри заданої та отриманої

топологій ДП. За результатами порівняння система експертної оцінки діє в одному з двох можливих варіантів:

– якщо немає відхилень в отриманій топології або вони в рамках допустимих від вихідного зображення, продовжувати процес експонування та спостереження;

– якщо відхилення великі, то експертна система на основі кореляції вводить корективи у параметри друку та генерує новий G-code, і відбувається новий друк маски. Так цикл повторюється, поки відхилення стануть допустимими.

Модель керування наведено на рисунку 1.16.

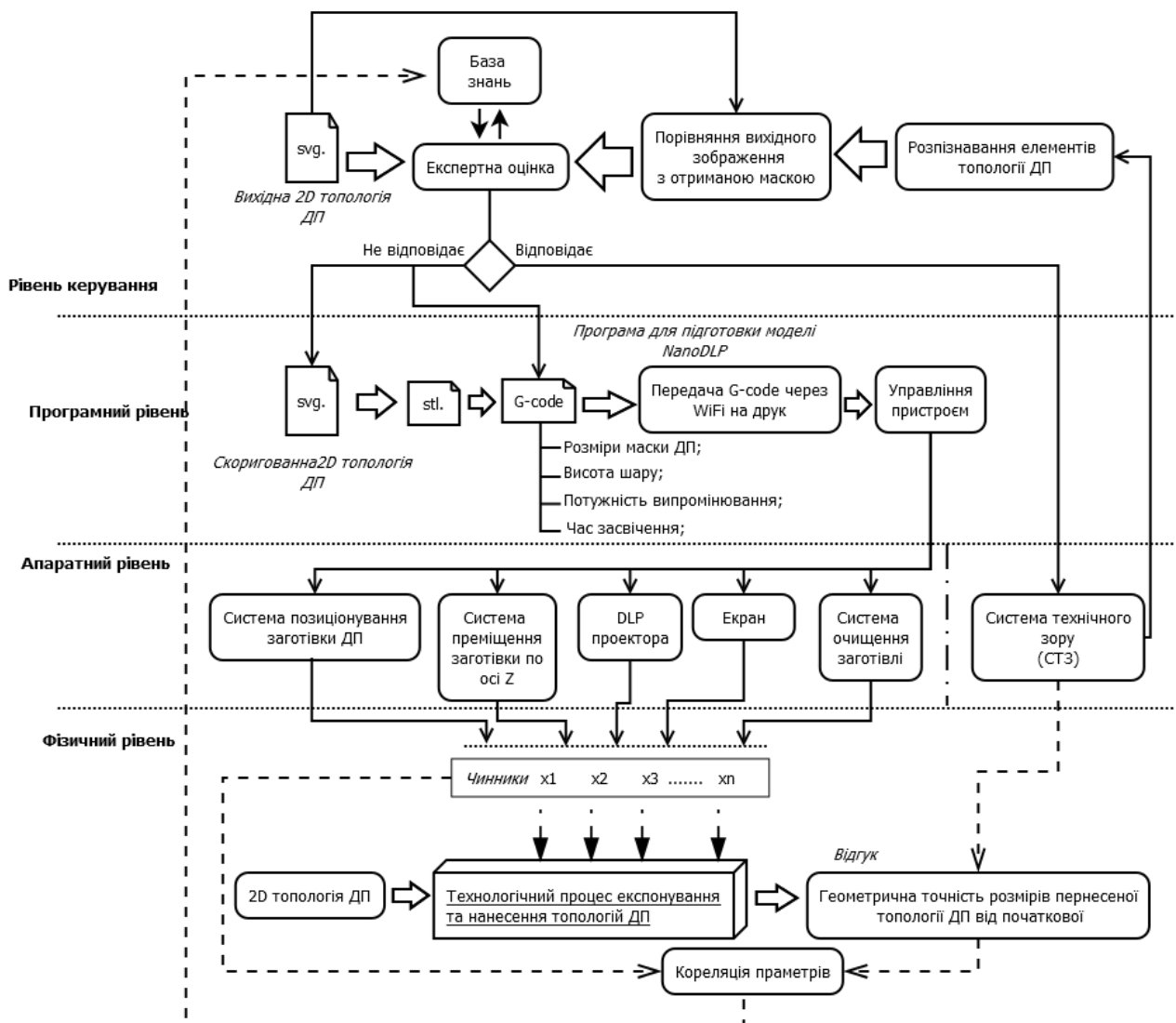


Рисунок 1.16 – Модель керування

Даний підхід організації кіберфізичної системи з внутрішньою інформаційною системою дозволяє візуалізувати отримані топології ДП та вносити корективи в роботу системи управління для отримання мінімальних відхилень геометричних розмірів.

1.7 Висновки до першого розділу

У першому розділі розглянуто такі питання:

- класифікація друкованих плат за їх типами, характеристиками та класами точності;
- етапи фотолітографії, зокрема етапи нанесення та експонування провідникового рисунка;
- установки та витратні матеріали для перенесення топологічного рисунка;
- фотополімерний 3D-друк та використання його у фотолітографії ДП на етапах нанесення фоторезиста та експонування зображення на підкладку;
- модель управління технологічним процесом створення фотополімерних масок та впровадження автоматизації у цей процес.

З проведеного аналізу можна дійти невтішного висновку, що у виробництві ОДП і ДДП задіяно дуже багато устаткування, допоміжної оснастки і витратних матеріалів, що у своє чергу веде як до збільшення витрат, собівартості виробів та задіяної робочої площі виробництва.

Основні недоліки класичного методу фотолітографії для виготовлення ОДП та ДДП наведені в таблиці 1.7.

Таблиця 1.7 – Недоліки фотолітографії для виготовленні ОДП та ДДП

№	Недолік	Пояснення
1	Велика кількість обладнання та його вартість для етапів нанесення фоторезисту та експонування топології ДП	Операція нанесення фоторезисту на поверхню заготовки ДП потребує спеціальних валочних верстатів для плівкових матеріалів або ванн та центрифужних верстатів для аерозольного нанесення.

Продовження таблиці 1.7

№	Недолік	Пояснення
2	Необхідність виготовляти окремі трафарети топології для непрямого експонування	Для кожної топології ДП необхідно виготовляти новий трафарет, що в свою чергу потребує установок для виготовлення цих трафаретів та додаткових витрат на матеріали.
3	Велика кількість витратних матеріалів	До цього входить: – фоторезист; – чорнила для виготовлення трафаретів; – плівки для трафаретів; – розчини для нанесення та видалення фоторезисту. Все це напряму впливає на собівартість готової ДП.
4	Низька гнучкість виробництва	Оскільки класичний підхід фотолітографії передбачає послідовність певних етапів виготовлення ДП, то витрачається час на перехідні операції. До того ж для переходу на нову топологію ДП необхідно перелаштовувати верстати та виготовляти новий трафарет.

Використання технології адитивного фотополімерного 3D-друку та використання фотополімерної смоли як захисної маски на етапах нанесення та експонування зображення топології ДП дозволяє вирішити перелічені недоліки. Для впровадження та успішної реалізації даного підходу необхідно розробити систему оцінки якості одержаних виробів, яка оцінюватиме відхилення геометричних розмірів одержуваної фотополімерної маски від вихідного зображення. Система технічного зору один із основних компонентів автоматизації даного процесу. СТЗ буде здійснювати такі функції:

- розпізнавання елементів топології отриманої фотополімерної маски;
- порівняння вихідних геометричних розмірів топології з отриманими.

СТЗ взаємодіє з системою експертної оцінки, яка на основі бази знань, отриманої під час кореляцій впливів технологічних параметрів та отриманих розмірів елементів маски редагуватиме параметри друку у G-code.

Основні результати першого розділу опубліковано у роботах [22, 23, 24, 25, 40, 41, 42].

Список джерел, які використано у першому розділі, наведено у переліку джерел посилань [11 – 21, 26 – 39, 43].

2 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ КОНТРОЛЮ РОЗМІРІВ ФОТОПОЛІМЕРНИХ МАСОК ТОПОЛОГІЇ

2.1 Етапи підготовки реального зображення для розроблення ПЗ

Виходячи з моделі керування (рис. 1.16), для контролю відхилень розмірів топології ДП та порівняння між собою початкової топології та отриманої після нанесення фотополімерної маски необхідно розробити СТЗ з програмним забезпеченням (ПЗ). Це дасть можливість контролю та обробки результатів експонування топології. Даний тип задач найбільш поширений у кіберфізичних виробничих системах (CPPS).

В основу Industry 4.0 покладені передові дослідження в галузях: штучного інтелекту, робототехніки, хмарних обчислень, адитивних технологій і т.д., синтез застосування яких дозволив удосконалити технологічні процеси виробництва. Розробити новий підхід у вигляді кіберфізичних виробничих систем (CPPS) [1-3]. Особливістю застосування CPPS – синтез фізичного та кібернетичного світу в єдиний інформаційний екопростір, який дозволяє створювати дуже гнучкі переналаштовувані виробничі лінії [4]. Однією з перспективних сфер застосування CPPS вважається їх впровадження в виробництво високотехнологічних виробів радіоелектронного призначення та вдосконалення систем технічного зору.

Обробка зображень топології друкованих плат є важливою складовою Industry 4.0, оскільки зображення можуть бути використані для автоматизованого контролю якості та візуальної інспекції виробничих процесів, пов'язаних з виробництвом друкованих плат. Основні застосування обробки зображень топології друкованих плат в Industry 4.0 включають [5]:

- контроль якості: обробка зображень може використовуватись для контролю якості друкованих плат, наприклад, для виявлення дефектів, які можуть бути непомітні для людського ока. Програмне забезпечення для

обробки зображень може автоматично розпізнавати дефекти, такі як пошкоджені доріжки, коротке замикання, відсутність деталей та інші, та сповіщати операторів про їх наявність;

– візуальна інспекція: обробка зображень може бути використана для візуального контролю друкованих плат у режимі реального часу. Вона може допомогти забезпечити точність та якість продукту під час виробництва;

– моніторинг процесу: обробка зображень може бути використана для моніторингу процесів виробництва друкованих плат. Вона може допомогти відслідковувати рух обладнання, контролювати температуру та інші параметри процесу виробництва;

– автоматичне розпізнавання топології: обробка зображень може бути використана для автоматичного розпізнавання топології друкованих плат. Це може допомогти в автоматизованому процесі монтажу електронних компонентів на друковані плати;

– віртуальна реальність: обробка зображень може бути використана для створення віртуальної моделі топології ДП.

Для обробки зображень використовують різні методи, такі як [6]:

– фільтрація зображень – використовується для зменшення шуму на зображенні, покращення контрасту та інших властивостей зображення. До методів фільтрації належать медіанна фільтрація, фільтрація Гауса та інші;

– сегментація зображень – використовується для виділення окремих об'єктів на зображенні. Це може бути корисно для автоматизованого розпізнавання об'єктів, класифікації зображень та іншого;

– визначення ознак – використовується для виділення специфічних ознак зображення, таких як кольорові характеристики, форма та текстура. Це може бути корисно для класифікації зображень та іншого;

– розпізнавання образів – використовується для автоматичного розпізнавання об'єктів на зображенні та класифікації зображень за допомогою алгоритмів машинного навчання.

Ці методи обробки зображень можуть використовуватися окремо або в комбінації для досягнення певної мети аналізу зображення. Для вирішення задачі аналізу та порівняння зображень заданої та отриманої топологій ДП, необхідно підготувати зображення для подальшої обробки та порівняння за допомогою машинного зору. Дане завдання розробки програмного забезпечення складається з наступних етапів та графічних бібліотек: фільтрація; нормалізація (масштабування і поворот); виділення реперних точок; нормалізація (масштабування і поворот).

2.2 Методи фільтрації зображень

2.2.1 Лінійна фільтрація

Лінійні фільтри є частиною сімейства фільтрів і відрізняються своїм простим математичним описом, але надають можливість досягти різноманітних результатів. Опис лінійного фільтра визначається матеріально значущою функцією F , яка задана на растровому зображенні. Ця функція відома як ядро фільтра, і сам процес фільтрації виконується за допомогою операції дискретної згортки (зваженого підсумовування).

$$B(x, y) = \sum_i \sum_j F(i, j) \cdot A(x + i, y + j) , \quad (2.1)$$

Зазвичай ядро фільтра відрізняється від нуля тільки в певній області навколо точки $(0, 0)$, а за її межами значення $F(i, j)$ або дорівнює нулю, або дуже близьке до нього, таким чином, його можна ігнорувати. Ядро фільтра, що визначено на прямокутній області N , може бути представлено як матриця розміром $m \times n$, за умови, що довжини її сторін є непарними числами. Для задання матриці M_{kl} ядра її слід центрувати (2.2):

$$F(i, j) = M_i \frac{m-1}{2} j + \frac{n-1}{2} , \quad (2.2)$$

Коли піксель (x, y) розташований в межах околів границі зображення, в цьому випадку значення $A(x+i, y+j)$ може вказувати на піксель, що перебуває за межами зображення. Цю проблему можна вирішити декількома методами [44]:

- не проводити фільтрацію для таких пікселів, обрізавши зображення по краях або закрасивши їх, наприклад, чорним кольором;
- не включати відповідний піксель у підсумовування, розподіливши його вагу $F(i, j)$ рівномірно серед інших пікселів околу $N(x, y)$;
- визначити значення пікселів за межами зображення за допомогою екстраполяції;
- визначити значення пікселів за межами зображення за допомогою дзеркального відображення ($A(-2, 5) = A(2, 5)$).

Вибір конкретного способу потрібно робити з урахуванням конкретного фільтру та особливостей конкретного застосування. Також для встановлення необхідного порогу контрастності зображення підключаємо бібліотеку нормалізації зображення (Додаток А). Програмна реалізація коду для ПЗ наведено на рисунку 2.1.

```
public override Image<Gray, byte> Process(Image<Gray, byte> gray)
{
    var normalizedOutput = new Image<Gray, byte>(gray.Width, gray.Height, new Gray(0));
    CvInvoke.Normalize(gray, normalizedOutput, 0, 255, NormType.MinMax);
    return normalizedOutput;
}
public override Image<Gray, byte> Process(Image<Gray, byte> firstImage, Image<Gray,
byte> secondImage)
{
    throw new NotImplementedException("Normalize is non lined image processor");
}
```

Рисунок 2.1 – Програмна реалізація коду лінійної фільтрації

2.2.2 Згладжувальні фільтри

Згладжувальні фільтри діють на зображення аналогічно мутному склу: зображення стає нерізким, розмитим. Найпростіший прямокутний

згладжувальний фільтр радіуса r задається за допомогою матриці розміру $(2r+1) \times (2r+1)$, всі значення якої рівні (2.3):

$$\frac{1}{(2r+1)^2} \quad (2.3)$$

Сума всіх елементів матриці дорівнює одиниці. При застосуванні фільтрації зі вказаним ядром, значення пікселя замінюється середнім значенням пікселів, розташованих у квадраті зі стороною $(2r+1)$ навколо нього [45].

Одним з можливих застосувань фільтрації є приглушення шуму, що означає відновлення вихідного зображення, до пікселів якого додано випадковий шум. Оскільки шум змінюється незалежно для кожного пікселя і за умови, що математичне сподівання значень шуму дорівнює нулю, то шуми сусідніх пікселів буде компенсувати один одного. Збільшення розміру вікна фільтрації призводить до меншої усередненої інтенсивності шуму, але при цьому спостерігається значне розмиття важливих деталей на зображенні.

Припущенням про вихідне не зашумлене зображення є подібність значень інтенсивності пікселів, розташованих поруч. Зазвичай, чим менша відстань між пікселями, тим ймовірніше їхня подібність. Це відрізняє вихідне не зашумлене зображення від шумових компонентів, для яких схожість пікселів не залежить від їхньої відстані. Враховуючи це, можна припустити, що використання прямокутного фільтра для шумозаглушення має суттєвий недолік: пікселі на відстані r від оброблюваного пікселя впливають на результат так само, як і сусідні.

Більш ефективно шумозаглушення можна, таким чином, здійснити, якщо вплив пікселів один на одного буде зменшуватися з відстанню. Цією властивістю володіє гаусівський фільтр з ядром.

$$F_{gauss}(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{i^2 + j^2}{2\sigma^2}\right). \quad (2.4)$$

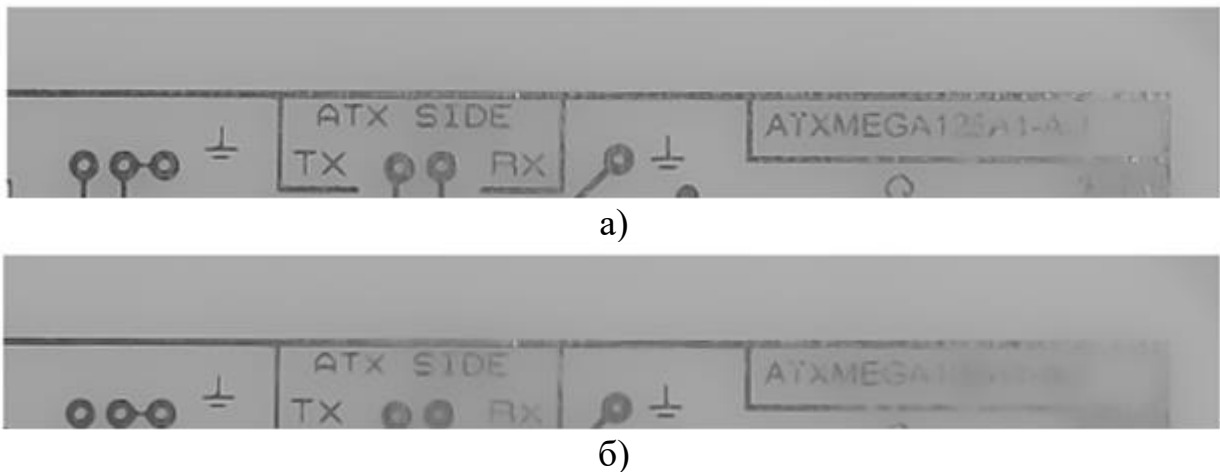
Гаусівський фільтр має ядро нескінченного розміру, але швидко зменшується до нуля при віддалені від точки $(0, 0)$. На практиці можна обмежитися згорткою вікна навколо $(0, 0)$, наприклад, взявши радіус вікна на рівні 3σ . Гаусівська фільтрація також згладжує зображення. На відміну від прямокутного фільтра, точки при гаусівській фільтрації створюватимуть симетрично розмиття пляму, зі спаданням яскравості від середини до країв, набагато більш схожу на реальне розмиття від розфокусування лінз [46]. Очікувано, гаусівська фільтрація є більш ефективною при шумозаглушенні, оскільки вплив пікселів один на одного при гаусівській фільтрації зворотно пропорційний квадрату відстані між ними. Коефіцієнт пропорційності і ступінь розмиття визначаються параметром σ .

Програмно даний метод працює за наступною послідовністю. Виконується конвертація зображення до сірого, після чого створюється матриця пікселів, яка записується, і вмикається функція зниження шумів. Після цього оброблене зображення виводиться на екран. Програмна реалізація наведена на (рис 2.2), повний файл бібліотеки в Додатку Б.

```
public override Image<Gray, byte> Process(Image<Gray, byte> gray)
{
    Mat output = new Mat();
    CvInvoke.FastNlMeansDenoising(gray.Mat, output, DenoiseFactor);
    return output.ToImage<Gray, byte>();
}
```

Рисунок 2.2 – Програмна реалізація згладжуючого фільтру

На рисунку 2.3 наведені приклади роботи коду за різних значень згладжування зображення.



а – при автоматичному значенні порогу згладжування 7; б – при значенні порогу згладжування зображення 15.

Рисунок 2.3 – Реалізація глобальної бінарзації

2.2.3 Бінаризація

Процес бінаризації зображення полягає у перетворенні кольорового зображення в двоколірне чорно-біле. Основним параметром цього процесу є поріг t , який порівнюється з яскравістю кожного пікселя. Внаслідок цього порівняння пікселю присвоюється значення 0 або 1. Це значення порогу є ключовим критерієм перевірки інтенсивності кожної точки на зображенні [47, 48].

Існують різні методи бінаризації, які можна умовно розділити на дві групи – глобальні та локальні.

У першому випадку величина порогу залишається незмінною протягом усього процесу бінаризації. Математично це можливо описати виразом (2.5). У випадку адаптивної бінаризації, зображення розбивається на області, в кожній з яких обчислюється локальний поріг.

$$f(i, j) = \begin{cases} 0, & (i, j) < t \\ 1, & (i, j) \geq t \end{cases} \quad (2.5)$$

Функція глобальної бінаризації представлена на рисунку 2.4.

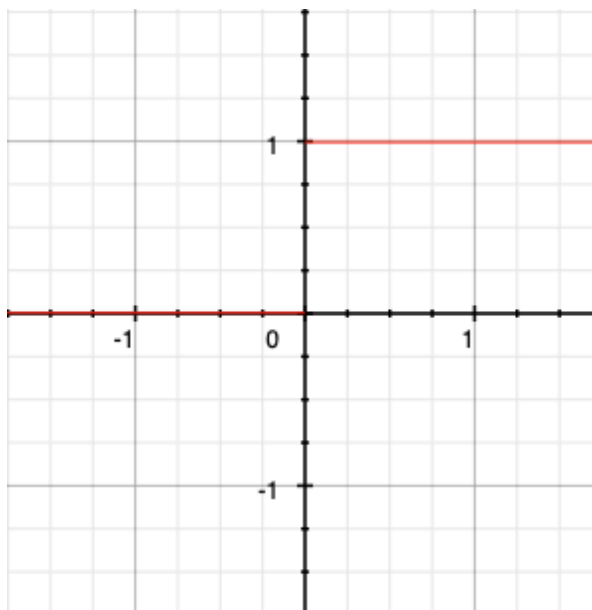
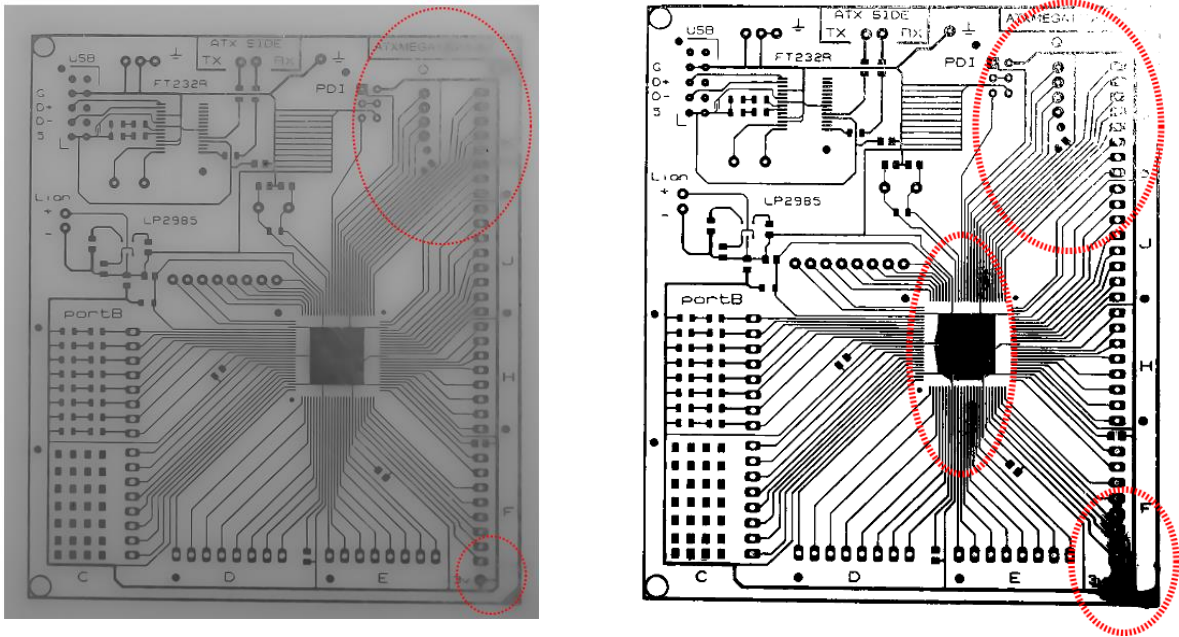


Рисунок 2.4 – Функція бінаризації

Головна мета бінаризації – це зменшення кількості інформації та залишення основних даних, з якими буде провадиться подальша обробка. Глобальна та локальна бінаризація являє собою базову обробку, і такий спосіб погано підходить для зображень з великим контрастом та з великою кількістю шумів [49, 50]. Це пов'язано з визначенням порогових значень обробки пікселів (рис. 2.5).

Ефективна бінаризація значно спрощує подальшу обробку зображення. З іншого боку, невдачі у процесі бінаризації можуть призвести до неполадок, таких як розриви у лініях, втрата значущих деталей, порушення цілісності об'єктів, поява шуму і непередбачувані спотворення символів через неоднорідності фону [51].



а) б)
а – вхідне зображення; б – бінаризоване зображення

Рисунок 2.5 – Реалізація глобальної бінаризації

Бібліотека бінаризації зображення наведена в Додатку В. Програмна реалізація наведена на рисунку 2.6.

```
public override Image<Gray, byte> Process(Image<Gray, byte> gray)
{
    if (IsOtsu)
    {
        _treshold = (int)this.Otsu(gray);
    }
    var binary = gray.ThresholdBinary(new Gray(_treshold), new Gray(255));
    if (binary != null)
    {
        return binary;
    }
    return gray;
}
```

Рисунок 2.6 – Програмна реалізація бінаризації зображення

У даній стоці коду виставляємо умову. Якщо порог знаходиться, то автоматично підключаємо метод Otsu, якщо ні, то вказуємо значення порогу Otsu власноруч.

2.2.4 Метод Otsu

Для визначення порогових значень у бінаризації застосовується метод Otsu. Головна задача даного методу «Otsu» знаходження необхідного порогового значення бінаризації. Процес відокремлення пікселів переднього плану від фону називається порогуюванням. Це метод на основі дисперсії для знаходження порогового значення, за якого зважена дисперсія між пікселями переднього і заднього плану є найменшою. Ключова ідея полягає в тому, щоб перебрати всі можливі значення порогу і виміряти розкид пікселів переднього і заднього планів. Потім потрібно знайти поріг, за якого розкид буде найменшим [52, 53].

Алгоритм ітеративно шукає поріг t , який мінімізує внутрішньокласову дисперсію, визначену як зважена сума дисперсії двох класів (фону і переднього плану). Кольори у відтінках сірого зазвичай знаходяться в діапазоні 0-255 (0-1 у випадку плаваючого відтінку). Отже, якщо ми виберемо поріг 100, то всі пікселі зі значеннями менше 100 стануть фоном, а всі пікселі зі значеннями більше або дорівнюють 100 стануть переднім планом зображення. Формула для знаходження внутрішньокласової дисперсії за будь-якого порогу t має вигляд (2.9).

$$\sigma_m^2(t) = \sigma_{bg}(t)\sigma_{bg}^2(t) + \sigma_{fg}(t)\sigma_{fg}^2(t), \quad (2.9)$$

де, σ_{bg} та σ_{fg} – ймовірності появи певного виду пікселів для кожного класу за порогового значення t ;

σ_m^2 – зважена за долями сума дисперсії.

Щоб зрозуміти, що означає ймовірність в даному випадку, нехай:

– P_{all} – загальна кількість пікселів у зображенні;

– $P_{BG}(t)$ – кількість пікселів фону на порозі t ;

– $P_{FG}(t)$ – кількість пікселів переднього плану в момент часу t .

Таким чином, ваги ймовірності можливо задати за (2.10) та (2.11):

$$\sigma_{bg}(t) = \frac{P_{BG}(t)}{P_{all}}, \quad (2.10)$$

$$\sigma_{fg}(t) = \frac{P_{FG}(t)}{P_{all}}. \quad (2.11)$$

Дисперсію можна розрахувати за (2.12):

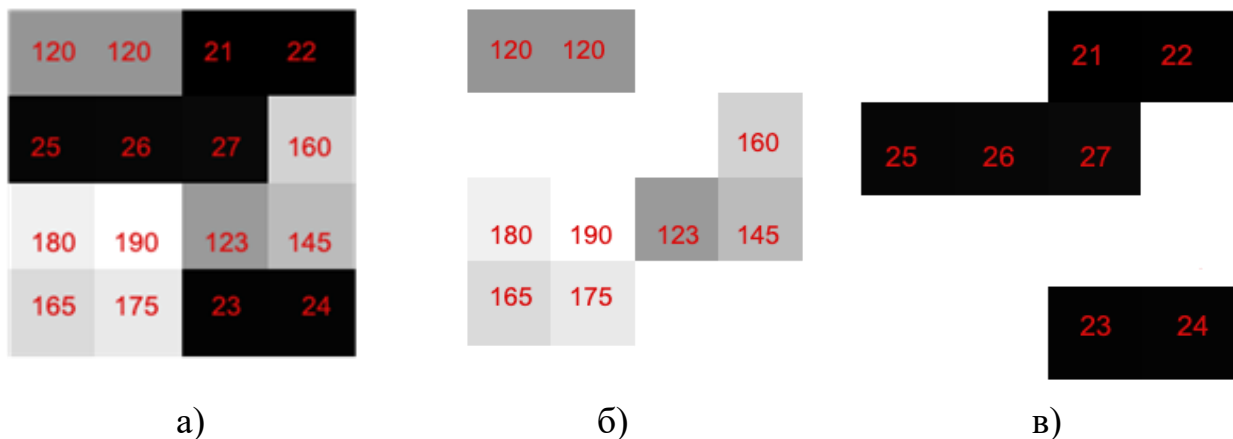
$$\sigma_m^2(t) = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{N - 1}, \quad (2.12)$$

де, x_i – значення пікселя в позиції i у групі (bg або fg);

\bar{x} – середнє значення пікселів у групі (bg або fg);

N – кількість пікселів.

Розглянемо ці формули на прикладі знаходження внутрішньокласової дисперсії за одного порогового значення $t=100$ (рис. 2.7) [53]. Для наведеного зображення (рис. 2.7, а) за умови $T=100$ отримаємо фон і передній план, як показано на (рис. 2.7, б – рис. 2.7, в).



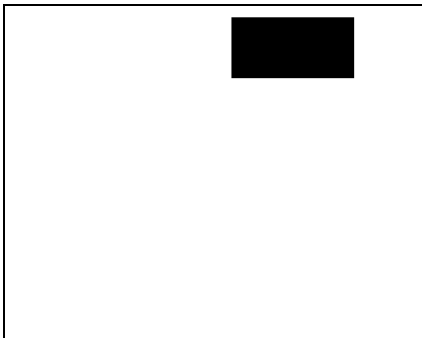
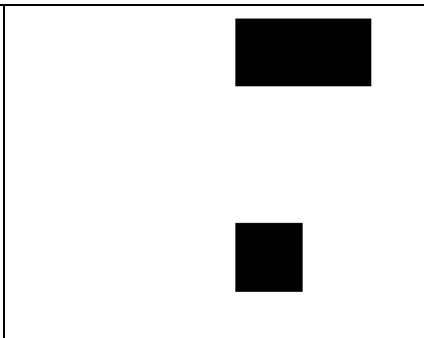
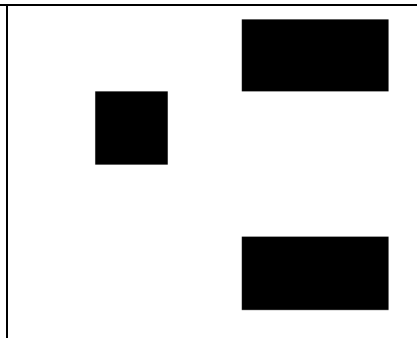
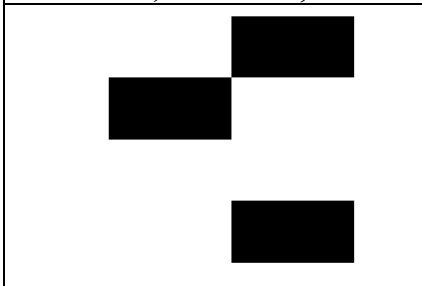
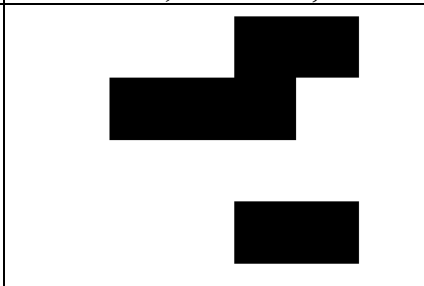
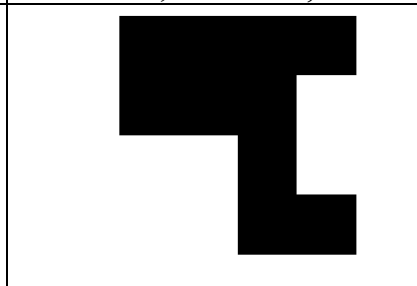
а – повне зображення зі значеннями кольорів пікселів P_{all} ; б – пікселі переднього плану P_{FG} ; в – фонові пікселі P_{BG} .

