

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ
Кафедра _____ КІТАР
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський)
Спеціальність _____ 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології
та робототехніка
Тип програми _____ Освітньо-професійна
Освітня програма _____ Комп'ютеризовані та робототехнічні системи
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав.кафедри _____
(підпис)

«__» _____ 2025р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Остапенко Ігорю Володимировичу
(шифр і назва)

1. Тема роботи: _____ Розроблення програмного модуля для моделювання
циклічних технологічних процесів з використанням технологій ПОТ

Затверджена наказом університету від _____ 25.11.2024 №1239Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії _____ 21.01.2025р.

3. Вихідні дані до роботи: 3.1 Циклічний технологічний процес; 3.2 ПОТ
технології; 3.3 Q-схема моделювання

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: 4.1 Вступ; 4.2 Аналіз
системи автоматизації циклічних технологічних процесів; 4.3 Аналіз

циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат;

4.4 Вибір обладнання та формування переліку параметрів; 4.5 Розробка
Q-схеми моделювання тех. процесу виробництва друкованих плат;

4.6 Розробка метода моделювання технологічного процесу виробництва
друкованих плат; 4.7 Обґрунтування вибору мови та середовища розробки;

4.8 Розробка алгоритму моделювання технологічного процесу виробництва
друкованих плат; 4.9 Розробка програмної функції моделювання;

4.10 Проведення експериментів з моделювання технологічного процесу
виробництва друкованих плат; 4.11 Аналіз отриманих результатів;

4.12 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Графічний демонстраційний матеріал в форматі PowerPoint(*.ppt) формату А4 –15 сторінок.

6. Консультанти розділів роботи

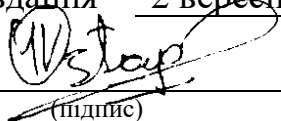
Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по-батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз системи автоматизації циклічних технологічних процесів	15.09.2024-08.10.2024	виконано
2	Аналіз циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат	09.10.2024-21.10.2024	виконано
3	Вибір обладнання та формування переліку параметрів	22.10.2024-01.11.2024	виконано
4	Розробка Q-схеми моделювання тех. процесу виробництва друкованих плат	02.11.2024-11.11.2024	виконано
5	Розробка метода моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат	12.11.2024-20.11.2024	виконано
6	Обґрунтування вибору мови та середовища розробки	21.11.2024-25.11.2024	виконано
7	Розробка алгоритму моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат	26.11.2024-02.12.2024	виконано
8	Розробка програмної функції моделювання	03.12.2024-08.12.2024	виконано
9	Проведення експериментів з моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат	09.12.2024-20.12.2024	виконано
10	Аналіз отриманих результатів	21.12.2024-28.12.2024	виконано

Дата видачі завдання 2 вересня 2024р.

Здобувач


(підпис)

Остапенко І.В.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Стародубцев М.Г.

(прізвище, ініціали)

Я, як студент ХНУРЕ, розумію та підтримую політику закладу з академічної доброчесності. Я не надавав та не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

05.01.2025

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'I. V. Ostapenko', with a stylized flourish at the end.

Остапенко І.В.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 89 с., 15 табл., 18 рис., 3 дод., 46 джерел.

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ЦИКЛІЧНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ, ПОТ, ЕФЕКТИВНІСТЬ, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС.

Мета дослідження – підвищення ефективності циклічного технологічного процесу за рахунок розробки програмного забезпечення для моделювання.

Об'єкт дослідження – технологічний процес.

Предмет дослідження – методи, моделі та програмне забезпечення моделювання циклічного технологічного процесу.

В кваліфікаційній роботі було проведено аналіз циклічних технологічних процесів на виробництві, використання технології ПоТ для автоматизації технологічних процесів, методів моделювання циклічних технологічних процесів та сучасних системи автоматизації циклічних технологічних процесів. Було проаналізовано циклічний технологічний процес виробництва друкованих плат, обрано обладнання та сформовано перелік параметрів. Розроблено Q-схему моделювання та метод моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат. Проведено обґрунтування вибору мови та середовища розробки, розроблено алгоритм моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат та програмну функцію моделювання. Заключним етапом стало проведення експериментальних досліджень з моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат та аналіз отриманих результатів моделювання.

Результати кваліфікаційної роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме 9.4.

ABSTRACT

Explanatory note: 89 pages, 15 tables, 18 figures, 3 app, 46 sources.

AUTOMATION, CYCLIC TECHNOLOGICAL PROCESSES, IIOT, EFFICIENCY, SOFTWARE, MODELING, TECHNOLOGICAL PROCESS.

The purpose of the study is to increase the efficiency of the cyclic technological process by developing modeling software.

The object of the study is the technological process.

The subject of the study is methods, models and software for modeling the cyclic technological process.

The qualification work analyzed cyclic technological processes in production, the use of IIoT technology for automation of technological processes, methods for modeling cyclic technological processes and modern automation systems for cyclic technological processes. The cyclic technological process of printed circuit board production was analyzed, equipment was selected and a list of parameters was formed. A Q-scheme of modeling and a method for modeling the technological process of printed circuit board production were developed. The choice of language and development environment was justified, an algorithm for modeling the technological process of printed circuit board production and a modeling software function were developed. The final stage was the conduct of experimental research on modeling the technological process of printed circuit board production and the analysis of the obtained modeling results.

The results of the qualification work can be attributed to Sustainable Development Goal 9 "Industry, Innovation and Infrastructure", namely 9.4.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	9
Вступ.....	10
1 Аналіз системи автоматизації циклічних технологічних процесів.....	12
1.1 Аналіз циклічних технологічних процесів на виробництві.....	12
1.2 Аналіз використання технології ПоТ для автоматизації технологічних процесів	13
1.3 Аналіз методів моделювання циклічних технологічних процесів	15
1.4 Аналіз сучасних системи автоматизації циклічних технологічних процесів	17
1.5 Постановка задач дослідження	19
2 Розробка схеми та метода моделювання циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат	21
2.1 Аналіз циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат	21
2.2 Вибір обладнання та формування переліку параметрів.....	27
2.3 Розробка Q-схеми моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат	39
2.4 Розробка метода моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат	43
2.5 Висновки до 2-го розділу	46
3 Розробка програми моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат та експериментальні дослідження	48
3.1 Обґрунтування вибору мови та середовища розробки	48
3.2 Розробка алгоритму моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат	49
3.3 Розробка програмної функції моделювання	51

3.4 Проведення експериментів з моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат	56
3.5 Аналіз отриманих результатів моделювання	63
3.6 Охорона праці	64
3.7 Висновки до 3 розділу	67
Висновки	68
Перелік джерел посилань	69
Додаток А Лістинг програми моделювання циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат	77
Додаток Б Апробація результатів наукових досліджень	80
Додаток В Демонстраційний матеріал.....	88

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ДП – друкована плата;

ЕРЕ – електронні радіоелементи;

СМО – система масового обслуговування;

ЦТП – циклічні технологічні процеси;

ШІ – штучний інтелект;

АОІ – автоматизовані системи для оптичного контролю;

Big Data – великі дані;

ІоТ – промисловий інтернет речей;

РСВ – виробництво друкованих плат;

SCADA – supervisory control and data acquisition.

ВСТУП

Сучасні виробничі системи потребують високої точності, швидкості та адаптивності в управлінні, що можна досягти за допомогою інтеграції новітніх технологій. Застосування ІІОТ дозволяє здійснювати моніторинг та контроль параметрів виробничих процесів в реальному часі, що забезпечує підвищення ефективності, зниження витрат і покращення якості продукції.

Моделювання циклічних технологічних процесів є важливим інструментом для розробки та тестування нових методів управління. Створення програмного забезпечення, яке б враховувало специфіку цих процесів і використовувало можливості ІІОТ, дозволяє значно знизити ризики помилок, покращити планування та передбачуваність результатів. Враховуючи швидкість технологічних змін, розробка таких систем є важливим кроком до забезпечення конкурентоспроможності підприємств і підвищення їх ефективності на всіх етапах виробництва.

Мета дослідження – підвищення ефективності циклічного технологічного процесу за рахунок розробки програмного забезпечення для моделювання.

Об'єкт дослідження – технологічний процес.

Предмет дослідження – методи, моделі та програмне забезпечення моделювання циклічного технологічного процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз циклічних технологічних процесів на виробництві;
- провести аналіз використання технології ІІОТ для автоматизації технологічних процесів;
- провести аналіз методів моделювання циклічних технологічних процесів;

- провести аналіз сучасних системи автоматизації циклічних технологічних процесів;
- провести аналіз циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат;
- провести вибір обладнання та формування переліку параметрів;
- розробити Q-схему моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат;
- розробити метод моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат;
- провести обґрунтування вибору мови та середовища розробки;
- розробити алгоритм моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат;
- розробити програмну функцію моделювання;
- провести експериментальні дослідження з моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат;
- провести аналіз отриманих результатів.

Кваліфікаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008 – 15 [1], керуючись навчальним посібником з дипломного проекту [2] та методичними вказівками [3], а результати кваліфікаційної роботи отримали апробацію в наукових статтях [4].

1 АНАЛІЗ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЦИКЛІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

1.1 Аналіз циклічних технологічних процесів на виробництві

Циклічні технологічні процеси (ЦТП) є основою багатьох виробничих систем, що виконують повторювані операції для виготовлення продукції чи надання послуг. Ці процеси характеризуються повторюваністю певних стадій, що дозволяє оптимізувати використання ресурсів та забезпечити стабільний рівень продуктивності. ЦТП застосовуються в машинобудуванні, хімічній промисловості, харчовому виробництві та інших галузях, де важливими є стандартизація та мінімізація витрат. Структура ЦТП включає декілька етапів: підготовка сировини, виконання основної операції, проміжний контроль, транспортування та завершальна обробка. У межах кожного циклу застосовуються стандартизовані процедури, що забезпечують високу точність операцій, що дозволяє досягати сталості результатів, але водночас вимагає значного планування для уникнення збоїв у ланцюжку [5].

Серед основних переваг ЦТП – передбачуваність, ефективне використання ресурсів, можливість швидкого масштабування виробництва, а також зниження впливу людського фактора. Завдяки повторюваності операцій, ці процеси добре адаптуються до автоматизації, що підвищує точність і зменшує кількість відходів. Крім того, ЦТП сприяють зниженню витрат на одиницю продукції через оптимізацію виробничого циклу. Попри значні переваги, організація ЦТП стикається з багатьма викликами. Непередбачені затримки, поломки обладнання чи нестача ресурсів можуть зірвати увесь процес, крім того, жорстка стандартизація іноді зменшує гнучкість, що ускладнює адаптацію до нових вимог ринку або технологій. Аналіз цих викликів є важливим для забезпечення стабільності виробництва .

В останній час зростає роль автоматизації у ЦТП, що базується на використанні промислового інтернету речей (IIoT), робототехніки та систем моделювання. Це дозволяє не лише знижувати кількість ручної праці, але й забезпечувати безперервний моніторинг та оптимізацію процесу в реальному часі. Розробка програмного забезпечення для автоматизації стає ключовою умовою підвищення продуктивності та якості. Для аналізу та оптимізації ЦТП широко застосовуються методи моделювання, такі як цифрові двійники процесів, що дозволяють передбачати можливі збої, оцінювати продуктивність та знаходити вузькі місця в системі, це забезпечує можливість коригувати процеси ще до їхньої реалізації, що знижує ризики та витрати [6].

ЦТП мають значний вплив на екологічну складову виробництва. Оптимізація цих процесів сприяє зменшенню споживання енергії, сировини та кількості відходів. Застосування екологічно чистих матеріалів та енергозберігаючих технологій стає важливим фактором для забезпечення сталого розвитку виробництва. Перспективою вдосконалення ЦТП є подальша інтеграцією автоматизації, використанням штучного інтелекту та машинного навчання. Ці технології дозволять створювати більш адаптивні системи, які реагуватимуть на зміну умов у реальному часі, такий підхід не лише підвищує ефективність виробництва, але й робить його більш конкурентоспроможним на глобальному ринку [7].

1.2 Аналіз використання технології IIoT для автоматизації технологічних процесів

Промисловий інтернет речей – це концепція, яка об'єднує інтелектуальні пристрої, програмне забезпечення та мережеві рішення для підвищення ефективності промислових процесів. IIoT дозволяє автоматизувати управління технологічними процесами, забезпечуючи

реальний час моніторингу, аналітику та зворотний зв'язок. Основою цієї технології є датчики, контролери, обчислювальні вузли та мережі передачі даних. Ключовими компонентами ІоТ є інтелектуальні сенсори, що збирають дані про стан обладнання чи процесів, програмні рішення для обробки даних та хмарні платформи для їх зберігання. Додатково використовуються аналітичні інструменти, які на основі машинного навчання та великих даних (Big Data) забезпечують оптимізацію роботи виробничих систем. Такі системи також інтегруються з ERP та SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) для комплексного управління. ІоТ забезпечує низку переваг, серед яких зниження простоїв завдяки прогнозуванню поломок, оптимізація споживання ресурсів та підвищення якості продукції. Наприклад, технології ІоТ дозволяють контролювати енергоефективність обладнання та швидко адаптувати параметри виробництва до змін у реальному часі. Завдяки автоматизації зменшується потреба у втручанні людини, що підвищує безпеку праці [8].

Одним із прикладів є використання ІоТ на виробництві General Electric, де платформа Predix забезпечує моніторинг роботи турбін у реальному часі [9]. Інший приклад – рішення Siemens MindSphere, що дозволяє підприємствам аналізувати виробничі дані для виявлення аномалій та вдосконалення процесів [10]. Обидва приклади демонструють широкі можливості технології для різних галузей промисловості. Поряд з ІоТ існують й інші технології автоматизації, такі як традиційні SCADA-системи, робототехніка та кіберфізичні системи. Прикладом є SCADA, що забезпечує управління та моніторинг, але має обмежені можливості для інтеграції великих даних та аналітики. Кіберфізичні системи є більш складними, але часто дорожчими в розгортанні та обслуговуванні [11].

ІоТ та SCADA мають схожі функції, однак ІоТ пропонує ширший функціонал завдяки можливості інтеграції з хмарними сервісами та машинним навчанням. Наприклад, якщо SCADA здатна лише відображати

стан обладнання, то IoT може прогнозувати поломки, надаючи рекомендації щодо оптимізації. Проте SCADA залишається більш економічним варіантом для невеликих підприємств. У харчовій промисловості IoT дозволяє контролювати температуру, вологість та інші параметри на кожному етапі виробництва. Наприклад, компанія Nestlé впровадила сенсорні системи для моніторингу умов зберігання, що дозволило значно знизити втрати продукції [12]. Такі рішення є ідеальними для галузей, де критичним є дотримання суворих стандартів якості. У важкій промисловості IoT забезпечує моніторинг та управління обладнанням у складних умовах. На шахтах Rio Tinto застосовують системи, які відстежують стан обладнання та рух техніки, що дозволяє не лише підвищити безпеку працівників, але й зменшити витрати на обслуговування [13].

