

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

Розроблення імітаційної моделі керування виробництвом в рамках Industrial 4.0

(тема)

Виконала:

студентка 2 курсу, групи КІТПВм-20-1

Жгунова А.Є.

(прізвище, ініціали)

Спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми Освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані
технологічні процеси і виробництва

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Євсєєв В.В.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАМ

Невлюдов І. Ш.

(прізвище, ініціали)

2021 р.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ
 Кафедра _____ КІТАМ
 Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський)
 Спеціальність _____ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
 Тип програми _____ Освітньо-професійна
 Освітня програма _____ КІТПВ (Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва)

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
 Зав. кафедри КІТАМ _____
 (підпис)
 «___» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентці _____ Жгуновій Анні Євгенівні
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи _____ Розроблення імітаційної моделі керування виробництвом в рамках Industrial 4.0

Затверджена наказом по університету від _____ 08.11.2021 р. № 1697 Ст.

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 14.12.2021

3. Вихідні дані до роботи SMD-лінія; імітаційна модель роботи автоматичної лінії; час надходження заготовок; ймовірність виникнення браку = 0,1; час моделювання; довжина черги та час її проходження. Кількість реалізацій $N = 10$. Реалізація математичної моделі на персональному комп'ютері за допомогою мови імітаційного моделювання GPSS.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

4.1 Вступ;

4.2 Дослідження сучасних виробничих ліній в Smart Manufacturing;

4.3 Розробка Q-схеми моделювання та вибір обладнання;

4.4 Розробка імітаційної моделі та експериментальні дослідження;

4.5 Висновки.

4.6 Перелік джерел посилань

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – с. формату А4.

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 технічного завдання	8.11.21	виконано
2	Дослідження сучасного стану технології виробництва друкованих плат завдяки автоматичним лініям	10.11.21	виконано
3	Розробка Q-схеми роботи автоматичної лінії	15.11.21	виконано
4	Розробка імітаційної моделі за допомогою мови GPSS	21.11.21	виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.21	виконано
6	Подання атестаційної роботи в ЕК		

Дата видачі завдання 8.11.2021

Студент _____
(підпис)

Жгунова А.Є.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Євсєєв В.В.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 76 с., 2 табл., 26 рис., 2 дод., 30 джерел.

ІНДУСТРІЯ 4.0, КІБЕРФІЗИЧНІ СИСТЕМИ, ВИРОБНИЧА ЛІНІЯ,
ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, Q-СХЕМА.

Об'єкт дослідження – кіберфізичні виробничі системи.

Предмет дослідження – автоматичні системи управління виробничими лініями SMT-монтажу.

Мета роботи – розроблення Q-схеми моделювання виробничої лінії SMT-монтажу на мові GPSS.

Методи дослідження – неперервно-стохастичний підхід в моделюванні систем, імітаційна модель, аналітичний метод, методи сучасних інформаційних технологій.

У кваліфікаційній роботі розроблено імітаційну модель процесу функціонування автоматичної виробничої лінії виготовлення друкованих плат.

Для цього проведено дослідження, яке базується на методах математичного та комп'ютерного моделювання – для проведення моделювання ТП виготовлення друкованих плат, а також на методах імітаційного моделювання – для розробки імітаційної моделі ТП виготовлення друкованих плат.

Для забезпечення безпечних умов роботи та аналізу автоматичних ліній проведені необхідні розрахунки з усунення основних шкідливий виробничий факторів в робочій зоні.

Отримані данні імітаційним методом дозволять оптимізувати роботу виробничої лінії SMT-монтажу для виробництва друкованих плат.

Результати кваліфікаційної роботи апробовані у 3 фахових статтях.

ABSTRACT

Explanatory note: 76 pp., 2 tab., 26 fig., 2 app., 30 sources.

INDUSTRY 4.0, CYBER PHYSICAL SYSTEMS, PRODUCTION LINE, SIMULATION MODELING, Q-SCHEME.

The object of research is cyberphysical production systems.

The subject of research is automatic control systems for SMT-assembly production lines.

The purpose of the work is to develop a Q-scheme for modeling the production line of SMT-mounting in GPSS.

Research methods – continuous-stochastic approach in system modeling, simulation model, analytical method, methods of modern information technologies.

In the qualification work the simulation model of the process of functioning of the automatic production line of production of printed circuit boards is developed.

To this end, a study was conducted, which is based on the methods of mathematical and computer modeling – for modeling TP production of printed circuit boards, as well as on the methods of simulation modeling – to develop a simulation model of TP production of printed circuit boards.