Рисунок 2.7 – Приклад знаходження дисперсії пікселів зображення за методом Otsu [49]

У даному прикладі загальна кількість пікселів P_{all} дорівнює 16. Кількість пікселі в переднього плану P_{FG} дорівнює 7, а фонових пікселів P_{BG} – 9. Якщо підставити ці значення в (2.10) та (2.11), отримуємо значення

ймовірностей ω_{bg} , яке дорівнює 0,44, а ω_{fg} дорівнює 0,56. Тепер, щоб знайти дисперсію, спочатку знайдемо середнє значення x_{bg} та x_{fg} . Для цього окремо складаємо всі значення пікселів переднього плану та фонові пікселі і ділимо і x на кількість. Отримуємо: x_{bg} дорівнює 24, а x_{fg} 153,1. Дисперсії σ_{bg}^2 та σ_{fg}^2 , отриманих на основі (2.12) [52, 53]. Мають значення 4 та 657,43. Після цього, підставляючи отримані результати в формулу 2.12, знаходимо дисперсію значень кольорів σ^2 . У даному випадку σ^2 дорівнює 369,9208. Аналогічно ми можемо знайти і для інших значень t (табл. 2.1).

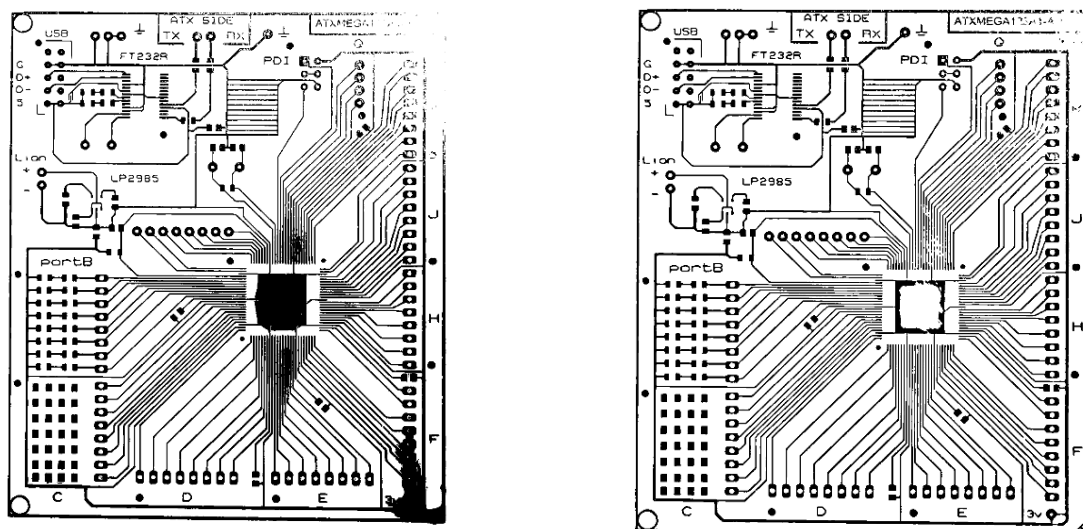
Таблиця 2.1 – Виявлення порогу бінаризації за методом Otsu [52]

		
$t=22, \sigma^2=4092,58$	$t=23, \sigma^2=3667,6$	$t=25, \sigma^2=2642,35$
		
$t=26, \sigma^2=2009,93$	$t=28, \sigma^2=371,55$	$t=124, \sigma^2=1316,48$

Значення дисперсії залишається однаковим від 28 до 120. Наведені вище дисперсії, то вони найменші за умови $T=28$ або, точніше, між 28 і 120. Таким чином, поріг дорівнює 28.

Різні методи бінаризації мають свої слабкі місця: так, наприклад, метод Otsu може призводити до втрати дрібних деталей і «злипання» прилеглих символів за умови невірного вибору прогонового значення (рис. 2.8).

Бібліотека бінаризації зображення за методом Otsu наведена в Додатку В.



а) – бінаризоване зображення; б) – бінаризоване зображення за методом Otsu

Рисунок 2.8 – Приклад роботи методу Otsu для бінаризації зображень

2.2.5 Адаптивна бінаризація з визначенням «Block size»

Адаптивна бінаризація – це метод бінаризації зображень, за якого поріг бінаризації змінюється залежно від локального середнього значення пікселів в околі кожного пікселя. Адаптивна бінаризація виконується шляхом обчислення локального середнього значення пікселів у певному околі «Block size» навколо кожного пікселя, і потім порогове значення вибирається залежно від цього середнього значення. Якщо значення пікселя більше за поріг, то він вважається білим, інакше – чорним [54].

Цей метод використовується для бінаризації зображень зі змінним освітленням або шумами, які можуть змінювати глобальний поріг бінаризації. Дані властивості адаптивної бінаризації підходять для використання цих методів в аналізі та порівнянні між собою технічних зображень у виробництві, отриманих за допомогою систем технічного зору. Цей метод застосовується в багатьох областях, таких як розпізнавання символів, аналіз зображень, медична діагностика тощо.

Основними параметрами для адаптивної бінаризації є:

– метод знаходження середнього значення пікселів у сканованій ділянці (середнє значення за Гаусом);

– розмір скупної ділянки «Block size».

«Block size» в бінаризації означає розмір блоку, на який розбивається зображення перед застосуванням бінаризації. Зазвичай зображення розбивається на блоки однакового розміру, і для кожного блоку окремо застосовується бінаризація.

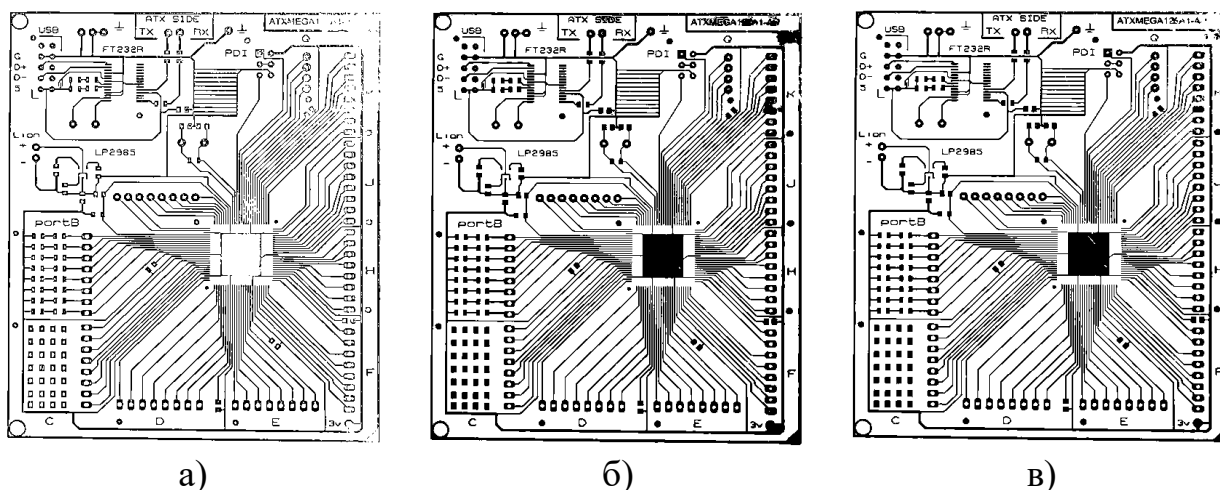
Розмір блоку в бінаризації може впливати на якість результату. Якщо блоки занадто маленькі, то деякі деталі можуть бути втрачені, а якщо блоки занадто великі, то результат може бути неоднорідним. Оптимальний розмір блоку залежить від розміру зображення, характеру зображення та застосовуваного методу бінаризації. Зазвичай для зображень високої роздільної здатності, таких як зображення медичних знімків або зображення високої якості, використовуються більші блоки, тоді як для зображень низької роздільної здатності, таких як зображення з веб-камер або мобільних телефонів, використовуються менші блоки. За своєю сутністю «Block size», є матрицею, в якій знаходяться значення пікселів (рис. 2.9).

i	5	120	223	45	154	68
	26	201	167	190	250	89
	78	143	208	80	158	184
	67	223	251	165	95	47
	84	245	84	68	135	69
	82	255	123	175	205	54
				j		

Рисунок 2.9 – Приклад області Block size 3×3

Залежності від розмірів цієї матриці, змінюється здатність розпізнавання дрібних елементів зображення в бінаризації. Чим більше

значення розмірів матриці «Block size», тим складніше деталізувати малі елементи, та навпаки: чим менше розмір матриці, тим більше знаходження дрібних елементів (рис. 2.10) [55].



а) порогове значення «Block size» дорівнює 23; б) порогове значення «Block size» дорівнює 423; в) автоматичне знаходження значення «Block size»

Рисунок 2.10 – Приклад знаходження області «Block size» за пропонуваним алгоритмом

Залежно від складності зображення необхідно підбирати власні значення «Block size», що займає час у процесі обробки. Тому розробка автоматизованого знаходження значення «Block size», для різних зображень із різними типами елементів, є актуальною задачею [56].

«Block size» завжди повинен бути не парним числом для проведення сканування зображень з довільним розміром.

Для автоматичного вибору значень «Block size» був побудований наступний алгоритм дій:

- знаходимо глобальний порог бінаризації (t) за допомогою методу Otsu;
- бінаризуємо зображення та знаходимо середнє квадратичне відхилення (σ);

– якщо отримане значення парне, то віднімаємо одиницю, якщо значення не парне, то залишаємо, як є та підставляємо це значення в пошуку «Block size» (рис. 2.11).

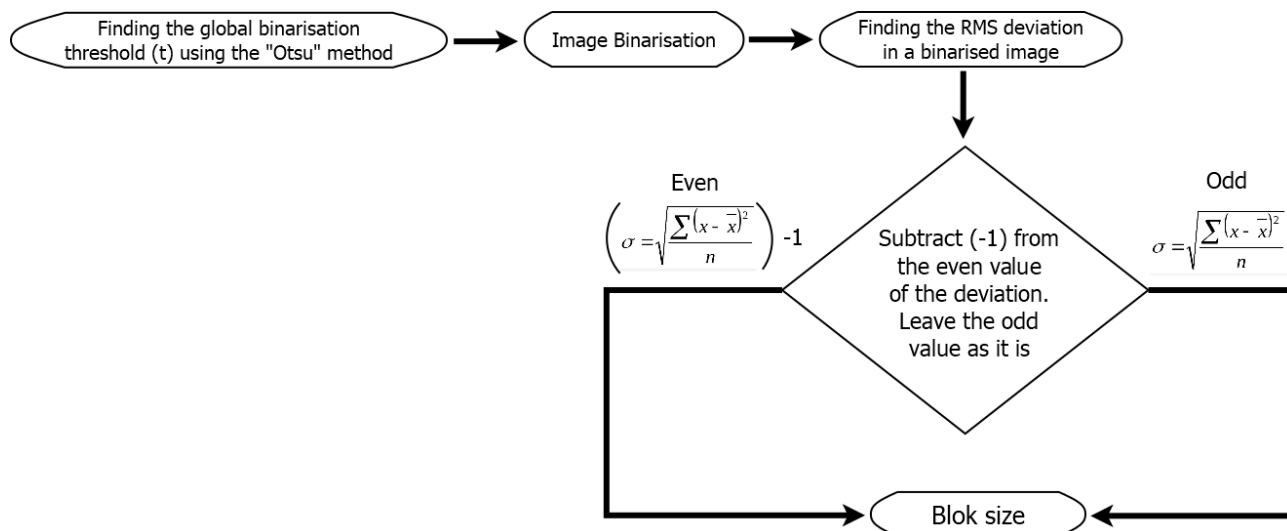
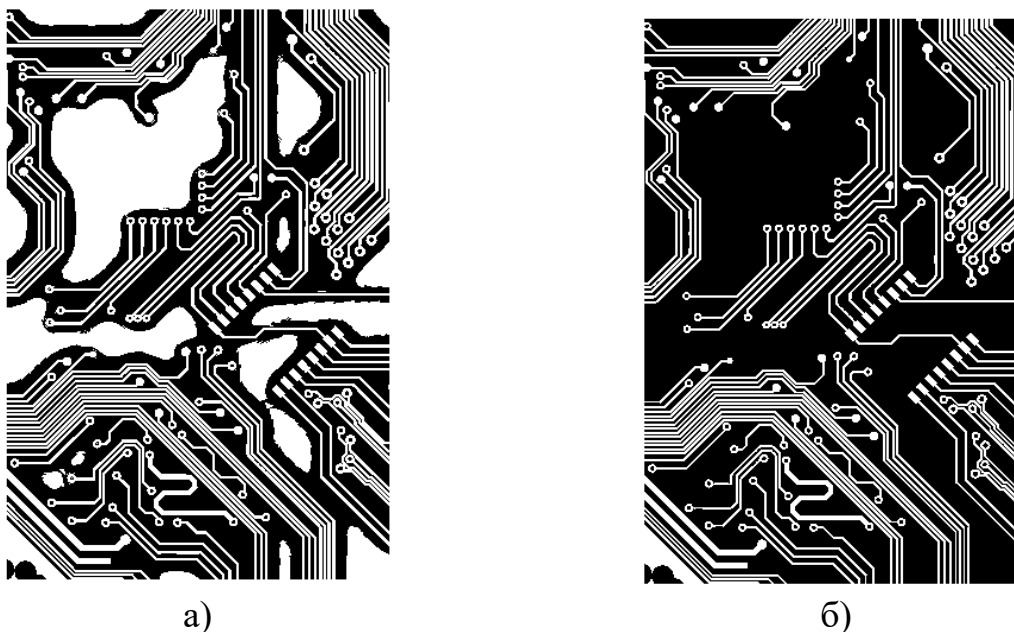


Рисунок 2.11 – Алгоритм знаходження автоматичного значення «Block size»

В даному підході ми знаходимо значення середнього квадратичного відхилення вже в бінаризованому зображенні, це дає інформацію про відхилення значень фону (наприклад, білий колір) та деталі (наприклад, чорний колір) зображення, яку можна використовувати як розмір скануючої ділянки «Block size».

За результатами розробленого алгоритму пошуку розмірів скануючої ділянки «Block size» в бінаризації технологічних зображень топології ДП можливо виділити наступні переваги даного методу (рис. 2.12):

- автоматичне знаходження оптимальної скануючої області «Block size»;
- опір шумам зображення без використання згладжувальних фільтрів;
- знаходження деталей у зонах перепаду контрасту.



а) глобальна бінаризація; б) адаптивна бінаризація з автоматичним налаштуванням розміру скануючої ділянки

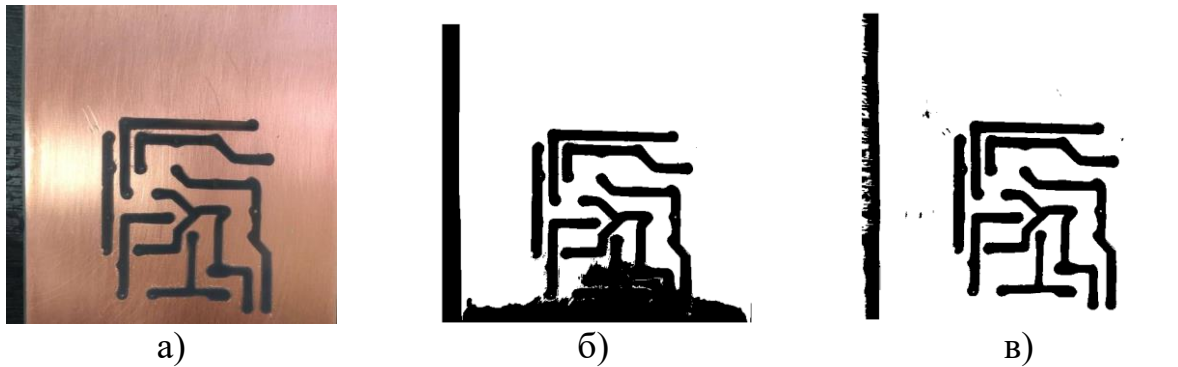
Рисунок 2.12 – Результати роботи алгоритму

Сенс використання середнього квадратичного відхилення у бінаризованому зображенні як розміру вікна у адаптивній бінаризації полягає у наступному:

- по-перше, даний підхід дозволяє отримати глобальне бінаризоване зображення з автоматичним порогом за методом «Otsu»;
- по-друге, використання середнє відхилення в бінаризованому зображенні, так як це дає середнє значення між розміром фону та елементами зображення.

Таким чином, отримуємо середнє оптимальне значення для виконання бінаризації і, як можна побачити з прикладів, автоматична адаптивна бінаризація дає (рис. 2.13):

- зменшення впливу шумів;
- зменшення перепаду контрасту;
- можливість знаходити більше деталей.



а) реальне зображення; б) бінаризоване зображення; в) бінаризоване зображення за пропонуваним алгоритмом з розміром значення сканованої ділянки

Рисунок 2.13 – Результати вдосконаленої бінаризації

З використанням автоматичного вікна сканування така обробка стає більш швидкою і більш точною.

До недоліків даного методу можливо віднести наступне:

- більш повільний, ніж звичайна глобальна бінаризація;
- параметр відхилення, а отже і знаходження порогу, залежить від глобальної бінаризації.

Бібліотека адаптивної бінаризації наведена в Додатку Г. На рисунку 2.14 наведений інтерфейс розробленої програми для обробки зображень з включенням адаптивної бінаризації.

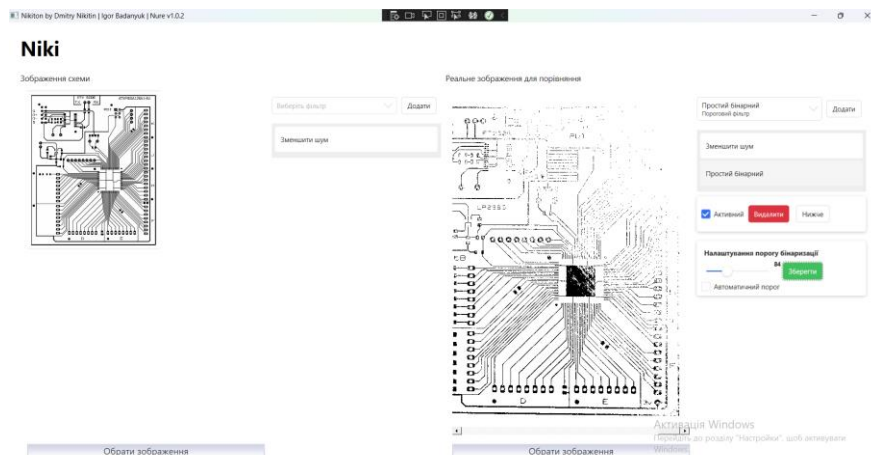


Рисунок 2.14 – Інтерфейс програми з адаптивною бінаризацією

2.3 Методи вирівнювання зображення

Технологія знаходження ключових точок зображень знаходить застосування в різних галузях, таких як вирівнювання зображень, обробка медичних зображень. Шляхом виділення характерних точок з певними особливостями для опису та реєстрації зображення, алгоритм реєстрації на основі особливостей пропонує численні переваги, включаючи низьку обчислювальну складність (у порівнянні з моделями штучного інтелекту), високу стабільність та ефективність реєстрації. Тому порівняння та вирівнювання широко використовується в галузі обробки зображень.

У класичних алгоритмах виділення ознак відзначаються такі методи, як SIFT (Scale-Invariant Feature Transform – масштабно-інваріантне перетворення ознак) [57, 58], прискорені стійкі ознаки SURF (Steerability Uniformity and Robustness Evaluation – оцінка рівномірності керованості та надійності) [56], орієнтовані ознаки, отримані за допомогою FAST (Features from Accelerated Segment Test – прискореного сегментарного тесту), та BRIEF (Binary Robust Independent Elementary Features – бінарні стійкі незалежні елементарні функції).

Також варто відзначити такі методи орієнтованих FAST та обернених BRIEF, як ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF – орієнтований FAST та повернутий BRIEF) [58], BRISK (Binary Robust Invariant Scalable Keypoints – бінарні стійкі інваріантні масштабовані ключові точки) [59], KAZE (Keypoint Aligned Zone Extractor – виділення вирівняних зон за ключовими точками) [60, 61], AKAZE (Accelerated-Keypoint Aligned Zone Extractor – прискорений пошук зон з вирівнюванням за ключовими точками) [62 - 64], а також різноманітні покращені версії цих алгоритмів.

Одними з доступних методів для виділення ознак в зображеннях є методи: BRISK, ORB та AKAZE.

Алгоритм ORB поєднує у собі оптимізований оператор визначення кутів FAST і дескриптор BRIEF, що сприяє значному підвищенню швидкості

обчислень. Однак він не забезпечує масштабної інваріантності. З іншого боку, алгоритм BRISK виділяє кутові особливості за допомогою адаптивного та загального прискореного сегментного тесту [65] і будує двійкові дескриптори, порівнюючи значення сірого кольору пікселів. Незважаючи на високу швидкість обчислень, його надійність низька. Новий алгоритм KAZE, що є модифікованою версією Harris-Z [66] використовує нелінійну дифузійну фільтрацію в нелінійному масштабному просторі для виявлення двовимірних характерних точок, зберігаючи межу об'єкта та досягаючи високої точності та деталізації.

Однак це пов'язано з високими обчислювальними витратами. У порівнянні з алгоритмом KAZE, який використовує адитивний оператор або схеми розщеплення, прискорена версія алгоритму KAZE – AKAZE використовує систему чисельного аналізу швидкої явної дифузії FED (Feature Enhanced Descriptor – дескриптор з розширеними можливостями) [67] для розв'язання рівняння нелінійної дифузійної фільтрації. Це підвищує точність і знижує складність реалізації.

Хоча модифікований двійковий бінарний алгоритм з локальними різницями (M-LDB) [68] в AKAZE значно прискорює час зіставлення описів ознак, його стійкість і розрізнявальна здатність не досягають таких високих показників, як у дескриптора SIFT [69], особливо під час виконання обертань, перспективних перетворень і змін масштабу. У випадку швидкісних візуальних подібностей [70] основний акцент зроблений на використанні відстані Хеммінга замість евклідової відстані для визначення відповідності або невідповідності між двома ознаками. З іншого боку, LDANHash [71] використовує лінійний дискримінантний аналіз та перетворює дескриптори в двійкову форму через встановлений поріг. Всі ці підходи зорієнтовані на покращення швидкості роботи алгоритму, а не його точності.

2.3.1 Метод AKAZE

Нелінійний масштабний простір являє собою набір різних масштабів вхідного зображення, які організовані в октави. Кожна октава містить чотири підрівні в алгоритмі AKAZE. На рисунку 2.15 наведено псевдокод алгоритму для двох октав [72].

Input: Input image Output: Output images Preprocessing: $L_{t^0} \leftarrow \text{Gaussian filter}(\text{Input image})$ Compute Kcontrast using input image for Octave = 1 to 2 for Sublevel = 1 to 4 Diffusivity: Compute L_{flow} based on L_t and Kcontrast for all pixels. FED: for $j = 1$ to $N // N$ varies for different sublevels. Compute L_{step} using L_{flow} and L_t $L_t \leftarrow L_t + L_{step}$ end for loop Output images { Octave, Sublevel } $\leftarrow L_t$ end for loop Resize image end for loop

Рисунок 2.15 – Псевдокод алгоритму AKAZE [72]

Алгоритм AKAZE включає два основних кроки попередньої обробки для генерації нелінійного масштабного простору та підготовки зображення для подальшого аналізу.

На першому кроці зображення підлягає гаусівській фільтрації для зменшення шуму, і обчислюється коефіцієнт контрастності зображення, який грає важливу роль у виділенні деталей. Цей коефіцієнт контрастності використовується на подальших етапах алгоритму [73, 74].

Другий крок полягає в обчисленні функції провідності з використанням градієнтів зображення та раніше обчисленого коефіцієнта контрастності, отриманого на попередньому етапі. Ця функція визначає, наскільки детально межі зображення будуть зберігатися у процесі подальшого розгортання. У даній роботі ми використовуємо функцію провідності [62] у вигляді (2.13), щоб врахувати цей аспект.

$$L_{flow}(i, j) = \frac{1}{1 + \frac{L_x^2(i, j) + L_y^2(i, j)}{K^2}}, \quad (2.13)$$

де, K – коефіцієнт контрастності, а L_x та L_y – градієнти зображення, обчислені за допомогою фільтра Шарра в горизонтальному та вертикальному напрямках відповідно.

Використовуємо параметри фільтра Шарра, як показано на рис. 2.16.

$$\text{Vertical filter} \begin{bmatrix} +3 & +10 & +3 \\ 0 & 0 & 0 \\ -3 & -10 & -3 \end{bmatrix} \quad \text{Horizontal filter} \begin{bmatrix} +3 & 0 & -3 \\ +10 & 0 & -10 \\ +3 & 0 & -3 \end{bmatrix}$$

Рисунок 2.16 – Ваги у фільтрі Шарра

На третьому і останньому етапах обчислення FED отримуємо результат, позначений як L_{flow} , який обчислюється для кожного пікселя у зображенні. На цих етапах також створюється новий підрівень масштабного простору, використовуючи L_{flow} та дані з попереднього підрівня [73]. Процес FED включає в себе кілька ітерацій N , кількість яких змінюється залежно від рівня масштабного простору. Значення N для кожного підрівня визначається за допомогою попередньо обчисленого масиву з оригінального алгоритму AKAZE [62]. На кожному етапі значення постійного розміру кроку множиться на фільтрі.

У процесі FED на кожному етапі обчислюється сума значень центрального пікселя разом з чотирма його сусідніми пікселями у вертикальному і горизонтальному напрямках L_{flow} множенням на різницю між центральним пікселем і чотирма сусідніми пікселями вертикальними та горизонтальними з попереднього підрівня. Ця операція даного множення називається L_{step} . Обчислення FED представлені у (2.14) і (2.15).

$$L_{step}(i, j) = \sum \left(L_{flow}(i, j) + L_{flow}(i + k_1, j + k_2) \right) + (L_t^n(i, j) - L_t^n(i + k_1, j + k_2))s, \quad (2.14)$$

де, $k_1, k_2 \in \{-1, 1\}$, де L_{step} – результат FED обчислення;

L_t – попередній підрівень;

s – розмір кроку (константа, яка є різною для кожного підрівня) [75].

Наступний підрівень генерується згідно з (2.15).

$$L_t^{n+1} = L_{step} + L_t^n, \quad (2.15)$$

де, L_t^{n+1} – значення наступного підрівня у нелінійному масштабному просторі.

Бібліотека вирівнювання зображення з методом AKAZE наведена в Додатку Д. Приклад роботи програми наведений на рисунку 2.17.



а)

б)

в)

а – еталоне зображення; б – не вирівняне зображення топології;

в – зображення, вирівняне за допомогою методу AKAZE з знаходженням співпадінь з еталонним зображенням.

Рисунок 2.17 – Реалізація методу AKAZE

2.3.2 Метод BRISK

Алгоритм BRISK складається з трьох основних етапів: виявлення ключових точок, створення описів для ключових точок і зіставлення цих

дескрипторів. На початку створюється піраміда масштабного простору, і стабільні екстремальні точки з субпіксельною точністю в неперервному масштабному просторі визначаються за допомогою AGAST (адаптивний оператор виявлення кутів) [76]. Потім створюється двійковий дескриптор для кожного локального зображення, використовуючи відношення сірої шкали випадкових пар точок, які беруться з вибірки в околі цього локального зображення. Нарешті, для зіставлення ознак використовується відстань Хеммінга.

Методологія виявлення ключових точок BRISK походить від AGAST (адаптивний та загальний прискорений сегментний тест) [77]. FAST [76] поширено на площину зображення та масштабний простір. У рамках алгоритму BRISK простір масштабної піраміди складається з n октав c_i та n внутрішніх октавни d_i , де $i=\{0,1,\dots,n-1\}$, зазвичай при $n=4$. Октави утворюються шляхом поступової напівдискретизації вихідного зображення (що відповідає C_0). Кожна внутрішня октава d_i розташована між шарами c_i та c_{i+1} , (рис. 2.18). Перша внутрішня октава d_0 отримана шляхом зменшення дискретизації вихідного зображення C_0 в 1,5 рази, тоді як решта внутрішньооктавних шарів отримані шляхом послідовної половинної дискретизації. Отже, якщо t позначає масштаб, то $t(c_i)=2^i$ та $t(d_i)=1,5(2^i)$.

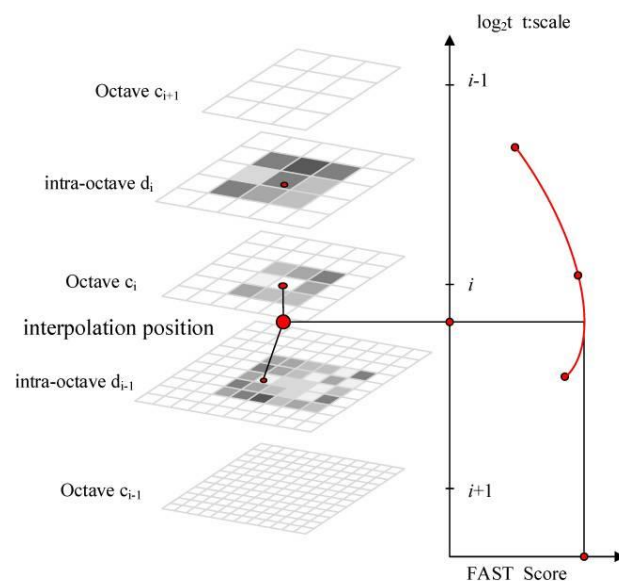


Рисунок 2.18 – Масштабнопросторове виявлення точок інтересу [75]

Алгоритм виявлення ключових точок складається з двох наступних кроків. Спершу детектор FAST 9-16 застосовується до кожної октави і внутрішньооктавних шарів окремо, використовуючи однаковий поріг T , для визначення потенційних областей інтересу. Після цього точки, які належать цим областям, підлягають немаксимальному приглушенню в масштабному просторі. Ключові точки повинні відповідати наступним двом умовам:

- оцінка FAST s_c точки, що виявляється, яка знаходиться в тому ж шарі, повинна бути більшою, ніж у інших восьми сусідніх точок;
- оцінки в шарі вище і нижче повинні бути меншими, ніж оцінка FAST s цієї точки. Виявлення максимумів на осі шкали в октаві c_0 є особливим випадком. Для того, щоб отримати оцінки FAST для віртуальної внутрішньооктавної d_l нижче c_0 , ми застосовуємо маску FAST 5-8 [78] на c_0 . Однак, в цьому випадку не потрібно, щоб оцінки на ділянці d_l були нижчими, ніж оцінка досліджуваної точки в октаві c_0 .

Зважаючи на важливість зображення як неперервної величини, не лише за самим зображенням, але і за його масштабом, ми виконуємо процес субпіксельного та неперервного уточнення масштабу для кожного знайденого піксельного максимуму. Для зменшення складності цього процесу спочатку ми застосовуємо метод найменших квадратів для підбору 2D квадратичної функції до трьох оцінок-плям (які отримані на різних рівнях шару ключової точки-шару вище і нижче), що дозволяє нам отримати три субпіксельні максимуми. Щоб уникнути втрати дискретизації, ми розглядаємо ділянку 3×3 навколо кожної оцінки на кожному рівні. Далі ці покращені оцінки використовуються для побудови одновимірної параболи вздовж шкали, що дає остаточну оцінку рівня яскравості та оцінку масштабу на максимумі. На останньому кроці ми виконуємо повторну інтерполяцію координат зображення між областями на різних рівнях шарів.

Опис ключових точок має суттєвий вплив на подальшу ефективність порівняння дескрипторів та впливає на продуктивність алгоритму в цілому. Кожна ключова точка у методі SIFT включає 128-векторний дескриптор, тоді

як у методі SURF ця кількість становить 64. Під час порівняння дескрипторів SIFT і SURF можливо використовувати лише евклідову відстань, що є менш ефективним методом. На відміну від SIFT та SURF, дескриптор BRISK представлений у вигляді бінарного бітового рядка, який був запропонований Майклом Калондором, і його порівняння здійснюється за допомогою відстані Хеммінга. Іншими словами, обчислення відстані Хеммінга можна провести дуже ефективно, використовуючи побітову операцію XOR.