Основними викликами при впровадженні IoT є висока вартість обладнання, необхідність уніфікації протоколів передачі даних та забезпечення кібербезпеки. Підприємства стикаються з проблемою обробки великих обсягів даних, що вимагає додаткових інвестицій у інфраструктуру. Технологія IoT відкриває нові можливості для автоматизації, підвищення ефективності та гнучкості виробничих процесів, роблячи промисловість більш інноваційною та конкурентоспроможною [14].

1.3 Аналіз методів моделювання циклічних технологічних процесів

Моделювання циклічних технологічних процесів є важливим інструментом для оптимізації виробництва, зменшення витрат і підвищення ефективності. Основними методами є аналітичне моделювання, імітаційне моделювання, методи на основі штучного інтелекту (ШІ), а також гібридні підходи. Кожен із цих методів має свої особливості, переваги та недоліки, наведемо деякі з них та опишемо більш детально кожен:

– аналітичне моделювання ґрунтується на використанні математичних формул і рівнянь для опису технологічних процесів. Цей метод дозволяє отримати точні результати для лінійних та добре визначених систем. Перевагами є висока точність, швидкість розрахунків і низькі обчислювальні витрати. Однак аналітичне моделювання не підходить для складних або нелінійних систем, де виникають взаємозалежності між змінними;

– імітаційне моделювання передбачає створення цифрових копій процесів для проведення експериментів у віртуальному середовищі. Воно добре підходить для складних і динамічних систем. Перевагами є можливість враховувати широкий спектр параметрів, виявлення вузьких місць у виробничому процесі та мінімізація ризиків. Водночас, цей метод потребує значних ресурсів для розробки моделей, а також вимагає високої кваліфікації інженерів;

– методи на основі ШІ, такі як нейронні мережі, машинне навчання та генетичні алгоритми, дозволяють створювати адаптивні моделі, здатні прогнозувати поведінку систем у реальному часі. Основні переваги включають здатність аналізувати великі обсяги даних і знаходити оптимальні рішення навіть для складних систем. Недоліками є складність розробки алгоритмів, необхідність значних обчислювальних ресурсів і ризик утворення помилок у навчальних даних;

– гібридні підходи поєднують елементи кількох методів, що дозволяє компенсувати їх недоліки. Наприклад, аналітичні моделі можуть використовуватися разом із імітаційними для швидкого налаштування складних систем, або алгоритми ШІ можуть вдосконалювати існуючі моделі. Переваги гібридних підходів включають високу точність і гнучкість. Недоліками є складність впровадження та висока вартість таких рішень [15].

Порівнюючи ці методи, можна виділити ключові аспекти. Аналітичне моделювання добре підходить для простих процесів, тоді як імітаційне моделювання ідеальне для вивчення складних систем. Методи ШІ

відкривають можливості для глибокого аналізу, але потребують значних ресурсів. Гібридні підходи забезпечують найвищу ефективність, але є технологічно складними. Результати аналізу свідчать, що вибір методу залежить від складності системи, доступних ресурсів і цілей моделювання. Для оптимізації циклічних технологічних процесів часто доцільно використовувати поєднання методів, що дозволяє врахувати всі фактори й забезпечити максимальну ефективність виробництва [16].

1.4 Аналіз сучасних системи автоматизації циклічних технологічних процесів

У сучасних умовах автоматизація циклічних технологічних процесів стала невід'ємною частиною виробничих систем. Основними напрямками автоматизації є інтеграція ІоТ, використання SCADA систем, а також застосування роботизованих систем для оптимізації технологічних процесів. Кожен з підходів має свої особливості, переваги і недоліки [17].

Одним з найбільш поширених рішень є системи на основі ІоТ, які дозволяють здійснювати моніторинг і управління технологічними процесами в реальному часі за допомогою датчиків, підключених до інтернету. Прикладом є платформи, як-от Siemens MindSphere, які дозволяють зібрати і проаналізувати дані з різних виробничих ліній. Основні переваги таких систем – це можливість віддаленого моніторингу, високий рівень інтеграції і адаптивність до різних процесів. Однак складність інтеграції, високі витрати на установку датчиків і необхідність налаштування під конкретні умови виробництва можуть бути значними недоліками. Для покращення систем можна знизити витрати на інфраструктуру шляхом використання більш доступних сенсорів і застосування алгоритмів для автоматичного налаштування параметрів [18].

Ще одним важливим компонентом автоматизації є SCADA-системи, які використовуються для моніторингу та управління технологічними процесами на різних етапах виробництва. Прикладом є система Wonderware, яка дозволяє відображати дані у вигляді інтерфейсів у реальному часі. SCADA-системи добре підходять для централізованого управління та збереження історичних даних. Однак такі системи вимагають стабільного з'єднання з мережею та можуть бути вразливими до збоїв у разі високого навантаження. Для їх покращення можна впровадити механізми адаптивного керування, а також розширити можливості віддаленого доступу через хмарні технології [19].

Роботизовані системи, такі як ABB Robotics, використовуються для автоматизації фізичних процесів, таких як складання, пакування або обробка матеріалів. Вони забезпечують високу точність і ефективність, а також здатні працювати без перерв у циклічних процесах. Однак роботизовані системи вимагають значних інвестицій у обладнання та навчання персоналу. Для покращення цих систем можна використовувати адаптивне програмне забезпечення, що дозволяє роботам виконувати різні завдання без перепрограмування. Також доцільно інтегрувати роботи з іншими автоматизованими системами для зниження витрат [20].

Ще одним прикладом є використання систем на базі технологій штучного інтелекту для прогнозування і оптимізації циклічних процесів, прикладом якого є система GE Digital, яка дозволяє оптимізувати роботу турбін на основі даних про знос обладнання, виробничі умови та прогнози на основі машинного навчання. Перевага таких систем полягає в їх здатності передбачати проблеми до їх виникнення, що значно знижує ймовірність збоїв і поломок, однак складність алгоритмів та потреба в постійному навчанні моделей можуть бути суттєвими обмеженнями. Покращити ці системи можна шляхом зниження витрат на навчання моделей за допомогою методів transfer

learning або використання менш обчислювальних ресурсів для реального часу [21].

Для більш комплексного управління технологічними процесами багато підприємств використовують гібридні системи, які поєднують ІоТ, SCADA і ШІ для забезпечення більшої гнучкості та ефективності. Наприклад, система Honeywell Experion PKS, яка інтегрує реальні дані з виробничих ліній, забезпечуючи автоматичне налаштування процесів в залежності від змін умов. Перевага таких систем полягає в їхній універсальності та здатності працювати з різноманітними технологіями, що дозволяє оптимізувати різні етапи виробництва. Однак складність в інтеграції різних підсистем і висока вартість таких рішень можуть бути їхніми недоліками. Для покращення таких систем можна зменшити кількість необхідних компонентів шляхом вибору універсальних платформ і знижувати їх вартість через використання відкритих стандартів [22].

Вибір між різними системами автоматизації залежить від специфіки підприємства, доступних ресурсів і цілей автоматизації. Для підприємств, що потребують високої точності та інтеграції з різними підсистемами, найкраще підходять гібридні рішення, хоча вони й є дорогими в плані впровадження. Якщо головною метою є зниження витрат і підвищення ефективності на конкретних етапах процесу, більш підходящими будуть SCADA або роботизовані системи. Платформи на основі ІоТ можуть бути ідеальними для підприємств, де важлива можливість віддаленого моніторингу і адаптація до змінюваних умов виробництва [23].

1.5 Постановка задач дослідження

В ході проведеного у першому розділі аналізу, було виявлено, що тема дослідження є актуальною. Метою дослідження є підвищення ефективності циклічного технологічного процесу за рахунок розробки програмного

забезпечення для моделювання. Об'єктом дослідження є технологічний процес. Предметом дослідження є методи, моделі та програмне забезпечення моделювання циклічного технологічного процесу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- провести аналіз циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат;
- провести вибір обладнання та формування переліку параметрів;
- розробити Q-схему моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат;
- розробити метод моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат;
- провести обґрунтування вибору мови та середовища розробки;
- розробити алгоритм моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат;
- розробити програмну функцію моделювання;
- провести експериментальні дослідження з моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат;
- провести аналіз отриманих результатів.

2 РОЗРОБКА СХЕМИ ТА МЕТОДА МОДЕЛЮВАННЯ ЦИКЛІЧНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ДРУКОВАНИХ ПЛАТ

2.1 Аналіз циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат

Циклічний процес виробництва друкованих плат можна поділити на кілька основних етапів, кожен з яких виконується послідовно, проте є тісно пов'язаним з іншими етапами. У більшості випадків процес виробництва можна розглядати як ітеративний, оскільки після завершення певних фаз можлива необхідність повернення до попередніх кроків для усунення дефектів або внесення коректувань [24]. Класичні етапи циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат представлено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Класичні етапи циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат

Назва етапу	Опис	Основні кроки
1	2	3
Проектування друкованої плати (Design)	Це початковий етап, де інженери проектують схему майбутньої плати за допомогою програмного забезпечення для автоматизованого проектування (CAD). На цьому етапі розробляється принципова схема електронного пристрою та проводиться трасування доріжок	Розробка схеми (Schematic Design) Створення топології плати (PCB Layout) Симуляція і перевірка (Verification and Simulation)

Продовження таблиці 2.1

1	2	3
Підготовка виробництва (CAM підготовка)	Після завершення проектування файли, які містять інформацію про схему, перетворюються на формати, придатні для виробництва. Це може включати формати Gerber, які описують кожен шар плати, а також механічні специфікації	Перетворення файлів у формати, придатні для верстатів. Аналіз і оптимізація траєкторій для зменшення кількості відходів матеріалу
Вирізка і підготовка основи (Substrate Preparation)	Основою друкованої плати є діелектричний матеріал, зазвичай склотекстоліт, покритий міддю	Вирізка плати за потрібними розмірами. Очищення та обробка поверхні для забезпечення оптимального нанесення доріжок
Формування схеми (Pattern Transfer)	Один із ключових етапів процесу, де на поверхню плати наносяться доріжки мідного шару	Фоторезистивне травлення: на поверхню плати наноситься фоторезистивний матеріал, потім через фотошаблон схема експонується ультрафіолетовим світлом. Хімічне травлення: після експонування уерозчинені ділянки фоторезисту змиваються, залишаючи відкриту мідь, яку травлять за допомогою хімічних реактивів (наприклад, хлорид заліза)
Свердління (Drilling)	Після формування схеми відбувається свердління отворів для майбутнього монтажу електронних компонентів та для металізації переходів між шарами (у випадку багат шарових плат)	

Продовження таблиці 2.1

1	2	3
Металізація отворів (Plating)	Металізація отворів необхідна для забезпечення електричного зв'язку між різними шарами плати (у багатошарових РСВ). Це досягається за допомогою електрохімічного процесу осадження міді на внутрішні стінки отворів	
Нанесення захисних шарів (Solder Mask and Silkscreen)	Нанесення захисних шарів включає покриття поверхні друкованої плати шаром захисної маски (Solder Mask), що захищає провідники від коротких замикань та корозії, залишаючи відкритими тільки контактні площадки для пайки. Після цього наноситься силкскрін (Silkscreen), який використовується для маркування компонентів та інструкцій на платі	Solder Mask: захисний шар, який наноситься на всю поверхню плати, окрім місць, де компоненти будуть паятися. Він запобігає випадковим коротким замиканням під час пайки Silkscreen: маркування плати, яке допомагає в монтажі компонентів, позначаючи їх місцезнаходження та орієнтацію
Пайка (Soldering)	Після нанесення захисних шарів плата готова до встановлення компонентів	Використовуються різні методи пайки, такі як пайка в розплавленому припої (Wave Soldering) або пайка методом оплавлення (Reflow Soldering)
Контроль якості (Quality Control)	Після завершення пайки та монтажу компонентів відбувається контроль якості плати	Візуальний контроль для виявлення фізичних дефектів. Електричне тестування, яке перевіряє безперервність ланцюгів та наявність коротких замикань
Тестування готового виробу (Functional Testing)	На цьому етапі можуть бути проведені як автоматизовані, так і ручні тести для перевірки відповідності готового виробу заданим технічним вимогам	

Циклічність виробничого процесу виражається у постійному повторенні окремих етапів для різних партій плат, а також можливих ітераціях в рамках однієї партії у випадку виявлення дефектів на етапі контролю якості або тестування. Приведемо приклад:

– якщо при контролі якості виявляються дефекти друку доріжок, плати можуть бути повернуті на стадію фоторезистивного травлення;

– у разі невідповідності функціональних параметрів виріб може бути повернутий на стадію пайки для усунення несправностей [25].

Таким чином, аналіз циклічного технологічного процесу дозволяє оптимізувати витрати ресурсів, скоротити час виготовлення партій, знизити кількість відходів і забезпечити високу якість кінцевої продукції. На базі таблиці 2.1 розробимо графічне представлення типового циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат (РСВ).

Відповідно до заданої схеми електричної принципіальної, яка представлена в додатку А та переліку ЕРЕ, необхідно вдосконалити типовий ТП виготовлення друкованої плати (рис. 2.1) на одиничні ТП з внесенням коректив по операціям. Відповідно до цього рекомендується додати ще операцій контролю, що дозволить зменшити вірогідність отримання браку, за рахунок своєчасного виявлення на ранніх етапах ТП виготовлення ДП.

Виходячи з цього пропонується додати операцію «Оптичного контролю» якості операцій «Формування схеми (Pattern Transfer)» (рис. 2.1. після 4), та повторити її після операцій «Нанесення захисних шарів (Solder Mask and Silkscreen)» (рис. 2.1. після 7). Обґрунтуванням такого рішення послужили наступні рішення:

– внесення операції «Оптичний контроль» на етапах «Формування схеми» та після «Нанесення захисних шарів» є виправданим для підвищення якості виробництва друкованих плат (ДП). На етапі формування схеми (після операції 4) можливі дефекти, такі як неправильне травлення або відхилення у структурі провідників, що можуть призвести до функціональних помилок або

пошкодження плати. Оптичний контроль на цьому етапі дозволить виявити подібні дефекти на ранніх стадіях виробництва та своєчасно усунути їх, зменшуючи ризик браку;

– додатковий контроль після операції нанесення захисних шарів (після операції 7) також є важливим, оскільки захисна маска та силкскрін повинні бути нанесені з високою точністю. Неправильне нанесення захисного шару може призвести до непрацездатності плати через короткі замикання або недостатній захист провідників від зовнішніх факторів. Оптичний контроль на цьому етапі допоможе гарантувати, що плата має належну якість перед завершальними процесами пайки та тестування, що підвищує загальну надійність та якість готового виробу [26].