To ensure safe working conditions and analysis of automatic lines, the necessary calculations were made to eliminate the main harmful production factors in the work area.

The obtained data by the simulation method will allow to optimize the work of the production line of SMT-assembly for the production of printed circuit boards.

The results of the qualification work were tested in 3 professional articles.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	7
Вступ.....	8
1 Дослідження сучасних виробничих ліній в Smart Manufacturing	11
1.1 Дослідження кіберфізичних виробничих систем	11
1.2 Аналіз структур виробничих ліній	16
1.3 Аналіз параметрів виробничих ліній	19
1.4 Аналіз і вибір мови імітаційного моделювання.....	25
1.5 Постановка мети та задач дослідження	28
2 Розробка Q-схеми моделювання та вибір обладнання	30
2.1 Дослідження виробничої лінії SMT-монтажу	30
2.2 Вибір обладнання	32
2.3 Розробка Q-схеми моделювання.....	40
2.4 Розрахунок кількості прогонів для отримання необхідної точності	44
2.5 Висновки до 2 розділу	46
3 Розробка імітаційної моделі та експериментальні дослідження.....	47
3.1 Розробка алгоритму роботи програми	47
3.2 Створення імітаційної моделі на базі GPSS	51
3.3 Аналіз отриманих результатів дослідження.....	59
3.4 Питання охорони праці та безпеки життєдіяльності.....	62
3.5 Висновки до 3 розділу	69
Висновки	71
Перелік джерел посилання	73
Додаток А Код програми імітаційної моделі	77
Додаток Б Демонстраційний матеріал у вигляді презентації	79

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

CPS – cyber-physical systems;

IoS – internet of services;

IoT – internet of things;

SMD – surface mounted device;

SMT – surface mount technology;

АСУТП – автоматизована система керування технологічним процесом;

ДП – друкована плата;

ЕОМ – електронно-обчислювальні машини;

ІТ – інформаційні технології;

М2М – міжмашинне підключення;

МЗП – мова загального призначення;

МІМ – мова імітаційного моделювання;

СМО – система масового обслуговування;

ТП – технологічний процес.

ВСТУП

Тенденції розвитку сучасного світу ведуть до збільшення обсягів інформації, підвищення вимог до її точності і своєчасного подання для аналізу і ухвалення рішень в режимах реального часу, вимагають перегляду підходів до використання високих технологій та їх ролі в різних сферах діяльності людини, що, у свою чергу, потребує змінити підходи до промислових технологій.

Діяльність сучасних виробничих підприємств реалізується сьогодні в відповідно до технологічних процесів Індустрії 3.0. В проектно-виробничу діяльність впроваджуються нові технічні та програмні засоби і системи автоматизації, що підвищують продуктивність праці проектувальників і знижують час виконання окремих етапів життєвого циклу виробів.

Аналіз шляхів модернізації виробничих потужностей підприємств показує, що основні напрямки розвитку, які підтримують організації, орієнтовані не тільки на зниження витрат, автоматизацію технологічних процесів і т.д., але і на цифровізацію проектних процедур, процесів постачання, виробництва, логістики, підтримки виробу в експлуатації і т.д. в загальному життєвому циклі виробів.

Необхідність оптимізації етапів життєвого циклу виробів призводить до вирішення ряду супутніх завдань, орієнтованих на розробку нових підходів до створення виробничих комплексів підприємств майбутнього на базі Індустрії 4.0, що підтримують інтеграцію технологічних, технічних, програмних та інших засобів і систем, що автоматизують етапи розробки та виготовлення виробів приладобудування. Такими системами, призначеними для роботи на підприємствах майбутнього, є кіберфізичні системи.

Провідні країни в галузі інноваційних технологій в промисловості запропонували нову концепцію стратегії цифрової революції – Індустрія 4.0. У Німеччині концепція Індустрії 4.0 підтримується міністерствами Federal Ministry of Education and Research Germany (BMBWF) і Federal Ministry for Economic Affairs and Energy Germany (BMWi). Основними представниками на ринку Industry 4.0 є

ABB (Швейцарія), Mitsubishi, Yaskawa, FANUC (Японія), KUKA, Siemens (Німеччина), General Electric, IBM, Cisco, Microsoft, Stratasys, Google, Intel, HP, Ansys, AIBrain, SAP, Amazon Web Services і General Vision (США).

Україна поки що визначається. В 2018 році в країні створена Національна стратегія Індустрії 4.0, але допоки вона не прийнята урядом країни й виконується силами бізнес-спільноти, яку координує Асоціація підприємств промислової автоматизації України (АППАУ) та платформа Industry4Ukraine.