На відміну від інших алгоритмів, які використовують випадково обрані пари точок для створення бінарних ознак (наприклад, BRIEF), дескриптор BRISK використовує фіксований шаблон для вибірки сусідніх точок для створення ознак. У межах цього шаблону будуються чотири концентричні кола з розміром 40×40 пікселів та центром в точці інтересу. На кожному з цих чотирьох концентричних кіл можна отримати N (де $N=60$) точок з рівномірним розподілом та однаковими відстанями між ними. На рис. 2.18 видно, що маленькі сині кружечки позначають місця вибірки взірців. Щоб уникнути ефекту згладжування під час вибору інтенсивності точки p_i на шаблоні, застосовується гаусове розмиття зі стандартним відхиленням σ_i , яке пропорційне до відстані між точками на відповідному колі, рис. 2.19.

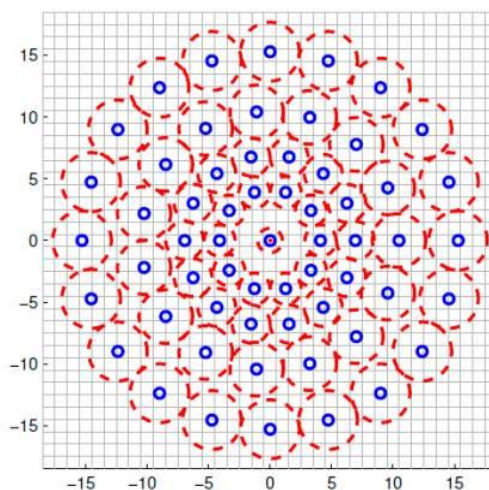


Рисунок 2.19 – Двійкова стійка інваріантна масштабована схема вибірки ключових точок BRISK [78]

Означимо множину пар точок, утворену всіма парами точок вибірки, як A , (2.16):

$$A = \{(p_i, p_j) \in R^2 \times R^2 \mid i < N \wedge j < i \wedge i, j \in N\}, \quad (2.16)$$

де (p_i, p_j) – пара точок множини A .

Значення сірого, згладжені пікселями p_i та p_j , позначаються відповідно як $I(p_i, \sigma_i)$ та $I(p_j, \sigma_j)$. Локальний градієнт між двома точками пікселів визначається наступним чином:

$$g(p_i, p_j) = (p_i - p_j) \times \frac{I(p_j, \sigma_j) - I(p_i, \sigma_i)}{\|p_j - p_i\|}, \quad (2.17)$$

де, $1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq N$.

Відповідно до відстані між парами пікселів, множина точок дискретизації на коротких відстанях визначається як S , (2.18). А множина точок дискретизації на довгих відстанях визначається як L , (2.19).

$$S = \{(P_i, P_j) \in A \mid \|P_i - P_j\| < \sigma_{max}\} \subseteq A, \quad (2.18)$$

$$L = \{(P_i, P_j) \in A \mid \|P_i - P_j\| > \sigma_{min}\} \subseteq A, \quad (2.19)$$

де, σ_{max} – поріг дальніх відстаней, зазвичай становить $9,75t$;

σ_{min} – поріг прицільних відстаней, зазвичай σ_{min} становить $13,67t$;

t – просторовий масштаб характерних точок.

В алгоритмі BRISK вважається, що локальні градієнти знищують один одного, і локальний градієнт не потрібно враховувати під час обчислення загальної градієнтної моди. Таким чином, загальний напрямок моди для характерних точок можна оцінити за допомогою набору L , (2.20):

$$g = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \end{bmatrix} = \frac{1}{l} \times \sum_{(p_i, p_j) \in L} g(p_i, p_j), \quad (2.20)$$

де, l – довжина підмножини далеких пар L ;

$g(p_i, p_j)$ – позначає градієнт пари характерних точок (p_i, p_j) ;

g_x та g_y – сума градієнтів пари далеких точок, заданих по осі x та напрямку осі y .

Для того, щоб побудувати дескриптор з інваріантністю обертання та інваріантністю масштабу, шаблон вибірки повертається на кут θ навколо характерної точки k . θ обчислюється за виразом (2.21).

$$\theta = \text{actan2}(g_y, g_x) , \quad (2.21)$$

Потім порівнюється та каскадується інтенсивність сірого для набору пар на коротких відстанях S , генерується дескриптор ознаки за (2.22).

$$b = \begin{cases} 1, & I(p_j^\theta, \sigma_j) > I(p_i^\theta, \sigma_i) \\ 0, & I(p_j^\theta, \sigma_j) \leq I(p_i^\theta, \sigma_i) \end{cases} \quad (P_i^\theta, P_j^\theta) \in S , \quad (2.22)$$

де, p_i^θ – точка, на яку p_i обертається навколо виділеної точки k за умови повороту на кут θ ;

$I(p_i^\theta, \sigma_i)$ – інтенсивність сірого кольору $I(p_i^\theta, \sigma_i)$ після повороту на кут θ навколо опорної точки k .

Визначення відповідності між дескрипторами досягається через порівняння подібності між дескрипторами двох характерних точок. Оскільки алгоритм BRISK використовує бінарний бітовий рядок, що складається з «1» і «0», для опису виділених точок схожість дескрипторів визначається шляхом обчислення відстані Хеммінга для дескрипторів. Обчислення відстані Хеммінга реалізується за допомогою побітової операції XOR, де беруться два значення. Якщо відповідні біти однакові, результат – «0», інакше – «1». Потім обчислюється статистика кількості «1», і чим більше «1», тим більше відмінностей між двома дескрипторами; в іншому випадку – навпаки. Припустимо, що X та Y – це два дескриптори BRISK, і вони підлягають (2.23).

$$\begin{aligned}
 X &= \chi_1, \chi_2, \dots, \chi_i, \dots, \chi_N ; \\
 Y &= \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_i, \dots, \gamma_N .
 \end{aligned}
 \tag{2.23}$$

де, значення x_i та y_i дорівнюють "1" або "0".

Рівняння відстані Хеммінга задається наступним чином (2.24).

$$HD(X, Y) = \sum_{i=1}^N \chi_i \oplus \gamma_i \sum_{i=1}^n b(\chi_i, \gamma_i) ,
 \tag{2.24}$$

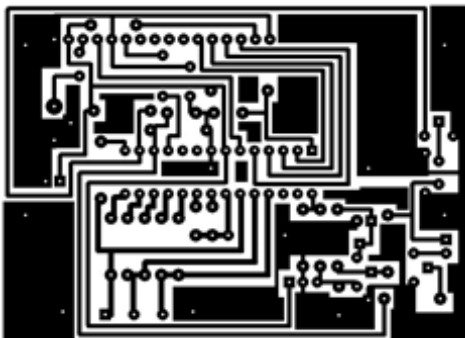
де, $b(\chi_i, \gamma_i)$ позначає бітову нерівність, у рівнянні (формула 2.24) χ_i та γ_i – це i -ті біти дескрипторів X та Y відповідно (2.25).

$$b(x, y) = \begin{cases} 1 & x \neq y \\ 0 & x = y \end{cases} ,
 \tag{2.25}$$

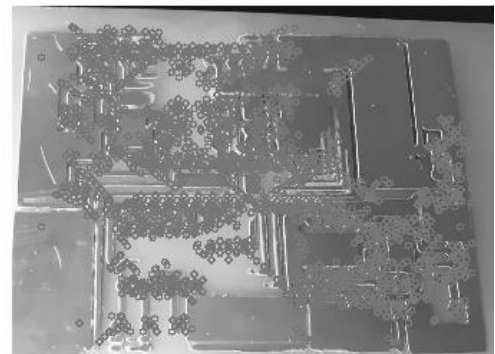
Символ \oplus – це символ XOR. Значення відстані Хеммінга обчислюється для оцінки ступеня збігу двох дескрипторів BRISK. Чим більше значення відстані Хеммінга, тим менший ступінь збігу дескрипторів.

Бібліотека вирівнювання зображення за методом BRISK наведена в додатку Д.

Результати роботи за методом BRISK наведені на рисунку 2.20.



а)



б)

а – початкова топологія; б – оброблене зображення топології методом BRISK

Рисунок 2.20 – Знаходження ключових точок за методом BRISK

2.3.3 Метод ORB

Визначення характерних точок виконується за допомогою ORB, який являє собою поєднання орієнтованого детектора ключових точок FAST та обертового дескриптора BRIEF. Він виявляється набагато швидшим за SURF та SIFT [79], тому він є більш придатним для застосунків, які працюють в реальному часі.

Характерні точки на зображенні можуть бути сприйняті як основні точки, такі як контурні точки, яскраві об'єкти на темному тлі або темні області на світлому фоні. Алгоритм ORB використовує швидкий алгоритм [80-83] для визначення цих ключових точок. Основна ідея цього швидкого алгоритму полягає в порівнянні кожної точки з її сусідами, і якщо вона суттєво відрізняється від більшості навколишніх точок, то вона визнається як особлива точка за (2.26) [84].

$$N = \sum_{x \in \text{circle}(p)} |I(x) - I(p)| > \varepsilon_d, \quad (2.26)$$

де, $I(x)$ – відтінок сірого будь-якої точки на колі;

$I(p)$ – відтінок сірого центру;

ε_d – порогове значення різниці відтінків.

Якщо N більше заданого порогового значення, яке, як правило, становить три чверті навколишніх точок кола, то P вважається точкою-характеристикою.

Процес обчислення FAST можна описати таким чином: спочатку вибирається піксельна точка P і розглядається можливість використання її як опорної точки, як показано на рисунку 2.19. Вважається, що значення яскравості цієї точки дорівнює M . Потім встановлюється певне порогове значення V , наприклад, 20 % від M . Якщо абсолютна різниця в яскравості між P і іншими точками перевищує V , то ці точки вважаються різними. Потім, з точкою P в центрі, відбираються 16 пікселів на колі радіусом 3. P вважається кутовою точкою, якщо середнє значення яскравості L точок з цих 16 більше

за $(M+V)$ або менше від $(M-V)$. Тут L встановлено на 12, і якщо принаймні 12 точок задовольняють цю умову, то P визнається опорною точкою; в іншому випадку вважається, що P не є опорною точкою. Для прискорення обчислень були введені додаткові оптимізації: якщо чотири точки навколо кандидатської точки розглядаються з інтервалом 90 градусів, то принаймні три з них повинні мати значну різницю в яскравості порівняно з кандидатською точкою. У протилежному випадку точка-кандидат не вважається особливою, і додаткові обчислення не проводяться. Схему швидкого визначення характерних точок показано на рисунку 2.21.

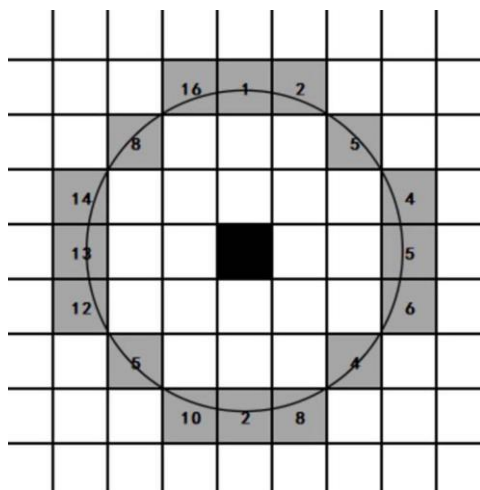


Рисунок 2.21 – Принципова схема виділення швидких особливих точок [76]

Високошвидкісний тест виконується для виключення великої кількості не кутів, у цьому тесті перевіряються лише чотири пікселі з координатами 1, 9, 5 та 13.

Оскільки алгоритм FAST не має можливості визначати напрямок точок, в алгоритмі ORB для досягнення масштабної інваріантності застосовується побудова тришарової піраміди гаусівських зображень [85]. Для забезпечення інваріантності до обертання точок використовується метод сірого центроїда [86]. У зазначеному методі для заданої частини зображення $I(x, y)$ створюється координатна система, де характерні точки визначають початок координат. Далі розраховується положення центроїда в околі цих точок, і

формується вектор, який має початкову точку в характерних точках і кінцеву в центроїді. Для обчислення моменту відносно околу S використовується вираз (2.27).

$$M_{pq} = \sum_{x,y} x^p y^q I(x, y), \quad (2.27)$$

де, $I(x,y)$ – значення сірого кольору зображення, $x,y \in [-r,r]$;

r – радіус околу характерної точки;

S – положення центроїда околу.

За допомогою наведених вище моментів знайдено центр C латки (2.28):

$$C = \left(\frac{M_{01}}{M_{00}}, \frac{M_{10}}{M_{00}} \right), \quad (2.28)$$

Орієнтація θ точки задається за допомогою виразу (2.29):

$$\theta = \tan^{-1} \frac{M_{01}}{M_{10}}. \quad (2.29)$$

Розрахувати дескриптори для характерних точок – це завдання, яке вирішує ORB, застосовуючи вдосконалений алгоритм для створення опису характерних точок. Цей алгоритм вирішує головну проблему, яка полягала в тому, що сам блок не був інваріантним до обертання. Основна ідея його роботи полягає у виборі пар точок N за певним шаблоном, які оточують характерну точку P , і у подальшому об'єднанні результатів порівняння цих пар точок N для створення дескрипторів.

Короткий дескриптор – це простий і швидкий метод, який базується на ідеї, що окіл зображення може бути представлений за допомогою обмеженої кількості контрастів інтенсивності. Ми визначимо критерій τ для області P в межах околу $S \times S$ зображення за допомогою виразу (2.30):

$$\tau(p; x, y) = \begin{cases} 1, & p(x) < p(y) \\ 0, & p(x) \geq p(y) \end{cases}, \quad (2.30)$$

де, $p(x)$ – інтенсивність P в точці x ;

$p(y)$ – інтенсивність P в точці y .

Виберемо n_d та пару позицій (x,y) , яка однозначно визначає бінарний критерій. Короткий дескриптор – це двійковий бітовий рядок розміром n_d розмірностей.

$$f_{nd}(p) = \sum_{1 \leq i \leq n} 2^{i-1} \tau(p; x, y) . \quad (2.31)$$

Значення пікселів можуть складати 128, 256, 512 і так далі. Обираючи різні значення, можливо балансувати між швидкістю обробки, ефективністю зберігання і можливістю ідентифікації зображення.

Критерій сусідства зображень у описі розглядає лише окремий піксель, що робить його чутливим до шуму. Для подолання цього недоліку в методі ORB кожна тестова точка використовує вікно розміром 5×5 у межах 31×31 пікселів. Вибір цього вікна підпорядковується гаусівському розподілу, і для прискорення обчислень використовується інтегральне зображення. Сам опис не має орієнтації і не є інваріантним до обертання. Рішення, запропоноване в методі ORB, полягає у спробі додати напрямок до кожного блоку. У позиції (x_i, y_i) , для будь-якого n бінарних характерних ознак, що визначають матрицю розміром $2n$, використовується вираз (2.32).

$$S = \begin{pmatrix} x_1, x_2, \dots, x_n \\ y_1, y_2, \dots, y_n \end{pmatrix}, \quad (2.32)$$

Використовуючи напрямок околу θ та відповідну матрицю обертання R_θ , побудуємо виправлену версію S , $S_\theta: S_\theta = R_\theta S$. Таким чином, дескриптор Стіда Бріфа має вигляд (2.33).

$$g_n(p, \theta) = f_{nd}(p) | (x_i, y_i) \in S_\theta, \quad (2.33)$$

Після отримання шаблону для управління пошуком, використовуємо алгоритм ретельного пошуку [87], щоб знайти пари блоків розміром 256 пікселів, які мають найнижчу кореляцію серед всіх можливих пар

піксельних блоків. Цей процес призводить до отримання остаточного опису. Схему обчислення дескриптора можна побачити на рисунку 2.22.

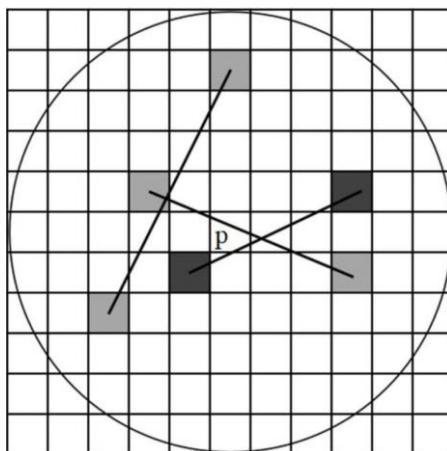


Рисунок 2.22 – Принципова схема розрахунку дескриптора [87]

Бібліотека вирівнювання зображення за методом ORB наведена в додатку Д.

2.4 Порівняння зображень за методом SAD

У процесі обробки цифрових зображень сума абсолютних різниць SAD (Sum of Absolute Differences) служить як міра подібності між різними блоками на зображенні. Її обчислення полягає у визначенні абсолютної різниці між кожним пікселем у вихідному блоці і відповідним пікселем у блоці, який порівнюється. Після цього, всі ці різниці складаються, щоб отримати просту метрику схожості між цими блоками. Ця метрика може також інтерпретуватися як норма L^1 різницевого зображення або Манхеттенська відстань між двома блоками зображень [88 – 90].

Сума абсолютних різниць (SAD) може мати різноманітні застосування, такі як:

- розпізнавання об'єктів: SAD може бути використана для порівняння областей на зображенні та визначення ступеня їхньої подібності, що корисно для завдань розпізнавання об'єктів;

– створення карт розбіжностей для стереозображень: вимірюючи різницю між відповідними пікселями на лівому і правому стереозображеннях за допомогою SAD, можна створити карту розбіжностей, яка використовується для визначення глибини об'єктів на зображенні;

– оцінка руху для стиснення відео: SAD може бути використана для визначення різниці між кадрами відео, що допомагає в оцінці руху об'єктів у відеопослідовності. Ця інформація може бути використана для стиснення відео і зменшення обсягу даних без значної втрати якості.

У даному прикладі використовується сума абсолютних відмінностей для визначення того, яка частина пошукового зображення найбільше схожа на зображення-шаблон. У цьому конкретному випадку розмір шаблонного зображення становить 3×3 пікселі, тоді як зображення для пошуку має розмір 3×5 пікселів. Кожен піксель на зображеннях представлений одним цілим числом від 0 до 9, що можна побачити на рисунку 2.23.

Шаблон	Зображення для пошуку				
2 5 5	2	7	5	8	6
4 0 7	1	7	4	2	7
7 5 9	8	4	6	8	5

Рисунок 2.23 – Сума абсолютних відмінностей

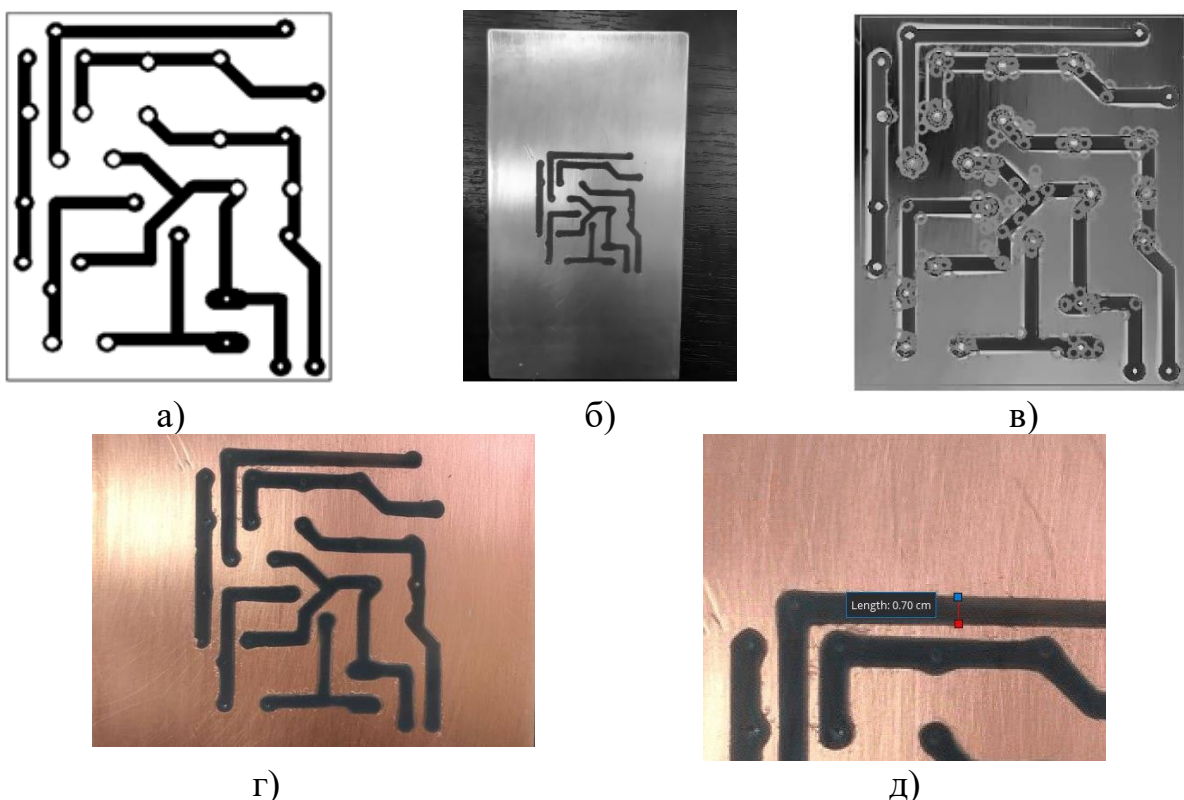
На зображенні існують рівно три унікальних місця, де може бути поміщений шаблон: лівий бік зображення, центр зображення та правий бік зображення. Для обчислення значень суми абсолютних різниць (SAD) використовується абсолютна різниця між кожною відповідною парою пікселів. Наприклад, різниця між 2 та 2 дорівнює 0 або 4, 1 дорівнює 3 або 7, а 8 дорівнює 1 і так далі. Обчислення значень абсолютної різниці для кожного пікселя для трьох можливих розташувань шаблону призводить до наступних результатів, які можна побачити на рисунку 2.24.

Ліва частина	Центральна частина	Права частина
0 2 0	5 0 3	3 3 1
3 7 3	3 4 5	0 2 0
1 1 3	3 1 1	1 3 4

Рисунок 2.24 – Обчислення значень абсолютної різниці

Для кожної з цих трьох областей зображення, сума абсолютних різниць (SAD) для 9 пар відповідних пікселів складається як 20, 25 та 17 відповідно. На основі цих значень SAD можна зробити висновок, що права частина пошукового зображення найбільше схожа на шаблонне зображення, оскільки має найменшу суму абсолютних різниць порівняно з двома іншими областями.

Бібліотека SAD наведена в додатку Е. Приклад роботи програми наведений на рисунку 2.25.



а – еталоне зображення; б – отримане зображення топології; в – результат обробки обчислення зображень методом SAD; г – готовий зразок фотополімерної маски; д – розмір, визначений системою технічного зору

Рисунок 2.25 – Реалізація методу SAD

2.5 Висновки до другого розділу

У другому розділі розглянуто такі питання:

- 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 бінаризацію з використанням методу порогового значення Otsu;
- вдосконалено спосіб використання алгоритму «Block size» для адаптивної бінаризації зображення;
- розглянуті методи вирівнювання зображення на базі методу AKAZE, BRISK, ORB;
- розглянуті методи порівняння зображень на основі суми абсолютних різниць SAD;
- розроблено програмне забезпечення для контролю відхилень фотополімерної маски та порівняння отриманих топологій з еталонним зображеннями у процесі експонування топології ДП.

На основі проведеної роботи можливо буде спостити процес дослідження на етапі вимірювання відхилень фотополімерних масок під час експонування топології ДП та порівнянні отриманої топології з початковим зображенням провідникової структури.

Основні результати другого розділу опубліковано у роботах [44, 56].

Список джерел, які використано у другому розділі, наведено у переліку джерел посилань [1 – 6, 45 – 55, 57 – 90].

3 АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ НАГРІВАННЯ ФОТОПОЛІМЕРНОЇ СМОЛИ ПІД ЧАС ЕКСПОНУВАННЯ ТОПОЛОГІЇ ДП

3.1 Постановка задачі

Незалежно від обраної технології фотополімерного 3D-друку можна ідентифікувати основні фактори, що впливають на стан об'єкта управління, а саме на відхилення геометричних розмірів моделі. Для зручності їх можна поділити на дві групи:

- 1 параметри налаштування експонування шарів моделі;
- фізико-хімічні властивості фотополімерної смоли.

Параметри налаштування експозиції шарів моделі відносяться значення, встановлені у програмі для підготовки моделі до друку (наприклад, NanoDLP або Chitubox). Серед них можна виділити: висоту шару, мкм; кількість базових шарів; час експонування базових та основних шарів, секундах; інтенсивність випромінювання, Лм.

Характеристики моделі та збереження геометричних розмірів під час друку залежать від фізико-хімічних властивостей фотополімерної смоли, що обумовлені її хімічним складом. Серед цих властивостей можна відзначити: коефіцієнт усадки смоли, %; довжина хвилі поляризації, нм; коефіцієнт теплопровідності, Вт/м².

Детальне розглядання принципу роботи фотополімерних технологій вказує на певну системність. У всіх трьох цих технологіях використовується випромінювання світла, енергія якого не лише спрямована на полімеризацію необхідних областей фотополімеру, але також на нагрівання самої фотополімерної смоли, зокрема за рахунок температурного коефіцієнта об'ємного розширення матеріалу (ТКОР).

Температурний коефіцієнт об'ємного розширення матеріалу (α) визначає, як змінюється його об'єм за умови зміни температури, і вимірюється в одиницях $1/^\circ\text{C}$ (або $1/\text{K}$). Він показує, на скільки одиниць зміниться об'єм матеріалу через зміну температури на один градус Цельсія [91].

Математично температурний коефіцієнт об'ємного розширення виражається за допомогою виразу (3.1).

$$\alpha = (\Delta v/v_0)/\Delta T, \quad (3.1)$$

де, α – температурний коефіцієнт об'ємного розширення;

ΔV – зміна об'єму матеріалу;

V_0 – початковий об'єм матеріалу;

ΔT – зміна температури.

Температурний коефіцієнт об'ємного розширення може варіюватися залежно від конкретного матеріалу. Вплив ТКОР під час формування кожного шару моделі виявляється дуже важливим, оскільки за занадто високої температури смоли збільшується коефіцієнт розширення матеріалу. Це може призводити до геометричних відхилень у шарах моделі, а також викликати проблеми, подібні до перезасвічення шарів, зображених на рисунку 3.1.

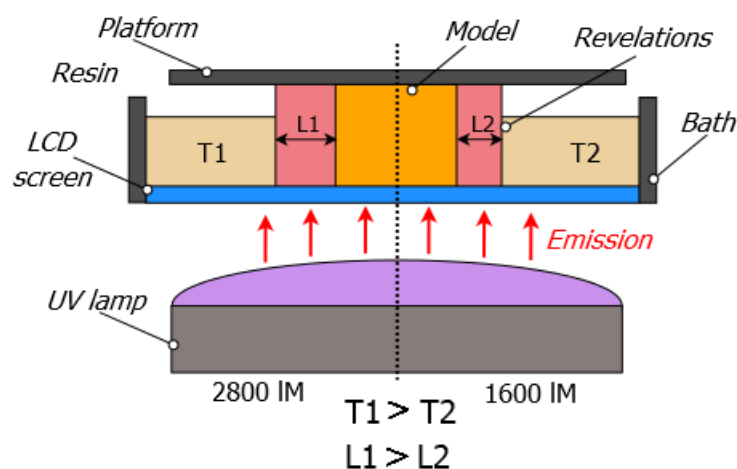


Рисунок 3.1 – Принцип впливу ТКОР у процесі експонування моделі

Отже, можна врахувати, що всі ці параметри, до певної міри, безпосередньо впливають на температуру нагрівання смоли під час друку, на ТКОР і, як наслідок – якісну оцінку процесу виготовлення ДП, а саме на відповідність розмірів отриманої системи провідників. У результаті вивчення температурних впливів у процесі фотополімерного 3D-друку визначається актуальність досліджень.

3.2 Фізичний опис технологічного процесу нагрівання фотополімерної смоли під час експонування моделі

З фізичної точки зору можна розглядати процес нагріву фотополімерної смоли та виникнення температурного коефіцієнта об'ємного розширення як проблему теплообміну у тришаровій стінці.

Розглядаючи особливості фотополімерного 3D-друку за технологією LCD, детально розглянемо структуру тришарової стінки (рис. 3.2). Ця стінка складається з трьох щільно прилягаючих один до одного шарів з такими товщинами: d_1 (товщина LCD-екрану), d_2 (товщина плівки) та d_3 (товщина рідкої фотополімерної смоли). Кожен з цих шарів має власну теплопровідність (λ_1 , λ_2 і λ_3 відповідно).

Також відомі температури зовнішніх поверхонь t_1 і t_4 . Тепловий контакт між шарами є ідеальним, без взаємних зазорів і, відповідно, без повітряних проміжків. Температури в місцях контакту шарів позначаємо як t_2 і t_3 .

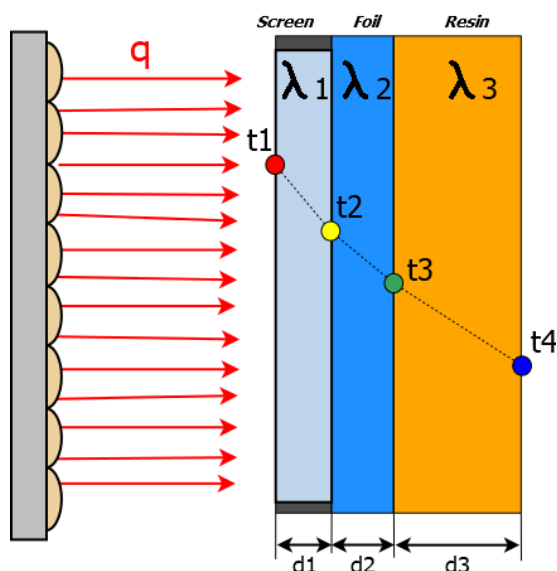


Рисунок 3.2 – Теплообмін у процесі фотополімерного LCD 3D-друку

Оскільки температури зовнішніх поверхонь постійні, тепловий потік – сталий, і відповідно, кількість теплоти, що проходить за одиницю часу – незмінна [91–93]. За стаціонарного режиму питомий тепловий потік q постійний і для всіх шарів однаковий. Тому можна записати для кожного з шарів:

$$\begin{aligned} q &= \frac{\lambda_1}{d_1} (t_1 - t_2) ; \\ q &= \frac{\lambda_2}{d_2} (t_2 - t_3) ; \\ q &= \frac{\lambda_3}{d_3} (t_3 - t_4) . \end{aligned} \quad (3.2)$$

З наведених виразів легко визначити значення локальних різниць температур на межах кожного шару за виразами (3.3):

$$\begin{aligned} t_1 - t_2 &= q \frac{d_1}{\lambda_1} ; \\ t_2 - t_3 &= q \frac{d_2}{\lambda_2} ; \\ t_3 - t_4 &= q \frac{d_3}{\lambda_3} . \end{aligned} \quad (3.3)$$

Складаючи по черзі ліві та праві частини рівнянь, отримаємо (3.4):

$$t_1 - t_4 = q \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} \right) . \quad (3.4)$$

Звідки отримуємо рівняння теплового потоку (3.5):

$$q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}} , \quad (3.5)$$

Температури на стику шарів t_2 та t_3 можна визначити із системи рівнянь:

$$\begin{aligned} t_2 &= t_1 - q \frac{d_1}{\lambda_1} , \\ t_3 &= t_4 + q \frac{d_3}{\lambda_3} . \end{aligned} \quad (3.6)$$

Іноді багат шарову стінку розраховують як одношарову товщиною $d_{\text{заг}}$, як суму всіх товщин шару. При цьому у розрахунок вводиться еквівалентний коефіцієнт теплопровідності $\lambda_{\text{ек}}$, який визначається з умови:

$$q = \frac{t_1 - t_4}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}} = \frac{\lambda_{\text{ек}}}{d} (t_1 - t_4) , \quad (3.7)$$

Звідси отримуємо рівняння еквівалентного коефіцієнту теплопровідності.

$$\lambda_{\text{ек}} = \frac{d}{\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}} , \quad (3.8)$$

Під час виведення розрахункової формули для багат шарової стінки (формули 3.7 та 3.8) припускали, що шари щільно прилягають один до одного і завдяки ідеальному тепловому контакту поверхні, які дотикаються, мають однакову температуру. За умови шорсткої поверхні між шарами виникають повітряні зазори. А оскільки теплопровідність повітря у нормальних умовах $\lambda_{\text{повітря}}$ дорівнює $0,025 \text{ Вт}/(\text{м} \times ^\circ\text{C})$, то наявність навіть

дуже тонких повітряних прошарків різко погіршує теплопровідність конструкції.