Виходячи з цього, одиничний циклічний технологічний процес виробництва друкованих плат (PCB) пристрою буде мати наступний вигляд, який представлено на рисунку 2.2.

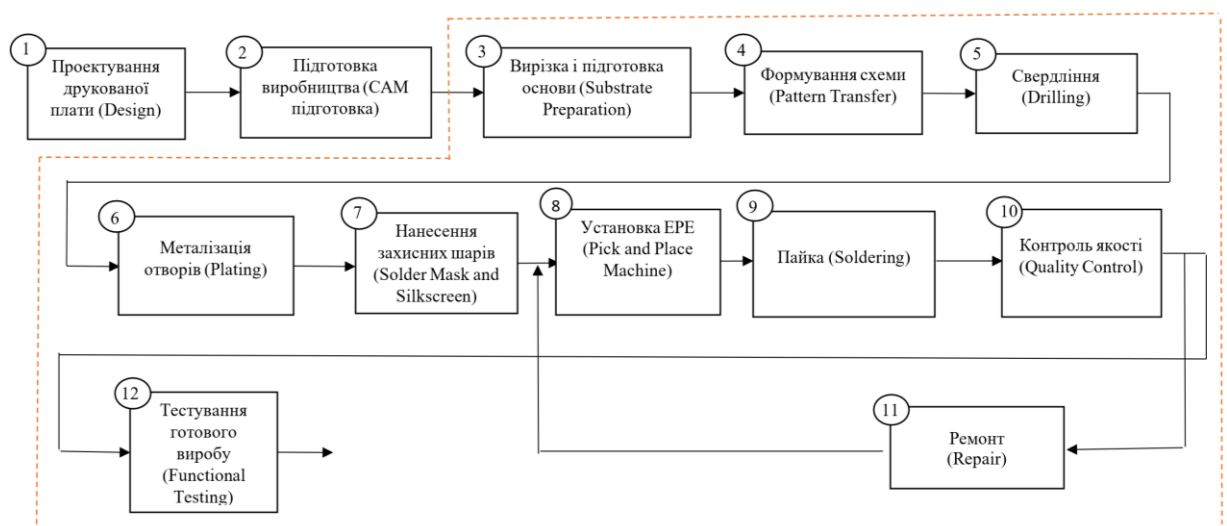


Рисунок 2.1 – Графічне представлення типового циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат

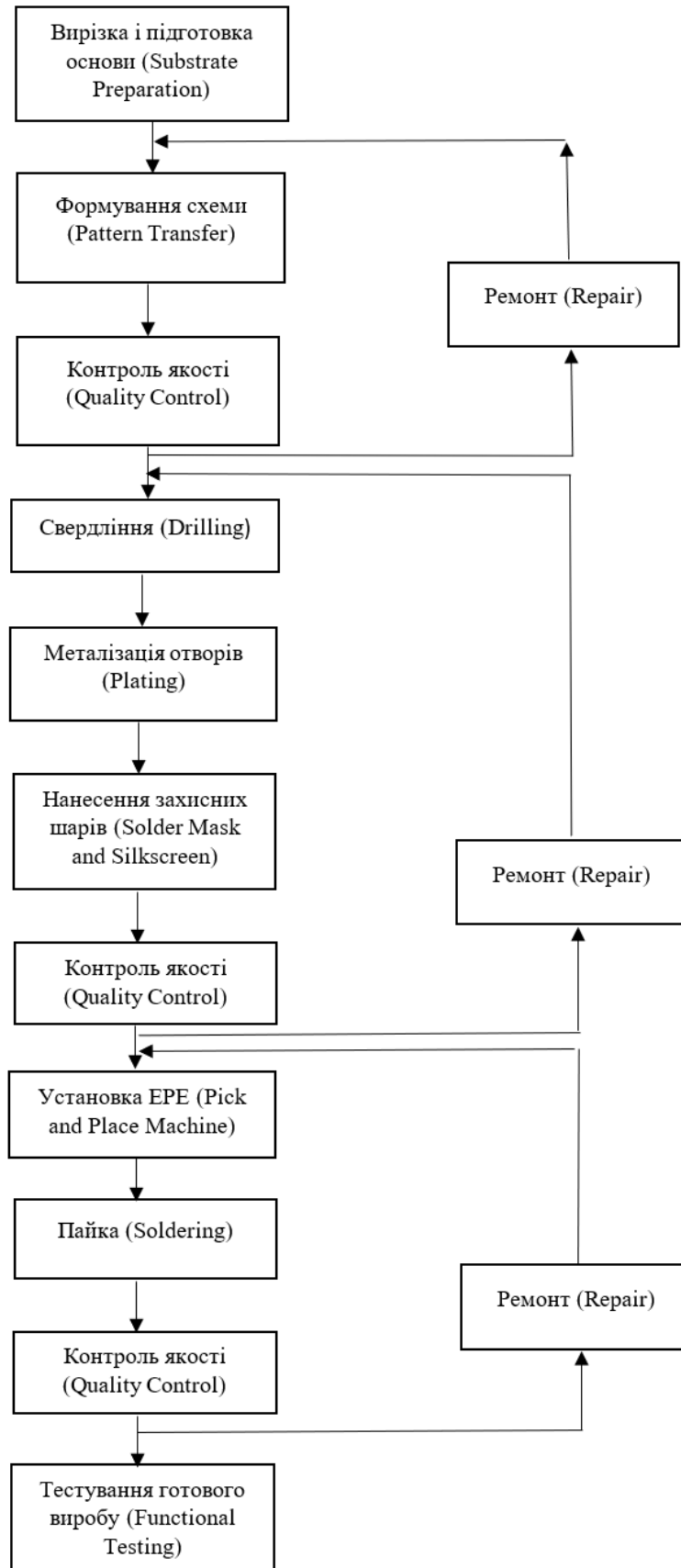


Рисунок 2.2 – Одиничний циклічний технологічний процес виробництва друкованих плат пристрою

2.2 Вибір обладнання та формування переліку параметрів

При виборі обладнання для виробництва друкованих плат (ДП) з використанням планарних електронних радіоелементів (ЕРЕ), необхідно враховувати кілька ключових критеріїв, які впливають на ефективність та якість технологічного процесу:

- точність обладнання для формування схем, обладнання повинно мати високу точність при нанесенні малюнку провідників. Планарні ЕРЕ мають обмежені розміри, тому будь-які відхилення у формуванні схеми можуть призвести до коротких замикань або відкритих ланцюгів. Використання лазерного травлення або прецизійного фоторезисту дозволить зберегти високу якість рисунків шару;

- обладнання для свердління та металізації отворів, під час виробництва плат необхідно забезпечити точне свердління отворів для встановлення планарних ЕРЕ. Від цього залежить правильне розташування елементів на платі та забезпечення надійних електричних з'єднань. Металізація отворів також має бути високоякісною для забезпечення доброго контакту між шарами;

- обладнання для нанесення захисних шарів, при використанні планарних ЕРЕ особливу увагу слід приділяти нанесенню паяльної маски та силкскріну. Паяльна маска повинна точно захищати зони, які не повинні бути покриті при пайці, щоб уникнути коротких замикань між контактами. Для цього потрібно вибирати обладнання з можливістю точної калібровки та контролю;

- автоматизовані системи контролю якості, важливим критерієм є наявність автоматизованих систем для оптичного контролю (АОІ), які допоможуть своєчасно виявляти дефекти на етапах формування схем та нанесення захисних шарів. Це дозволить значно знизити кількість браку та підвищити ефективність виробництва;

– технології для високоякісної пайки, планарні ЕРЕ вимагають точної пайки для збереження надійних з'єднань. Обладнання для пайки повинно підтримувати точне регулювання температури, щоб уникнути перегріву компонентів і забезпечити якісне з'єднання;

– обладнання для тестування та функціональної перевірки, оскільки планарні ЕРЕ є складними компонентами, важливо мати обладнання для електричного тестування плат перед завершенням виробництва. Це включає функціональні тести та випробування на працездатність для перевірки всіх електричних параметрів [27].

Кожен із зазначених критеріїв впливає на вибір обладнання, оскільки від точності процесів, контролю якості, та правильного застосування захисних і контактних матеріалів залежить надійність кінцевого продукту.

Виходячи з обраних критеріїв проведемо аналіз та вибір обладнання відповідно до параметрів ЕРЕ та ДП, заданих в ТЗ, та розробленого одиничного циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат (РСВ) пристрою, який представлено на рисунку 2.2.

Операція "Вирізка і підготовка основи" (Substrate Preparation) (рис. 2.2) є початковим етапом технологічного процесу виготовлення друкованих плат і полягає в тому, щоб нарізати матеріал основи на заготовки потрібного розміру. Це важливо для забезпечення точних розмірів та відповідності заготовок технічним вимогам подальших етапів виробництва. Підготовка також може включати очищення поверхні основи для забезпечення належного зчеплення схемних шарів з матеріалом плати. Ця операція критично впливає на якість і точність кінцевого продукту. На рисунку 2.3 представлений загальний вид автоматизованого станка Schmolл Maschinen MODUL 200, а в таблиці 2.2 представлені його характеристики [28].



Рисунок 2.3 – Загальний вид автоматизованого станка CNC
Schmoll Maschinen MODUL 200 [28]

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики автоматизованого станка CNC
Schmoll Maschinen MODUL 200

Технічні характеристики	Значення
Розмір плати	до 610 мм x 460 мм
Продуктивність	до 300 плат на годину
Точність	$\pm 0,005$ мм
Автоматичне завантаження/розвантаження	Так

Операція "Формування схеми" (Pattern Transfer) є ключовим етапом у виробництві друкованих плат, що відповідає за нанесення електронних схем на підготовлену основу. Під час цього процесу за допомогою фотолітографії або інших методів формуються електричні доріжки, які забезпечують з'єднання між компонентами. Важливість цієї операції полягає в її здатності забезпечити високу точність та якість нанесення схем, що безпосередньо впливає на функціональність та надійність готового виробу. Від коректності виконання формування схеми залежить подальша стабільність роботи електронних пристроїв. На рисунку 2.4 представлений загальний вид автоматизованого станка Orbotech Nuvogo 1000 DI (Direct Imaging), а в таблиці 2.3 представлені його характеристики [29].



Рисунок 2.4 – Загальний вид автоматизованого станка CNC
Orbotech Nuvogo 1000 DI (Direct Imaging) [29]

Таблиця 2.3 – Технічні характеристика автоматизованого станка CNC
Orbotech Nuvogo 1000 DI (Direct Imaging)

Технічні характеристики	Значення
Лазерна система прямого перенесення	Так
Роздільна здатність	до 2 мкм
Швидкість	5000 dpi
Продуктивність	до 250 плат на годину

Операція "Контроль якості" (Quality Control) в технологічному процесі виготовлення друкованих плат є невід'ємною складовою, що забезпечує відповідність виробів встановленим стандартам та специфікаціям. Цей етап включає перевірку якості виконання попередніх операцій, таких як формування схеми, свердління та металізація отворів, що дозволяє виявити дефекти та недоліки на ранніх стадіях виробництва. Якісний контроль не лише знижує ймовірність дефектів у готових виробах, але й підвищує загальну надійність та довговічність електронних пристроїв. Він забезпечує довіру споживачів і знижує витрати на виправлення помилок, що можуть виникнути в процесі експлуатації продукції. На рисунку 2.5 представлений загальний вид автоматизованого станка Koh Young Zenith Alpha AOI, а в таблиці 2.4 представлені його характеристики [30].



Рисунок 2.5 – Загальний вид автоматизованого станка CNC
Koh Young Zenith Alpha AOI [30]

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики автоматизованого станка CNC
Koh Young Zenith Alpha AOI

Технічні характеристики	Значення
Розмір плати	до 530 мм x 530 мм
Швидкість перевірки	70 плат на годину
3D сканування	Так (з точністю до 10 мкм)
Автоматичний аналіз дефектів	Так

Операція "Свердління" (Drilling) в технологічному процесі виготовлення друкованих плат потрібна для створення отворів у шарі основи, які забезпечують електричне з'єднання між різними шарами плати та монтажними майданчиками для встановлення електронних компонентів. Ці отвори також використовуються для механічного кріплення плати у складі готового виробу. Точність і якість свердління є критично важливими для забезпечення належного функціонування плати та уникнення електричних коротких замикань чи несправностей. На рисунку 2.6 представлений загальний вид автоматизованого станка Hitachi DR300 PCB Drilling Machine, а в таблиці 2.5 представлені його характеристики [31].



Рисунок 2.6 – Загальний вид автоматизованого станка CNC Hitachi DR300 PCB Drilling Machine [31]

Таблиця 2.5 – Технічні характеристики автоматизованого станка CNC Hitachi DR300 PCB Drilling Machine

Технічні характеристики	Значення
Швидкість	до 200000 об/хв
Діаметр отвору	0,1 мм – 8 мм
Точність свердління	$\pm 0,01$ мм
Автоматична система завантаження плат	так

Операція "Металізація отворів" (Plating) в технологічному процесі виготовлення друкованих плат є критично важливим етапом, оскільки вона забезпечує електричне з'єднання між шарами плати через отвори. Під час цього процесу внутрішні стінки отворів покриваються тонким шаром металу, зазвичай міддю, що дозволяє створювати електричні зв'язки між різними компонентами плати. Це також сприяє поліпшенню механічної міцності конструкції та її здатності до відведення тепла. Якість металізації визначає надійність роботи електронних пристроїв, тому важливо дотримуватися технологічних параметрів на цьому етапі. На рисунку 2.7 представлений загальний вид автоматизованого станка Atotech Uniplate InPulse 2, а в таблиці 2.6 представлені його характеристики [32].



Рисунок 2.7 – Загальний вид автоматизованого станка CNC

Atotech Uniplate InPulse 2 [32]

Таблиця 2.6 – Технічні характеристики автоматизованого станка CNC
Atotech Uniplate InPulse 2

Технічні характеристики	Значення
Товщина покриття	до 25 мкм
Продуктивність	до 16 плат на годину
Мінімальний діаметр отвору	0,15 мм
Автоматична система хімічної металізації	Так

Операція "Нанесення захисних шарів" (Solder Mask and Silkscreen) в технологічному процесі виготовлення друкованих плат є ключовою для забезпечення їх надійності та функціональності. Захисний шар, або маска для паяння, запобігає небажаному з'єднанню паяльного матеріалу з певними ділянками плати, що допомагає уникнути коротких замикань та покращує якість з'єднань. Крім того, сілскрін, або шовкографія, використовується для нанесення інформації, такої як маркування компонентів та інструкції з їх установки, що полегшує процес монтажу та обслуговування плати. Ці два етапи забезпечують не тільки функціональність, а й візуальну ідентифікацію компонентів, що підвищує загальну ефективність виробництва. На рисунку 2.8 представлений загальний вид автоматизованого станка MEC Solder Mask Coating Line, а в таблиці 2.7 представлені його характеристики [33].