З 2016 року національний рух Індустрії 4.0 пройшов чималий шлях.

В липні 2016 році була досягнута стратегічна угода секторів ІТ та АСУТП навколо положень Хартії Індустрії 4.0. Так виник національний рух Індустрії 4.0.

В 2017 році вийшов окремий сайт “Індустрія 4.0 в Україні”, пройшли перший конкурс інноваторів та перші експортні заходи в Берліні.

В 2018 році була розроблена національна стратегія Індустрії 4.0. 14 проектів згруповані по 6 напрямам дій й АППАУ взяла на себе відповідальність за їх впровадження. Відтоді моніторинг руху йде згідно планів цієї стратегії.

У наслідок чого об’єктом дослідження становиться кіберфізичні виробничі системи.

Предмет дослідження – автоматичні системи управління виробничими лініями SMT-монтажу.

Мета роботи – розроблення Q-схеми моделювання виробничої лінії SMT-монтажу на мові GPSS.

Для реалізації поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- виконати огляд та аналіз лінії SMT-монтажу, обрати для неї обладнання;
- проаналізувати особливості технологічних процесів виготовлення ДП завдяки автоматизованим лініям;
- розглянути особливості автоматичних виробничих ліній як об’єктів моделювання;
- проаналізувати сучасні методи та програмні засоби комп’ютерного моделювання;

- розробити імітаційну модель процесу функціонування автоматичної виробничої лінії виготовлення ДП;
- розробити програмне забезпечення імітаційної моделі для визначення функціональних характеристик лінії SMT-монтажу;
- провести розрахунки та надати рекомендації щодо використання результатів роботи;
- виконати розрахунок засобів електробезпеки та забезпечення безпечних умов праці в офісі розробників програмного забезпечення;
- оформити пояснювальну записку згідно з методичними вказівками [1], вимогами ДСТУ 3008:2015 [2] та положеннями [3-4].

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ВИРОБНИЧИХ ЛІНІЙ В SMART MANUFACTURING

1.1 Аналіз кіберфізичних виробничих систем

«Індустрія 4.0» або «Четверта промислова революція» – це інтеграція ланок промислового виробничого ланцюга із застосуванням «новітніх інформаційних і комунікаційних технологій». На відміну від автоматизованого виробництва (англ. Computer-integrated Manufacturing, попереднього етапу розвитку промисловості, іменованого тепер як «Індустрія 3.0») – центральним елементом у функціонуванні виробничих систем стають Інтернет технології, що забезпечують комунікації між людьми, машинами і продуктами.

«Індустрія 4.0» – збірне поняття, що охоплює ряд сучасних технологій пов'язаних з автоматизацією, обміном даних і виробництва. Воно визначено як набір технологій і концепцій для організації ланцюга створення вартості, який об'єднує «Кіберфізичні системи» (Cyber-physical systems, CPS), «Інтернет речей» (Internet of things, IoT) і «Інтернет сервісів» (Internet of Services, IoS) .

Індустрія 4.0 визначає бачення і принципи функціонування «Розумного Підприємства». Таке підприємство використовує модульну структуру, кіберфізичні системи контролюють фізичні процеси, створюючи своєрідну віртуальну копію реального світу, і приймають децентралізовані рішення. За допомогою Інтернету речей кіберфізичні системи з'єднуються і взаємодіють один з одним і людьми в реальному часі. За допомогою Інтернету сервісів, внутрішні і сторонні сервіси вибираються і утилізуються учасниками ланцюга створення вартості [6].

Основу Індустрії 4.0 склали чотири принципи:

– функціональна сумісність людини і машини, яка надає можливість контактувати безпосередньо через Інтернет;

- прозорість інформації і здатність систем створювати віртуальну копію фізичного світу;
- технічна допомога машин людині для об'єднання великих обсягів даних і виконання ряду небезпечних для людини завдань;
- здатність систем самостійно і автономно приймати рішення.

Від попередніх революцій Індустрію 4.0 відрізняють такі обов'язкові ознаки:

- цифровізація і вертикальна інтеграція по ланцюгу створення вартості. «Індустрія 4.0» передбачає цифровізацію і інтеграцію процесів по вертикалі в рамках всієї організації, починаючи від розробки продуктів і закупівель і закінчуючи виробництвом, логістикою і сервісним обслуговуванням. Всі дані про операційні процеси, їх ефективності, управління якістю і операційне планування доступні в режимі реального часу в єдиному інформаційному просторі, оптимізованому під різні платформи;