3.3 Розробка математичної моделі впливу температури в пакеті Matlab Simulink

Першим етапом для моделювання впливу теплових процесів на ТКОР фотополімерної смоли та вирішення проблеми керуванням нагріву фотополімерном під час експонування топології об'єктом, необхідно визначити сам об'єкт керування та що саме можна вважати керуючим впливом для даної моделі.

LED-матриця задається генератором імпульсів, а довжина та скважність імпульсів задається за допомогою час засвічення та часу циклу. Амплітуду імпульсу будемо вимірювати через силу світла (кандели: $\text{кд} \times \text{ср} \times \text{Вт}^{-1}$).

Частина світла, проходячи до робочої зони, перетворюється на тепло в LCD-матриці, плівці ванни і фотополімері. Відсоток (коефіцієнт) поглинання залежить від оптичної прозорості та товщини цих шарів. Коефіцієнт визначається експериментально, товщина відома. Світло, що потрапило на стіл або модель, що друкується, фокусується на ньому і бере участь у полімеризації фотополімеру.

Вважаємо, що світло, яке залишилося, повністю витрачається на полімеризацію смоли. Коефіцієнтом відбиття від заготовки та поверхні деталі нехтуємо (поверхня заготовки матова, смола, що полімеризується, має малий коефіцієнт відбиття). Також на процес теплообміну у верстаті та нагрівання та охолодження фотополімерної смоли впливає примусова вентиляція електронних компонентів пристрою, що теж необхідно враховувати. Враховуємо взаємне нагрівання шарів. На рисунку 3.3 наведена схема прийняття рішень АСУ ТП у процесі передачі тепла [94].

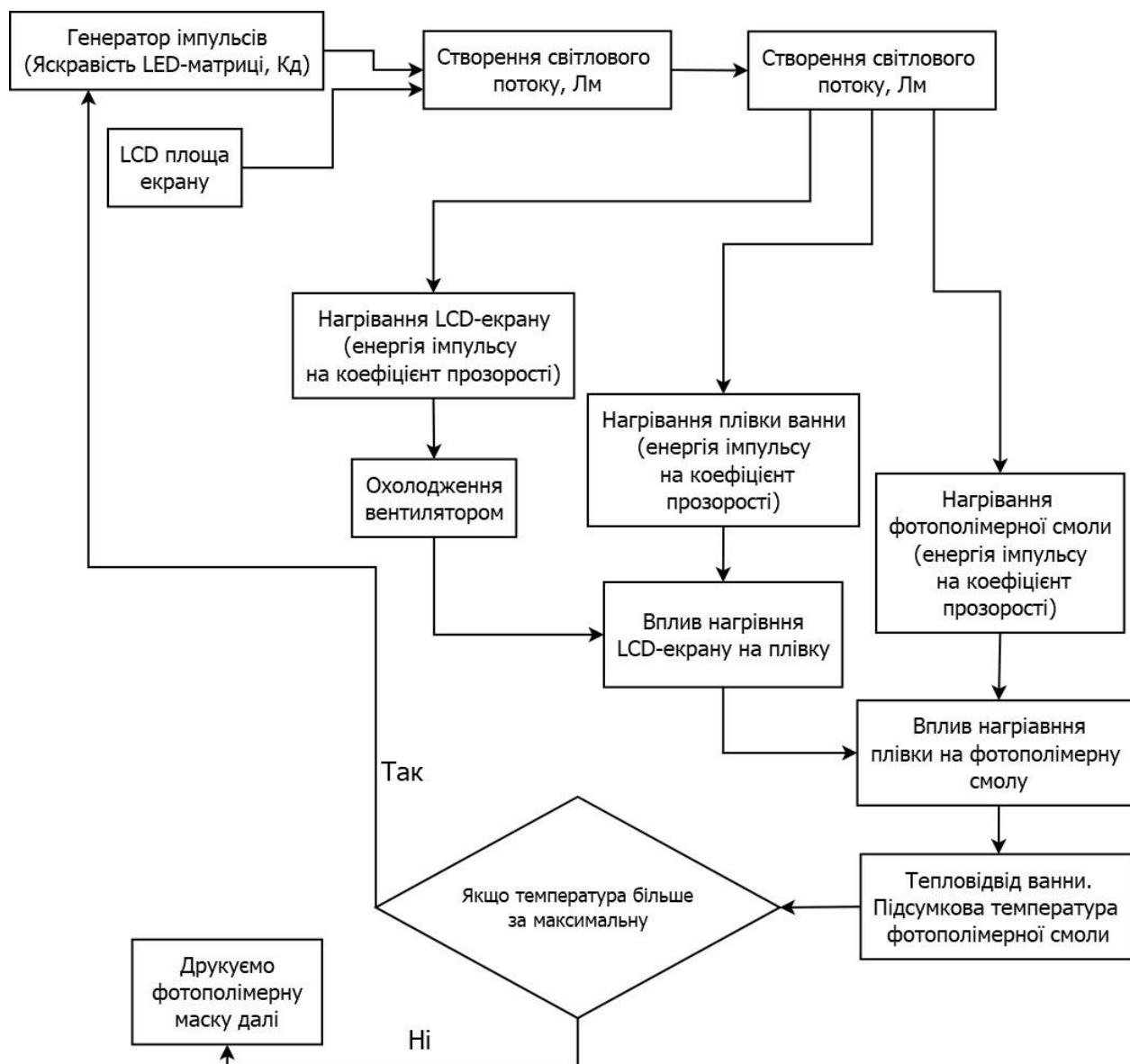


Рисунок 3.3 – Алгоритм роботи під час експонування топології ДП

До параметрів верстату можливо віднести:

- об'єм зони корпусу верстату;
- елементи, які нагріваються під час експонування топології ДП LCD-екран, плівка та фотополімерна смола (теплоємність та теплосупротив цих елементів).

Дані елементи можна розглянути як стінки. У даній моделі буде використовуватися розрахунок з низькою теплоємністю, оскільки товщина стінок мала. Для створення стін з низькою теплоємністю у моделі було

обрано значення повного опору (імпеданс) і ємнісного опору, наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Розрахунок повного та ємнісного теплового супротиву елементів моделі

Найменування	Товщина шару, м	Теплоємність, C , кДж/м ² ×К	Тепловий супротив R , м ² ×К/Вт	Питома теплоємність C_p , кДж/кг×К	Питома маса, кг/м ²
LCD-екран (скло)	0,00135	4,82	0,32	0,84	0,91
Плівка (полімерна)	0,000125	1,8	0,75	0,95	0,9
Фотополімерна смола (епоксидна смола)	0,015	0,17	0,026	1,2	1,16
Лінза УФ-матриці	0,010	4,82	0,32	0,42	0,91
Повітряний прошарок	0,025	0	0,160	0,00	0,00
Кількість діодів в УФ-матриці	24				
Площа дна ванни, мм ²	8160				
Об'єм відсіку для електроніки верстату, м ³	0,013				

З точки зору оптимізації автоматизованого контролю процесу, значення ТКОР фотополімерної смоли можливо описати за допомогою рисунка 3.4.

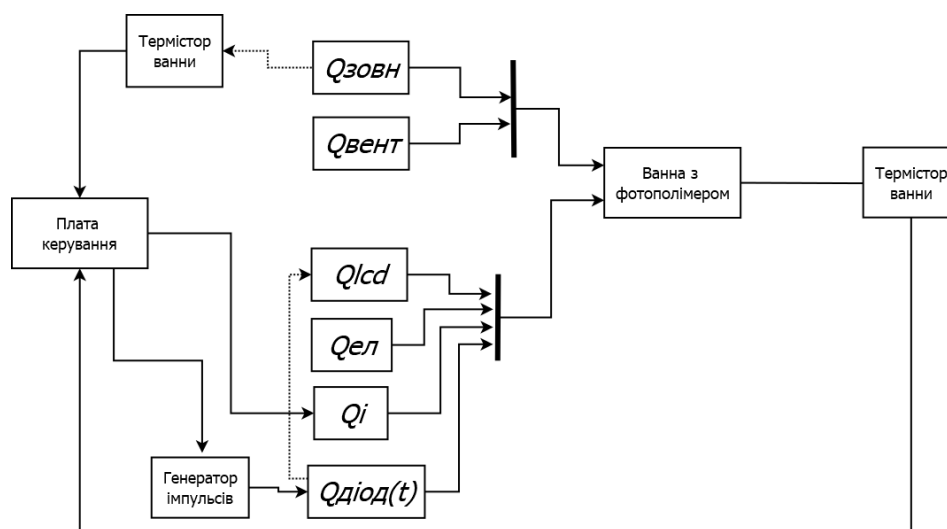


Рисунок 3.4 – Принцип роботи керуючого сигналу АСУ ТП для контролю нагрівання фотополімерної смоли

В даному випадку на систему нагрівання фотополімерної смоли впливає два типи теплових потоків:

- зовнішній нагрів на макет (температура у приміщенні, природня вентиляція у приміщенні);
- внутрішній нагрів всередині макету (нагрів від електроніки макету, нагрів від діодів УФ-матриці).

Зовнішніх теплових потоків в системі є два:

- $Q_{\text{зовн}}$ – кондукційний теплообмін крізь стінки приладу;
- $Q_{\text{вент}}$ – теплообмін від природньої вентиляції.

Математичний опис $Q_{\text{зовн}}$ можливо виразити за допомогою (3.9):

$$Q_{\text{зовн}} = \frac{\Delta T}{\Sigma R_{\text{тс}}} = US(T_{\text{в}} - T_{\text{з}}) , \quad (3.9)$$

де, $R_{\text{тс}}$ – термічний опір, К/Вт;

U – загальний термічний опір, Вт/м²×К;

S – площа дна ванни для фотополімерної смоли, мм²;

$T_{\text{з}}$ – температура зовні верстату, °С;

$T_{\text{в}}$ – температура в середні верстату, °С.

Загальний термічний опір знаходимо за виразом (3.10):

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \Sigma \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{h_e}}, \quad (3.10)$$

де, L – товщина шару, м;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м²×К;

h_3 та h_b – коефіцієнт внутрішнього і зовнішнього конвективного теплообміну відповідно, Вт/м²×К.

Математичний опис $Q_{\text{вент}}$ можливо виразити за допомогою виразу (3.11):

$$Q_{\text{вент}} = \Phi \rho_{\text{п}} c_{\text{п}} (T_{\text{в}} - T_{\text{з}}). \quad (3.11)$$

де, Φ – потік повітря внаслідок природньої вентиляції, м³/с;

$\rho_{\text{п}}$ – щільність повітря (1,2 кг/м³);

$c_{\text{п}}$ – питома теплоємність повітря (1000 кДж/кг).

Потік повітря внаслідок природньої вентиляції Φ знаходимо за допомогою виразу (3.12):

$$\Phi = \frac{nV}{3600}. \quad (3.12)$$

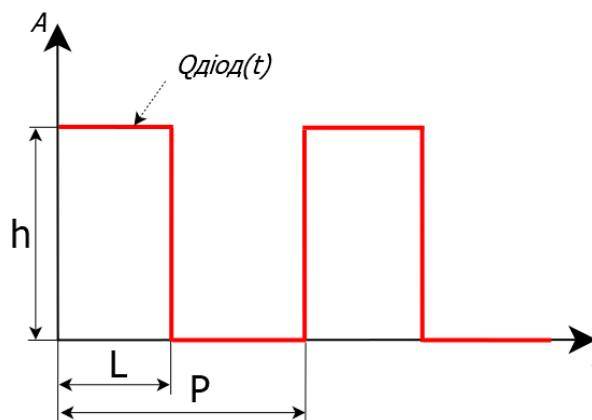
де, V – об'єм повітря в середні верстату, м³.

До внутрішніх чинників теплообміну можна віднести:

- Q_{LCD} – загальний внутрішній нагрів від УФ-матриці;
- $Q_{\text{ел}}$ – внутрішній нагрів від електронних компонентів верстата;
- Q_i – потік тепла внаслідок інфільтрації (примусова вентиляція);
- $Q_{\text{діод}}(t)$ – тепло від одного УФ-діода.

За допомогою Q_{LCD} , Q_i та $Q_{\text{діод}}(t)$ можливо контролювати ТКОР фотополімерної смоли. Основним елементом нагріву є УФ-матриця, яка генерує УФ-випромінювання. Для зниження можливості перегріву фотополімеру, вмикання діодів на УФ-матриці можливо зробити за допомогою імпульсів, тим самим робити інтервали між вмиканням та вимиканням діодів. Це буде дозволяти дати час смолі охолонути та зменшити імовірність перегріву та виникнення великого значення ТКОР. Отже

автоматизований контроль буде відбуватися за допомогою керування теплового потоку $Q_{\text{діод}}(t)$ (рис. 3.5).



A – амплітуда імпульсу; L – довжина імпульсу; P – період імпульсу.

Рисунок 3.5 – Принцип роботи керуючого сигналу

Опис $Q_{\text{діод}}(t)$ можна зробити за допомогою виразу (3.13):

$$Q_{\text{діод}}(t) = q_{\text{випром}} S_{\text{лінза}} SGF . \quad (3.13)$$

де, $q_{\text{випром}}$ – випромінювання діода, Вт/м²;

$S_{\text{лінзи}}$ – площа лінзи для фокусування УФ-випромінювання, мм²;

SGF – коефіцієнт посилення.

Випромінювання діода $q_{\text{випром}}$ знаходимо за формулою (3.14):

$$q_{\text{випром}} = \tau(E_{\text{пр}} + E_{\text{роз}}) SGF . \quad (3.14)$$

де, τ – передана енергія;

$E_{\text{пр}}$ – пряма енергія випромінювання від діоду, Вт/м²;

$E_{\text{роз}}$ – пряма енергія випромінювання від діоду, Вт/м².

Загальний внутрішній нагрів від УФ-матриці Q_{LCD} можна виразити за допомогою формулою (3.15):

$$Q_{\text{LCD}} = H_{\text{д}} n_{\text{д}} . \quad (3.15)$$

де, $H_{\text{д}}$ – норма виробітки тепла діода, Вт;

$n_{\text{д}}$ – кількість діодів на УФ-матриці.

Внутрішній нагрів від електронних компонентів верстата $Q_{ел}$ будемо вважати за сталу величину.

Потік тепла внаслідок інфільтрації (примусова вентиляція) Q_i знаходимо за формулою (3.16):

$$Q_i = 0,013V_p(T_B - T_3) . \quad (3.16)$$

де, 0,013 – це об'єм нагрітого повітря всередні верстату, Дж/м³;

V_p – рівень вентиляції, м³/с.

Диференціальне рівняння, яке буде включати всі теплові потоки та пов'язувати їх вплив з температурою фотополімеру, буде мати наступний вигляд:

$$m_{см}c_{см} \frac{dT}{dt} = Q_{діода}(t) + Q_{LCD} + Q_{ел} + Q_{зовн} - Q_{вент} - Q_i . \quad (3.17)$$

де, $m_{см}$ – фотополімерної смоли в ванній, кг;

$c_{см}$ – питома теплоємність фотополімерної смоли.

Динамічну модель можливо виразити за допомогою електр-теплової аналогії. У схемі є 5 резисторів (середовища, через які відбуваються втрати теплових потоків) та чотири конденсатори (середовища, які поступово нагріваються у процесі експонування зображення топології), (рис. 3.6).

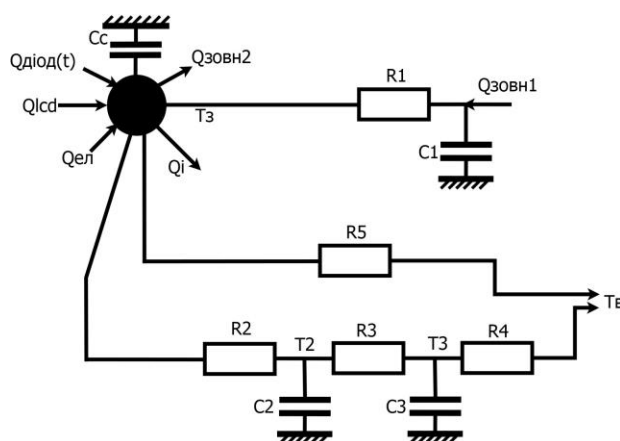


Рисунок 3.6 – Електр-теплова схема теплообміну

За даною схемою виходить, що: $Q_{зовн1}$ – приплив теплоти безпосередньо від переміщення, Вт; $Q_{зовн2}$ – приплив теплоти від корпусу

верстата, Вт; $Q_{\text{вент}}$ – приплив теплоти від природної вентиляції, Вт; Q_{LCD} – приплив теплоти від загального внутрішнього нагріву від УФ-матриці, Вт; $Q_{\text{ел}}$ – приплив теплоти від електронних компонентів верстату, Вт; Q_i – приплив теплоти внаслідок інфільтрації повітря, Вт; $Q_{\text{діод}}(t)$ – приплив теплоти від одного УФ-діода, Вт; T_3 – температура ззовні верстату, °С; $T_{\text{в}}$ – температура всередині верстату, °С; T_2 – температура між УФ-матрицею та повітрям, °С; T_3 – температура між повітрям та LCD-екраном, °С; C_c – теплоємність фотополімерної смоли у ванній, Дж/К; C_1 – теплоємність матеріалів корпусу верстату, Дж/К; C_2 – теплоємність фіксуючої лінзи, Дж/К; C_3 – LCD-екрану, Дж/К; R_1 – опір матеріалів корпусу, К/Вт; R_2 – опір матеріалу лінзи, К/Вт; R_3 – опір повітря між лінзою та LCD-екраном, К/Вт; R_4 – опір LCD-екрана, К/Вт; R_5 – сумарний термічний опір.

Динамічний режим верстату можна змоделювати за допомогою системи звичайних лінійних диференціальних рівнянь. Ці рівняння можна переписати у вигляді матриць, а потім реалізувати динамічну модель у середовищі MatLab/Simulink. Рівняння для температурних вузлів мають такий вигляд [95, 96], формула 3.18:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dT_1}{dt} &= \frac{1}{R_1} (T_3 - T_1) + q_{\text{випром}} S_{\text{лінза}} SGF \vartheta, \\ C_2 \frac{dT_2}{dt} &= \frac{1}{R_2} (T_3 - T_2) - \frac{1}{R_3} (T_2 - T_3), \\ C_3 \frac{dT_3}{dt} &= \frac{1}{R_3} (T_2 - T_3) - \frac{1}{R_4} (T_3 - T_4). \end{aligned} \quad (3.18)$$

де показник конвекції:

$$\begin{aligned} C_c \frac{dT_c}{dt} &= Q_{\text{діод}}(t) + Q_{\text{LCD}} + Q_{\text{ел}} + q_{\text{випром}} S_{\text{лінза}} (1 - \vartheta) + mcT_3 - \frac{1}{R_1} (T_3 - T_1) - \\ &\frac{1}{R_2} (T_3 - T_2) - \frac{1}{R_5} (T_3 - T_{\text{в}}). \end{aligned} \quad (3.19)$$

Якщо $\vartheta = 0$, то енергія випромінювання повністю передається через пікселі LCD-екрана. Якщо $\vartheta = 1$, то вся енергія випромінювання безпосередньо нагріває фотополімерну смолу.

Після перетворення рівняння мають такий вигляд:

$$\begin{aligned}\dot{T}_1 &= \left(\frac{1}{R_1 C_1}\right) T_i + \left(-\frac{1}{R_1 C_1}\right) T_1 + \left(\frac{S_{\text{лінза}} SGF \vartheta}{C_1}\right) q_{\text{випром}} ; \\ \dot{T}_2 &= \left(\frac{1}{R_2 C_2}\right) T_i + \left(-\frac{1}{R_3 C_3} - \frac{1}{R_3 C_2}\right) T_2 + \left(\frac{1}{R_3 C_2}\right) T_3 ; \\ \dot{T}_3 &= \left(-\frac{1}{R_3 C_3}\right) T_2 + \left(-\frac{1}{R_3 C_3} - \frac{1}{R_4 C_3}\right) T_3 + \left(\frac{1}{R_4 C_3}\right) T_B ;\end{aligned}\quad (3.20)$$

$$\begin{aligned}\dot{T}_B &= \left(\frac{1}{C_c}\right) Q_{\text{діод}}(t) + \left(\frac{1}{C_c}\right) Q_{LCD} + \left(\frac{1}{C_c}\right) Q_{\text{ел}} + \left(\frac{1}{C_c}\right) [q_{\text{изл}} S_{\text{стекл}} SGF (1 - \vartheta)] + \\ &\left(\frac{\dot{m}c}{C_c} + \frac{1}{R_5 C_c}\right) T + \left(\frac{1}{R_1 C_c}\right) T_1 + \left(\frac{1}{R_2 C_c}\right) T_2 + \left(\frac{\dot{m}c}{C_c} - \frac{1}{R_2 C_c} - \frac{1}{R_5 C_c} - \frac{1}{R_1 C_c}\right) T_B .\end{aligned}$$

Рівняння (3.19) та (3.21) можна подати в матричному вигляді:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu , \\ y &= Cx + Du .\end{aligned}$$

З такими векторами отримуємо наступну матрицю рівнянь:

$$\begin{aligned}x &= \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_i \end{bmatrix}; & \dot{x} &= \begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \\ \dot{T}_3 \\ \dot{T}_i \end{bmatrix}; & y &= \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_i \end{bmatrix}; & u &= \begin{bmatrix} T_B \\ Q_{\text{вент}} \\ Q_{\text{зовн}} \\ q_{\text{випром}} \end{bmatrix}; \\ C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; & D &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \\ A &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_1 C_1} - \frac{1}{R_3 C_2} & \frac{1}{R_3 C_2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_3 C_3} & -\frac{1}{R_4 C_3} & 0 \\ \frac{1}{R_1 C_c} & \frac{1}{R_1 C_1} & 0 & -\frac{\dot{m}c}{C_c} - \frac{1}{R_2 C_c} - \frac{1}{R_5 C_c} - \frac{1}{R_1 C_c} \end{bmatrix}; \\ B &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{S_{\text{лінза}} SGF \vartheta}{C_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{R_4 C_3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\dot{m}c}{C_c} + \frac{1}{R_5 C_c} & \frac{1}{C_c} & \frac{1}{C_c} & \frac{S_{\text{лінза}} SGF \vartheta}{C_c} \end{bmatrix}.\end{aligned}\quad (3.22)$$

Дослідження теплових режимів фотополімерної смоли виконується шляхом комп'ютерного моделювання динамічної моделі у середовищі MatLab/Simulink. Реалізація моделі у середовищі Simulink наведена на рисунку 3.7.

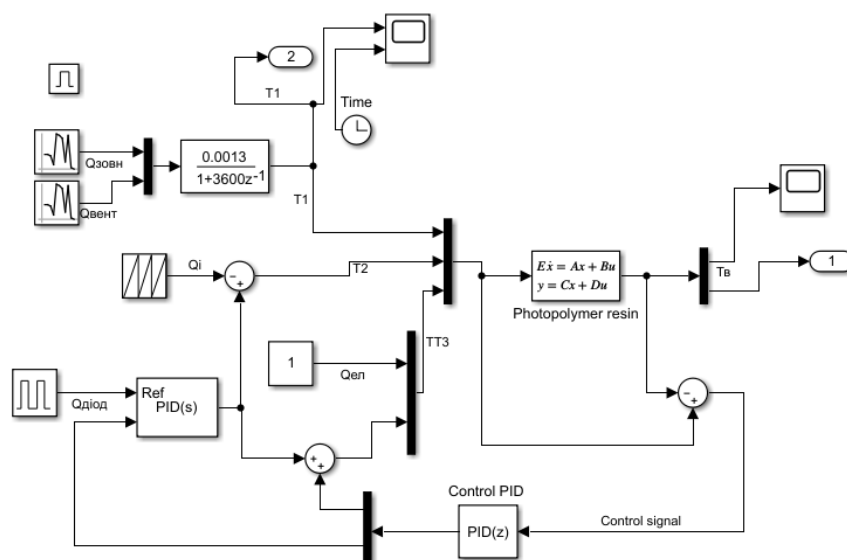


Рисунок 3.7 – Схема контролю температури фотополімерної смоли

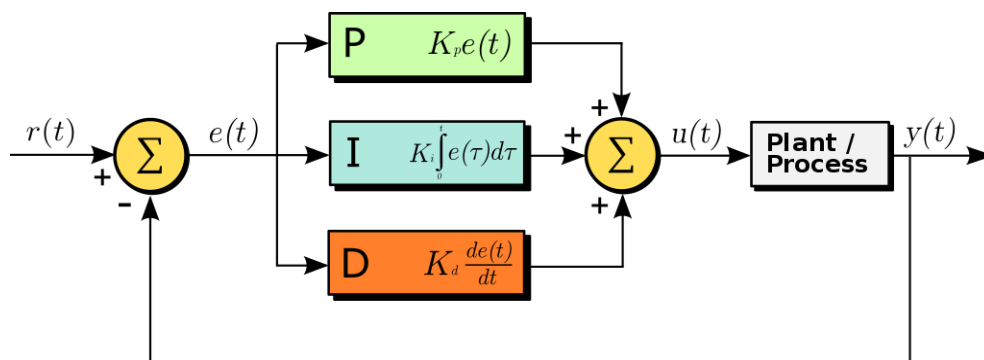
Розташування елементів в конструкції LCD-принтера впливає на температуру повітря всередині верстат (рисунок 3.1). Для контролю температури фотополімерної смоли під час експонування зображення. У верстат буде встановлено два термістора: термістор контролю зовнішньої температури; термістор контролю температури фотополімерної смоли.

Для контролю сигналів імпульсів УФ-лампи верстату буде використовуватися PID-регулювання (пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор) [97, 98].

PID-регулятор – пристрій у керувальному контурі зі зворотним зв'язком. Використовується в системах автоматичного керування для формування керуючого сигналу з метою отримання необхідних точності та якості перехідного процесу.

Призначення PID-регулятора у підтриманні заданого значення r деякої величини u за допомогою зміни іншої величини U . Значення r називається

заданим значенням (або уставкою), а різниця $e=(r-y)$ – нев'язкою (або помилкою регулювання), неузгодженістю або відхиленням величини від заданої. Наведені нижче формули справедливі у разі лінійності та стаціонарності системи, що рідко виконується на практиці (рис. 3.8).



$y(t)$ – вихідна величина; $r(t)$ – задане значення; $e(t)$ – похибка;

$U(t)$ – керуючий сигнал, що керує величиною $y(t)$

Рисунок 3.8 – Система керування зі зворотним зв'язком за участю PID-регулятора [97]

Вихідний сигнал регулятора U визначається трьома доданками, формула 3.23:

$$U(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt}, \quad (3.23)$$

де, K_p , K_i , K_d – коефіцієнти посилення пропорційної, інтегрувальної та диференціовальної складових регулятора відповідно.

У системі пропорційно-інтегро-диференціального управління пристрій управління генерує сигнал, що є сумою трьох компонент: пропорційної похибки, інтегралу від похибки та похідної похибки. Передавальна функція пристрою управління або PID-регулятора визначається за формулою 3.24:

$$W(s) = k_1 + \frac{k_2}{s} + k_3 s, \quad (3.24)$$

Включення похідної від похибки у закон управління призводить до збільшення швидкості реакції системи на зміни вхідного впливу, підвищує її швидкодію, а також зменшує динамічну похибку системи та поліпшує її динамічні характеристики (рис. 3.9).

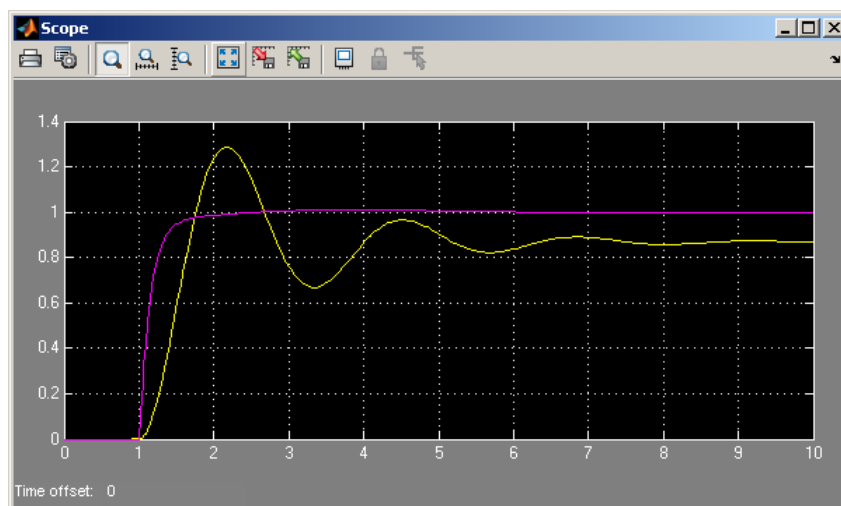


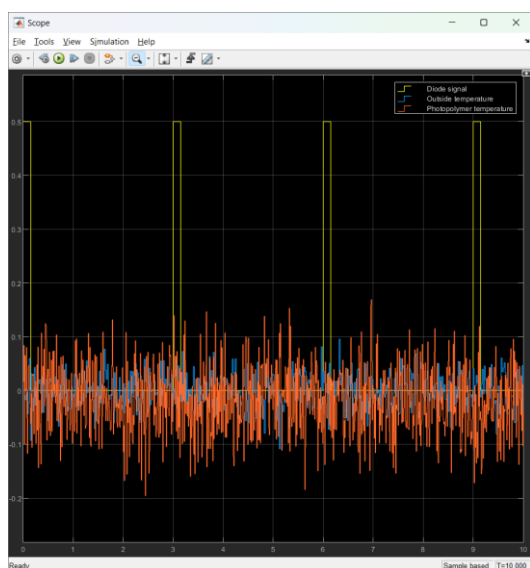
Рисунок 3.9 – Приклад управління сигналу за допомогою PID-регулятора [96]

Отже, за допомогою PID-регулятора буде відбуватися порівняння температури фотополімерної смоли зі значенням температури, вказаної на контролері, кожні 1000 мс. Значення на контролері вказується власноруч, або воно буде обиратися автоматично, виходячи з коливань зовнішньої температури навколо макету.

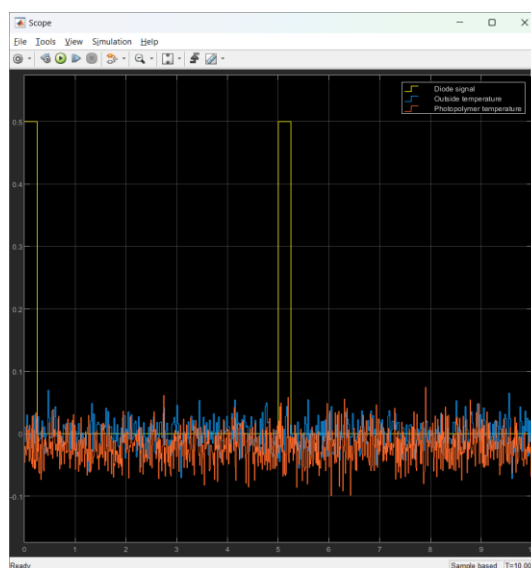
Якщо значення температури фотополімерної смоли під час експонування зображення більше, ніж значення на контролері, то PID-регулятор передає сигнал контролеру. Після цього контролер вносить корективи в G-code та робить більший інтервал між вмиканнями УФ-матриці. Тим самим збільшується час на охолодження фотополімерної смоли. Після цього знову відбувається порівняння температури.