Рисунок 2.8 – Загальний вид автоматизованого станка CNC
MEC Solder Mask Coating Line [33]

Таблиця 2.7 – Технічні характеристика автоматизованого станка CNC
MEC Solder Mask Coating Line

Технічні характеристики	Значення
Точність нанесення	± 10 мкм
Продуктивність	до 150 плат на годину
Автоматична система нанесення та УФ-затвердіння	Так

Операція "Установка EPE" (Pick and Place Machine) в технологічному процесі виготовлення друкованих плат є критично важливою для автоматизації монтажу електронних компонентів. Вона дозволяє швидко і точно розміщувати елементи на поверхні плати, забезпечуючи високу продуктивність і зменшуючи ймовірність людських помилок. Такі машини оснащені сучасними системами візуалізації та контролю, які гарантують правильне позиціонування і забезпечують якість монтажу. Крім того, автоматизація цього етапу дозволяє знижувати витрати на виробництво і скорочувати час виготовлення, що є важливими факторами в умовах конкурентного ринку електроніки. На рисунку 2.9 представлений загальний вид автоматизованого станка CNC Yamaha YSM20R Pick and Place Machine, а в таблиці 2.8 представлені його характеристики [34].



Рисунок 2.9 – Загальний вид автоматизованого станка CNC
Yamaha YSM20R Pick and Place Machine [34]

Таблиця 2.8 – Технічні характеристика автоматизованого станка CNC
Yamaha YSM20R Pick and Place Machine

Технічні характеристики	Значення
Швидкість встановлення	до 95,000 компонентів на годину (CPH)
Точність встановлення	$\pm 0,025$ мм
Мінімальний розмір компонентів	01005 (0,4 мм x 0,2 мм)
Максимальний розмір компонентів	45 мм x 45 мм
Підтримка одночасного розміщення	до 120 різних типів компонентів
Система зчитування та вирівнювання компонентів за допомогою камери	Так

Операція пайки (Soldering) в технологічному процесі необхідна для надійного з'єднання електронних компонентів з друкованою платою. Пайка забезпечує електричний контакт між компонентами та доріжками на платі, що є ключовим для їх функціонування. Правильне виконання цього процесу гарантує міцність і стійкість з'єднань, а також знижує ризик виникнення дефектів або коротких замикань. Ця операція є завершальним етапом монтажу компонентів, що забезпечує стабільну роботу електронних пристроїв. На рисунку 2.10 представлений загальний вид автоматизованого станка Rehm V8 Reflow Soldering System, а в таблиці 2.9 представлені його характеристики [35].



Рисунок 2.10 – Загальний вид автоматизованого станка CNC
Rehm V8 Reflow Soldering System [35]

Таблиця 2.9 – Технічні характеристики автоматизованого станка Rehm
V8 Reflow Soldering System

Технічні характеристики	Значення
Температурний діапазон	до 350 °С
Конвеєрна система	до 1,5 м/хв
Розмір плати	до 610 мм x 460 мм
Система газової інертної атмосфери	Так

Операція тестування готового виробу (Functional Testing) необхідна для перевірки працездатності друкованої плати після завершення всіх етапів виробництва. Під час тестування перевіряється правильність функціонування електричних з'єднань, робота встановлених компонентів і відповідність плати заданим технічним вимогам. Це дозволяє виявити можливі дефекти, які могли виникнути під час пайки або монтажу компонентів, та забезпечити якість і надійність кінцевого продукту перед його подальшим використанням або випуском на ринок. На рисунку 2.11 представлений загальний вид автоматизованого станка Takaya APT-1400F Flying Probe Tester, а в таблиці 2.10 представлені його характеристики [36].



Рисунок 2.11 – Загальний вид автоматизованого станка CNC
Takaya APT-1400F Flying Probe Tester [36]

Таблиця 2.10 – Технічні характеристики автоматизованого станка
Takaya APT-1400F Flying Probe Tester

Технічні характеристики	Значення
Розмір плати	до 510 мм x 460 мм
Мінімальна відстань між точками	10 мкм
Швидкість тестування	до 180 точок/с
Підтримка багат шарових плат	Так

Конвеєрна система для переміщення друкованих плат між операціями в гнучкій виробничій лінії необхідна для автоматизації і оптимізації процесу. Вона забезпечує безперервний потік ДП між різними етапами технологічного процесу, мінімізуючи час простою і ручну працю. Це підвищує ефективність виробництва, забезпечує точність позиціонування плат для подальшої обробки, знижує ризик пошкоджень, та дозволяє зберігати стабільний темп виробництва. Конвеєр сприяє підтримці цілісності та якості продукту на всіх етапах виробництва. На рисунку 2.12 представлений загальний вид конвеєрної системи FlexLink Modular Conveyor System, а в таблиці 2.11 представлені його характеристики [37].



Рисунок 2.12 – Загальний вид конвеєрної системи
FlexLink Modular Conveyor System [37]

Таблиця 2.11 – Технічні характеристики конвеєрної системи FlexLink
Modular Conveyor System

Технічні характеристики	Значення
Швидкість транспортування	до 30 м/хв
Максимальний розмір плати	610 мм x 460 мм
Інтеграція з системами автоматизації	Так

Вибір обладнання для виробництва друкованих плат базується на високій продуктивності та точності кожної операції. Schmolл MODUL 200 забезпечує точність вирізки основи $\pm 0,005$ мм та продуктивність до 300 плат/год, що гарантує стабільні розміри заготовок. Формування схем на Orbotech Nuvogo 1000 DI з роздільною здатністю 5000 dpi дозволяє створювати тонкі та точні доріжки шириною до 2 мкм. Для контролю якості Koh Young Zenith Alpha з 3D-скануванням у 10 мкм дозволяє виявляти найдрібніші дефекти. Свердління Hitachi DR300 забезпечує високу точність ($\pm 0,01$ мм) та швидкість до 200000 об/хв, що є критичним для точних отворів. Установка EPE Yamaha YSM20R з продуктивністю до 95,000 компонентів на годину і точністю $\pm 0,025$ мм прискорює процес складання плат [38].

Базуючись на обраному обладнанні CNC (рис. 2.3-12) та розробленому одиничному циклічному ТП виробництва друкованих плат пристрою (рис. 2.2), то гнучка автоматизована циклічна лінія виробництва буде мати наступний вид, як представлено на рисунку 2.13.

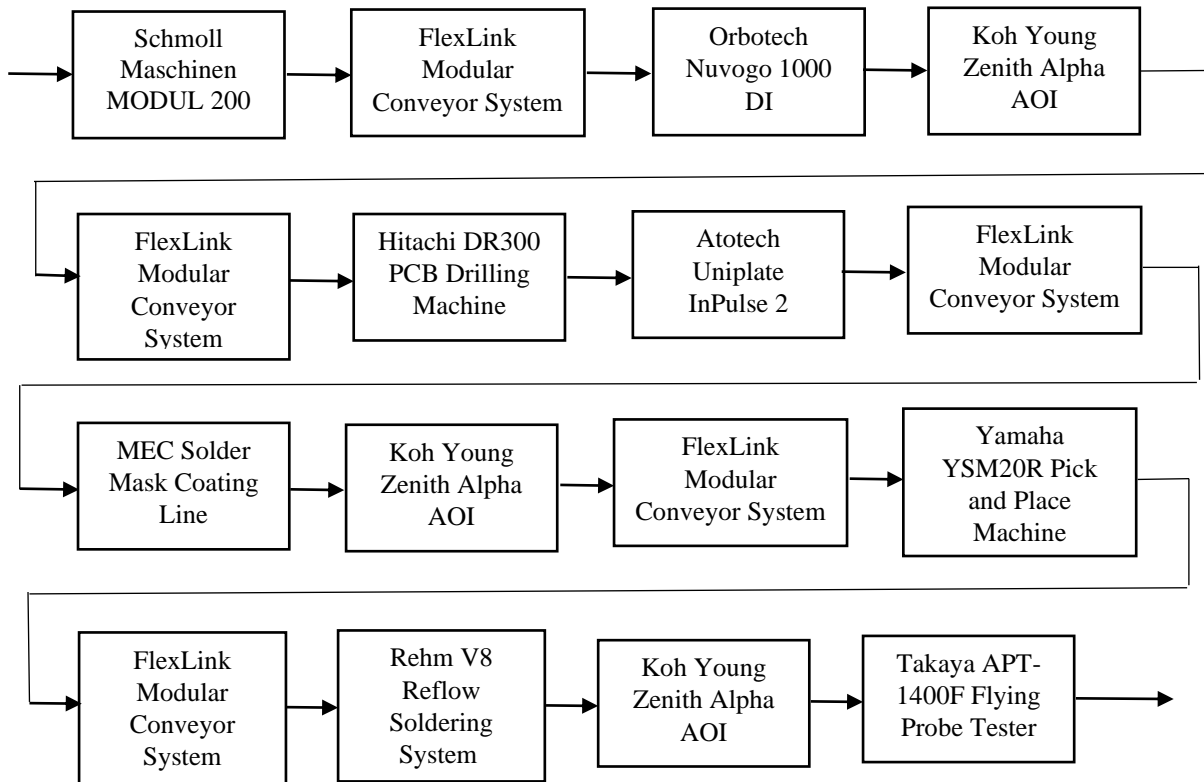


Рисунок 2.13 – Загальний вид розробленої гнучкої автоматизованої лінії виробництва ДП на базі циклічного ТП

2.3 Розробка Q-схеми моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат

Q-схема моделювання циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат – це графічне відображення послідовності технологічних операцій із циклічним характером, що включає етапи виготовлення друкованих плат із регулярним контролем якості та можливістю повернення до попередніх етапів для виправлення дефектів. Така схема акцентує увагу на контролі якості кожного кроку та забезпечує гнучкість у виробничому процесі за рахунок можливості повторюваних циклів для досягнення необхідних стандартів продукції [39].

Обґрунтуванням вибору Q-схеми для моделювання циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат стали наступні фактори:

– контроль якості в реальному часі, Q-схема передбачає періодичні перевірки якості після кожної критичної операції. Це дозволяє своєчасно виявляти дефекти та повторювати окремі етапи для їх виправлення без необхідності завершення всього процесу;

– зменшення витрат на ремонт, циклічний процес дає змогу ідентифікувати проблеми на ранніх етапах, мінімізуючи витрати на виправлення дефектів та зниження кількості браку на фінальних стадіях виробництва;

– оптимізація ресурсів, за допомогою Q-схеми можна краще керувати матеріальними та енергетичними ресурсами, забезпечуючи економію завдяки уникненню повторної обробки всього продукту;

– інтеграція автоматизації, у сучасному виробництві друкованих плат, яке використовує Industry 4.0 і роботизовані системи, Q-схеми дозволяють інтегрувати контрольні та виробничі системи в єдиний безперервний процес .

Для моделювання розробленої гнучкої автоматизованої лінії виробництва ДП на базі циклічного ТП (рис. 2.13) пропонується використовувати систему масового обслуговування (СМО). Система масового обслуговування – це системи виробництва, обслуговування, управління, в яких однорідні події повторюються багато разів, наприклад, на підприємствах побутового обслуговування, у системах прийому, переробки і передачі інформації, автоматичних лініях виробництва і ін. Основні елементи СМО – це об'єкти, що обслуговуються в СМО (вимоги чи заявки), та один або декілька обслуговуючих пристроїв з чергою. У відкритій мережі МО вимоги надходять ззовні мережі та після обробки залишають її. У закритій мережі МО деяка кількість вимог весь час знаходиться в ній, переходячи з однієї СМО до іншої, але ніколи не залишаючи мережу МО. Використовуючи теорію СМО, розроблена гнучка автоматизована лінія виробництва ДП на базі циклічного ТП буде мати наступне графічне представлення, як показано на рисунку 2.14 [40].

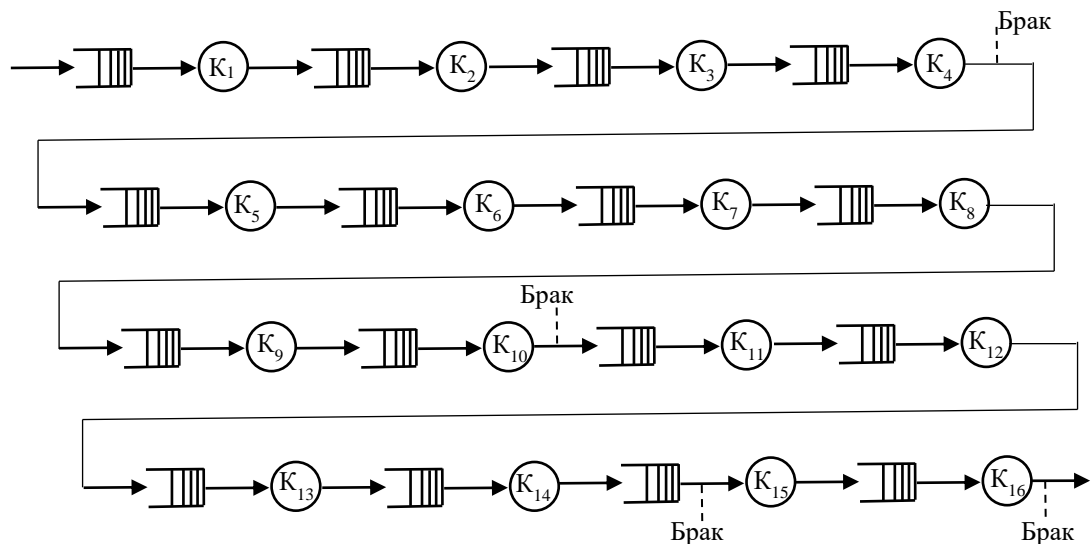



Рисунок 2.14 – Графічне представлення розробленої гнучкої автоматизованої лінії виробництва ДП на базі циклічного ТП у елементах СМО

В таблиці 2.12 приведемо опис кожного елемента розробленого графічного представлення гнучкої автоматизованої лінії виробництва ДП на базі циклічного ТП у елементах СМО.