- цифровізація і горизонтальна інтеграція декількох ланцюгів створення вартості. Горизонтальна інтеграція виходить за межі діяльності одного підприємства і охоплює постачальників, споживачів і всіх ключових партнерів по ланцюгу створення вартості;

- цифровізація продуктів і послуг. Цифровізація товарів передбачає доповнення наявних продуктів інтелектуальними датчиками або пристроями зв'язку, сумісними з інструментами аналізу даних. Завдяки впровадженню нових методів аналітики у компаній з'являється можливість отримувати дані про використання продуктів і допрацьовувати ці продукти відповідно до нових вимог кінцевих користувачів;

- цифрові бізнес-моделі і доступ клієнтів. Провідні галузеві компанії також розширюють спектр наданих ними послуг, пропонуючи революційні цифрові рішення, наприклад комплексне персоніфіковане обслуговування на основі даних і інтегровані платформи;

- нові цифрові бізнес-моделі часто спрямовані на отримання додаткової виручки від цифрових рішень, оптимізацію взаємодії з клієнтом і поліпшення

доступу клієнтів. Цифрові товари і послуги часто призначені для обслуговування клієнтів шляхом надання їм комплексних рішень в відокремленій цифровій екосистемі;

– розвинена технологічна платформа. Підприємства використовують високотехнологічні машини і обладнання, інформаційно-комунікаційні рішення і кіберфізичні системи, що забезпечують цифровізацію і інтеграцію. Без розвинених технологій проблематично реалізувати всі попередні атрибути з практичної точки зору [7].

Технології – основа Індустрії 4.0, без них неможлива трансформація промислового виробництва. Частина ключових технологій активно впроваджується, частина поки проходить попередні випробування в науково-дослідних центрах, але їх ефективність вже надійно доведена практикою застосування.

Аналіз великих даних. Цілі застосування: підвищення якості продукції, енергозбереження та вдосконалення порядку обслуговування обладнання. Для ефективного застосування важлива інтеграція даних з декількох інформаційних систем, в тому числі управління виробництвом обліку ресурсів, управління відносинами з клієнтами та ін.

Автономні роботи. Сучасні роботи настроюються і конструюються так, щоб взаємодіяти між собою і з співробітниками, самостійно навчатися і оптимізувати власні операції.

Симуляція (моделювання). Віртуальне моделювання продуктів, матеріалів і процесів вже застосовується на етапі інженерних розробок, в майбутньому його застосування розшириться для імітації повного циклу операційних і виробничих процесів. Ці моделі будуть витягувати дані в режимі реального часу для створення віртуальної копії реального виробництва за участю машин, продуктів і співробітників. Це дозволить операторам тестувати і оптимізувати настройки обладнання для наступного продукту на лінії за допомогою віртуальної моделі до внесення зміни безпосередньо на фізичному виробництві.

Інтеграція ІТ-систем. У багатьох компаніях інформаційні системи не інтегровані між собою або інтегровані частково. Також вкрай рідко між собою інтегруються підприємства-виробники, постачальники та клієнти. Індустрія 4.0 передбачає, що функціональні підрозділи в рамках однієї компанії і цілі компанії утворюють загальний універсальний інформаційний простір з метою автоматизувати відразу кілька ланцюгів створення цінності.

Промисловий Інтернет речей. В даний час тільки деяке обладнання на виробництві використовує міжмашинне підключення (M2M) і використовує вбудовані обчислювальні потужності. Промисловий Інтернет речей передбачає оснащення вбудованими датчиками все більшу кількість виробничих об'єктів і навіть незавершену продукцію. Це дозволить передавати великі обсяги даних як між машинами, так і централізованих систем контролю, здійснити децентралізацію систем аналітики і прийняття рішень, забезпечуючи роботу в режимі реального часу.

Кібербезпека. В управлінні та на виробництві багато компаній як і раніше покладаються на ІТ-рішення, які є закритими і не з'єднаними із зовнішнім світом. При збільшенні з'єднань і використанні стандартних протоколів з'єднань, які передбачає Індустрія 4.0, стає очевидною потреба в захисті ключових виробничих систем та ліній від кіберзагроз. Тому безпечні з'єднання і надійні підходи до управління доступом до систем є невід'ємною умовою розвитку корпоративних інформаційних систем.

Хмарні обчислення. Багато компаній вже використовують програмне забезпечення і системи аналізу на основі хмарних платформ. Індустрія 4.0 передбачає збільшення потоків обміну даними, що виходять за межі окремо взятої компанії. Зростає і обчислювальна потужність хмарних платформ. Надалі виробничі системи моніторингу і контролю, можливо, перейдуть на хмарні платформи.