Якщо коливання тепла в фотополімерній смоли не перевищують вказаної температури, то продовжується друк, якщо більше то знову збільшується час між вмиканням та вимиканням УФ-матриці. На рисунку

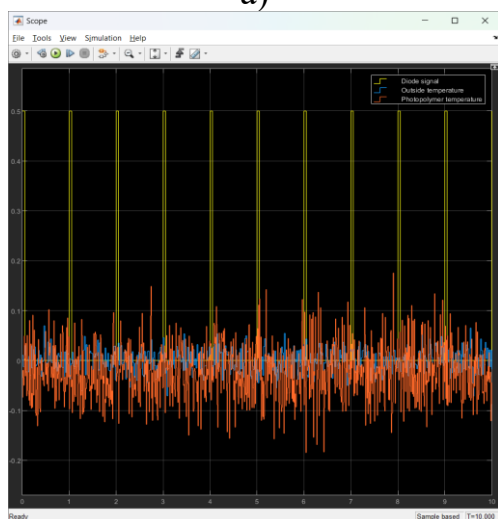
3.10 наведені результати роботи системи контролю температури фотополімерної смоли.



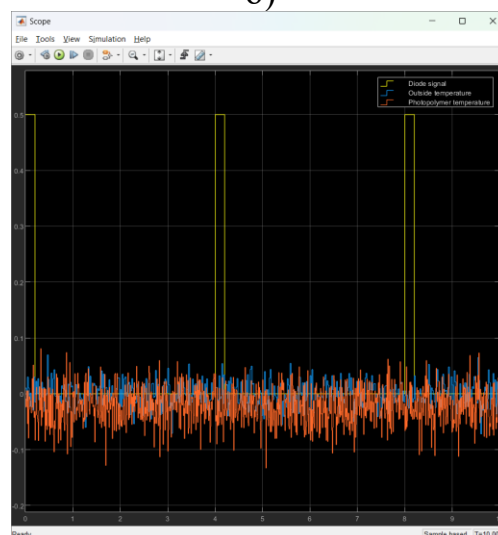
а)



б)



в)



г)

а – температура при роботі верстата без контролю з періодом експонування 3 с; б – температура при роботі верстата з контролем з періодом експонування 6 с; в – температура при роботі верстата без контролю з періодом експонування 1 с; г – температура при роботі верстата з контролем з періодом експонування 4 с.

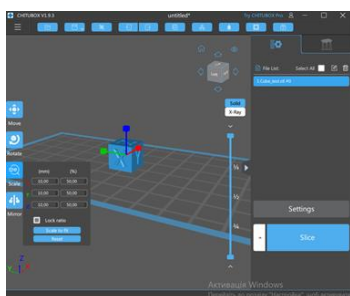
Рисунок 3.10 – Результати роботи схеми контролю температури фотополімерної смоли

3.4 Дослідження впливу температури фотополімерної смоли на геометричні відхилення розмірів ДП

Для проведення досліджень впливу температурного коефіцієнта об'ємного розширення на відхилення геометричних розмірів провідникової структури друкованої плати спочатку треба оцінити, скільки змінюється температура фотополімерної смоли під час експонуванні моделі [99].

Для простоти вимірювань була обрана тестова модель куба розмірами $20 \times 20 \times 20$ мм (рис. 3.11), яка буде друкуватися за наступних параметрів експонування:

- час засвічення смоли, що змінювався у межах від 7 с до 20 с з кроком 1 с для кожного випробування;
- висота шару, яка залишалася постійною і становила 35 мкм;
- максимальна інтенсивність випромінювання за значень 2800 Лм та 1600 Лм.



а)



б)

а – модель у програмі Chitubox; б – тестовий зразок.

Рисунок 3.11 – Тестова модель для досліджень

В цілому буде 28 вимірювань. Як фотополімерна смола буде використовуватися фотополімер марки Plexiwire Resin Basic. Для заміру температури початкової та після друку буде використовуватися термістор. Початковою температурою будемо вважати кімнатну у межах від $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ в середньому.

Результати вимірювань зміни температури під час експонування моделі наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Зміни температури фотополімерної смоли

Інтенсивність випромінювання, Лм	Час експонування, с	Початкова Температура смоли, °С	Температура нагріву смоли, °С	Зростання температури, °С	Середнє зростання температури, °С
1600	7	20,3	25,2	4,9	5,4
	8	20,6	24,7	4,1	
	9	20,5	25,5	5	
	10	21,1	25,8	4,7	
	11	20,4	25,6	5,2	
	12	20,9	26,1	5,2	
	13	21,0	25,9	4,9	
	14	21,5	26,4	4,9	
	15	20,9	26,7	5,8	
	16	21,3	26,7	5,4	
	17	20,6	27,0	6,4	
	18	20,8	27,2	6,4	
	19	20,1	27,3	7,2	
20	21,2	27,1	5,9		
2800	7	19,8	25,8	6	6,8
	8	20,5	26,2	5,7	
	9	21,3	26,5	5,2	
	10	20,5	26,4	5,9	
	11	20,4	27,2	6,8	
	12	21,4	27,6	6,2	
	13	20,7	27,7	7	
	14	21,8	27,5	5,7	
	15	20,7	28,2	7,5	
	16	22,2	28,3	6,1	
	17	21,4	28,6	7,2	
	18	21,0	28,9	7,9	
	19	20,0	29,2	9,2	
20	20,7	29,4	8,7		

Температура нагрівання фотополімерної смоли 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.

Враховуючи це, виконано визначення впливу температури фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів моделі. Були визначені наступні діапазони значень параметрів: час засвічування смоли: від 7 с до 16 с, з кроком 1 с для кожного випробування; висота шару: 35 мкм; максимальна інтенсивність випромінювання: 1600 Лм; температура фотополімерної смоли перед початком друку: від 10 °С до 45 °С, з кроком 5 °С для кожного випробування.

Максимальна інтенсивність випромінювання 1600 Лм була обрана для зменшення ризику перегріву фотополімерної смоли, оскільки за даної інтенсивності середній приріст температури становив 5,4 °С. Діапазон температури фотополімерної смоли від 10 °С до 45 °С обрали для зменшення ймовірності перегріву самої смоли та деформації плівки дна ванної.

Для отримання детальнішої інформації, необхідно провести серію експериментів на 80 зразках. За допомогою другого етапу експерименту буде можливо визначити, чи суттєво впливає температура фотополімерної смоли на відхилення геометричних розмірів, чи, можливо, вплив визначають час експонування та інтенсивність випромінювання.

Тестова топологія було обране наступне зображення, показана на рисунку 3.12.

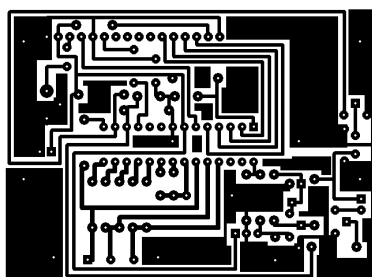


Рисунок 3.12 – Тестова топологія ДП

У таблиці 3.3 наведені результати вимірювань відхилень геометричних розмірів топології ДП за різних значень температури фотополімерної смоли.

Таблиця 3.3 – Відхилення розмірів за різних значень температури

№	Час засвічення, с	Температура нагріву смоли, °С	Відхилення, розмірів по осях ХУ, мм	№	Час засвічення, с	Температура нагріву смоли, °С	Відхилення, розмірів по осях ХУ, мм
1	7	10	0,053	41	7	30	0,079
2	8		0,077	42	8		0,103
3	9		0,094	43	9		0,122
4	10		0,108	44	10		0,131
5	11		0,127	45	11		0,148
6	12		0,131	46	12		0,16
7	13		0,140	47	13		0,169
8	14		0,142	48	14		0,163
9	15		0,145	49	15		0,173
10	16		0,149	50	16		0,176
11	7	15	0,056	51	7	35	0,097
12	8		0,069	52	8		0,109
13	9		0,087	53	9		0,123
14	10		0,104	54	10		0,140
15	11		0,127	55	11		0,144
16	12		0,130	56	12		0,151
17	13		0,133	57	13		0,161
18	14		0,137	58	14		0,174
19	15		0,144	59	15		0,172
20	16		0,151	60	16		0,177
21	7	20	0,070	61	7	40	0,094
22	8		0,089	62	8		0,117
23	9		0,103	63	9		0,136
24	10		0,136	64	10		0,149
25	11		0,139	65	11		0,177
26	12		0,147	66	12		0,180
27	13		0,151	67	13		0,188
28	14		0,155	68	14		0,201
29	15		0,16	69	15		0,202
30	16		0,165	70	16		0,209
31	7	25	0,082	71	7	45	0,102
32	8		0,105	72	8		0,12
33	9		0,128	73	9		0,139
34	10		0,140	74	10		0,157
35	11		0,141	75	11		0,181
36	12		0,155	76	12		0,182
37	13		0,161	77	13		0,186
38	14		0,177	78	14		0,199
39	15		0,185	79	15		0,208
40	16		0,192	80	16		0,217

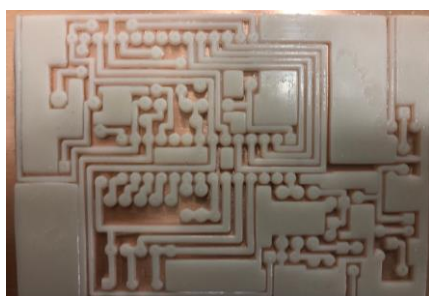
На підставі отриманих даних можна прийти до висновку, що зі збільшенням температури фотополімерної смоли зростає величина відхилень геометричних розмірів моделі. Слід відзначити, що за температур у діапазоні

від 10 °С до 20 °С середнє відхилення розмірів є меншим, ніж у попередніх дослідах за тих самих значень часу експонування, таблиця 3.4.

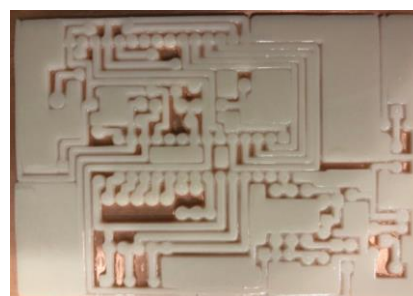
Таблиця 3.4 – Різниця відхилень розмірів залежно від температури

Без контролю температури							
№	Час експонування, с	Відхилення при температурі 10 °С	Відхилення при температурі 15 °С	Відхилення при температурі 20 °С	Відхилення при температурі 25 °С	Відхилення при температурі 30 °С	Середнє значення відхилень при температурах від 10 °С до 30 °С
1	7	0,053	0,056	0,070	0,082	0,079	0,068
2	8	0,077	0,069	0,089	0,105	0,103	0,0886
3	9	0,094	0,087	0,103	0,128	0,122	0,1068
4	10	0,108	0,104	0,136	0,140	0,131	0,1238
5	11	0,127	0,127	0,139	0,141	0,148	0,1364
6	12	0,131	0,130	0,147	0,155	0,16	0,1446
7	13	0,140	0,133	0,151	0,161	0,169	0,1508
8	14	0,142	0,137	0,155	0,177	0,163	0,1548
9	15	0,145	0,144	0,16	0,185	0,173	0,1614
10	16	0,149	0,151	0,165	0,192	0,176	0,1666
З регуляцією температури при експонуванні топології							
1	7	0,021	0,023	0,048	0,05	0,048	0,038
2	8	0,058	0,042	0,065	0,086	0,081	0,066
3	9	0,086	0,074	0,092	0,117	0,114	0,096
4	10	0,065	0,067	0,093	0,12	0,09	0,087
5	11	0,096	0,095	0,104	0,108	0,114	0,103
6	12	0,103	0,121	0,119	0,122	0,139	0,12
7	13	0,121	0,118	0,132	0,147	0,145	0,132
8	14	0,114	0,103	0,121	0,142	0,135	0,123
9	15	0,112	0,113	0,132	0,156	0,149	0,132
10	16	0,13	0,148	0,154	0,183	0,162	0,155

Різницю у відхиленнях геометричних розмірів топології ДП чітко можливо побачити на рисунку 3.13.



а)



б)

а – фотополімерна маска за 10 °С; б – фотополімерна маска за 45 °С.

Рисунок 3.13 – Результати відхилень за різних температур фотополімерної смоли

3.5 Висновки до третього розділу

У третьому розділі розглянуто та вирішені такі завдання:

– фізичний опис процесу нагрівання фотополімерної смоли під час експонування моделі. Були розглянуті особливості фотополімерного експонування за LCD-технологією, а саме процес передачі теплового потоку від УФ-випромінювання діодної матриці до фотополімерної смоли. Тим саме описується виникнення теплового коефіцієнту об'ємного розширення фотополімерної смоли під час друку моделі;

– розробка моделі впливу температури в середовищі Matlab Simulink. Була розроблена схема керування тепловим потоком при фотополімерному експонування на основі задачі теплообміну між трьома стінками з різними коефіцієнтами теплопровідності. Описані формули та побудована електрична схема нагрівання, за якого відбувається процес нагрівання фотополімерної смоли. Та проведено симуляцію нагріву фотополімерної смоли в програмному середовищі Matlab Simulink.

– проведені дослідження впливу температури фотополімерної смоли на геометричні відхилення розмірів ДП.

Проведені дослідження впливу температурного коефіцієнта об'ємного розширення на відхилення геометричних розмірів провідникової структури друкованої плати, експерименти відбувалися в два етапи:

– дослідження впливу часу експонування та інтенсивності випромінювання УФ на нагрівання 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 ДП (вивчення залежності відхилень геометричних розмірів від температури фотополімеру).

Згідно з результатами досліджень можна зробити наступні 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 2800 Лм. Таким чином, для наступного етапу досліджень рекомендується користуватися діапазоном часу експонування від 7 с до 16 с;

– за умови збільшенні температури фотополімерної смоли збільшується значення відхилень геометричних розмірів моделі;

– за температур у діапазоні від 10 °С до 20 °С, середнє відхилення розмірів менше ніж у попередніх дослідях, за тих же значеннях часу експонування.

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

Основні результати третього розділу опубліковано у роботах [94, 99].

Список джерел, які використано у третьому розділі, наведено у переліку джерел посилань [91 – 93, 95 – 98].

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Факторний аналіз фотополімерних смол

Першим етапом у проведенні подальших досліджень впливу параметрів експонування на збереження геометричних розмірів топології ДП є визначення конкретних фотополімерних смол, які будуть використовуватися для створення тестових топологій друкування. Метою даного етапу досліджень є визначення, які фотополімерні смоли будуть більш доцільні для виготовлення фотополімерних масок [100].

Існують різноманітні типи фотополімерних смол, які використовуються для технології 3D-друку. Ось деякі з них:

- стандартні фотополімери;
- силіконові фотополімери;
- фотополімери високої температури;
- фотополімери для медичних застосувань;
- кольорові фотополімери;
- фотополімери для високошвидкісного друку;
- біорезорбовані фотополімери.

Для досліджень було вибрано дев'ять стандартних марок фотополімерних смол, які найчастіше використовуються у фотополімерному 3D-друці.

Для проведення факторного аналізу були обрані певні параметри для кожної марки смоли з відповідними характеристиками, як вказано у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Марки та характеристики фотополімерних смол

№	Назва смоли	Мін. Діапазон довжини хвилі полімеризації, нм	Мак. Діапазон довжини хвилі полімеризації, нм	Мін. Коефіцієнт усадки, %	Мак. Коефіцієнт усадки, %	Час засвітлення шару, с	Час засвітлення базових шарів, с	Товщина шару, мкм	Інтенсивність випромінювання, Лм
1	Anycubic 405nm UV [101]	405	405	2,76	3,54	5	15	35	1600
2	Plexiwire Resin Basic [102]	405	450	3,04	3,82	7	20	35	1800
3	MonoFilament Basic [103]	405	450	2,37	4,22	7	25	35	1600
4	FunToDo [104]	225	415	1,27	2,43	6	17	20	2600
5	Wanhao Castable [105]	395	420	1,16	1,16	8	15	35	2600
6	BlueCast CR3A [106]	400	410	3,74	4,82	4	9	10	1800
7	Elegoo 3D [107]	385	450	5,37	5,74	3	10	35	1600
8	Weistek [108]	385	410	2,38	3,02	7	15	50	1800
9	Tevo [109]	380	420	3,53	4,22	8	12	50	2400

Факторний аналіз дозволяє скоротити обсяг вибірки, особливо коли об'єкт описується численними рисами чи характеристиками, які можуть взаємодіяти між собою (зміна однієї характеристики впливає на іншу). Факторний аналіз допомагає виконати зведення всіх цих характеристик та рис до меншої кількості, при цьому не порушуючи дані для подальшого аналізу [110]. Для визначення обсягу вибірки для факторного аналізу використовується програма для статистичних розрахунків IBM SPSS Statistics 26 [111, 112]. Вибірка включає 9 фотополімерних смол та вісім параметрів, які характеризують певний тип смоли.

У налаштуваннях вказується розрахунок (KMO and Bartlett's test of sphericity), критерій сферичності. Це необхідно для того, щоб визначити, наскільки вдалим буде використання отриманих результатів у подальшому аналізі. Значення цього показника повинно перевищувати 0,5.

Також вибираємо метод (Varimax) для проведення факторного аналізу. У ході цього процесу здійснюються низка кореляційних аналізів з метою визначення взаємовпливу між змінними. Обраний метод спрощує та прискорює цей процес.

Встановлюємо меню (Factor Scores) у боці Regression з метою врахування змін факторного аналізу, які визначають можливість класифікації отриманих фотополімерних смол. Для виключення малозначущих факторів з низьким рівнем кореляції встановлюємо значення 0,5 в налаштуваннях. Значення кореляції менше даного порогу вважається незначущим.

Після цього отримуємо результати розрахунків. Оцінюємо міру адекватності та критерій Бартлетта (KMO and Bartlett's test of sphericity), спостерігаємо значення 0,685. Це значення перевищує 0,5, що свідчить про успішність факторного аналізу, як показано на рисунку 4.1.

KMO and Bartlett's Test

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		,685
Bartlett's Test of Sphericity	Approx. Chi-Square	82,341
	df	28
	Sig.	,000

Рисунок 4.1 – Міра адекватності та критерій Бартлетта

Інша таблиця, яка необхідна – це таблиця перевернутих матриць компонентів (Component Matrix^a), рис. 4.2.

Component Matrix^a

	Component		
	1	2	3
Max. Коефіцієнт усадки, %	,951		
Min. Коефіцієнт усадки, %	,943		
Інтенсивність випромінювання, Лм	-,775		
Час засвітлено шару, с	-,755	,540	
Час засвітлено базових шарів, с		,693	-,564
Товщина шару, мкм		,662	,602
Max. Діапазон довжини хвилі полімеризації, нм		,609	
Min. Діапазон довжини хвилі полімеризації, нм	,501	,535	

Extraction Method: Principal Component Analysis.

a. 3 components extracted.

Рисунок 4.2 – Матриця перевернутих компонентів

Початкові вісім характеристик у даній моделі розподілилися на три макрочинники, і їхні взаємні кореляції виглядають наступним чином:

- максимальний коефіцієнт усадки має значущу кореляцію з першим фактором на рівні 0,951;
- час засвітлення шару одночасно корелює з першим фактором на рівні -0,755 (значуща кореляція) та з другим фактором на рівні 0,54 (слабка кореляція).

Аналізуючи результати на рисунку 4.2, можна відзначити, що в перший макрочинник входять:

- максимальний діапазон довжини хвилі полімеризації;
- мінімальний коефіцієнт усадки;
- інтенсивність випромінювання;
- час засвітлення шару;

- мінімальний діапазон довжини хвилі полімеризації.

Це виглядає логічно та взаємопов'язано, оскільки:

- усадка може залежати від тривалості експонування шару, оскільки зменшення часу експозиції призводить до збільшення відсотку усадки від загального об'єму шару. Це пояснюється тим, що недостатня полімеризація шару зробить його більш схильним до усадки друкованого шару;

- мінімальний діапазон довжини хвилі полімеризації та інтенсивність випромінювання також можуть впливати на усадку, залежно від хімічних властивостей смоли.

До другого макрофактора потрапили, наступні параметри:

- час засвітлено шару;
- час засвітлено базових шарів;
- товщина шару;
- максимальний діапазон довжини хвилі полімеризації;
- мінімальний діапазон довжини хвилі полімеризації.

Залежність цих параметрів також можливо пояснити:

- тривалість експозиції для основних та базових шарів може впливати на товщину шару, оскільки збільшення часу експонування збільшує ризик виникнення надмірного засвітлення шарів.

- довжина хвилі полімеризації також впливає на товщину шару, оскільки може виникати залежність від хімічних властивостей смоли. Зі збільшенням довжини хвилі рекомендована висота шару також зростає, як показано в таблиці 3.1.

До третього макрофактора увійшли час експонування базових шарів та товщина шару. Кореляція тут пояснюється тим, що зі збільшенням висоти базових шарів менше часу експозиції потрібно для затвердіння бази.

Для зручності подальшої оцінки фотополімерних смол перейменуємо отримані нові зміни:

- FAC1_1 – «Показники усадки»;
- FAC2_1 – «Час експонування та висота шару»;

– FAC3_1 – «Показники адгезії перших шарів».

Для того, щоб було зручно працювати далі, необхідно привести дані значення в нормальний стан. Для цього всі значення факторів необхідно розділити на три рівних проміжки (зробити ранжування ряду). Це дозволить описати значення за допомогою балів (1 – низький, 2 – середній; 3 – високий рівень) [112].

Якщо підставити ці значення під конкретну марку смоли, то отримуємо оцінку за трьома показниками, таблиця 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати оцінювання фотополімерних смол

№	Марка смоли	Показники оцінки			Середній бал
		Показники усадки	Час експонування та висота шару	Показники адгезії перших шарів	
1	Anycubic 405nm UV	3	1	2	2
2	Plexiwire Resin Basic	2	3	2	2,3
3	MonoFilament Basic	2	3	2	2,3
4	FunToDo	1	3	1	1,6
5	Wanhao Castable	1	2	3	2
6	BlueCast CR3A	3	1	1	1,6
7	Elegoo 3D	3	2	1	2
8	Weistek	1	2	3	2
9	Tevo	2	1	3	2

Виходячи з результатів, для подальшого проведення досліджень найкращими марками фотополімерних смол виявилися Plexiwire Resin Basic та MonoFilament Basic. Ці смоли будуть використовуватися для створення тестових зразків.

4.2 Дослідження адгезії до поверхні заготовки та відхилення геометричних розмірів

Виходячи з розглянутого в першому розділі принципу експонування ДП був проведений експеримент з виготовлення ДП за допомогою LCD-технології. Для проведення досліджень створений трафарет топології ДП з розмірами 80 мм×72 мм, у форматі векторного зображення (svg.), переконвертувати в формат для 3D-друку (stl.). Такий підхід до обробки і конвертації 2D-зображення в 3D-об'єкт необхідний для роботи з маскою у програмі NanoDLP, в якій можна згенерувати машинний код послідовного виконання команд (G-code) для DLP/LCD-принтера, в якому будуть задані необхідні параметри виконання друку (рис. 4.3) [113].



а) векторне зображення; б) 3D-маска

Рисунок 4.3 – Обробка векторного зображення для 3D-експонування

Для виготовлення зразків використана фотополімерна смола Plexiwire Resin Basic Orange Transparent, обрана через її високі механічні і технологічні параметри малий час експонування, мінімальна можливо товщина шару та відсутність шкідливого впливу на персонал, мала усадка під час полімеризації, висока стійкість впливу хімічних реактивів, що позитивно впливає на процесі травлення. Характеристики смоли наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Характеристики фотополімерної смоли Plexiwire Basic Orange

№	Характеристики смоли	Номінальні значення
1	Густина	1,2 г/см ³
2	Діапазон ультрафіолету	220-405 нм
3	Твердість	80D за шкалу Шора
4	Мінімальна товщина шару	20 мкм
5	Мінімальний час засвічення шару	7 с
6	Точність друку	±0,05 мм

Для перевірки даних припущень були проведені 112 вимірювань відхилення отриманих розмірів провідників ДП від вихідних геометричних. Побудована модель лінійної регресії з урахуванням наступних параметрів:

- тривалість засвічення смоли від 7 с до 20 с;
- інтенсивність випромінювання максимальна 2800 Лм та мінімальна 1600 Лм;
- довжина хвилі випромінювання 405-435 нм;
- товщина базового шару 20 мкм та 50 мкм.

Створену 3D-топологию провідників ДП 80 мм×72 мм перенесено на фольгований склотекстоліт (марки СФ ДСТУ 10316-78) та протравлено в розчинні хлорного заліза (FeCl₃).

У першому експерименті перевірена адгезія фотополімерної смоли до фольгової заготовки. Результат підтверджує стійкість фотополімерної смоли до впливу хлористого заліза та якісну адгезію до поверхні, але спостерігається відхилення геометричних розмірів провідникової структури на ±0,00847 мм (мінімальне відхилення) за значення базового розміру провідника 2 мм.

Результати вимірювань наведені в Додатку Ж. Для більшої наочності та більшого розуміння впливу досліджуваних параметрів на процес виготовлення ДП скорочені результати в діапазоні часу експонування від 7 с до 11 с наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Середні значення відхилень розмірів провідників за різних значень параметрів експонування

Довжина хвилі випромінювання 405 нм			
Інтенсивність випромінювання 1600 Лм		Інтенсивність випромінювання 2800 Лм	
Час експонування, с	Відхилення, мм	Час експонування, с	Відхилення, мм
7	+0,084	7	+0,102
8	+0,107	8	+0,129
9	+0,125	9	+0,135
10	+0,137	10	+0,165
11	+0,157	11	+0,17
Товщина шару 20 мкм		Товщина шару 50 мкм	
Час експонування, с	Відхилення, мм	Час експонування, с	Відхилення, мм
7	+0,092	7	+0,102
8	+0,111	8	+0,128
9	+0,122	9	+0,148
10	+0,142	10	+0,162
11	+0,152	11	+0,187
Середнє відхилення за інтенсивності випромінювання 1600 Лм та товщину шару 20 мкм		Середнє відхилення за інтенсивності випромінювання 2800 Лм та товщини шару 50 мкм	
Час експонування, с	Відхилення, мм	Час експонування, с	Відхилення, мм
7	+0,088	7	+0,102
8	+0,109	8	+0,128
9	+0,123	9	+0,141
10	+0,139	10	+0,163
11	+0,155	11	+0,178

Графічний опис залежності відхилень за різних значень параметрів експонування топології ДП наведено на рисунку 4.4.

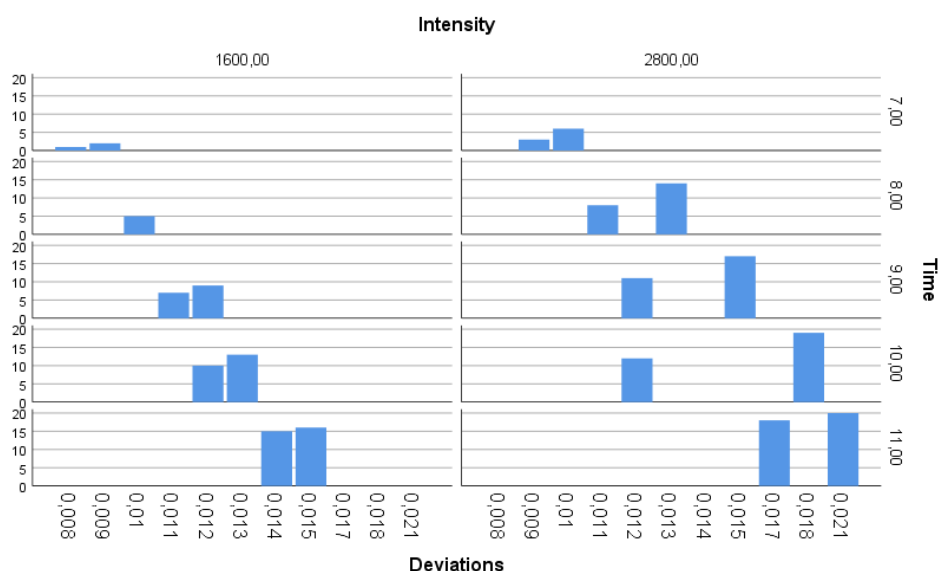


Рисунок 4.4 – Залежності відхилень розмірів провідників від параметрів експонування

Дані відхилення можуть бути пов'язані з великою тривалістю засвічення фотополімера. Отриманий результат дозволив зробити наступні припущення:

- існує лінійна залежність між тривалістю засвічення та геометричним розміром провідника. Чим більший час засвічення, тим більше відхилення розміру в сторону збільшення, відповідно за меншого часу засвічення – відхилення менше;

- за низької інтенсивності світлового потоку фотополімерна смола може не завершити процес полімеризації повністю через часткову прозорість екрану-маски, який поглинає частину ультрафіолетового випромінювання. Це впливає на здатність ультрафіолету до взаємодії зі смолою та може призвести до скорочення терміну служби екрану. Внаслідок недостатньої адгезії до заготовки, випромінювання ультрафіолету може залишити полімер у напівполімеризованому стані на плівці під час перенесення топології на заготовку. Це, в свою чергу, може призвести до зменшення терміну служби плівки. Низька інтенсивність світла, в поєднанні зі слабкою адгезією шару до заготовки, може викликати протравлення провідників та зменшення розмірів у напрямку, що менше за початковий;

– чим більша висота базового шару фотополімерної маски, тим більший зазор між екраном і заготовкою. Це може привести до більшої дифракції світлового потоку, відповідно більшого паразитного засвічення провідників (рис. 4.5).

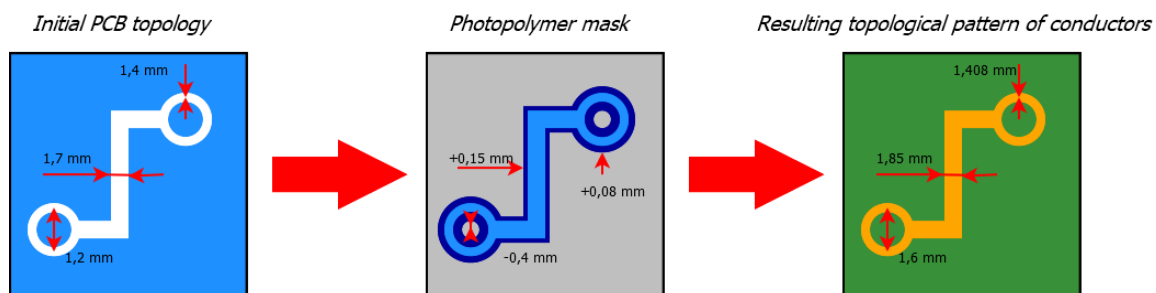
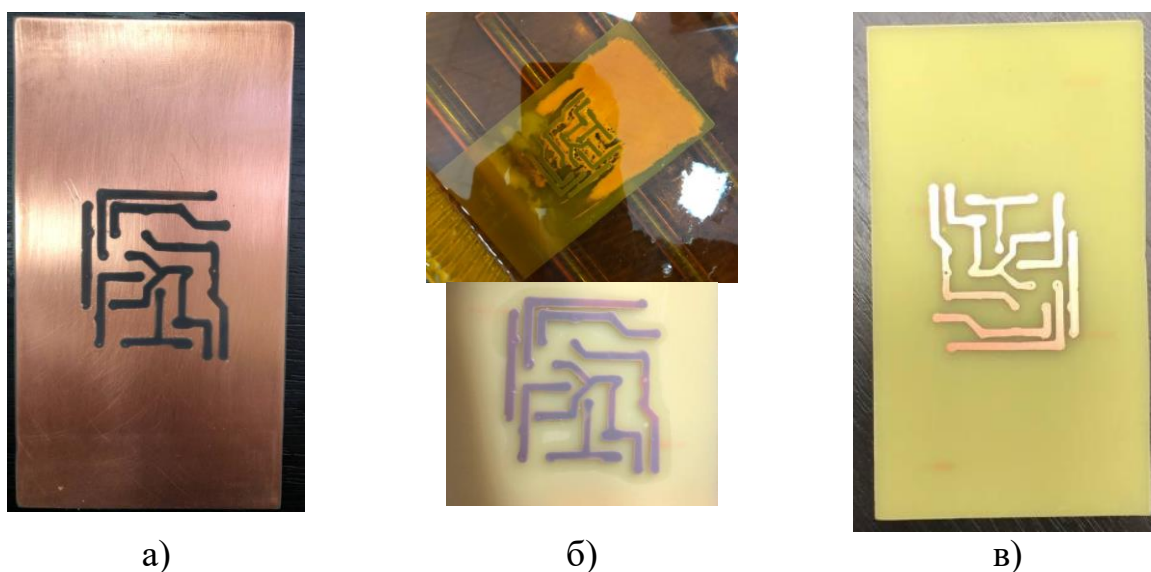


Рисунок 4.5 – Схематичне представлення відхилень в дослідах

Зразок отриманої топології наведений на рисунку 4.6.