Таблиця 2.12 – Опис кожного елемента розробленого графічного представлення гнучкої автоматизованої лінії виробництва ДП на базі циклічного ТП у елементах СМО

Позначення	Опис
1	2
	<p>Черга – це модель, яка відображає процес очікування клієнтів або завдань на обслуговування в умовах обмежених ресурсів, таких як оператори чи пристрої. Черга формується, коли надходження клієнтів перевищує можливості системи виконувати їх обслуговування в реальному часі, і вони змушені чекати своєї черги для отримання послуги або виконання операції. Ця концепція використовується для аналізу ефективності роботи різних систем, таких як транспорт, телекомунікації чи обчислювальні ресурси</p>

Продовження таблиці 2.12

1	2
	<p>Маршрут – це послідовність етапів або станцій, через які проходить клієнт або завдання в процесі обслуговування. Маршрут визначає порядок, в якому клієнт переміщується між різними сервісними точками, такими як оператори чи пристрої, для отримання послуг або завершення обробки. Правильне моделювання маршрутів дозволяє оптимізувати потоки в системі та підвищити її ефективність</p>
K ₁	Канал або пристрій, в даному випадку це CNC Schmoll Maschinen MODUL 200
K ₂	FlexLink Modular Conveyor System
K ₃	CNC Orbotech Nuvogo 1000 DI
K ₄	Koh Young Zenith Alpha AOI
K ₅	FlexLink Modular Conveyor System
K ₆	CNC Hitachi DR300 PCB Drilling Machine
K ₇	CNC Atotech Uniplate InPulse 2
K ₈	FlexLink Modular Conveyor System
K ₉	CNC MEC Solder Mask Coating Line
K ₁₀	Koh Young Zenith Alpha AOI
K ₁₁	FlexLink Modular Conveyor System
K ₁₂	CNC Yamaha YSM20R Pick and Place Machine
K ₁₃	FlexLink Modular Conveyor System
K ₁₄	CNC Rehm V8 Reflow Soldering System
K ₁₅	Koh Young Zenith Alpha AOI
K ₁₆	CNC Takaya APT-1400F Flying Probe Teste
Брак	<p>Це продукція, що не відповідає встановленим стандартам якості або технічним вимогам і підлягає відбраковці. У СМО брак може виникати на різних етапах виробництва через помилки у технологічному процесі, неполадки обладнання або недоліки у сировині. Аналіз і управління браком є критично важливими для забезпечення ефективності виробництва, оскільки знижують витрати, покращують якість готової продукції та оптимізують використання ресурсів</p>

Розроблена схема моделювання циклічного технологічного процесу виготовлення друкованих плат на основі теорії систем масового обслуговування має кілька переваг. По-перше, вона дозволяє точно відобразити послідовність та взаємозв'язки між різними етапами виробництва, що сприяє оптимізації всього процесу. По-друге, використання

СМО дозволяє прогнозувати та аналізувати показники продуктивності, такі як час обслуговування та завантаження обладнання, що допомагає виявляти вузькі місця в технологічному процесі. Також, завдяки моделюванню, можна провести різні сценарії тестування, оцінюючи вплив змін на ефективність виробництва. Нарешті, така схема дозволяє враховувати фактори браку та якості, що є критично важливими для підвищення загальної ефективності та конкурентоспроможності виробництва [41].

2.4 Розробка метода моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат

На базі циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат (ДП), представленого на рисунку 2.14 можна описати кожен етап з позиції систем масового обслуговування. Відповідно до графічного представлення розробленої гнучкої автоматизованої лінії виробництва ДП на базі циклічного ТП у елементах СМО на схемі кожен вузол K_i , де $i = 1, 2, 3, \dots, 16$ є окремою станцією обслуговування. Кожна станція обробляє чергу замовлень або партій плат і може бути описана за допомогою моделі СМО типу $M/M/1$.

Моделі СМО типу $M/M/1$ обрано для моделювання циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат за наступними критеріями:

- надходження заявок з потоком Пуассона, так як модель $M/M/1$ припускає, що заявки (партії або окремі друковані плати) надходять до системи згідно з пуассонівським розподілом, який є адекватним для моделювання випадкових подій. У виробництві ДП це може відображати як випадкові затримки або нерівномірність у надходженні замовлень на різних етапах циклічного ТП;

– експоненціальний час обслуговування, так як час обслуговування на кожному етапі циклу, як припускає модель $M/M/1$, розподіляється за експоненціальним законом. Це підходить для моделювання часу обробки на технологічних станціях, таких як свердління, нанесення покриттів, паяння або контроль якості, де середній час обслуговування варіюється;

– одна станція обслуговування (одноканальна система), припускає що кожен етап виробництва друкованих плат, відповідно до моделі $M/M/1$, розглядається як окрема станція з одним каналом обслуговування. Це відповідає реаліям виробництва, де кожна операція виконується послідовно на одній машині або на одному робочому місці;

– черга без обмежень, тобто модель $M/M/1$ передбачає, що черга на обслуговування може мати довільну довжину. У циклічному ТП друкованих плат це допомагає моделювати ситуації, коли на певному етапі може виникнути скупчення заявок, наприклад, коли одна машина працює повільніше або затримується через технічне обслуговування;

Таким чином, модель $M/M/1$ є обґрунтованим вибором для моделювання виробничого процесу друкованих плат завдяки своїй здатності адекватно відображати процес надходження та обробки замовлень, а також через простоту у використанні для розрахунків і оптимізації.

Введемо наступні параметри для опису процесу моделювання циклічного ТП виробництва ДП: λ_i – інтенсивність потоку заявок (кількість ДП, що надходять на обслуговування за одиницю часу); μ_i – інтенсивність обслуговування на кожному обладнанні (середній час виконання одної операції); n_i – кількість заготовок ДП, що знаходяться в черзі до обладнання.

Для кожного обкладення циклічного ТП виготовлення ДП можна визначити середню довжину черги, як:

$$L_q = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}, \quad (2.1)$$

де L_q – середня довжина черги;

μ – інтенсивність обслуговування на кожному обладнанні (середній час виконання однієї операції);

λ – інтенсивність потоку заявок (кількість ДП, що надходять на обслуговування за одиницю часу).

Цей вираз показує, скільки партій або окремих плат очікують обслуговування на кожному етапі. Важливо зазначити, що система вважається стабільною лише тоді, коли $\lambda < \mu$.

Виходячи з (2.1), визначимо час очікування в черзі (W_q), як середній час очікування замовлення в черзі перед кожним обладнанням, це можна визначити за формулою Літтла, як:

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda}, \quad (2.2)$$

де W_q – середній час, який витрачається на очікування обслуговування;

L_q – середня довжина черги;

λ – інтенсивність потоку заявок (кількість ДП, що надходять на обслуговування за одиницю часу).

Ймовірність зайнятості обладнання ($P(z)$) можна також обчислити ймовірність того, що обладнання зайнята в момент часу, що дорівнює:

$$P(z) = \frac{\lambda}{\mu}, \quad (2.3)$$

де $P(z)$ – ймовірність зайнятості обладнання;

λ – інтенсивність потоку заявок (кількість ДП, що надходять на обслуговування за одиницю часу);

μ – інтенсивність обслуговування на кожному обладнанні (середній час виконання однієї операції).

В даному випадку маршрут проходження, є одноканальною системою для виробництва друкованих плат та означає, що всі плати проходять послідовно через кожну технологічну операцію. Оскільки кожна операція обслуговується лише одним обладнанням, заявки рухаються по маршруту від одного етапу до іншого в суворо визначеному порядку, як показано на рисунку 2.15. Цей маршрут проходження можна описати таким чином:

- послідовність операцій, всі заявки повинні пройти через усі етапи технологічного процесу, такі як свердління, нанесення покриття, паяння, перевірка якості тощо, в строго послідовному порядку;

- обмежена кількість обладнання, оскільки кожен етап обслуговується тільки однією автоматизованою CNC станком або конвеєром, кожна заявка повинна чекати своєї черги, якщо на цьому обладнанні вже обслуговується інша заявка. Це створює чергу перед кожною операцією;

- чергова система, при наявності черги заявки рухаються по маршруту тільки після завершення виконання операцій. В результаті кожна ДП проходить через всі етапи послідовно, очікуючи своєї черги на кожному етапі.

Таким чином, маршрут проходження в одноканальній системі відображає послідовний рух ДП через всі технологічні етапи без можливості паралельного обслуговування на кожному етапі, що підкреслює важливість управління чергою для оптимізації процесу [42].

2.5 Висновки до 2-го розділу

У другому розділі було виконано аналіз циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат, визначено ключові етапи та параметри, що впливають на якість і ефективність виробництва. Проведений аналіз дозволив виявити основні особливості процесу, такі як послідовність

операцій, тривалість циклів, а також основні обмеження, які впливають на швидкість і якість виконання операцій.

На основі проведеного аналізу було обґрунтовано вибір обладнання для моделювання, сформовано перелік параметрів для моніторингу та управління процесом, а також розроблено Q-схему моделювання, яка забезпечує візуалізацію основних етапів технологічного процесу. Запропонований метод моделювання враховує специфіку виробництва друкованих плат та дозволяє оцінювати ефективність процесу, проводити оптимізацію параметрів і прогнозувати результати, що створює базу для подальшого впровадження автоматизованих систем управління та забезпечує підвищення ефективності виробництва.

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМИ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ДРУКОВАНИХ ПЛАТ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Обґрунтування вибору мови та середовища розробки

Для моделювання циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат важливо обрати мову програмування та середовище розробки, які забезпечать ефективність, гнучкість та зручність у роботі з великими обсягами даних і складними обчисленнями. Одним із ключових критеріїв є здатність мови підтримувати теорію систем масового обслуговування (СМО), оскільки вона дозволяє моделювати та аналізувати процеси обробки та обслуговування заявок у виробничому середовищі [43].

Python є однією з найкращих мов для цієї задачі з кількох причин. По-перше, він має потужну екосистему бібліотек, таких як NumPy, SciPy та Pandas, які спрощують обробку даних та виконання складних математичних операцій. По-друге, бібліотеки на зразок SimPy дозволяють легко моделювати дискретні події та процеси, що робить Python ідеальним для моделювання виробничих систем. Важливо також зазначити, що Python є мовою з низьким порогом входу, що полегшує її освоєння навіть для тих, хто не має глибокого досвіду у програмуванні.

Інші мови, такі як C++ та Java, також можуть бути використані для моделювання, проте вони мають певні недоліки у порівнянні з Python. Наприклад, C++ забезпечує високу продуктивність і контроль над системними ресурсами, але його складна синтаксична структура може ускладнити розробку та підтримку коду. Java, хоча і є більш зручною для користувача, ніж C++, вимагає більше зусиль для налаштування та

використання специфічних бібліотек для моделювання СМО, що може уповільнити процес розробки.

Python також виграє завдяки своїй мультиплатформенності та активній спільноті, яка постійно оновлює і розширює функціонал. Це дозволяє розробникам швидко знаходити рішення для проблем, з якими вони можуть зіткнутися. Крім того, Python добре інтегрується з іншими мовами та інструментами, що дозволяє використовувати його у різноманітних середовищах, включаючи наукові дослідження та промислові додатки.

Отже, вибір Python для моделювання циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат є обґрунтованим через його гнучкість, зручність використання, багатство бібліотек та активну підтримку спільноти. Це забезпечує ефективність у розробці, моделюванні та аналізі виробничих процесів, що робить Python кращим вибором для вирішення поставленої задачі [44].

3.2 Розробка алгоритму моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат

Розробка алгоритму моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат є ключовим етапом дослідження, оскільки дозволяє створити ефективний інструмент для оптимізації складних виробничих операцій. Друковані плати є основою сучасної електроніки, і їх виробництво включає багатоетапний цикл із високими вимогами до точності, якості та швидкості.

Моделювання технологічного процесу дає можливість аналізувати та прогнозувати результати, мінімізувати витрати ресурсів і час на виробництво, а також підвищити ефективність використання обладнання. Алгоритм, що враховує особливості кожного етапу виготовлення друкованих

плат, забезпечує інтеграцію сучасних методів автоматизації, що є важливим для досягнення конкурентоспроможності підприємства на ринку.

Алгоритм роботи даної програми для моделювання циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат базується на бібліотеці SimPy, яка дозволяє створювати процеси та керувати чергами в системах масового обслуговування. Спочатку клас `Equipment` визначає кожне обладнання, яке бере участь у виробничому процесі. Кожне обладнання має ім'я, час обробки, випадкове відхилення цього часу, чергу, загальний час обробки та кількість оброблених заготовок. Також кожне обладнання має один ресурс, що представляє собою його можливість одночасно обробляти тільки одну заготовку.

Процес обробки друкованої плати починається з функції `pcb_process`, яка по черзі відправляє кожну плату через всі одиниці обладнання. Для кожного обладнання створюється запит на доступ до ресурсу, що представляє процес обробки заготовки. Під час обробки вибирається випадковий час обробки, що лежить в межах заданого діапазону часу і відхилення, після чого ресурс звільняється, а черга на обладнанні зменшується.

Основна функція `run_simulation` запускає середовище SimPy і створює всі одиниці обладнання згідно з введеними параметрами. Далі середовище запускається на заданий час, упродовж якого обробляється вказана кількість друкованих плат. Після завершення моделювання програма виводить результати, такі як кількість оброблених заготовок, максимальну довжину черги перед кожним обладнанням та середній час обробки.

Загальний вид алгоритму моделювання циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат представлено на рисунку 3.1.