а) полімерна фотомаска; б) травлення ДП у розчині хлорного заліза (FeCl_3);
в) готова топологія ДП.

Рисунок 4.6 – Виготовляння ДП за технологію 3D-експонування

4.3 Перевірка базових припущень множинної лінійної регресії

Для побудови моделі множинної лінійної регресії необхідно зробити перевірку базових припущень, які підтвердять або спростують адекватність

початкових значень для розрахунку та дозволять переконатися, що параметри, які були включені в модель, дійсно впливають на залежну змінну.

Для перевірки базових припущень множинної лінійної регресії необхідно переглянути наступні припущення: змінні вимірюються у шкалах інтервалів та відносин; мінімальна кількість вимірювань на кожний незалежний фактор (повинно бути не менше 20 вимірювань); відсутність викидів у вимірюваннях; відсутність мультиколінеарності між незалежними змінними; нормальний розподіл залишків; гомоскедастичність дисперсії залишків; лінійність зв'язку [114, 115].

4.3.1 Змінні вимірювань у шкалах інтервалів та відносин та мінімальна кількість вимірювань

У дані вимірювань у цьому дослідженні мають порядковий характер, тому за першим припущенням модель проходить [116].

У даній моделі використовується чотири незалежні змінні (час експонування (Time); товщина шару (Thickness); інтенсивність випромінювання (Intensity); довжина хвилі (Wavelength)). Виходячи з правила, що на кожну незалежну змінну мінімальна кількість вимірювань становить 20, то для побудови даної множинної лінійної регресії кількість вимірювань повинна бути не менше 100 вимірювань. У даному випадку в цій моделі вимірювань 112 (Додаток Ж). Тому по другому припущенню модель проходить.

4.3.2 Відсутність похибок у вимірюваннях

Для перевірки відсутності похибок у вимірюваннях необхідно скористатися програмою IBM SPSS Statistics 26 [111, 112]. Вводимо значення в дану програму (рис. 4.7).

	Name	Type	Width	Decimals	Label	Values	Missing	Columns	Align	Measure	Role
1	Deviations	Numeric	8	5		None	None	8	Right	Unknown	Input
2	Time	Numeric	8	0		None	None	8	Right	Unknown	Input
3	Thickness	Numeric	8	0		None	None	8	Right	Unknown	Input
4	Intensity	Numeric	8	0		None	None	8	Right	Unknown	Input
5	Wavelength	Numeric	8	0		None	None	8	Right	Unknown	Input

Рисунок 4.7 – Внесення даних в IBM SPSS Statistics 26

Для перевірки наявності викидів обираємо діагностику по вимірюваннях (Casewise diagnostics). Це дозволить отримати деякі відомості про похибки. Побудуємо додаткові змінні, а саме:

- відстань Кука (Cook`s);
- стандартизовані залишки (Standardized);
- стандартизовані передбачені значення (Predicted Values).

Стандартизовані значення цих величин необхідні для того, щоб побачити чи знаходяться ці значення до діапазону норми.

Після налаштувань отримуємо таблицю статистики залишків (Residuals Statistics^a), рис. 4.8.

	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation	N
Predicted Value	,0100125	,0255892	,0178008	,00386310	112
Std. Predicted Value	-2,016	2,016	,000	1,000	112
Standard Error of Predicted Value	,000	,000	,000	,000	112
Adjusted Predicted Value	,0101091	,0255967	,0178070	,00386077	112
Residual	-,00328229	,00228059	,00000000	,00107548	112
Std. Residual	-2,996	2,082	,000	,982	112
Stud. Residual	-3,089	2,146	-,003	1,007	112
Deleted Residual	-,00348782	,00242340	-,00000611	,00113094	112
Stud. Deleted Residual	-3,221	2,184	-,005	1,018	112
Mahal. Distance	2,988	5,550	3,964	,884	112
Cook's Distance	,000	,119	,010	,018	112
Centered Leverage Value	,027	,050	,036	,008	112

a. Dependent Variable: Deviations

Рисунок 4.8 – Статистика залишків

Виходячи з того, що максимальні та мінімальні значення стандартизованих залишків (Std.Residual) та стандартизовані передбачені значення (Std.Predicted Value) не виходять з діапазону ± 3 , що свідчить про відсутність викидів у вимірюванні. Відстань Кука (Cook`s Distance) 0,119, що значно менше одиниці, що теж підтверджує відсутність викидів [116].

4.3.3 Відсутність мультиколінеарності між незалежними змінними

Наступне припущення, яке необхідно перевірити, це наявність мультиколінеарності між незалежними змінними. Обираємо описові статистики (Descriptives) та діагностика колінеарності (Collinearity diagnostics). У результаті отримуємо таблицю кореляцій (рис. 4.9).

Correlations						
		Deviations	Time	Thickness	Intensity	Wavelength
Pearson Correlation	Deviations	1,000	,904	,134	,300	,060
	Time	,904	1,000	,000	,000	,000
	Thickness	,134	,000	1,000	,000	,000
	Intensity	,300	,000	,000	1,000	,000
	Wavelength	,060	,000	,000	,000	1,000
Sig. (1-tailed)	Deviations	.	,000	,079	,001	,267
	Time	,000	.	,500	,500	,500
	Thickness	,079	,500	.	,500	,500
	Intensity	,001	,500	,500	.	,500
	Wavelength	,267	,500	,500	,500	.
N	Deviations	112	112	112	112	112
	Time	112	112	112	112	112
	Thickness	112	112	112	112	112
	Intensity	112	112	112	112	112
	Wavelength	112	112	112	112	112

Рисунок 4.9 – Кореляція моделі

Мультиколінеарність – це лінійна залежність між незалежними змінними, тобто між самими предикторами (час експонування (Time); товщина шару (Thickness); інтенсивність випромінювання (Intensity); довжина хвилі (Wavelength)) [114, 115]. Між самими предикторами, залежності не повинно спостерігатися у вимірюваннях, або вона повинна бути мінімальною (менше 0,7). У даній моделі в кореляції Пірсона (Pearson Correlation), між змінними Time, Thickness, Intensity та Wavelength зв'язок

дорівнює нулю. Щоб переконатися у відсутності мультиколінеарності, переходимо в таблицю коефіцієнтів регресії (Coefficients) (рис. 4.10).

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1	(Constant)	-,007	,003		-2,225	,028		
	Time	,001	,000	,904	34,847	,000	1,000	1,000
	Thickness	3,575E-5	,000	,134	5,180	,000	1,000	1,000
	Intensity	1,998E-6	,000	,300	11,581	,000	1,000	1,000
	Wavelength	1,584E-5	,000	,060	2,295	,024	1,000	1,000

a. Dependent Variable: Deviations

Рисунок 4.10 – Коефіцієнти регресії «Coefficients»

Якщо судити за фактором інфляції дисперсії (VIF), який повинен бути менше 5, то у даній моделі показник (VIF) між незалежними змінними дорівнює 1, що підтримує відсутність мультиколінеарності між предикторами.

Показнику допустимості (Tolerance), який дорівнює $1/(VIF)$, повинен бути більше 0,2. Це доля дисперсії самого предиктора, кожного із вказаного, який не може бути отриманий від інших предикторів. У даній моделі він доповнює одиниці у всіх предикторах.

У діагностиці колінеарності (Collinearity Diagnostics^a), при за наближенні власних значень до нуля (Eigenvalue) збільшується показник обумовленості (Condition Index), він повинен бути менше 15 (рис. 4.11).

Model	Dimension	Eigenvalue	Condition Index	Variance Proportions				
				(Constant)	Time	Thickness	Intensity	Wavelength
1	1	4,751	1,000	,00	,00	,01	,00	,00
	2	,136	5,906	,00	,06	,90	,04	,00
	3	,076	7,911	,00	,59	,01	,40	,00
	4	,036	11,465	,01	,34	,09	,55	,01
	5	,001	86,773	,99	,00	,00	,00	,99

a. Dependent Variable: Deviations

Рисунок 4.11 – Діагностика колінеарності «Collinearity Diagnostics^a»

У даному випадку в п'ятому вимірюванні цей показник дорівнює 86,773, що є великою загрозою мультиколінеарності між предикторами. Для того, щоб виправити це, необхідно виключити одну змінну з моделі. Використовуючи долі дисперсії (Variance Proportions) виключаємо змінну, до якої більше 0,9. У даному випадку це Wavelength, до якої дорівнює 0,99. Перебудовуємо модель та отримуємо результати, наведені на рис. 4.12.

Correlations

		Deviations	Time	Thickness	Intensity
Pearson Correlation	Deviations	1,000	,904	,134	,300
	Time	,904	1,000	,000	,000
	Thickness	,134	,000	1,000	,000
	Intensity	,300	,000	,000	1,000
Sig. (1-tailed)	Deviations	.	,000	,079	,001
	Time	,000	.	,500	,500
	Thickness	,079	,500	.	,500
	Intensity	,001	,500	,500	.
N	Deviations	112	112	112	112
	Time	112	112	112	112
	Thickness	112	112	112	112
	Intensity	112	112	112	112

а)

Coefficients^a

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1	(Constant)	7,533E-5	,001		,128	,898		
	Time	,001	,000	,904	34,178	,000	1,000	1,000
	Thickness	3,575E-5	,000	,134	5,081	,000	1,000	1,000
	Intensity	1,998E-6	,000	,300	11,359	,000	1,000	1,000

а. Dependent Variable: Deviations

б)

Collinearity Diagnostics^a

Model	Dimension	Eigenvalue	Condition Index	Variance Proportions			
				(Constant)	Time	Thickness	Intensity
1	1	3,768	1,000	,00	,01	,01	,00
	2	,133	5,314	,01	,09	,86	,05
	3	,076	7,059	,00	,55	,01	,45
	4	,023	12,762	,99	,36	,12	,50

а. Dependent Variable: Deviations

в)

а – кореляції моделі; б – коефіцієнти регресії (Coefficients^a);
в – діагностика колінеарності (Collinearity Diagnostics^a)

Рисунок 4.12 – Результати побудови моделі

У перебудованій моделі всі отримані результати відповідають попереднім правилам. Показник обумовленості (Condition Index) для всіх змінних менше 15. Тепер дана модель повністю відповідає припущенню про відсутність мультиколінеарності між незалежними змінними [116].

4.3.4 Нормальний розподіл залишків

Залишком називається різниця між залежною змінною та передбаченим значенням Y , через яку проходить лінія регресії. Для перевірки нормального розподілу необхідно побудувати графік розподілу. Заходимо в меню (Plots) обираємо гістограму (Histogram) та нормально імовірний графік (Normal probability plot).

У результаті отримуємо гістограму, за допомогою якої можливо побачити, наскільки сильно відхилиться розподіл від теоретичної апроксимованої лінії Гаусса (рис. 4.13).

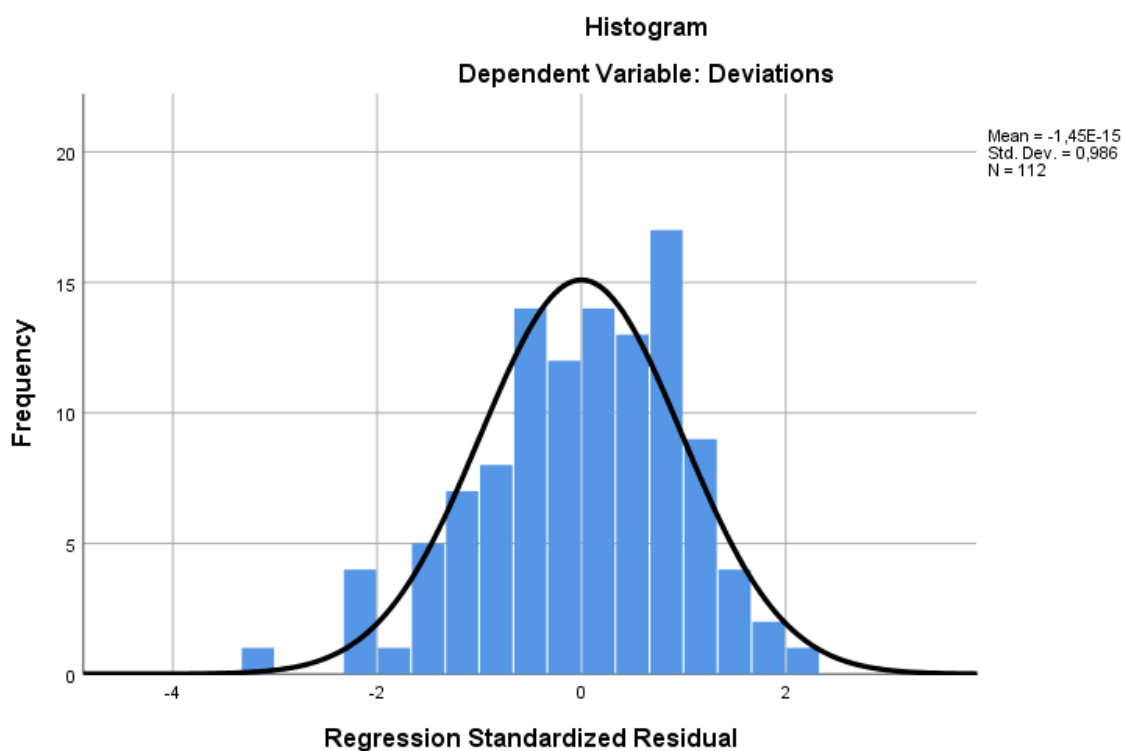


Рисунок 4.13 – Гістограма відхилення розподілу

На графіку ймовірностей, що накопичуються, можливо побачити, чи відхиляються спостереження від теоретичної прямої діагоналі (рис. 4.14).

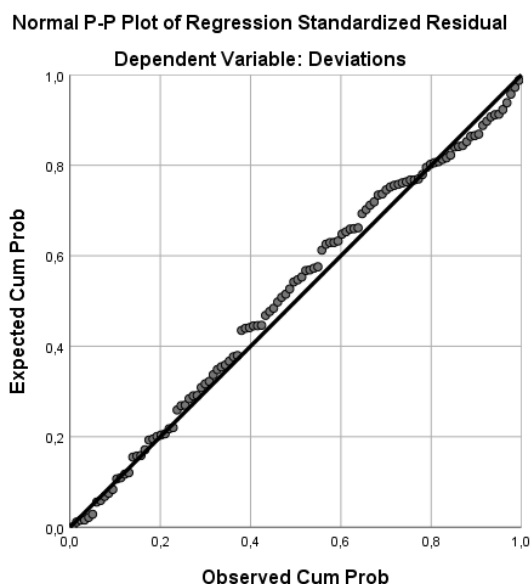


Рисунок 4.14 – Графік спостережень

Для того, щоб оцінити відхилення даних за нормальним розподілом (рисунок 4.13) та відхилення спостережень (рисунок 4.14), необхідно аналітично розглянути ці графіки та оцінити розподіл залишків.

У даних графіках необхідно оцінити стандартизований залишок, для цього окремо побудувавши ці величини. У результаті в вкладці Data View отримуємо додаткові значення RES_1 та ZRE_2, за допомогою яких можливо перевірити нормальність значень (рис. 4.15).

*Research.sav [DataSet1] - IBM SPSS Statistics Data Editor

File Edit View Data Transform Analyze Graphs Utilities Extensions Window Help

1: RES_1 -.00178006428571

	Deviation s	Time	Thicknes s	Intensity	Waveleng th	ZPR_1	ZRE_1	COO_1	RES_1	ZRE_2
1	,00847	7	20	1600	405	-2,01609	-1,40817	,02639	-.00178	-1,59386
2	,01074	8	20	1600	405	-1,78447	-,15269	,00027	-.00040	-,36247
3	,01250	9	20	1600	405	-1,55286	,63721	,00419	,00046	,41227
4	,01375	10	20	1600	405	-1,32124	,96152	,00856	,00082	,73035
5	,01575	11	20	1600	405	-1,08963	1,97051	,03293	,00192	1,71998

Рисунок 4.15 – Додаткові значення RES_1 та ZRE_2

Переходимо до аналізу описової статистики (Descriptive Statistics) розвідковий аналіз (Explore) та перенесемо отримані змінні. У вкладці Plots обираємо графік для критерію нормальності (Normality plots with tests).

У таблиці критерію нормального розподілу (Tests of Normality), у показниках значимості Kolmogorov-Smirnov та Shapiro-Wilk, значимість (Sig.) повинна бути більше, ніж 0,05, це дає підтвердження правила про нормальність розподілу залишків (рис. 4.16).

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Unstandardized Residual	,064	112	,200 [*]	,983	112	,153
Standardized Residual	,064	112	,200 [*]	,983	112	,153

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction

Рисунок 4.16 – Таблиця критерію нормального розподілу «Tests of Normality»

У даному випадку значимість стандартизованих (Standardized Residuals) і нестандартизованих залишків (Unstandardized Residuals) за критерієм Kolmogorov-Smirnov складає 0,2, а за критерієм Shapiro-Wilk складає 0,153, що підтверджує нормальний розподіл залишків у моделі.

Якщо побудувати додаткову гістограму стандартизованих значень, можливо порівняти стандартизовану гістограму з першою гістограмою (рисунок 4.13) та порівняти стандартні відхилення (Std.Dev.), і можливо переконатися, що вони однакові, та зберігається нормальний розподіл залишків (рис. 4.17).

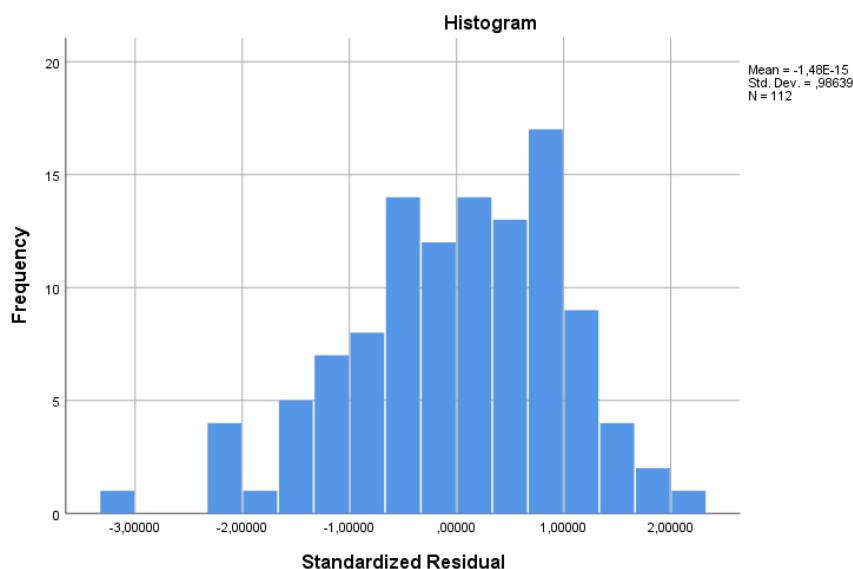


Рисунок 4.17 – Стандартизований залишок

4.3.5 Гомоскедастичність дисперсії залишків

Гомоскедастичність – це постійність дисперсії раптової помилки регресійної моделі [112].

Для перевірки даного припущення графічно обираємо по осі X стандартизовані передбачені значення (*ZPRED), а по осі Y стандартизовані залишки (*ZRESID).

За допомогою отриманого графіку (рисунок 4.18) можливо переглянути наявність викидів у моделі, чи виходять значення за межі ± 3 , в даному випадку викидів у моделі немає.

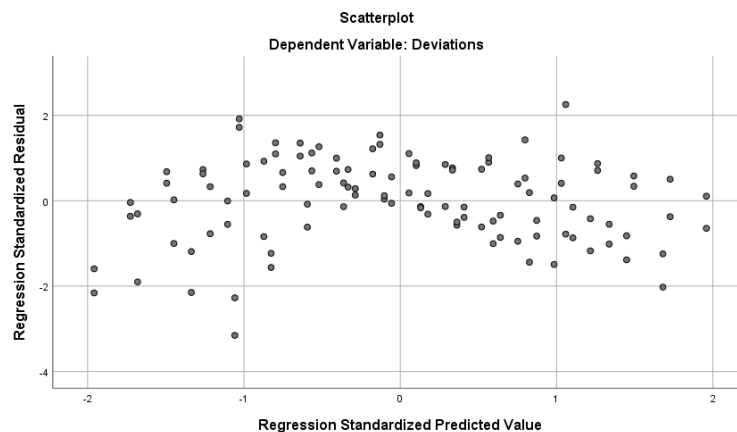
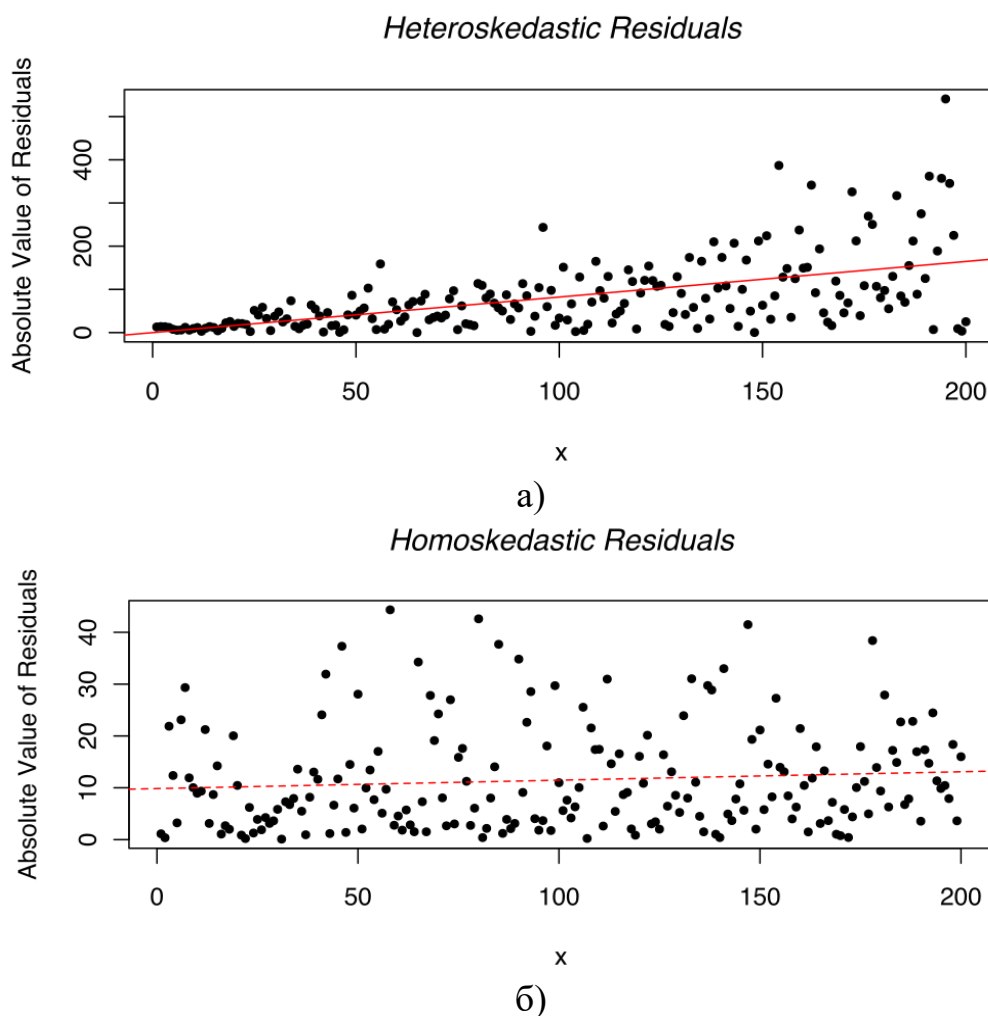


Рисунок 4.18 – Отриманий гомоскедастичний розподіл

Постійність або непостійність дисперсії помилок буде показувати, чи однаковий розкид по Y за умови збільшення X . Для того щоб пояснити, що собою являє гомоскедастичність, розглянемо гетероскедастичність (рис. 4.19).



а – приклад розподілу з гетероскедастичністю; б – приклад розподілу з гомоскедастичністю.

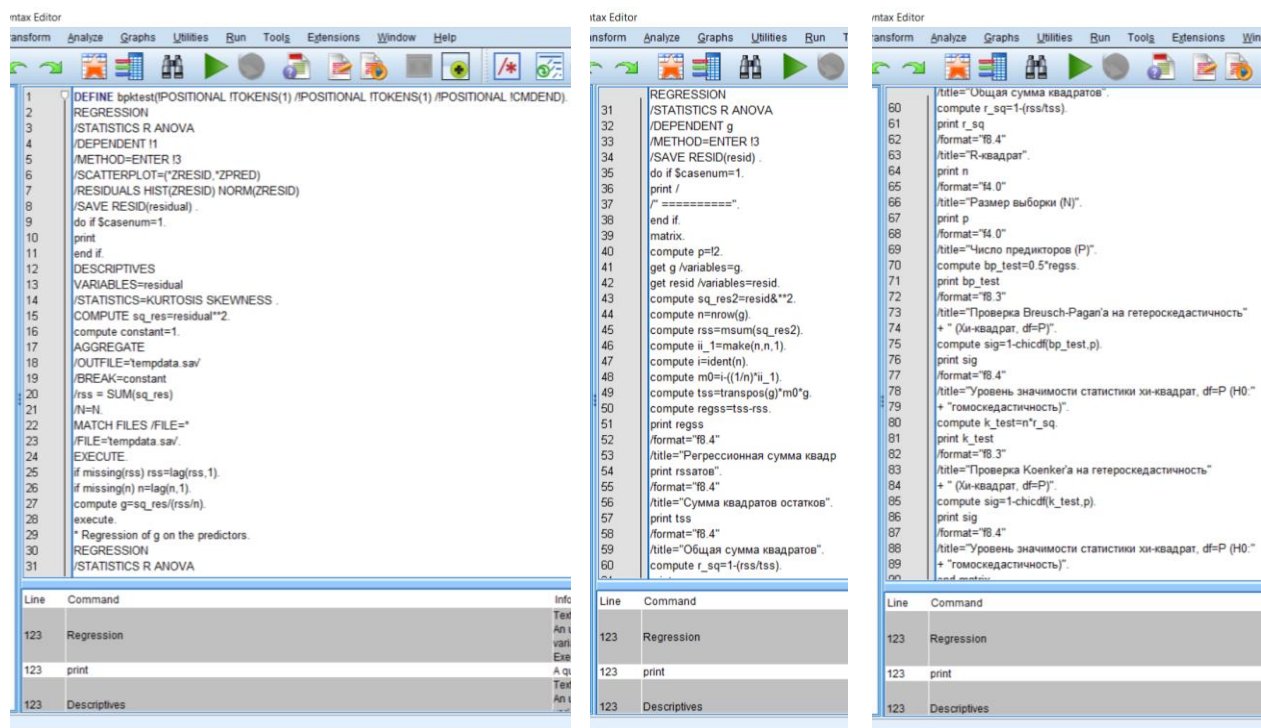
Рисунок 4.19 – Гомоскедастичність та гетероскедастичність розподілів

Гетероскедастичність (рисунок 4.19, а) – це непостійність дисперсії помилки. Воно приводить до того, що розподіл залишків має закономірну форму через непостійність дисперсії помилки. Дані мають закономірну форму. Якщо за формою розподілу спостерігається закономірність, то це

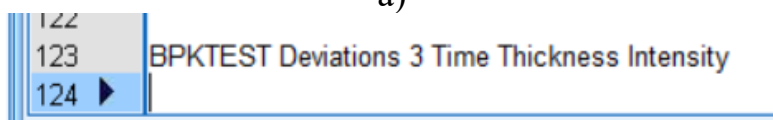
погано для моделі, необхідно щоб розподіл значень по осі Y вимірювався випадково – тому, що, коли будується модель, успішність моделі передбачення не однакова на всьому діапазону значень [114, 115].

Проблема графічної оцінки гомоскедастичності моделі полягає в тому, що легше побачити відхилення від гетероскедастичності, а збережені правила гомоскедастичності моделі до кінця бути впевненим важко. Тому використовуємо спеціалізовані критерії перевірки гомоскедастичності.

Для цього у програмному середовищі SPSS завантажуюмо додатковий код для перевірки гомоскедастичності. У стоці ВРКТЕСТ вводимо назви змінних моделі та почнемо побудову розрахунку значень (Run Selection), рис. 4.20.



а)

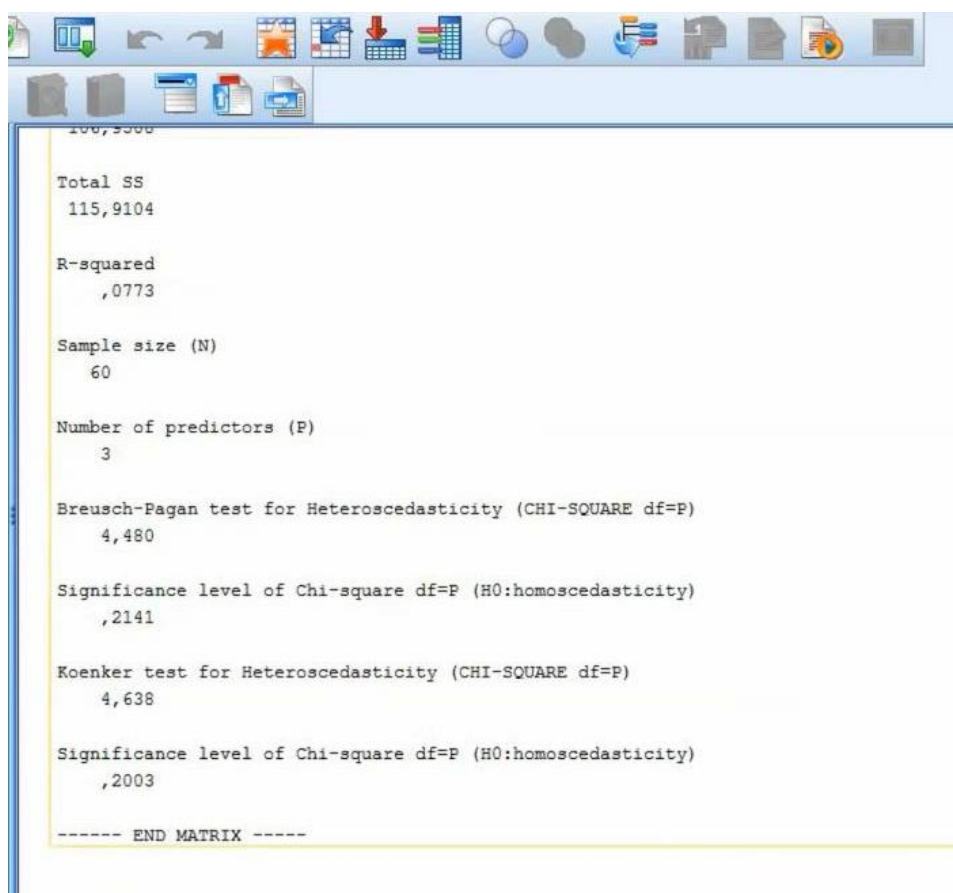


б)

а – частини коду для перевірки гомоскедастичності; б – внесення змінних у моделі

Рисунок 4.20 – Перевірка гомоскедастичності модель

Наприкінці розрахунку дивимося на критерій Breush-Pagan та критерій Koenker. Нульова гіпотеза цих критеріїв – це гомоскедастичність. Відповідно, щоб зберегти припущення про множинну лінійну регресію, необхідно, щоб значення цих критеріїв були більше, ніж 0,05. У даному випадку припущення щодо гомоскедастичності виконано Breush-Pagan дорівнює 4,480 та показник Koenker дорівнює 4,638 (рис. 4.21) [116].



```
100,9500
Total SS
115,9104

R-squared
,0773

Sample size (N)
60

Number of predictors (P)
3

Breusch-Pagan test for Heteroscedasticity (CHI-SQUARE df=P)
4,480

Significance level of Chi-square df=P (H0:homoscedasticity)
,2141

Koenker test for Heteroscedasticity (CHI-SQUARE df=P)
4,638

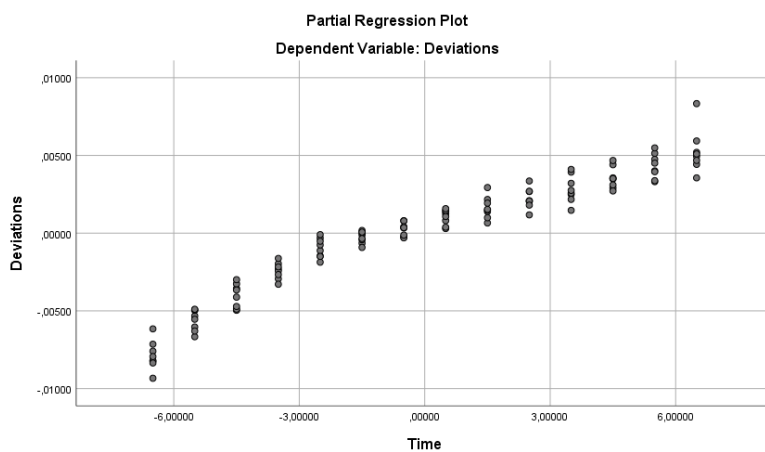
Significance level of Chi-square df=P (H0:homoscedasticity)
,2003

----- END MATRIX -----
```

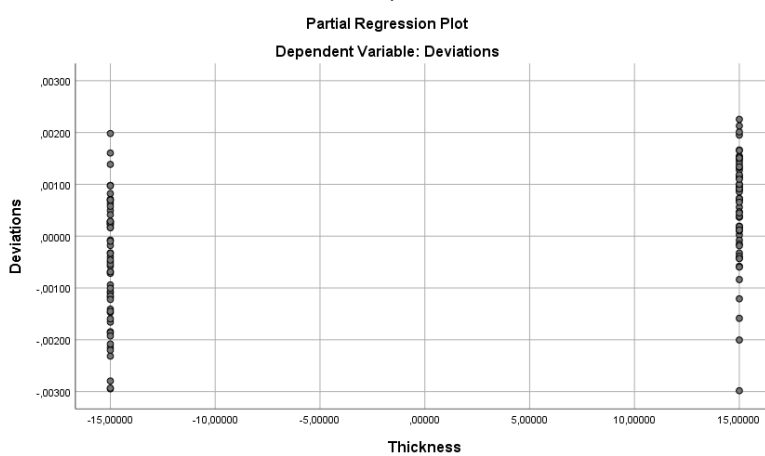
Рисунок 4.21 – Математична перевірка гомоскедастичності моделі

4.3.6 Лінійність зв'язку

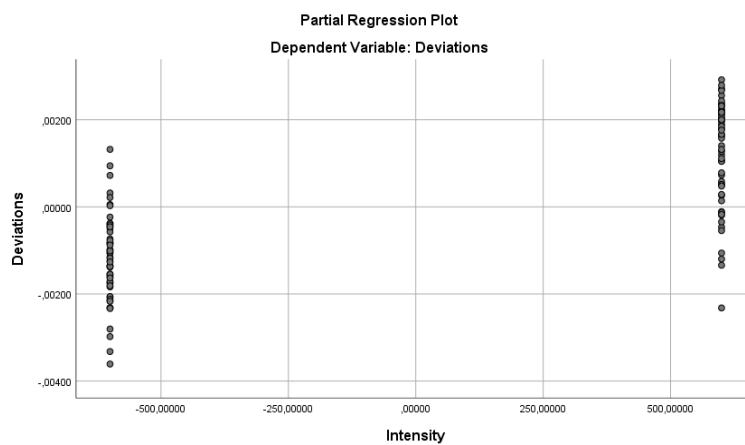
Для оцінки лінійності з в'язків використовуємо графіки приватної регресії. За допомогою функцій Produce all partial plots отримуємо графіки приватної регресії на кожну змінну (рис. 4.22).



а)



б)



в)

а – регресія відхилень від часу експонування; б – регресія відхилень від товщини шару; в – регресія відхилень від інтенсивності експонування.

Рисунок 4.22 – Значення приватних регресій

На основі отриманих розподілів можливо чітко постерігати, що наявність нелінійного патерну у графіках не простежується. Тому можна судити, що модель відповідає вимогам лінійності зв'язку [116].

4.4 Побудова моделі множинної регресії впливу параметрів експонування на геометричні розміри топології

Вводимо отримані дані у програму IBM SPSS Statistics для проведення базового лінійного регресійного аналізу параметрів експонування [111, 112].

Використовуючи розрахунки (Зведення для моделі), отримуємо значення коефіцієнта детермінації $R = 0,962$. Це показник відповідності розрахованих моделлю значень (лінійної регресії) та отриманих експериментальних результатів (рис. 4.23).

Model Summary ^b									
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	R Square Change	Change Statistics			Sig. F Change
						F Change	df1	df2	
1	,962 ^a	,925	,922	,00111683	,925	441,002	3	108	,000

a. Predictors: (Constant), Intensity, Thickness, Time

b. Dependent Variable: Deviations

Рисунок 4.23 – Зведення про модель

Для більшої точності перевірки отриманий результат перераховуємо на моделі з нестандартизованими передбаченими значеннями та розраховуємо кореляцію параметрів відхилення від стандартизованих значень (розрахованих відхилень), рис. 4.24.

Correlations

		Deviations	Unstandardized Predicted Value
Deviations	Pearson Correlation	1	,962**
	Sig. (2-tailed)		,000
	N	112	112
Unstandardized Predicted Value	Pearson Correlation	,962**	1
	Sig. (2-tailed)	,000	
	N	112	112

** . Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

Рисунок 4.24 – Кореляція значень

Значення R при повторному розрахунку дорівнює 0,962, що доводить, що кореляція отриманих та передбачених значень існує.

Коефіцієнт множинної детермінації R^2 дорівнює 0,925. Це означає, що включені в систему параметри на 92,5% впливають на результат. Скоригований коефіцієнт R^2 дорівнює 0,922 або 92,2%. Стандартна помилка оцінки 0,00111683.

За таблицею ANOVA перевіряємо гіпотезу про умову $R^2 = 0$. Оскільки рівень «Значимість» $< 0,05$, то підтверджується правильність попередніх результатів (рис. 4.25).

ANOVA^a

Model		Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1	Regression	,002	3	,001	441,002	,000 ^b
	Residual	,000	108	,000		
	Total	,002	111			

a. Dependent Variable: Deviations

b. Predictors: (Constant), Intensity, Thickness, Time

Рисунок 4.25 – Результати розрахунків значимості моделі

Для визначення ваги кожної змінної скористаємося Beta-коефіцієнтами, які показують, на скільки змінюється значення параметра від збільшення на

одиницю одного з факторів. Для пошуку Beta-коефіцієнтів розрахунок буде проводитися за допомогою стандартизованих значень (Z-балів).

Це необхідно для того, щоб переконатися, що стандартизовані значення і нестандартизовані збігаються (рис. 4.26).

Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Correlations		
		B	Std. Error	Beta			Zero-order	Partial	Part
1	(Constant)	7,533E-5	,001		,128	,898			
	Time	,001	,000	,904	34,178	,000	,904	,957	,904
	Thickness	3,575E-5	,000	,134	5,081	,000	,134	,439	,134
	Intensity	1,998E-6	,000	,300	11,359	,000	,300	,738	,300

a. Dependent Variable: Deviations

Рисунок 4.26 – Результати розрахунків (Beta-коефіцієнтів)

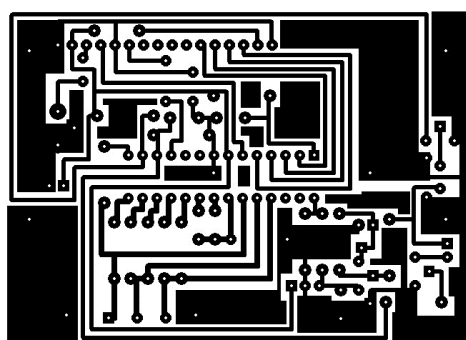
Виходячи з рівня значущості коефіцієнтів, можна порівняти, чи відрізняється Beta-коефіцієнт даного фактору від нуля. У даному випадку всі значення значущості $<0,05$ що доводить, що всі фактори включені до моделі коректно. Результати кореляцій Пірсона факторів на відгук наведені на рисунку 4.27.

		Deviations	Time	Thickness	Intensity
Pearson Correlation	Deviations	1,000	,904	,134	,300
	Time	,904	1,000	,000	,000
	Thickness	,134	,000	1,000	,000
	Intensity	,300	,000	,000	1,000
Sig. (1-tailed)	Deviations	.	,000	,079	,001
	Time	,000	.	,500	,500
	Thickness	,079	,500	.	,500
	Intensity	,001	,500	,500	.
N	Deviations	112	112	112	112
	Time	112	112	112	112
	Thickness	112	112	112	112
	Intensity	112	112	112	112

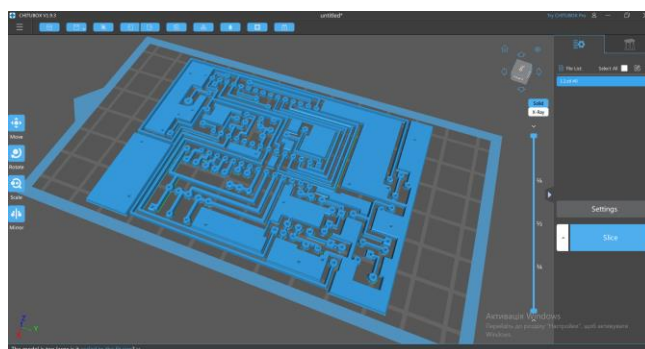
Рисунок 4.27 – Результати розрахунків кореляції Пірсона

Проведенні експерименти показують, що під час використання технології фотополімерного 3D-друку можливо переносити зображення

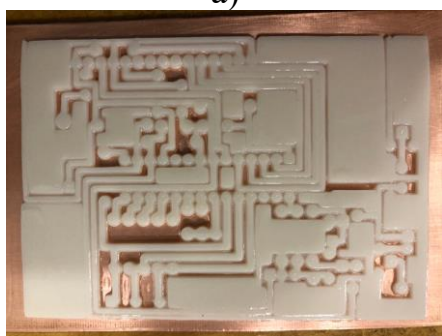
топології на ДП, об'єднавши процеси нанесення фоторезисту та водночас експонування топології в одній установці. У ході проведення експериментів та побудови лінійної регресійної моделі спостерігалася якісна адгезія полімеризованого фотополімеру до поверхні заготовки ДП, у результаті чого під час хімічного травлення вдалося уникнути підтравлювання торців доріжок на відміну від результатів застосування класичних фоторезистивних плівок (рис. 4.28).



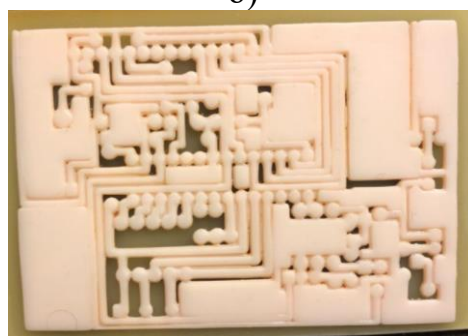
а)



б)



в)



г)

а – 2D-топология ДП; б – 3D-модель фотополімерної маски;

в – надрукована фотополімерна маска; г – плати після травлення.

Рисунок 4.28 – Виготовлення тестових зразків ДП

Виходячи з отриманих значень Beta-коефіцієнтів можливо зробити висновки [117]:

– збільшення на одну одиницю часу впливає на збільшення значення відхилення розмірів провідників ДП на 0,904;

– збільшення на одну одиницю інтенсивності випромінювання впливає на збільшення значення відхилення розмірів на 0,3;

– збільшення на 30 одиниць товщини впливає на збільшення значення відхилення розмірів на 0,134.

Це доводить, що найбільш вагомим фактором під час 3D-експонування є час. Тоді рівняння регресії виглядає таким чином:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 = 0,002 + 0,904x_1 + 0,134x_2 + 0,3x_3. \quad (4.1)$$

де, Y – фактор відхилення геометричних розмірів топології ДП;

b_0, b_1, b_2, b_3 – коефіцієнти лінійної регресії впливу параметрів на фактор;

x_1, x_2, x_3 – параметри впливу на фактор.

4.5 Оцінка різниці відхилень геометричних розмірів провідників ДП за різних товщин провідників

Для того, щоб більш точно визначити вплив параметрів експонування на відхилення геометричних розмірів топології ДП та побудувати більш досконалу регресійно-кореляційну модель, необхідно визначити відхилення розмірів провідникових доріжок різної ширини. Це дозволить впевнитися, що отримані коефіцієнти кореляції чинні і для різних провідників.

Для цього також були проведені вимірювання 112 зразків топології з провідниками. Початкова ширина провідників наступна: 1 мм, 1,5 мм та 3 мм. Діапазон параметрів експонування той же самий, як і для досліджень кореляцій за ширину провідників 2 мм. Результати вимірювань наведені в Додаток 3.

На рисунку 4.29 наведені результати розрахунків кореляції Пірсона для провідників обраної ширини.

Correlations

		Deviations_1 mm	Time	Thickness	Intensity
Pearson Correlation	Deviations_1mm	1,000	,903	,126	,301
	Time	,903	1,000	,000	,000
	Thickness	,126	,000	1,000	,000
	Intensity	,301	,000	,000	1,000
Sig. (1-tailed)	Deviations_1mm	.	,000	,094	,001
	Time	,000	.	,500	,500
	Thickness	,094	,500	.	,500
	Intensity	,001	,500	,500	.
N	Deviations_1mm	112	112	112	112
	Time	112	112	112	112
	Thickness	112	112	112	112
	Intensity	112	112	112	112

а)

Correlations

		Deviations_1. 5mm	Time	Thickness	Intensity
Pearson Correlation	Deviations_1.5mm	1,000	,903	,128	,301
	Time	,903	1,000	,000	,000
	Thickness	,128	,000	1,000	,000
	Intensity	,301	,000	,000	1,000
Sig. (1-tailed)	Deviations_1.5mm	.	,000	,089	,001
	Time	,000	.	,500	,500
	Thickness	,089	,500	.	,500
	Intensity	,001	,500	,500	.
N	Deviations_1.5mm	112	112	112	112
	Time	112	112	112	112
	Thickness	112	112	112	112
	Intensity	112	112	112	112

б)

Correlations

		Deviations_3 mm	Time	Thickness	Intensity
Pearson Correlation	Deviations_3mm	1,000	,896	,138	,305
	Time	,896	1,000	,000	,000
	Thickness	,138	,000	1,000	,000
	Intensity	,305	,000	,000	1,000
Sig. (1-tailed)	Deviations_3mm	.	,000	,073	,001
	Time	,000	.	,500	,500
	Thickness	,073	,500	.	,500
	Intensity	,001	,500	,500	.
N	Deviations_3mm	112	112	112	112
	Time	112	112	112	112
	Thickness	112	112	112	112
	Intensity	112	112	112	112

в)

а – кореляція за ширини провідників 1 мм; б – кореляція за ширини провідників 1,5 мм; в – кореляція за ширини провідників 3 мм.

Рисунок 4.29 – Результати розрахунків кореляції Пірсона

Таким чином, використовуючи формулу (4.1), можливо розрахувати середні значення кореляції кожного окремого параметру експонування зображення за різної ширини провідників (табл. 4.5) [118].

Таблиця 4.5 – Середні значення коефіцієнтів кореляції Пірсона

	Ширина провідника 1 мм	Ширина провідника 1,5 мм	Ширина провідника 2 мм	Ширина провідника 3 мм	Середнє значення кореляції
Час експонування, с	0,903	0,903	0,904	0,896	0,901
Товщина шару, мкм	0,126	0,128	0,134	0,138	0,131
Інтенсивність випромінювання, Лм	0,301	0,301	0,3	0,305	0,301

Тоді загальне рівня лінійної регресії буде мати наступний вигляд за (4.2):

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 = 0,002 + 0,901x_1 + 0,131x_2 + 0,301x_3, \quad (4.2)$$

де Y – фактор відхилення геометричних розмірів топології ДП;

b_0, b_1, b_2, b_3 – коефіцієнти лінійної регресії впливу параметрів на фактор;

x_1, x_2, x_3 – параметри впливу на фактор.

4.6 Оцінка витрат фотополімерної смоли під час 3D-експонування друкованих плат

Для коректного порівняння витрат у процесі виготовлення ДП методом плівкового фоторезисту за технологіями DLP і LCD необхідно визначити оптимальні співвідношення умов експонування та необхідних параметрів виробу з мінімальними відхиленнями топологічного рисунка ДП.

Попередні дослідження відхилення геометричних розмірів топології ДП під час 3D-експонування проводилися на 40 зразках фотополімерних масок за різних значень технологічних параметрів, таких як товщина шару експонування, час засвічення та інтенсивність випромінювання.

Тестове зображення використовувалася та ж модель топології, як і в попередніх дослідженнях, рисунок 4.3, а. Якості матеріалу для отримання

експериментальних зразків була використана фотополімерна смола Plexiwire Resin Basic Orange Transparen. Перевагами даної смоли є: досить висока механічна міцність друкованих деталей, малий час експонування і відносно низька, в порівнянні з іншими аналогами, ціна смоли (880 грн за літр). До того ж дана смола за результатами попереднього факторного аналізу та проведених досліджень показала високий рівень адгезії до фольгованої склотекстолітової заготовки.

У таблиці 4.6 наведені вартості фотополімерних смол, які найчастіше використовуються для 3D-друку.

Таблиця 4.6 – Вартість фотополімерних смол

№	Назва смоли	Вартість, грн/л
1	Anycubic 405nm UV [100]	1400
2	Plexiwire Resin Basic [101]	880
3	MonoFilament Basic [102]	1320
4	FunToDo [103]	2463
5	Wanhao Castable [104]	1650
6	BlueCast CR3A [105]	5927,40
7	Elegoo 3D [106]	1283,37
8	Weitek [107]	972
9	Tevo [108]	1173,40

За результатами проведення низки експериментів з отримання топологічного рисунку ДП, отримано дані, з урахуванням яких було виведено коефіцієнти кореляції Пірсона для факторів експонування фотополімерної 3D-маски, що впливають на відхилення геометричних розмірів під час друку (рис. 4.29).

Для розрахунку витрат фотополімера використовуються наступні параметри друку:

- шари від 20 мкм до 50 мкм;
- крок шарів 5 мкм; тимчасове засвічення від 7 с до 11 с.

Період засвічення шару до 11 с обраний, виходячи з того, що за умови збільшенні часу експонування фотополімерної маски, відхилення геометричних розмірів перевищує 0,1 мкм по осях X, Y.

У програмі NanoDLP передбачена можливість розрахунку витрати фотополімерної смоли під час друку моделі, користуючись, цією опцією і змінюючи параметри експонування та висоти маски, були отримані наступні значення (табл. 4.7).

Таблиця 4.7 – Результати розрахунків витрат полімерної смоли

Товщина, мкм	Час, с	Об'єм, мл	Вартість, грн	Товщина, мкм	Час, с	Об'єм, мл	Вартість, грн
0,2	7	0,45	0,396	0,2	8	0,47	0,4136
0,25		0,54	0,4752	0,25		0,55	0,484
0,3		0,68	0,5984	0,3		0,71	0,6248
0,35		0,79	0,6952	0,35		0,79	0,6952
0,4		0,87	0,7656	0,4		0,89	0,7832
0,45		1,02	0,8976	0,45		1,03	0,906
0,5		1,1	0,968	0,5		1,1	0,968
Товщина, мкм	Час, с	Об'єм, мл	Вартість, грн	Товщина, мкм	Час, с	Об'єм, мл	Вартість, грн
0,2	9	0,47	0,4136	0,2	10	0,51	0,4488
0,25		0,56	0,4928	0,25		0,62	0,5456
0,3		0,72	0,6336	0,3		0,78	0,6864
0,35		0,81	0,7128	0,35		0,87	0,7656
0,4		0,92	0,8096	0,4		0,96	0,8448
0,45		1,01	0,968	0,45		1,08	0,9504
0,5		1,14	1,0032	0,5		1,21	1,0648
Товщина, мкм		Час, с		Об'єм, мл		Вартість, грн	
0,2		11		0,54		0,4752	
0,25				0,67		0,5896	
0,3				0,82		0,7216	
0,35				0,92		0,8096	
0,4				1,09		0,9592	
0,45				1,18		1,0384	
0,5				1,22		1,0736	

За результатами проведеного кореляційного аналізу можливо вивести наступні закономірності (рис. 4.30):

– зміна параметра «висоти шару» на 5 мкм впливає на збільшення або зменшення витрат фотополімерної смоли з коефіцієнтом лінійної регресії (b_1) на 0,97;

– зміна параметра "часу експонування" на 1 с впливає на збільшення або зменшення витрати смоли з коефіцієнтом лінійної регресії (b_2) на 0,215.

		Consumption	Thickness	Time
Pearson Correlation	Consumption	1.000	.970	.215
	Thickness	.970	1.000	.000
	Time	.215	.000	1.000
Sig. (1-tailed)	Consumption	.	.000	.108
	Thickness	.000	.	.500
	Time	.108	.500	.
N	Consumption	35	35	35
	Thickness	35	35	35
	Time	35	35	35

Рисунок 4.30 – Результати розрахунків кореляції Пірсона

Отримані експериментальні результати наведені на рисунку 4.31, що демонструє залежність витрати фотополімерної смоли від часу експонування топології ДП і висоти 3D-маски.

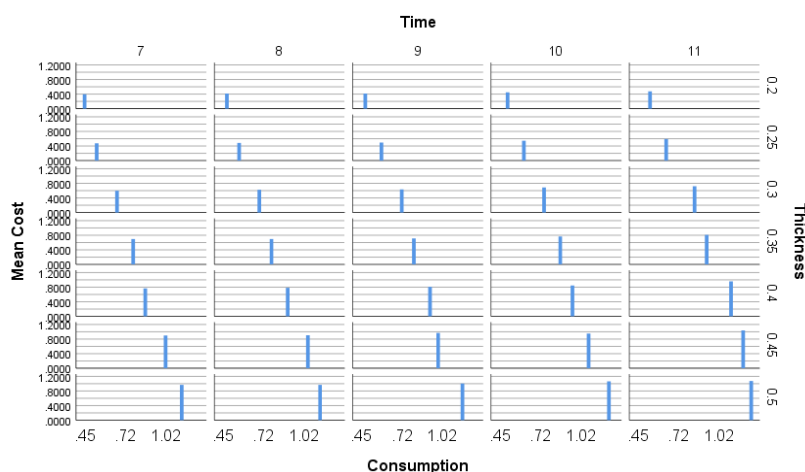


Рисунок 4.31 – Графічне зображення впливу параметрів експонування від витрат фотополімерної смоли

Під час виготовлення зразка витрачено 0,56 мл фотополімерної смоли марки Plexiwire Resin Basic. Якщо проаналізувати подібні зразки, то можливо виявити, що за умови збільшення часу на 1 с, за такої ж висоти шару 0,25 мкм, об'єм витрати смоли у середньому збільшується на 0,17 мл, але при цьому також збільшуються геометричні відхилення ширини провідників в середньому на $\pm 0,125$ мкм. Таким чином, використовуючи 100 мл фотополімерної смоли можна виготовити 178 ДП з габаритами 80 мм×72 мм,

за ціни 88 грн за 100 мл. Грошові витрати на полімерну смолу – 50 коп. на одну 3D-маску. Для виготовлення такої кількості ДП з використанням фоторезистивної плівки марки Riston-200 буде потрібно 11 стандартних листів 300 мм×200 мм (ціна за один лист – 22 грн.). Різниця грошових витрат при фотополімерному експонуванні (88 грн.) і при класичному методі друку з використанням фоторезистивної плівки (242 грн.) становить 154 грн, тобто є меншою на 37 %.

4.7 Висновки до четвертого розділу

У четвертому розділі розглянуто такі питання:

- проведений факторний аналіз фотополімерних смол, які використовуються у 3D-друці. За результатами аналізу були виявлені дві марки фотополімерів – Plexiwire Resin Basic та MonoFilament Basic, які краще підходять для проведення подальших досліджень;
- опрацьований метод переведення 2D-зображення топології у 3D-модель формату *.stl із подальшою конвертацією файлу G-code та відправкою моделі на друк;
- проведені дослідження прилипання адгезії фотополімера до поверхні заготовки та відхилення геометричних розмірів струмопровідних доріжок ДП, після травління топології. Проведено 112 вимірювань для ширини провідникових доріжок: 1 мм, 1,5 мм, 2 мм та 3 мм. На основі отриманих результатів можливо зробити наступні висновки.

Існує лінійна залежність між тривалістю засвічення та геометричним розміром провідника. Чим більше час засвічення, тим більше відхилення розміру в сторону збільшення, відповідно за меншого часу засвічення – відхилення менше.

За низької інтенсивності світлового потоку фотополімерна смола може не остаточно полімеризуватися через неповну прозорість екрану-маски, який приймає на себе частину випромінювання, це зменшує вплив ультрафіолету

на смолу та скорочує термін служби екрану. Таким чином, нестача випромінювання ультрафіолету може призвести до слабкої адгезії з заготовкою, у результаті цього під час перенесення топології на заготовку залишиться полімер у напівполімеризованому стані на плівці, що зменшить термін служби плівки. Нестача інтенсивності світла за слабкої адгезії шару до заготовки може призвести до протравлювання провідників і відхилення розмірів у меншу сторону від початкових.

Чим більша висота базового шару фотополімерної маски, тим більший зазор між екраном і заготовкою. Це може призвести до більшої дифракції світлового потоку, відповідно більшого паразитного засвічення провідників:

Виконано перевірку базових припущень множинної лінійної регресії на основі 112 зразків. Експериментальні дані підтвердили адекватність початкових значень для розрахунку та дозволили переконатися, що параметри, які були включені в модель, дійсно впливають на залежну змінну;

Побудована модель множинної регресії впливу параметрів експонування на геометричні розміри топології ДП.

На основі всіх проведених досліджень та обробленої статистики можливо зробити висновок, що використання адитивних технологій 3D-друку дозволяє:

- значно спростити і здешевити виготовлення ДП, виключивши з виробничого процесу етап 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, радіоелектронними 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 дозволяє більш ефективно використовувати виробничий простір на підприємствах, а також демонструє економічні вигоди використання адитивних технологій 3D-друку під час виготовлення ДП.

Основні результати четвертого розділу опубліковано у роботах [99, 112, 115, 116, 117].

Список джерел, які використано у другому розділі, наведено у переліку джерел посилань [100 – 111, 113, 114].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі були розглянуті науково-прикладні задачі пов'язані з виготовленням одно- та двосторонніх друкованих плат за допомогою адитивного фотополімерного 3D-друку.

У першому розділі було розглянуто:

Методи фотолітографії, які використовуються для виготовлення ДП. За результатами аналізу були знайдені певні недоліки у класичних етапах виготовлення плат за допомогою фотолітографії, а саме:

- витрати часу на етапах нанесення фоторезисту (це стосується як нанесення плівкового фоторезисту (сухого фоторезисту), так і аерозольного, рідкого));

- витрати часу на перехідному проміжку між нанесенням фоторезисту та експонуванням зображення (витрати часу, щоб містити заготовки на наступний етап виготовлення);

- необхідність виготовлення трафаретів топології у разі використання непрямого експонування, що свою чергу у створює необхідність додаткових витратах на принтер для виготовлення трафаретів та займає час на виготовлення;

- велика вартість верстатів для прямого експонування та висока вартість для нанесення фоторезисту;

- необхідність використання великої кількості обладнання на цих двох етапах;

- висока вартість витратних матеріалів, а саме: фоторезисту «сухого» або «рідкого», плівок і чорнил для виготовлення трафаретів для непрямого експонування;

- великі витрати робочого простору через велику кількість верстатів і допоміжного обладнання.

У 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 3D-друку такі як SLA, DLP та LCD, дозволяють спростити ці етапи виготовлення, за допомогою поєднання цих етапів в один та виготовлення фотополімерної захисної маски. Такий підхід має переваги:

- установка безпосередньо експонує задану топологію на заготовку, без попереднього нанесення фоторезистивних плівок або аерозолів, та не потребує виготовлення окремих трафаретів топології ДП;

- немає необхідності у двох окремих установках для нанесення фоторезисту а експонування – все здійснюється одночасно на одній установці, це дозволяє розвантажити виробничі площі;

- відсутність витрат часу між нанесенням та експонуванням топології;

- менші витрати матеріалу (фотополімерної смоли), що у свою чергу зменшить собівартість виробу;

- можливість прогнозування відхилень геометричних розмірів топології через значення параметрів експонування, що всю чергу дозволить зменшити кількість браку у процесі виробництва.

У другому розділі було розглянуто:

Кроки у підготовці реального зображення для обробки системою комп'ютерного зору (СТЗ): першочергово – фільтрація та згладжування зображення, після чого виконується виділення реперних точок та їх нормалізація (включаючи масштабування та поворот), і, нарешті, порівняння отриманого зображення з еталонним.

Методи лінійної фільтрації та згладжування зображення детально розглянуті, так само як і проста та адаптивна бінаризація з використанням методу порогового значення Otsu. Покращений підхід до адаптивної бінаризації зображення застосовано через вдосконалення алгоритму "Block size". Різні методи вирівнювання зображень, такі як AKAZE, BRISK, ORB,

також розглянуті. Для порівняння зображень використовується метод суми абсолютних різниць (SAD).

Крім того, було розроблено програмне забезпечення для контролю відхилень фотополімерної маски та порівняння отриманих топологій з еталонними зображеннями у процесі експонування топології друкованих плат (ДП). Ці дослідження можуть допомогти у вимірюванні відхилень фотополімерних масок під час експонування топології ДП та порівнянні отриманих топологій з початковими зображеннями провідникових структур.

У третьому розділі розглянуто та вирішені такі завдання:

Надано детальний опис фізичного процесу нагрівання фотополімерної смоли під час експонування моделі, у якому враховані особливості фотополімерного експонування за допомогою LCD-технології. Зосереджено увагу на передачі теплового потоку від УФ-випромінювання діодної матриці до фотополімерної смоли, що призводить до виникнення теплового коефіцієнту об'ємного розширення фотополімерної смоли під час друку моделі. Розроблено модель впливу температури у середовищі Matlab Simulink, що включає створення схеми керування тепловим потоком при фотополімерному експонуванні на основі задачі теплообміну між трьома стінками з різними коефіцієнтами теплопровідності. Дано опис формул та побудовано електричну схему нагрівання, яка відтворює процес нагрівання фотополімерної смоли. Крім того, здійснено симуляцію нагріву фотополімерної смоли в програмному середовищі Matlab Simulink.

Проведено дослідження впливу температури фотополімерної смоли на геометричні відхилення розмірів друкованих плат (ДП). Вивчено вплив температурного коефіцієнта об'ємного розширення на відхилення геометричних розмірів провідникової структури друкованої плати. Експерименти розподілені на два етапи.

– дослідження впливу часу експонування та інтенсивності випромінювання УФ на нагрівання 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 ДП (вивчення залежності відхилень геометричних розмірів від температури фотополімеру).

Згідно з результатами досліджень можна зробити наступні висновки:

– зі збільшенням часу експонування шару відбувається збільшення температури фотополімерної смоли, що призводить до зростання відхилень розмірів моделі. Це пояснюється тим, що із збільшенням часу експонування зростає час друку моделі, що в свою чергу веде до збільшення впливу УФ-випромінювання на фотополімерну смолу та її нагрівання, а також збільшує значення температурного коефіцієнта розширення;

– температура нагрівання фотополімерної смоли значною мірою залежить не тільки від часу друку, але й від інтенсивності УФ-випромінювання. Це можна визначити за відмінністю 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 занадто великим, оскільки вони перевищують допустимі відхилення $\pm 0,02$ мм. Це особливо відчутно за інтенсивності випромінювання 2800 Лм. Таким чином, для наступного етапу досліджень рекомендується використовувати діапазон часу експонування від 7 с до 16 с;

– при збільшенні температури фотополімерної смоли збільшується значення відхилень геометричних розмірів моделі;

– при температурах у діапазоні від 10 °С до 20 °С середнє відхилення розмірів менше, ніж у попередніх дослідях за таких же значення часу експонування.

Було перевірено працездатність системи контролю температури фотополімерної смоли під час експонування топології ДП. За рахунок розробленої системи контролю вдалося зменшити відхилення геометричних розмірів топологій масок друкованих плат в середньому на 0,03 мм (залежності від режимів експонування).

Опрацьований метод переводу 2D зображення топології в 3D-модель формату (*.stl) з подальшою конвертацією файлу G-code та відправкою моделі на друк;

У четвертому розділі розглянуто такі питання:

– виконаний аналіз властивостей фотополімерних смол, що використовуються у 3D-друці, де виявлено дві найбільш підходящі марки фотополімерів: Plexiwire Resin Basic та MonoFilament Basic, які належить використовувати для подальших досліджень;

– проведено дослідження адгезії фотополімера до поверхні заготовки та відхилення геометричних розмірів струмопровідних доріжок друкованих плат після травлення топології. Здійснено 112 вимірювань для ширини провідникових доріжок: 1 мм, 1,5 мм, 2 мм та 3 мм. На основі отриманих результатів можливо зробити висновки.