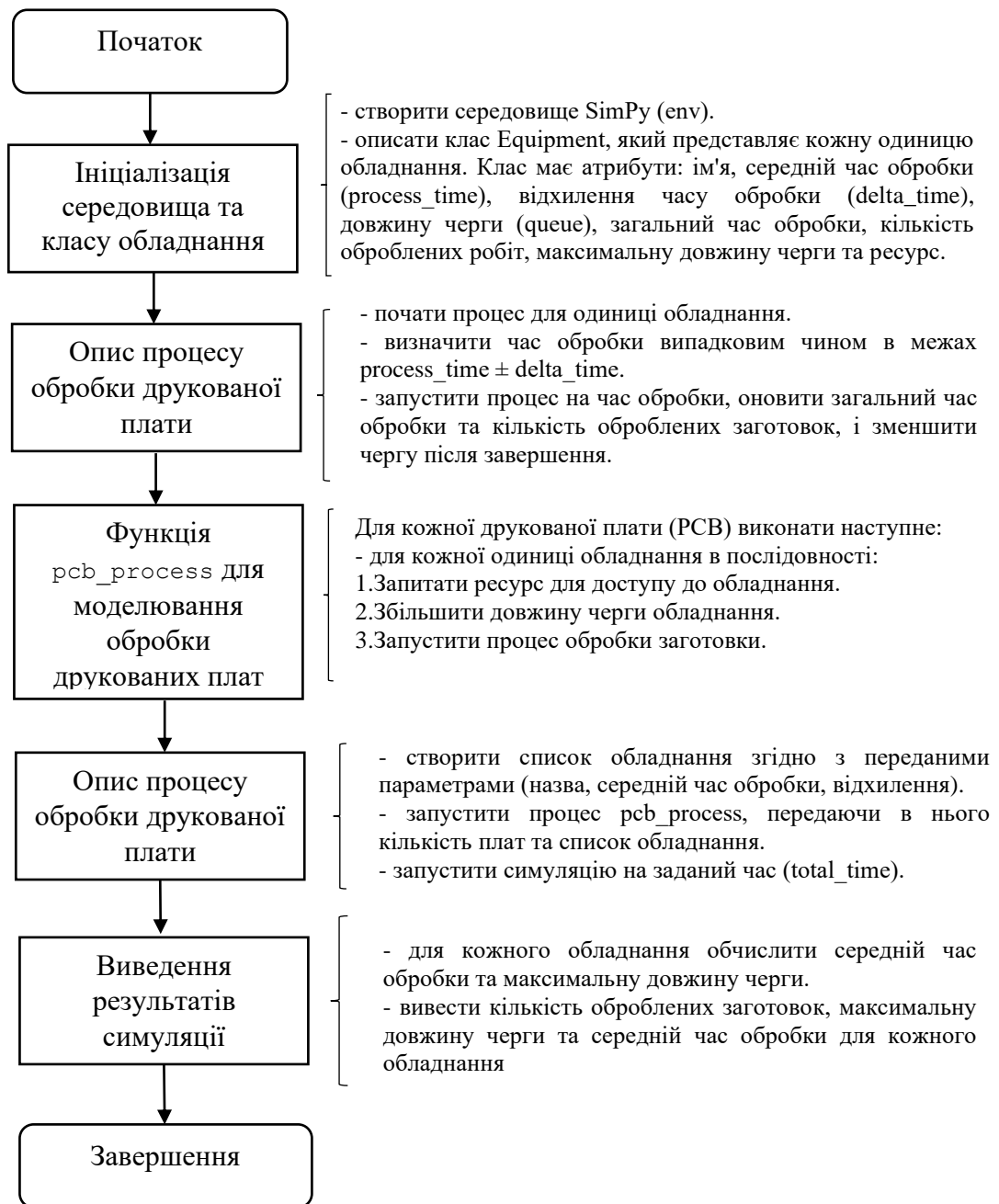


Рисунок 3.1 – Загальний алгоритм програми для моделювання циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат

3.3 Розробка програмної функції моделювання

Основна мета розробки програмної функції моделювання полягає в тому, щоб забезпечити можливість детального аналізу роботи виробничого обладнання, черг на різних етапах процесу та визначення потенційних "вузьких місць". Використовуючи інструменти програмування, такі як мова

Python та бібліотека SimPy, створюється модель, що дозволяє задавати параметри для кожної одиниці обладнання, враховувати випадкові коливання часу обробки та виявляти ефективність кожного етапу. Результати моделювання можуть бути використані для оптимізації виробничого процесу, покращення розподілу ресурсів і підвищення загальної продуктивності системи.

Приведемо опис деяких функцій реалізацій програми моделювання циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат.

```
import random
```

```
import simpy
```

Бібліотека `simpy` використовується для створення імітаційних моделей з дискретними подіями, що дозволяє моделювати процеси виробництва, зокрема черги та час роботи обладнання. `random` потрібен для генерації випадкових значень часу обробки, що дозволяє враховувати коливання тривалості операцій у виробничому циклі друкованих плат, створюючи більш реалістичну симуляцію.

```
def __init__(self, env, name, process_time, delta_time):
```

```
    self.env = env
```

```
    self.name = name
```

```
    self.process_time = process_time
```

```
    self.delta_time = delta_time
```

```
    self.queue = 0
```

```
    self.total_process_time = 0
```

```
    self.jobs_processed = 0
```

```
    self.max_queue = 0
```

```
    self.resource = simpy.Resource(env, capacity=1)
```

Цей фрагмент коду ініціалізує об'єкт обладнання для імітації технологічного процесу виробництва друкованих плат. Він встановлює основні параметри, такі як середній час обробки `process_time`, можливі

відхилення `delta_time`, назву обладнання `name`, а також створює ресурс із одиничною пропускнуою здатністю для керування чергою. Змінні `queue`, `total_process_time`, `jobs_processed` та `max_queue` дозволяють відслідковувати кількість оброблених плат, загальний час обробки та максимальну довжину черги.

```
def process(self, pcb):
    start = self.env.now
    processing_time = random.uniform(self.process_time - self.delta_time,
self.process_time + self.delta_time)
    yield self.env.timeout(processing_time)
    self.total_process_time += self.env.now - start
    self.jobs_processed += 1
    if self.queue > self.max_queue:
        self.max_queue = self.queue
    self.queue -= 1
```

Цей фрагмент коду моделює процес обробки друкованої плати на певному обладнанні. Він визначає випадковий час обробки `processing_time` з урахуванням допустимих відхилень, чекає завершення цього часу і оновлює загальний час обробки та кількість оброблених плат. Також він перевіряє та оновлює максимальну довжину черги, якщо черга збільшується, і зменшує її після завершення обробки.

```
def pcb_process(env, pcbs, equipments):
    for pcb in range(pcbs):
        for equipment in equipments:
            with equipment.resource.request() as request:
                equipment.queue += 1
                yield request
                yield env.process(equipment.process(pcb))
```

Цей фрагмент коду відповідає за послідовне проходження друкованих плат через кожне обладнання в технологічному циклі. Для кожної плати він ініціює запит на доступ до ресурсу обладнання, додає її в чергу та запускає процес обробки. Цей цикл імітує послідовність виробничих операцій для кожної плати, забезпечуючи облік черги та ресурсів.

```
def run_simulation(pcbcs, total_time, equipment_params):
    env = simpy.Environment()
    equipments = [Equipment(env, name, time, delta) for name, time, delta in
equipment_params]
    env.process(pcb_process(env, pcbcs, equipments))
    env.run(until=total_time)
    print("Simulation results:")
    for equipment in equipments:
        avg_process_time = equipment.total_process_time /
equipment.jobs_processed if equipment.jobs_processed > 0 else 0
        print(f'{equipment.name}:')
        print(f' Total processed jobs: {equipment.jobs_processed}')
        print(f' Max queue length: {equipment.max_queue}')
        print(f' Avg process time: {avg_process_time:.2f}')
```

Цей фрагмент коду запускає основну симуляцію технологічного циклу виробництва, ініціюючи середовище SimPy та створюючи об'єкти для кожного обладнання з заданими параметрами. Після запуску процесу обробки друкованих плат він працює до завершення заданого часу симуляції. Після цього підраховуються та виводяться результати, включаючи кількість оброблених плат, максимальну довжину черги та середній час обробки для кожного обладнання.

```
pcb_count = int(input("Enter the number of PCBs: "))
simulation_time = int(input("Enter the total simulation time: "))
```

```

equipment_data = [
    ("Schmoll Maschinen MODUL 200", 10, 2),
    ("FlexLink Modular Conveyor System", 5, 1),
    ("Orbotech Nuvogo 1000 DI", 8, 1),
    ("Koh Young Zenith Alpha AOI", 7, 1),
    ("Hitachi DR300 PCB Drilling Machine", 12, 2),
    ("Atotech Uniplate InPulse 2", 10, 2),
    ("MEC Solder Mask Coating Line", 9, 1),
    ("Yamaha YSM20R Pick and Place Machine", 15, 3),
    ("Rehm V8 Reflow Soldering System", 11, 2),
    ("Takaya APT-1400F Flying Probe Tester", 13, 2)
]

```

Цей фрагмент коду задає початкові параметри для симуляції, зокрема кількість друкованих плат та загальний час моделювання, які вводяться користувачем. Також він визначає список обладнання з його характеристиками: назвою, базовим часом обробки та допустимим відхиленням, що використовується для моделювання технологічного процесу кожного етапу виробництва друкованих плат.

```
run_simulation(pcb_count, simulation_time, equipment_data)
```

Цей фрагмент коду запускає симуляцію виробничого процесу, передаючи програмі кількість друкованих плат, загальний час моделювання та дані про обладнання. Він ініціює середовище моделювання, обробляє кожен етап виробничого циклу та виводить результати, зокрема кількість оброблених плат, середній час обробки та максимальну довжину черги для кожного обладнання.

Загальний лістинг програми моделювання циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат приведено в додатку А.

Розроблена програма моделювання циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат має кілька важливих переваг. Вона дозволяє

віртуально імітувати кожен етап виробничого процесу, відображаючи, як друковані плати проходять через різні види обладнання. Це дозволяє аналізувати продуктивність кожного окремого модуля, визначаючи середній час обробки та максимальну довжину черги для кожного етапу, що є важливим для оптимізації процесу. Програма також допомагає виявити потенційні "вузькі місця" в процесі, де утворюються черги, що дозволяє ефективніше розподіляти ресурси або розробляти стратегії для покращення продуктивності. Крім того, використання псевдовипадкових значень для часу обробки надає реалістичності моделі, враховуючи можливі коливання у роботі обладнання. Завдяки цьому підходу можна прогнозувати потенційні простої та оптимізувати планування виробничих циклів, що сприяє економії ресурсів і знижує ризики перевантаження ліній.

3.4 Проведення експериментів з моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат

Експеримент з моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат полягає у створенні імітаційної моделі, яка дозволяє аналізувати ефективність проходження плат через різні етапи виробництва. Основною метою є визначення навантаження на окремі етапи та виявлення потенційних вузьких місць, що можуть спричинити затримки. Модель симулює процеси, такі як нанесення покриття, свердління, конвеєрні переміщення, та інші ключові операції. Під час експерименту аналізуються кількість оброблених плат за певний період, максимальна довжина черг перед обладнанням, середній час перебування плат в черзі, а також час обробки на кожному етапі. Метою є визначення етапів, де виникають затримки через накопичення черг, що впливає на загальну продуктивність виробничої лінії. Результати експерименту допомагають оптимізувати кількість обладнання або параметри процесу для підвищення пропускної

здатності. Проведення симуляцій для різних обсягів виробництва дозволяє оцінити ефективність процесу в умовах змінного попиту, що важливо для гнучкого планування виробничих потужностей та покращення продуктивності.

Цей підхід дозволяє визначити, на яких етапах виробництва можуть виникати затримки через накопичення черг, а також оцінити загальну продуктивність виробничої лінії. Крім того, результати експерименту допоможуть визначити оптимальну кількість обладнання або змінити параметри виробничого процесу для збільшення пропускної здатності. Проведення серії симуляцій для різної кількості плат і часу моделювання дозволяє порівняти ефективність виробничого процесу за різних умов, що особливо важливо для виробництва з великою варіативністю обсягів замовлень. Задача полягає також в оптимізації витрат часу та ресурсів на кожному етапі, що забезпечує більш ефективне планування виробничих потужностей та поліпшення показників продуктивності виробництва.

Перший результат моделювання при наступних вхідних даних: Results for PCBs: 50, Simulation Time: 200 представлено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Отримані результати моделювання циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат при наступних вхідних даних: Results for PCBs: 50, Simulation Time: 200

Обладнання	Максимальна довжина черги	Середній час перебування в черзі	Середній час обробки для кожного обладнання
1	2	3	4
Schmoll Maschinen MODUL 200	1	0	10,48
FlexLink Modular Conveyor System	1	0	4,93
Orbotech Nuvogo 1000 DI	1	0	8,28

Продовження таблиці 3.1

1	2	3	4
Koh Young Zenith Alpha AOI	1	0	6,39
Hitachi DR300 PCB Drilling Machine	1	0	11,81
Atotech Uniplate InPulse 2	1	0	8,27
MEC Solder Mask Coating Line	1	0	8,62
Yamaha YSM20R Pick and Place Machine	1	0	16,27
Rehm V8 Reflow Soldering System	1	0	10,01
Takaya APT-1400F Flying Probe Tester	1	0	11,91

Аналіз результатів моделювання циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат свідчить про високу ефективність виробничого процесу за заданих параметрів. Для кожного обладнання максимальна довжина черги склала лише одну плату, що вказує на відсутність серйозних затримок на будь-якому з етапів виробництва. Середній час перебування в черзі дорівнює нулю, що підтверджує плавний перехід друкованих плат між етапами без утворення черг. Це свідчить про те, що пропускна здатність кожного пристрою відповідає обсягам продукції та що обладнання не простоює через надмірне навантаження.

Середній час обробки на кожному обладнанні варіюється в межах від 4,93 до 16,07 одиниць часу. Так, найменший час обробки показала конвеєрна система FlexLink Modular, тоді як найбільший – автомат для розміщення компонентів Yamaha YSM20R Pick and Place Machine, що можна пояснити різницею в складності виконуваних операцій. Також варто звернути увагу на відносно високі показники часу обробки у таких етапах, як свердління, паяння та тестування, що обумовлено більш тривалими технологічними процесами, які вимагають додаткової точності або перевірок якості.

Отримані результати свідчать, що за умови обробки 50 плат протягом 200 одиниць часу потужності виробничої лінії є достатніми для підтримки безперервного виробничого процесу без утворення затримок. Для зручності аналізу представім отримані данні у вигляді комбінованого графіка, представлено на рисунку 3.2.