Згідно з результатами досліджень можна зробити наступні висновки:

Існує лінійна залежність між тривалістю засвічення та геометричними розмірами провідника: чим довше триває засвічення, тим більше відхилення розміру в напрямку збільшення, у той час як при меншому часі засвічення відхилення менше.

При низькій інтенсивності світлового потоку може відбутися неповна полімеризація фотополімерної смоли через неповну прозорість екрану-маски, що абсорбує частину випромінювання. Це може призвести до зменшення впливу ультрафіолету на смолу та скорочення терміну служби екрану. Таким чином, недостатня інтенсивність ультрафіолетового випромінювання може призвести до слабкої адгезії до заготовки, що у свою чергу може призвести до залишкової полімеризації фотополімеру на плівці під час перенесення

топології. Це може призвести до скорочення терміну служби плівки. Недостатня інтенсивність світла, разом із слабкою адгезією до заготовки, також може призвести до протравлення провідників та зменшення їхніх розмірів порівняно з початковими.

Чим вище базовий шар фотополімерної маски, тим більший відстань між екраном і заготовкою. Це може спричинити більшу дифракцію світлового потоку і, відповідно, більше паразитне засвічення провідників.

Була проведена перевірка базових припущень множинної лінійної регресії на основі 112 зразків. Експериментальні дані підтвердили адекватність початкових значень для розрахунку та підтвердили, що параметри, які були включені в модель, дійсно впливають на залежну змінну.

Була побудована модель множинної регресії впливу параметрів експонування на геометричні розміри топології ДП.

На підставі всіх проведених досліджень та обробленої статистики можна зробити висновок, що використання адитивних технологій 3D-друку дозволяє:

- суттєво спростити та зменшити вартість виготовлення ДП, виключивши етап нанесення фоторезисту на заготовку;
- оптимізувати використання виробничих приміщень;
- пристосовувати вихідну топологію ДП з урахуванням впливу технологічних факторів (якщо доступне відповідне програмне забезпечення);
- досягати високої точності виготовлення друкованих провідників.

Подальший розвиток запропонованої технології має потенціал для виготовлення повністю функціональних електронних плат, які будуть включати в себе як жорсткі, так і гнучкі елементи, струмопровідні доріжки, діелектричну основу та радіоелектронні компоненти. Ці плати можуть бути використані у різноманітних пристроях.

Під час експериментів було зібрано дані, на основі яких розроблено модель регресії та кореляції для витрат фотополімерної смоли при формуванні топології друкованих плат. Це дозволяє ефективно зменшити

витрати матеріалів у процесі виробництва ДП за допомогою фотополімерних 3D-масок та сприяє позитивному економічному впливу в рамках кіберфізичних виробничих систем на підприємствах.

На основі проведених досліджень встановлено, що використання фотополімерного 3D-друку для виготовлення друкованих плат розміром 80 мм×72 мм з параметрами експонування, такими як час експонування 9 с та висота шару 0,25 мкм, призводить до економії матеріалів у розмірі 37% порівняно з використанням фоторезистивної плівки.

Запропонований метод виготовлення топологій друкованих плат дозволяє поєднати процес нанесення та експонування топології на заготовку, що призводить до скорочення часу виробництва і зменшення кількості необхідного технологічного обладнання. Крім того, цей підхід сприяє ефективнішому використанню виробничого простору на підприємствах і демонструє економічні переваги застосування адитивних технологій 3D-друку для виготовлення друкованих плат.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Arianna Martinelli, Andrea Mina, Massimo Moggi. (2021). The enabling technologies of industry 4.0: examining the seeds of the fourth industrial revolution. *Industrial and Corporate Change*, Volume 30, Issue 1, Pages 161–188, <https://doi.org/10.1093/icc/dtaa060>.
2. Núbia Carvalho, Omar Chaim, Edson Cazarini, Mateus Gerolamo. (2018). Manufacturing in the fourth industrial revolution: A positive prospect in Sustainable Manufacturing, *Procedia Manufacturing*, Volume 21, Pages 671-678. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.170>.
3. Mohammad Fakhar Manesh; Massimiliano Matteo Pellegrini; Giacomo Marzi; Marina Dabic. (2020). Knowledge Management in the Fourth Industrial Revolution: Mapping the Literature and Scoping Future Avenues, *IEEE Transactions on Engineering Management*, Volume: 68, Issue: 1, Page(s): 289 – 300. DOI: 10.1109/TEM.2019.2963489.
4. Andronie, Mihai, George Lăzăroiu, Mariana Iatagan, Iulian Hurloiu, and Irina Dijmărescu. (2021). "Sustainable Cyber-Physical Production Systems in Big Data-Driven Smart Urban Economy: A Systematic Literature Review". *Sustainability* 13, no. 2: 751. <https://doi.org/10.3390/su13020751>.
5. Nevliudov, I., & et al.. (2021). Development of a cyber design modeling declarative Language for cyber physical production systems, *J. Math. Comput. Sci.*, 11(1), 520-542.
6. Theo Lins, Ricardo Augusto Rabelo Oliveira. (2020). Cyber-physical production systems retrofitting in context of industry 4.0. *Computers & Industrial Engineering*. Volume 139, <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106193>.
7. Jabil Circuit Ukraine. Uzhgorod. [Type of medium]. Available: <https://www.jabil.com/contact/locations/uzhgorod.html>.
8. Juanjuan Hao, Yishu Wang, Yufeng Wu, Fu Guo. (2020). Metal recovery from waste printed circuit boards: A review for current status and perspectives. Resources, *Conservation and Recycling*, Volume 157. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104787>.
9. Loris Pietrelli, Sergio Ferro, Marco Vociante. (2019). Eco-friendly and cost-effective strategies for metals recovery from printed circuit boards. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 112, Pages 317-323. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.055>.
10. Liu, X., Fiedler, H., Gong, W. et al. (2018). Potential sources of unintentionally produced PCB, HCB, and PeCBz in China: A preliminary overview. *Front. Environ. Sci. Eng.* 12, 1 <https://doi.org/10.1007/s11783-018-1036-9>.
11. Cathleen Shamieh (2019). Electronics For Dummies. *John Wiley & Sons, 2019*, Pages 432 p. ISBN: 1119675596, 9781119675594.

12. Shamkhalichenar, H., J. Bueche C., Choi, J.W.; Printed Circuit Board (PCB) Technology for Electrochemical Sensors and Sensing Platforms. Electrical and Electro-Optical Biosensors. *Biosensors* 2020, 10(11), 159; <https://doi.org/10.3390/bios10110159>.

13. Huijun Gao, Zhengkai Li, Xinghu Yu, Jianbin Qiu; Hierarchical Multiobjective Heuristic for PCB Assembly Optimization in a Beam-Head Surface Mounter. *IEEE Transactions on Cybernetics*. Volume: 52, Issue: 7, July 2022, Page(s): 6911 – 6924p. DOI: 10.1109/TCYB.2020.3040788.

14. Zhichao Liu, Baida Qu. Machine vision based online detection of PCB defect. *Microprocessors and Microsystems*. Volume 82, April 2021, <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103807>.

15. Quanyin Tan, Lili Liu, Miao Yu, Jinhui Li. An innovative method of recycling metals in printed circuit board (PCB) using solutions from PCB production. *Journal of Hazardous Materials*. Volume 390, 15 May 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121892>.

16. Dedi Suwandil, Rofan Aziz, Agus Sifa, Emin Haris, Jos Istiyanto, Yudan Whulanza. Dry film photoresist application to a printed circuit board (PCB) using a maskless photolithography method. *International Journal of Technology* 10(5): 1033-1041. *IJTech* (2019). ISSN 2086-9614. <https://doi.org/10.31224/osf.io/27f49>

17. Zhao, J., Wu, Y., Xue, C., Yang, S., Wang, L., Zhu, F., Zhu, Z., Liu, B., Wang, Y., Tai, R., 2017. Fabrication of High Aspect Ratio Nanoscale Periodic Structures by the Soft X-ray Interference Lithography. *Microelectronic Engineering*, Volume 170, pp. 49–53.

18. Kim, K.Y.; Chang, H.; Lee, W.D.; Cai, Y.F.; Chen, Y.J. The influence of blood glucose meter resistance variation on the performance of a biosensor with a gold-coated circuit board. *J. Sens.* 2019, 2019, 5948182.

19. Chao Sun, Roman Mikhaylov, Yongqing Fu, Fangda Wu, Hanlin Wang, Xichen Yuan, Zhihua Xie, Dongfang Liang, Zhenlin Wu, Xin Yang. Flexible Printed Circuit Board as Novel Electrodes for Acoustofluidic Devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, Volume: 68, Issue: 1, January 2021, Page(s): 393 – 398p. <https://doi.org/10.1109/TED.2020.3039760>.

20. Kearney, D. J., Kicin, S., Bianda, E., & Krivda, A. (2017). PCB embedded semiconductors for low-voltage power electronic applications. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 7, 387–395. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2017.2651646>.

21. Qi, Z., Pei, Y., Wang, L., Yang, Q., & Wang, K. (2022). A highly integrated PCB embedded GaN full-bridge module with ultralow parasitic inductance. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37, 4161–4173. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2021.3128694>.

22. Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш., Разумов-Фризюк Є.А. Аналіз технології лазерного експонування друкованих плат // *Технологія приладобудування*. 2020, № 1. 56 – 59 с.

23. Nevliudov I., Bliznyuk D., Gurin D., Nikitin D., Razumov-Frizyuk E., Strelets R. Technology of laser exposure of topology of printed boards // №27 2021 *International independent scientific journal VOL. 1*. 27 – 32 с.

24. Разумов-Фризьук Є.А., Гурін Д.В., Нікітін Д.О., Близнюк Д.С., Стрілець Р. Є. Моделювання шнекового екструдера для FFF 3D друку // *Radiotekhnika*, 2(209), 206–214. <https://doi.org/10.30837/rt.2022.2.209.21>.

25. Нікітін Д.О., Стрілець Р.Є., Близнюк Д.С. Порівняльний аналіз технологій 3D прототипування SLA, DLP та LCD. Розробка автоматизованої станції для 3D друку // *Матеріали VII Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами»*, 26 листопада 2020. [Електронний ресурс] – К: НУХТ, 2020. 55 – 56 с.

26. А.Ю. Фартушна, І.М. Мацюк, О.М. Твердохліб. Вивчення технічних характеристик фотополімерних матеріалів та їх застосування у дисципліні «Технології 3D прототипування» // *Сучасні інноваційні технології підготовки інженерних кадрів для гірничої промисловості і транспорту 2021*, м. Дніпро, 23-24 квітня : зб. наук. пр. міжнар. конф. ст 128 – 132. [Електронний ресурс] URI <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/160301>

27. V. Doroshenko, P. Kaliuzhnyi, S. Kolomiitsev. Examples of 3D-Technologies for the Production of Hardware and Polymer Patterns // December 2021, *Casting processes 146(4):p 48-54.*: <https://doi.org/10.15407/plit2021.04.048>.

28. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку (І частина) / Г. О. Андрощук // *Наука, технології, інновації*. - 2017. - № 1. - С. 68-77.

29. Тулашвілі Ю.Й., Лук'янчук Ю.А. Використання сучасних SLA засобів в адитивних IT-технологіях // *The XXIII International Science Conference «Theory, practice and science»*, April 27 – 30, 2021, Tokyo, Japan. P 462 – 467. ISBN-978-1-63848-669-5. <https://doi.org/10.4699/ISG.2021.I.XXIII>.

30. Valentina G. Sysyuk, Vasil M. Granchak. Optical and polymerization characteristics of the materials for 3D-printing depending on the nature of their composite component // Publishing House “*Akadempriodyka*” National Academy of Sciences of Ukraine 2017. p 226 – 237. <https://doi.org/10.15407/akadempriodyka.444.226>

31. Alfred Jacobsen, Trond Jorgensen, Qyvind Tafjord, and Endre Kirkhorn "Concepts for 3D print productivity systems with advanced DLP photoheads", Proc. SPIE 9376, *Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications VII*, 937605.

32. 3D printing. A Practical Guide / Redwood Ben, Garrat Brian, Chauffeur Philemon. - М.: DMK-Press, 2020. - 220 p.

33. Rossi, S.; Puglisi, A.; Benaglia, M. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing in Organic Synthesis. *ChemCatChem* 2018, 10, 1512–1525, <https://doi.org/10.1002/cctc.201701619>.

34. Manapat J, Chen Q, Ye P, Advincula R (2017) 3D printing of polymer nanocomposites via stereolithography. *Macromol Mater Eng* 302:1600553.

35. Fiedor, P.; Pilch, M.; Szymaszek, P.; Chachaj-Brekiesz, A.; Galek, M.; Ortyl, J. Photochemical Study of a New Bimolecular Photoinitiating System for Vat Photopolymerization 3D Printing Techniques under Visible Light. *Catalysts* 2020, 10, 284.

36. T. Sibilieva, V. Alekseev, S. Barsuk, S. Berns, E. Boillat, I. Boiaryntseva, A. Boyarintsev, A. Carbone, A. De Roeck, S. Dolan, T. Driuk, A. Gendotti, I. Gerasymov, B. Grynyov, S. Hugon, U. Kose, O. Opolonin, A. Rubbia, D. Sgalaberna, M. Sibilyev, S. Tretyak, T. Weber, J. Wuthrich, X.Y. Zhao. «3D printing of inorganic scintillator-based particle detectors». *Journal of Instrumentation*, Volume 18, March 2023. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/18/03/P03007>

37. Yun, J.S., Park, T.W., Jeong, Y.H. et al. Development of ceramic-reinforced photopolymers for SLA 3D printing technology. *Appl. Phys. A* 122, 629 (2016). <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0157-x>.

38. Rocheva, V. V.; Koroleva, A. V.; Savelyev, A. G.; Khaydukov, K. V.; Generalova, A. N.; Nechaev, A. V.; Guller, A. E.; Semchishen, V. A.; Chichkov, B.N.; Khaydukov, E. V. High-Resolution 3D Photopolymerization Assisted by Upconversion Nanoparticles for Rapid Prototyping Applications. *Sci. Rep.* 2018, 8, 1– 10, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21793-0>.

39. Tomal, W.; Pilch, M.; Chachaj-Brekiesz, A.; Ortyl, J. Development of new high-performance biphenyl and terphenyl derivatives as versatile photoredox photoinitiating systems and their applications in 3D printing photopolymerization processes. *Catalysts* 2019, 9, 827.

40. Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш., Близнюк Д.С., Гурін Д.В., Разумов-Фризюк Е.А., Стрілець Р.Е. Виготовлення друкованих плат за допомогою технологій 3D друку // Збірника наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова № 4 (482) 2020. 79 – 86 с. [https://doi.org/10.15589/znp2020.4\(482\).9](https://doi.org/10.15589/znp2020.4(482).9).

41. Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш., Близнюк Д.С., Разумов-Фризюк Е.А., Стрілець Р.Е. Створення топології друкованих плат за допомогою фотополімерних адитивних технологій 3D друку // Науково-технічний журнал «Проблеми тертя та зношування» № 1(90) (2021) 42-54 с.

42. Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш. Використання 3D-експонування полімерних фотомасок // Одеська національна академія харчових технологій Університет Інформатики і прикладних знань, м. Лодзь, Польща Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» Навчально-науковий інститут комп'ютерних систем і технологій «Індустрія 4.0» ім. П.М. Платонова XXI Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів «Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій». 137 – 138 с.

43. Levashenko, V., Liashenko, O., & Kuchuk, H. (2020). Building Decision Support Systems based on Fuzzy Data. *Advanced Information Systems*, 4(4), 48–56. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2020.4.07>

44. Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш., Баданюк І.С. Методи фільтрації зображення топології друкованих плат // Вінниця, УКР - Вена, АУТ Випуск № 12-13 «ГРААЛЬ НАУКИ» за матеріалами III Міжнародної науково-практичної конференції "An Integrated Approach to Science Modernization: Methods, Models and Multidisciplinary". 351 – 355 с. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.29.04.2022.058>.

45. Liangyu Chen, Xin Lu, Jie Zhang, Xiaojie Chu, Chengpeng Chen; Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) *Workshops*, 2021, pp. 182-192.

46. Osypenko, V., Lurie, I., Yakobchuk, M., Savina, N., Boskin, O., Lytvynenko, V.: About innovation-investment designing of complex systems by inductive technology of system information-analytical research. In: *10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems IDAACS*, pp. 424–430 (2019). <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2019.8924434>.

47. Patel KK, Kar A, Khan MA (2019) Potential of reflected UV imaging technique for detection of defects on the surface area of mango. *J Food Sci Technol* 56(3):1295–1301.

48. P. Adarsh, P. Rathi and M. Kumar, "YOLO v3-Tiny: Object Detection and Recognition using one stage improved model," *2020 6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, 2020, pp. 687-694, doi:10.1109/ICACCS48705.2020.9074315.

49. Jin, Z.; Zhang, Z.; Gu, G.X. Automated Real-Time Detection and Prediction of Interlayer Imperfections in Additive Manufacturing Processes Using Artificial Intelligence. *Adv. Intell. Syst.* 2020, 2, 1900130.

50. Weis, A.A.; Mor, J.L.; Soares, L.B.; Steffens, C.R.; Drews, P.L., Jr.; de Faria, M.F.; Evald, P.J.; Azzolin, R.Z.; Nelson Filho, D.; Botelho, S.S. Automated seam tracking system based on passive monocular vision for automated linear robotic welding process. In Proceedings of the 2017 IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Emden, Germany, 24–26 July 2017; pp. 305–310.

51. Liu, X. Recent progress in semantic image segmentation. *Artificial Intell. Rev.* 2019, 52, 1089–1106.

52. Petrov, K. E., & Kyrychenko, V. V. (2023). Removal of rain components from single images using a recurrent neural network. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (2), 91. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2023-2-10>

53. R. Lima, A. Pozo, A. Mendiburu, and R. Santana, "Automatic design of deep neural networks applied to image segmentation problems," in *Proc EuroGP*, 2021, pp. 98–113.

54. D. Devarajan, S. Ramesh, and B. Gomathy, "A metaheuristic segmentation framework for detection of retinal disorders from fundus images

using a hybrid ant colony optimization,” *Soft Comput.*, vol. 24, no. 17, pp. 13 347–13 356, 2020.

55. X. Chen, Y. Sun, M. Zhang, and D. Peng, “Evolving deep convolutional variational autoencoders for image classification,” *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 25, no. 5, pp. 815–829, 2020.

56. I. Badanyuk, I. Nevliudov, D. Nikitin. Topological image processing for comprehensive defect and deviation analysis using adaptive binarization // № 1 (23) (2023): Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. 164 – 173 с. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2023.23.164>.

57. Gojcic, Z., Zhou, C., Wegner, J. D., Guibas, L. J., & Birdal, T. (2020). Learning multiview 3d point cloud registration. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition*, pp. 1759–1769.

58. Sun, Y., Zhao, L., Huang, S., *et al*: ‘L2-SIFT: SIFT feature extraction and matching for large images in large-scale aerial photogrammetry’, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 2014, **91**, pp. 1–16.

59. Kumar Y, Sharan SN (2017) Automatic misalignment defects detection & correction in PCB using SURF (Speed up Robust Features) technique. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, ISSN: 2278–0181 IJERTV6IS010166 Vol. 6.

60. Zhu, J. T., Gong, C. F., Zhao, M. X., Wang, L., and Luo, Y.: Image mosaic algorithm based on PCA-ORB feature matching, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-3/W10*, p 83–89, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W10-83-2020>, 2020.

61. Nagendra Pratap Singh, Vibhav Prakash Singh: Efficient Segmentation and Registration of Retinal Image Using Gumble Probability Distribution and BRISK Feature, *Traitement du Signal Vol. 37*, No. 5, October, 2020, pp. 855-864. <https://doi.org/10.18280/ts.370519>.

62. Mukherjee, P., Lall, B.: ‘Saliency and KAZE features assisted object segmentation’, *Image Vis. Comput.*, 2017, 61, pp. 82–97.

63. S. A. K. Tareen and Z. Saleem, “A comparative analysis of SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB, and BRISK,” in *IEEE Int. Conf. on Computing, Math. & Eng. Technologies, Sukkur, iCoMET*, 2018, pp. 1-10.

64. J. W. Feifan Lv, Feng Lu and C. Lim, “Mblen: Low-light image/video enhancement using cnns,” in *British Machine Vision Conference (BMVC)*, 2018.

65. Y. Xiang, F. Wang, and H. You, “Os-sift: A robust sift-like algorithm for high-resolution optical-to-sar image registration in suburban areas,” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 56, no. 6, pp. 3078–3090, 2018.

66. A. Jakubovic’ and J. Velagic’, “Image feature matching and object detection using brute-force matchers,” in *Int. Symp. ELMAR*, pp. 83–86 (2018).

67. Wu, M.: ‘Research on optimization of image fast feature point matching algorithm’, *EURASIP J. Image Video Process.*, 2018, pp. 106.11–106.27.

68. Bellavia, F., Tegolo, D., Valenti, C.: ‘Improving Harris corner selection strategy’, *IET Comput. Vis.*, 2011, **5**, (2), pp. 87–96.

69. Grewenig, S., Weickert, J., Bruhn, A.: ‘From box filtering to fast explicit diffusion’. *Joint Pattern Recognition Symp.*, Darmstadt, Germany, September 2010, pp. 533–542.
70. Li, C., Ma, L.: ‘A new framework for feature descriptor based on SIFT’, *Pattern Recognit. Lett.*, 2009, **30**, (5), pp. 544–557.
71. L. Qian, H. Li, and M. Xu, “Image mosaic algorithm based on improved AKAZE,” in *3rd Int. Conf. Comput. Vis., Image and Deep Learn. & Int. Conf. Comput. Eng. and Appl. (CVIDL & ICCEA)*, pp. 1089–1093 (2022).
72. Yeo, C., Ahammad, P., Ramchandran, K.: ‘Rate-efficient visual correspondences using random projections’. *IEEE Int. Conf. Image Processing*, San Diego, CA, USA, October 2008, pp. 217–220.
73. Strecha, C., Bronstein, A.M., Bronstein, M.M., *et al.*: ‘LDAHash: improved matching with smaller descriptors’, *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2012, **34**, (1), pp. 66–78.
74. Jiang, G., Liu, L., Zhu, W., Yin, S., Wei, S.: A 127 fps in full HD accelerator based on optimized AKAZE with efficiency and effectiveness for image feature extraction. In: *Proceedings of the 52nd Annual Design Automation Conference*, pp. 1–6 (2015).
75. Kalms, L., Elhossini, A., Juurlink, B.: FPGA based hardware accelerator for KAZE feature extraction algorithm. In: *International Conference on Field-Programmable Technology*, pp. 281–284 (2016).
76. Mentzer, N., Mahr, J., Payá-Vayá, G., Blume, H.: Online stereo camera calibration for automotive vision based on HW-accelerated A-KAZE-feature extraction. *J. Syst. Architect.* 97, 335–348 (2019).
77. Li, Y., Du, S., Ikenaga, T.: Temporally forward nonlinear scale space with octave prediction for high frame rate and ultra-low delay A-KAZE matching system. In: *16th International Conference on Machine Vision Applications*, pp. 1–4 (2019).
78. Guan, H., & Smith, W. A. 2017. BRISKS: Binary features for spherical images on a geodesic grid. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 4516-4524.
79. Dán, G., Khan, M. A., & Fodor, V. 2015. Characterization of SURF and BRISK interest point distribution for distributed feature extraction in visual sensor networks. *IEEE Transactions on Multimedia*, 17(5), pp. 591-602.
80. Shaharyar Ahmed Khan Tareen; Rana Hammad Raza.: Potential of SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB, BRISK, AGAST, and 7 More Algorithms for Matching Extremely Variant Image Pairs. In: *IEEE Xplore*: 20 April 2023. ISBN:979-8-3503-3531-6. <https://doi.org/10.1109/iCoMET57998.2023.10099250>.
81. Fan, X.N., Gu, Y.F., Ni, J.J., 2019. Application of Improved ORB Algorithm in Image Matching. *Computer and Modernization*, (2), 1-6,14.
82. Wei Chang, Yun Liu. An improved fast panoramic image stitching algorithm[J]. *Electronic measurement technology*, 2017, 40(7): 90-94.
83. Zhou, L.L.; Jiang, F. Image matching algorithm based on fast and brief. *Comput. Eng. Des.* 2015, 5, 1269–1273.

84. Luo, H.; Liu, K.; Jiang, S.; Li, Q.; Wang, L.; Jiang, W. CAISOV: Collinear Affine Invariance and Scale-Orientation Voting for Reliable Feature Matching. *Remote Sens.* 2022, 14, 3175.

85. Pang, S.; Du, A.; Mehmet, A.; Chen, H. Weakly supervised learning for image keypoint matching using graph convolutional networks. *Knowl.-Based Syst.* 2020, 197, 105871.

86. Chung, K.-L.; Tseng, Y.-C.; Chen, H.-Y. A Novel and Effective Cooperative RANSAC Image Matching Method Using Geometry Histogram-Based Constructed Reduced Correspondence Set. *Remote Sens.* 2022, 14, 3256.

87. Pu, X.C.; Tan, S.F.; Zhang, Y. Research on the navigation of mobile robots based on the improved fast algorithm. *CAAI Trans. Intell. Syst.* 2014, 9, 419–424.

88. Fan, X.N.; Gu, Y.F.; Ni, J.J. Application of improved ORB algorithm in image matching. *Comput. Mod.* 2019, 282, 1–6.

89. S. Li, “Research on SLAM loop detection based on ORB feature matching algorithm,” M.S. thesis, Softw. Eng., Beijing Univ. Technol., Beijing, China, 2020.

90. S. Chen, S. Zhong, B. Xue, X. Li, L. Zhao and C. -I. Chang, "Iterative Scale-Invariant Feature Transform for Remote Sensing Image Registration," in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 59, no. 4, pp. 3244–3265, April 2021, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3008609>.

91. Теорія автоматичного управління: Навчальний посібник [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В.П. Бунь. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 144 с.

92. Конспект лекцій з дисципліни «Теорія автоматичного управління» для здобувачів освітнього ступеня «бакалавр» зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології денної форми навчання [Електронний ресурс] / [Упорядник Я. В. Корпань]; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. – Черкаси: ЧДТУ, 2019. – 124 с.

93. Osadchyi S. I., Zozulya, V. A., Kalich, V. M., & Timoshenko, A. S. (2024). The frequency method for optimal identification of close-loop system elements . *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (4), 195. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2023-4-18>

94. Нікітін Д.О. Розробка моделі керуванням температури фотополімерної смоли на базі LCD-технології 3D-друку // Системи управління, навігації та зв'язку, Національний університет “Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка” – Полтава 2024: Збірник наукових праць, випуск 1 (75). 31 – 37 с. ISSN 2073-7394. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.1.031>.

95. Теорія автоматичного управління. Нелінійні та дискретні системи: Навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ.

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков. – Електронні текстові дані . – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 98 с.

96. Brian H. Hahn, Daniel T. Valentine. “Essential MATLAB for Engineers and Scientists”, *Academic Press*. ISBN: 978-0-08-100877-5, <https://doi.org/10.1016/C2015-0-02182-7>. (2017).

97. Rudenko O., Bezsonov O., Ilyunin O., Demirskiy O., Serdiuk N., Arsenyeva O., Semenenko O., 2023, Using a Neural Network Approach to Predict Deposits on the Surfaces of Heat Exchange Equipment, *Chemical Engineering Transactions*, 103, 697-702. <https://doi.org/10.3303/CET23103117>

98. S. Han and S. P. Bhattacharya, “PID controller synthesis using a v-Hurwitz stability criterion,” *IEEE Control Syst. Lett.*, vol. 2, no. 3, pp. 525– 530, 2018. <https://doi.org/10.1109/LCSYS.2018.2842784>.

99. Нікітін Д.О., Балабанов І.В. 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: International Center of Scientific Research.* p. 197 – 203. ISBN 979-8-88955-774-6. <https://doi.org/10.36074/scientia-26.01.2024>

100. Нікітін Д.О., Коротун Є.В. Дослідження параметрів фотополімерної смоли для адитивного 3D-друку // *Період трансформаційних процесів в світовій науці: задачі та виклики: матеріали II Міжнародної наукової конференції, м. Кривий Ріг, 10 січня, 2024р. / Міжнародний центр наукових досліджень. —Вінниця: ТОВ «УКРЛОГОС Груп, 2024. 292 – 294 с. ISBN 978-617-8126-97-1. <https://doi.org/10.30888/2663-571210.36074/mcnd-19.01.2024>*

101. Anycubic 405nm UV [Type of medium]. Available: <https://ua.anycubic.biz/white-eco-plant-based-uv-resin-anycubic-1kg>.

102. Plexiwire Resin Basic Orange Transparen [Type of medium]. Available: <https://shop.plexiwire.com.ua/basic-resin/resin-orange-transparent-500/>.

103. MonoFilament Basic [Type of medium]. Available: <https://monofilament.com.ua/ua/products/fotopolimernie-smoli-dlya-3d-printera/resin-basic/>.

104. FunToDo [Type of medium]. Available: <https://www.funtodo.net>.

105. Wanhao Castable [Type of medium]. Available: <https://wanhao.store/products/wanhao-castable-resin-for-jewelry-green-color-1000ml-bottle>.

106. BlueCast CR3A [Type of medium]. Available: <https://www.uvelirmag.com/3d-printery-i-polimery/bluecast-cr3a-for-lcddlp-3dp/>.

107. Elegoo 3D [Type of medium]. Available: <https://www.elegoo.com/collections/resin>.

108. Weistek [Type of medium]. Available: <https://www.amazon.com/Standard-UV-Curing-Precision-Photopolymer-Printing/dp/B08L6P5PNK>.
109. Tevo [Type of medium]. Available: <https://3ddevice.com.ua/product/smola-dlia-3d-printera-nextdent-base/>.
110. Основи аналітики: навч. посіб. Київ: Видавництво Ліра-К, 2022. 248 с. ISBN 978-617-520-284-5.
111. SPSS Statis for Dumlmies, 4th Edition /by Jesus Salcedo and Keith McCormick.[Book]. Published by: John&Sons.Inc. 2020. P. 444.
112. Statistical Methods in Psychiatry Research and SPSS. 2nd Edition./ By M. Venkataswamy Reddy. [Book]. Apple Academic Press. 2019. P.442. <https://doi.org/10.1201/9780429023309>.
113. Нікітін Д.О., Невлюдов І.Ш., Разумов-Фризюк Е.А. 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», 16 – 19 лютий 2021 г., Рим, Італія 606 – 611 с.
114. Приб К.А. Діагностика в системі управління [текст]: навч.посіб. / К.А. Приб, П75 Н.І. Патики. – Київ: «Центр учбової літератури», 2016. – 432 с. ISBN 978-617-673-410-9.
115. Величко О.М., Гордієнко Т.Б. Основи системного аналізу і прийняття оптимальних рішень [текст]: навч.посіб. / Величко О.М., Гордієнко Т.Б.: «Олді+», 2021. – 672 с. ISBN 978-966-289-553-7.
116. Nevlyudov I., Razumov-Frzyuk E., Nikitin D., Badaniuk I., Strelets R. // Practical results of the study of photopolymer exposure of printed circuit board topology. ISBN 978-9984-891-22-4 UDC 658.012.32 Information systems in project and program management, [Text]: Collective monograph edited by I. Linde. European University Press. Riga: ISMA, 2023. 317 p. Recommended for publication by the Kharkiv National University of Radio Electronics (protocol No. 10 of October 06, 2023).
117. Nevlyudov I., Razumov-Frzyuk I., Nikitin D., Blyzniuk D., Strelets R. Technology for creating the topology of printed circuit boards using polymer 3D masks // № 1 (15) (2021): Сучасний стан наукових досліджень і технології в промисловості. ст 120-131. DOI: <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2021.15.120>.
118. Nevliudov I., Bliznyuk D., Nikitin D., Razumov-Frzyuk E., Strelets R. Cost Estimation of Photopolymer Resin for 3D Exposure of Circuit Board // Technology Audit and Production Reserves — № 2/2(64), 2022. P.43-49. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.256538>.