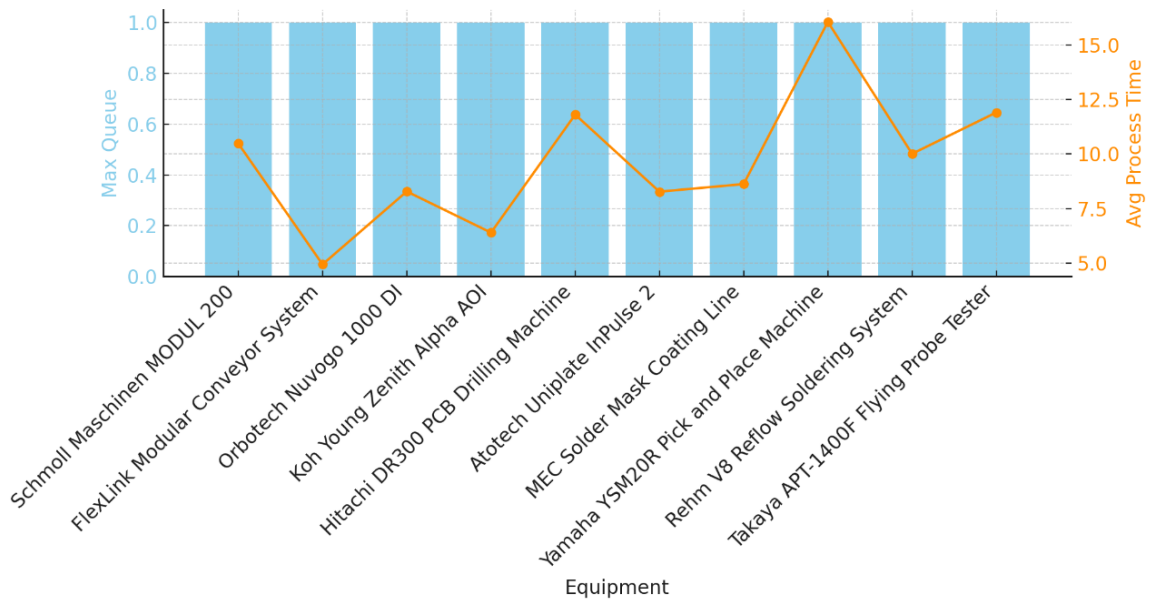


Рисунок 3.2 – Комбінований графік отриманих даних першого експерименту

Результати другого експерименту моделювання при наступних вхідних даних: Results for PCBs: 100, Simulation Time: 400 приведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Отримані результати моделювання циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат при наступних вхідних даних: Results for PCBs: 100, Simulation Time: 400

Обладнання	Максимальна довжина черги	Середній час перебування в черзі	Середній час обробки для кожного обладнання
1	2	3	4
Schmoll Maschinen MODUL 200	1	0	10,43

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4
FlexLink Modular Conveyor System	1	0	5,40
Orbotech Nuvogo 1000 DI	1	0	8,34
Koh Young Zenith Alpha AOI	1	0	6,89
Hitachi DR300 PCB Drilling Machine	1	0	12,37
Atotech Uniplate InPulse 2	1	0	10,21
MEC Solder Mask Coating Line	1	0	9,01
Yamaha YSM20R Pick and Place Machine	1	0	15,71
Rehm V8 Reflow Soldering System	1	0	10,73
Takaya APT-1400F Flying Probe Tester	1	0	14,13

Аналіз результатів моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат показує, що максимальна черга для кожного етапу дорівнює одиниці, що вказує на ефективне використання обладнання та відсутність значного накопичення робіт перед жодним із пристроїв. Середній час перебування в черзі для всіх етапів дорівнює нулю, що свідчить про оптимальний розподіл навантаження між елементами системи і високий рівень організації виробничого процесу. Однак, середній час обробки на різних машинах варіюється, відносно короткий для таких пристроїв, як конвеєрна система FlexLink та модуль автоматичної оптичної інспекції Koh Young Zenith Alpha, і довший для складніших процесів, таких як вибір та розміщення компонентів на Yamaha YSM20R і тестування за допомогою Takaya APT-1400F. Це можна пояснити різною складністю операцій, що виконуються на кожному етапі. Такі результати дозволяють зробити висновок, що виробнича лінія здатна підтримувати безперервний

технологічний цикл без значних затримок, забезпечуючи тим самим високу продуктивність.

Для зручності аналізу представимо отримані дані у вигляді комбінованого графіка, представленого на рисунку 3.3.

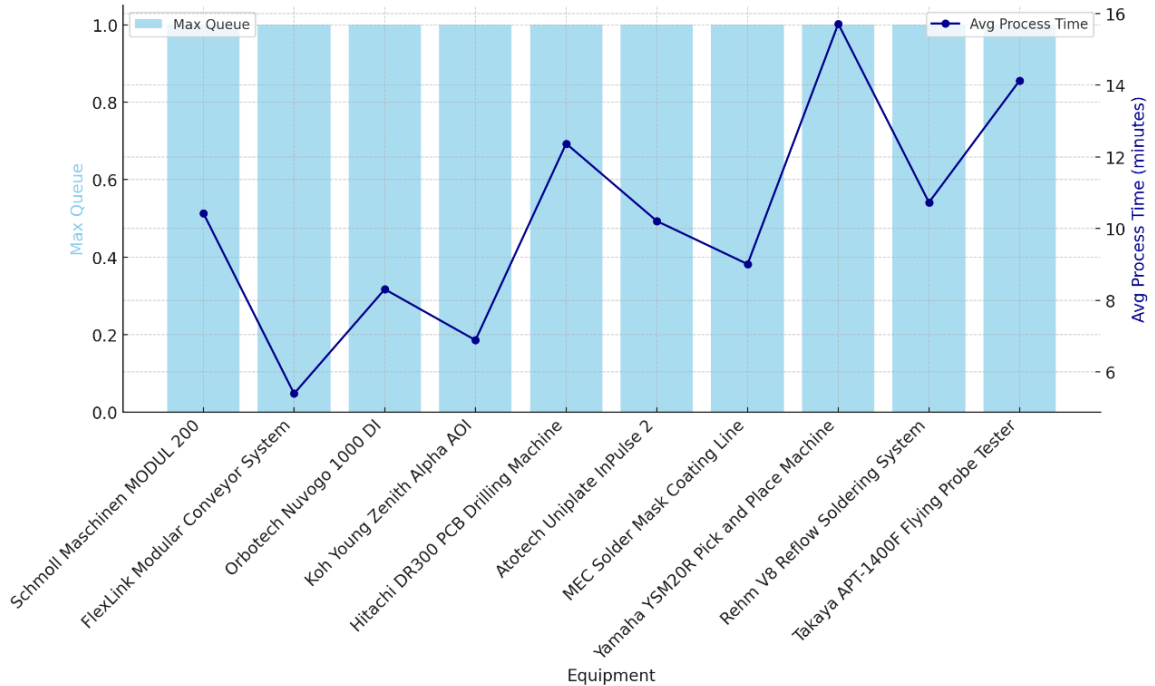


Рисунок 3.3 – Комбінований графік отриманих даних другого експерименту

Результати третього експерименту моделювання при наступних вхідних даних: Results for PCBs: 150, Simulation Time: 600 приведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Отримані результати моделювання циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат при наступних вхідних даних: Results for PCBs: 150, Simulation Time: 600

Обладнання	Максимальна довжина черги	Середній час перебування в черзі	Середній час обробки для кожного обладнання
1	2	3	4
Schmoll Maschinen MODUL 200	1	0	10,35

Продовження таблиці 3.3

1	2	3	4
FlexLink Modular Conveyor System	1	0	4,80
Orbotech Nuvogo 1000 DI	1	0	8,27
Koh Young Zenith Alpha AOI	1	0	6,94
Hitachi DR300 PCB Drilling Machine	1	0	12,02
Atotech Uniplate InPulse 2	1	0	10,39
MEC Solder Mask Coating Line	1	0	8,97
Yamaha YSM20R Pick and Place Machine	1	0	14,66
Rehm V8 Reflow Soldering System	1	0	11,18
Takaya APT-1400F Flying Probe Tester	1	0	13,30

Результати моделювання циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат демонструють ефективну організацію процесу з мінімальними затримками в черзі перед обладнанням. Значення максимальної черги дорівнює одиниці для всіх одиниць обладнання, що свідчить про відсутність скупчення плат перед будь-яким етапом виробництва та забезпечує безперебійний процес. Середній час перебування в черзі дорівнює нулю, що підкреслює високу пропускну здатність системи та належний розподіл ресурсів. Середній час обробки для кожного етапу варіюється залежно від складності технологічної операції. Наприклад, такі етапи, як розміщення компонентів (Yamaha YSM20R) і тестування (Takaya APT-1400F), мають триваліший середній час обробки через їхню високу точність та складність процесу. Водночас конвеєрні системи мають значно менший час обробки, що відображає їхню роль у швидкому переміщенні плат між іншими етапами. Загалом, результати моделювання підтверджують

збалансованість процесу та оптимальне використання ресурсів, що дозволяє уникнути простоїв і забезпечує рівномірне завантаження кожної одиниці обладнання.

Для зручності аналізу представимо отримані дані у вигляді комбінованого графіка, представлено на рисунку 3.4.

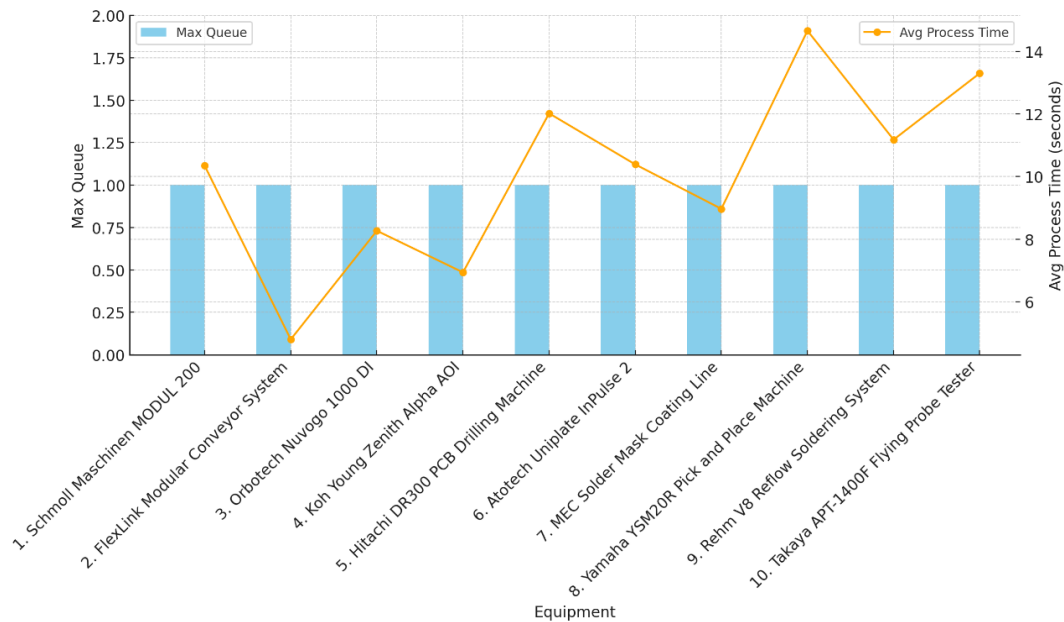


Рисунок 3.4 – Комбінований графік отриманих даних третього експерименту

3.5 Аналіз отриманих результатів моделювання

Загальні висновки з порівняльного аналізу даних для трьох експериментів показують, як збільшення кількості оброблених друкованих плат (PCBs) впливає на показники часу обробки та середньої затримки. У кожному експерименті максимальна черга обладнання залишалась постійною, що свідчить про стабільність системи в плані чергування, тоді як середній час обробки змінювався залежно від збільшення кількості плат, що обробляються. Для всіх експериментів спостерігається тенденція до зростання середнього часу обробки для більшості обладнання, що, ймовірно, зумовлено збільшенням обсягу роботи при однаковій інфраструктурі.

У першому експерименті середній час обробки коливався від 4,93 секунд для системи FlexLink Modular Conveyor до 16,07 секунд для Yamaha YSM20R Pick and Place Machine, що відображає значні відмінності в ефективності різних типів обладнання. У другому експерименті, з удвічі більшою кількістю плат, середній час обробки на різних пристроях збільшився, зокрема, для FlexLink Modular Conveyor цей показник зріс до 5,40 секунд, а для Yamaha YSM20R – до 15,71 секунд. Це підтверджує, що з більшим обсягом роботи навіть високоефективне обладнання може зіткнутися з деякими затримками. У третьому експерименті, при обробці 150 плат, спостерігається подальше зростання середнього часу обробки для більшості одиниць обладнання, хоча в деяких випадках зміни є мінімальними. Наприклад, середній час обробки для FlexLink Modular Conveyor знову зріс до 4,80 секунд, а для Yamaha YSM20R — до 14,66 секунд. Цей результат свідчить про те, що з часом і збільшенням обсягу роботи стає очевидним навантаження на обладнання, яке може потребувати оптимізації для підтримки високої ефективності.

Загалом, результати вказують на важливість балансування між продуктивністю та здатністю обробляти більший обсяг робіт без значного збільшення часу. Більшість обладнання показує поступове зростання середнього часу обробки в усіх експериментах, що свідчить про необхідність потенційних покращень у системах для підвищення їхньої ефективності при збільшенні обсягів виробництва. Тому оптимізація якості роботи кожного пристрою і системи в цілому є ключовим завданням для забезпечення стабільної роботи при змінних умовах.

3.6 Охорона праці

У процесі автоматизації та моделювання циклічних технологічних процесів необхідно забезпечити безпечні умови праці для всіх учасників

процесу. Враховуючи використання технологій ПІОТ і програмного забезпечення для управління, важливо врахувати ризики, що можуть виникнути під час експлуатації обладнання та систем, а також для персоналу, який здійснює нагляд за ними.

Одним з основних аспектів охорони праці є виявлення та оцінка потенційних ризиків, які можуть виникнути в процесі роботи з автоматизованими системами. Для оцінки рівня небезпеки в системах автоматизації використовується метод оцінки ризику за допомогою кількісних та якісних показників. Оцінка здійснюється за формулою:

$$R = P \cdot S, \quad (3.1)$$

де R – рівень ризику;

P – ймовірність виникнення небезпечної події (від 0 до 1);

S – ступінь шкоди або тяжкість наслідків цієї події.

Ймовірність P визначається на основі аналізу історії подій і функціонування системи, а S – це величина шкоди, яку може завдати подія. Всі значення визначаються експертним шляхом або за допомогою статистичних даних. Розглянемо приклад для ймовірності аварійного зупинення виробничої лінії, що є критичним для процесу.

Ймовірність виникнення аварії (неправильна робота системи через програмне забезпечення) $P = 0,02$ (2 %). Ступінь шкоди (наприклад, зупинка виробництва, втрати через простій): $S = 50000$ грн (вартість втрат через простої). Застосовуємо формулу для оцінки ризику:

$$R = 0,02 \cdot 50000 = 1000 \text{ грн.}$$

Отже, рівень ризику для даної події становить 1000 грн. Це означає, що в середньому система може призвести до збитків в розмірі 1000 грн за кожен цикл роботи.

Автоматизація процесів також може супроводжуватися змінами в енергоспоживанні та екологічних умовах. Для оцінки енергетичної ефективності і екологічних ризиків важливо розрахувати енергоспоживання на одиницю продукції:

$$E = P / Q, \quad (3.2)$$

де E – енергоспоживання на одиницю продукції (кВт·год/од);

P – потужність обладнання (кВт);

Q – кількість виготовленої продукції (одиниць).

Цей розрахунок дозволяє виявити потенційно небезпечні зони перевитрати енергії і забезпечити заходи для їх оптимізації. Розглянемо виробничу лінію, де за годину виготовляється 100 одиниць продукції.

Потужність обладнання $P = 50$ кВт. Кількість продукції за годину $Q = 100$ одиниць. Застосовуємо формулу для енергоспоживання на одиницю продукції:

$$E = 50 / 100 = 0,5 \text{ кВт}.$$

Отже, енергоспоживання на одиницю продукції становить 0,5 кВт · год. Якщо вартість електроенергії складає 2,64 грн за кВт·год, то вартість енергії на виробництво 100 одиниць продукції буде:

$$\text{Вартість енергії} = 50 \cdot 2,64 = 132 \text{ грн / год.}$$

Проведені розрахунки показують, що оцінка ризиків та енергетичних витрат є важливими інструментами для ефективного управління та мінімізації витрат у процесах автоматизації, що дозволяє знизити потенційні фінансові та екологічні ризики, забезпечуючи безпечну та економічно вигідну експлуатацію систем [45].

3.7 Висновки до 3 розділу

Розроблена програма моделювання циклічного технологічного процесу виробництва друкованих плат демонструє високу функціональність і практичну користь для аналізу виробничих систем. Програма дозволяє моделювати весь процес виробництва, враховуючи різні етапи обробки, завантаження обладнання та черги. Результати моделювання надають інформацію про продуктивність кожного етапу, включаючи середній час обробки, максимальну довжину черги та кількість оброблених плат. Цей підхід сприяє оптимізації технологічного процесу за рахунок виявлення "вузьких місць" і дозволяє покращити розподіл ресурсів для підвищення ефективності роботи виробничих ліній.

Проведені експерименти підтвердили здатність програми надавати релевантні дані для прийняття управлінських рішень, таких як зміна параметрів обладнання або додавання нових модулів для уникнення перевантаження. Модель враховує варіативність тривалості операцій завдяки використанню псевдовипадкових значень, що підвищує реалістичність симуляції. Завдяки можливості аналізувати різні сценарії виробництва, програмний модуль може бути використаний для планування виробничих потужностей, зниження витрат і підвищення загальної продуктивності технологічних процесів.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було досягнуто поставленої мети – підвищення ефективності циклічного технологічного процесу за рахунок розробки програмного забезпечення для моделювання.

У першому розділі було проведено аналіз циклічних технологічних процесів на виробництві, використання технології ПоТ для автоматизації технологічних процесів, методів моделювання циклічних технологічних процесів та сучасних системи автоматизації циклічних технологічних процесів. У другому розділі проаналізовано циклічний технологічний процес виробництва друкованих плат, обрано обладнання та сформовано перелік параметрів. Розроблено Q-схему моделювання та метод моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат. У третьому розділі проведено обґрунтування вибору мови та середовища розробки, розроблено алгоритм моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат та програмну функцію моделювання. Заключним етапом стало проведення експериментальних досліджень з моделювання технологічного процесу виробництва друкованих плат та аналіз отриманих результатів моделювання.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили здатність програми надавати релевантні дані для прийняття управлінських рішень, таких як зміна параметрів обладнання або додавання нових модулів для уникнення перевантаження. Отримані результати кваліфікаційної роботи можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме 9.4 [46].

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. – Введ. 2015-06-22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29 с.

2. Невлюдов, І.Ш. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [Текст]: навч. посіб. / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова. – Київ-58, пр. Космонавта Комарова, 1, 2016. – 320с.

3. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами»; «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва»; «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд.: І. Ш. Невлюдов Р. В. Артюх В. В. Безкоровайний Н. П. Демська В. В. Євсєєв О. І. Филипенко О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2021. 55 с.

4. Остапенко І. В. Дослідження методів керування ТП з використанням робототехнічних засобів / І. В. Остапенко // Автоматизація та Приладобудування = Automation and Development of Electronic Devices (ADED'2024) : збірник студентських наукових статей. – Харків : ХНУРЕ, 2024. – Вип. 1. – С. 47-50.

5. Жученко, Л. К. Автоматизація процесів керування термічною обробкою вуглецевих матеріалів : дис. ... д-ра філософії : 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Жученко Людмила Костянтинівна. – Київ, 2023. – 164 с.

6. Стадник Н. Б. Моделювання та ефективні методи опрацювання циклічних сигналів на базі ізоморфних циклічних випадкових процесів : дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 / Наталія Богданівна Стадник. — Тернопіль : ТНТУ, 2021. — 230 с.

7. Шерстньов В. В. Автоматизована система керування технологічним процесом виробництва водню : дипломна магістерська робота за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / В. В. Шерстньов ; наук. кер. Н. М. Шибицька ; рец. В. І. Чупринка. – Київ : КНУТД, 2021. – 111 с.

8. Qays, M. O., Ahmed, M. M., Parvez Mahmud, M. A., Abu-Siada, A., Muyeen, S. M., Hossain, M. L., ... & Rahman, M. M. (2022). Monitoring of renewable energy systems by IoT-aided SCADA system. *Energy Science & Engineering*, 10(6), 1874-1885.

9. Fortino, G., Guerrieri, A., Pace, P., Savaglio, C., & Spezzano, G. (2022). IoT Platforms and Security: An Analysis of the Leading Industrial/Commercial Solutions. *Sensors*, 22(6), 2196. <https://doi.org/10.3390/s22062196>.

10. Shi, Stone. "Industrial cloud, automation: The industrial. Internet of Things (IIoT) is being embraced by manufacturers as a natural extension of automation and controls development." *Control Engineering*, vol. 70, no. 8, Sept. 2023, p. 31. Gale Academic OneFile, link.gale.com/apps/doc/A786211953/AONE?u=anon~4de8442b&sid=googleScholar&xid=fa087c96. Accessed 11 Jan. 2025.

11. Tidrea, A., Korodi, A., & Silea, I. (2023). Elliptic Curve Cryptography Considerations for Securing Automation and SCADA Systems. *Sensors*, 23(5), 2686. <https://doi.org/10.3390/s23052686>.

12. Zhu, Q., Zhang, G., Luo, X., & Gan, C. (2023). An industrial virus propagation model based on SCADA system. *Information Sciences*, 630, 546-566.

13. S. Shitharth, K. M. Prasad, K. Sangeetha, P. R. Kshirsagar, T. S. Babu and H. H. Alhelou, "An Enriched RPCO-BCNN Mechanisms for Attack Detection and Classification in SCADA Systems," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 156297-156312, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3129053.

14. Вишванюк С. В. Удосконалення методу автоматизованого обліку готової продукції з використанням технології ПІОТ : пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні, спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / С. В. Вишванюк ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків, 2024. – 83 с.

15. Срогий Т. С. Методи моделювання циклічних сигналів в економіці : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра : спец. 126 – інформаційні системи та технології / наук. кер. Я. В. Литвиненко. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2024. 85 с.

16. Nnamene Christopher Chizoba. Computer ontology of the subject area "Modeling and processing of cyclic signals". - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the speciality 122 "Computer Science". - Ternopil National Technical University, named after Ivan Pulyuy, Ternopil, 2021.

17. Трембовецька І. Г. Аналіз сучасного стану конвеєрних ліній на виробництві / І. Г. Трембовецька // Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2024) : збірник студентських наукових статей. – Харків : ХНУРЕ, 2024. – Вип. 2. – С. 241-247.

18. X. Ding, S. Wu, M. Zhou, F. Cao and K. Liu, "A Survey of Industrial Internet Platform: the Powerful Tool Combining Industrial Internet of Things with Machine Learning," 2023 IEEE Smart World Congress (SWC), Portsmouth, United Kingdom, 2023, pp. 816-821, doi: 10.1109/SWC57546.2023.10449251.

19. Grachev, V. V., Myshlyaev, L. P., Lyakhovets, M. V., Ivushkin, K. A., & Makarov, G. V. (2021, July). Development of a control system for the technological complex of “Mine No. 12” processing plant based on the Wonderware System Platform 2017. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 823, No. 1, p. 012053). IOP Publishing.

20. Liu, R., Zhang, Z. F., Li, X., Liu, X. J., Li, H. Y., Bu, X. P., ... & Lyu, Q. (2023). Hot metal quality monitoring system based on big data and machine learning. *Journal of Iron and Steel Research International*, 30(5), 915-925.

21. Cahuzac, H., Sallustrau, A., Malgorn, C., Beau, F., Barbe, P., Babin, V., ... & Devel, L. (2022). Monitoring In Vivo Performances of Protein–Drug Conjugates Using Site-Selective Dual Radiolabeling and Ex Vivo Digital Imaging. *Journal of medicinal chemistry*, 65(9), 6953-6968.

22. Liao, K., Xu, S., Zhou, W., Luo, Y., Cao, Y., Wang, Y., & Gao, X. (2021, October). Implement of Building Management System\Environment Management System for 13-Valent Pneumococcal Conjugate Vaccine with Process Knowledge System. In *Proceedings of 2021 Chinese Intelligent Systems Conference: Volume I* (pp. 349-357). Singapore: Springer Singapore.

23. Яцишин Р.І. – Застосування методів машинного навчання для класифікації даних в комп’ютеризованих системах керування технологічними процесами.: кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю „174 — автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка“ / Р.І. Яцишин — Тернопіль : ТНТУ, 2024. — 75 с.

24. Бурко В. Я. Розробка та дослідження автоматизованої системи для гальванічного покриття деталей лужних акумуляторів з використанням двох автооператорів : кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю „151 — автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології“ / В. Я. Бурко. — Тернопіль : ТНТУ, 2023. — 107 с.

25. Чемерис О. Ю. Програмно-апаратний пристрій моніторингу тиску в системі водопостачання на базі Arduino : кваліфікаційна робота бакалавра : 123 Комп'ютерна інженерія / О. Ю. Чемерис ; Хмельниц. нац. ун-т. – Хмельницький, 2022. – 72 с.

26. Журавель, В. А. Мікроконтролерна система автоматизації і захисту енергетичних об'єктів : робота на здобуття кваліфікаційного рівня магістра : спец. 171 – електроніка / наук. кер. І. А. Кулик. Суми : СумДУ, 2021. 88 с.

27. Гекова Т. В. Експериментальне дослідження кінематичних параметрів роботизованих систем руху в просторі : магістерська дисертація на здобуття освітнього ступеня «магістр»: спец. спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Т. В. Гекова, ЧНУ ім. Петра Могили. - Миколаїв, 2022. - 154 с.

28. Rao, C. H., Singh, A. P., Kothuru, A., Varaprasad, B. K., & Goel, S. (2022). Fineline circuits realization with liquid photoresist and DMD-based photolithographic technique for space electronics applications. *Journal of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology*, 21(1), 011003-011003.

29. LDI NuvogoTM 1000 // GseMulticapa, 2024. URL: <https://gacem.com/ldi-nuvogotm-1000-new-cleanroom/?lang=en> (дата звернення: 23.11.2024).

30. He, J., Cen, Y., Li, Y., Alelaumi, S. M., & Won, D. (2021). A novel placement method for mini-scale passive components in surface mount technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(5), 1475-1485.

31. PCB Drilling Machine // ViaMECH, 2024. URL: <https://en.viamechanics.com/products/drill/> (дата звернення: 24.11.2024).

32. Atotech Sells 1,000th Horizontal Electrolytic Copper Plater To The Market // PEW, 2024. URL: https://powerelectronicsworld.net/article/114879/Atotech_sells_1000th_horizontal_electrolytic_copper_plater_to_the_market (дата звернення: 24.11.2024).

33. Rao, C. H., Singh, A. P., Varaprasad, B. K. S. V. L., Selvi, R., Rao, D. V. G., & Goel, S. (2024). Materials and manufacturing technology for high reliability rigid-flex multilayer PCB for space 3D-electronics packaging. *Engineering Research Express*, 6(2), 025336.

34. Full Line of Products // Hdcnc, 2024. URL: https://www.hdcncmc.com/VerticalMachiningCenterpl3740108.html?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAyoi8BhDvARIsAO_CDsAoXkrGJgWwGIEnbHuyLrAo7KENogL5NJsTptWXE9947dZniOl62WEaAloFEALw_wcB (дата звернення: 24.11.2024).

35. Marcinkevich, K. R., Lunkov, P. V., Kirienko, D. A., Putrolaynen, V. V., Belyaev, M. A., & Yartsev, A. V. (2021, June). Design, fabrication and testing of the package-on-package microcircuit. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1155, No. 1, p. 012096). IOP Publishing.

36. Ionel, R., & Mățiu-Iovan, L. (2022). Flying probe measurement accuracy improvement by external LCR integration. *Measurement*, 190, 110703.

37. Radicioni, L., Bono, F. M., & Cinquemani, S. (2025). On the use of vibrations and temperatures for the monitoring of plastic chain conveyor systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 223, 111935.

38. Білик І.Г., Білик М.Г. Розроблення та дослідження автоматизованої системи керування лінії подачі металевого профілю з використанням контролера фірми Siemens : кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістр за спеціальністю „174 — автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка“ / І.Г. Білик, М.Г. Білик — Тернопіль : ТНТУ, 2024. — 92 с.

39. Жгунова А. Є. Розроблення імітаційної моделі керування виробництвом в рамках Industrial 4.0 : пояснювальна записка до атестаційної роботи здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні, спеціальність 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / А.

Є. Жгунова ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки – Харків, 2021 – 76 с.

40. Іванюк О. А. Розроблення імітаційної моделі розподіленої бази даних для системи керування комп'ютерно-інтегрованим виробництвом : пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні, спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / О. А. Іванюк ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки – Харків, 2022. – 83 с.

41. Філонич Д. В. Розроблення підсистеми оптимізації страхових заділів для системи керування приладобудівельним виробництвом : пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні, спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / Д. В. Філонич ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки – Харків, 2022. – 87 с.

42. Балабанов І. В. Моделювання параметрів експонування топології при автоматизованому виробництві друкованих плат : пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні, спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / І. В. Балабанов ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків, 2024. – 80 с.

43. Луцків, А. М., & Бондаренко, М. (2022). Особливості оптимізації систем підтримки користувачів із застосуванням підходу систем масового обслуговування. Матеріали X науково-технічної конференції „Інформаційні моделі, системи та технології “Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 67-67.

44. Євсєєв В.В. Проектування мобільних роботів на базі одноплатних комп'ютерів (Raspberry Pi и мови Python 3.6) // Невлюдов І. Ш., Андрусевич А. О., Євсєєв В. В. Підручник. – Харків : 2020. С. 257.

45. Невлюдов І.Ш. Виробничі процеси та обладнання об'єктів автоматизації. Збірник задач: Навчальний посібник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, Г.В. Пономарьова, А.О. Функендорф. Кривий Ріг: КК НАУ. 2018. – 332 с.

46. Ціль 9. Промисловість, інновації та інфраструктура // Diia business, 2024. URL: https://business.diia.gov.ua/entrepreneur-handbook/item/cil_9_promislovist_innovaciyi_ta_infrastruktura (дата звернення: 18.12.2024).