Аддитивне виробництво (3D-друк). Компанії поступово починають застосовувати інструменти адитивного виробництва, наприклад 3D-друк. Зараз основна область застосування – це прототипування і створення окремих

компонентів. У Індустрії 4.0 інструменти адитивного виробництва можуть застосовуватися більш широко, в тому числі для виробництва невеликих партій кастомізованої продукції.

Доповнена реальність. Системи доповненої реальності оптимізують роботу на складі і підбір комплектуючих, направляють інструкції на мобільні пристрої виробничих робітників під час ремонту устаткування шляхом направлення. В рамках Індустрії 4.0 сфера їх застосування буде розширюватися з метою спростити роботу виробничого персоналу і забезпечити підтримку прийняття рішень.

Сукупність технологій, що забезпечують взаємодію між віртуальним і фізичним світом, називається кіберфізичними системами (рис. 1.1). Стосовно до промисловості використовується термін «кіберфізичні виробничі системи». Компанія ІВМ визначає кіберфізичні системи як системи, в яких обчислювальні елементи взаємодіють з датчиками, які забезпечують моніторинг кіберфізичних показників, і з виконавчими елементами, які вносять зміни в кіберфізичну середу. Кіберфізичні системи об'єднують інформацію від інтелектуальних датчиків, розподілених у фізичному середовищі, для кращого розуміння середовища і виконання більш точних дій. У фізичному контексті виконавчі елементи на основі одержуваних даних вносять зміни в середовище проживання користувачів. У віртуальному контексті кіберфізичні системи застосовуються для збору даних про віртуальних діях користувачів, обладнання та машин.



Рисунок 1.1 – Архітектура кіберфізичної системи [8]

1.2 Аналіз структур виробничих ліній

Технологічним комплексом (виробничою лінією) називається комплект обладнання, в тій чи іншій мірі, який бере участь в процесі виробництва продукції. Лінія поверхневого монтажу призначена для створення високопродуктивних ділянок автоматизованого складання друкованих плат.

Задачі, які може виконувати автоматизована виробнича лінія:

- монтаж від дослідних зразків і малих партій до серійного виробництва друкованих плат;
- монтаж компонентів (SMD-компонентів від 0,6 мм x 0,3 мм (0201) до 55 мм x 55 мм з кроком виводів 0,3 мм, BGA-компонентів, mBGA, Flip-Chips, CSP);
- монтаж компонентів (SIP, DIP-компонентів в вивідних корпусах, компонентів з осьовими і радіальними виводами, нестандартні і великогабаритні компоненти і роз'єми).

Монтаж SMD-компонентів здійснюється автоматизованою лінією поверхневого монтажу SMT (surface mounting technology). Можливий односторонній і двосторонній монтаж друкованих плат. Устаткування дозволяє працювати з традиційними друкованими платами з текстоліту, з гнучкими платами і платами з алюмінію і міді.

Автоматизований монтаж BGA, mBGA, Flip-Chips, CSP і інших складних компонентів здійснюється за рахунок застосування спеціалізованих насадок і перевіреної методики. Строго дотримується умова повної відтворюваності технології пайки. Це гарантує якість монтажу і дотримання всіх необхідних технологічних параметрів.

ЕлеСі виробляє монтаж SIP, DIP-компонентів в вивідних корпусах, компонентів з осьовими і радіальними виводами, нестандартних і великогабаритних компонентів і роз'ємів. Монтаж друкованих плат по ТНТ-технології проводиться на автоматизованій лінії селективної пайки. Висока точність контролю і управління параметрами пайки, відсутність впливу

людського фактора і сучасні технічні рішення гарантують максимальну продуктивність, стабільність процесу і виключають появу дефектів [9].

В даній атестаційній роботі буде розглянуто автоматичну виробничу лінію SMT-монтажу.

Основою ліній поверхневого монтажу є високопродуктивні автомати установки компонентів. Ці автомати завдяки сучасним інтелектуальним системам є гнучкими і простими в переналагодженні. Висока продуктивність і точність установки SMD компонентів дозволяє лініям поверхневого монтажу повністю відповідати всім сучасним тенденціям електронного виробництва. Автомат працює з компонентами в різній упаковці (стрічки, пенали, палети) і широким діапазоном розмірів корпусів від чіпів 0201 до BGA 42 мм x 42 мм, з платами з мінімальними розмірами 65 мм x 60 мм і максимальними 400 мм x 400 мм.

У лінії можуть вбудовуватися установки трафаретного друку, які дозволяють досягти високої продуктивності і відмінної якості збірки друкованих плат за рахунок використання передових технологій точності нанесення паяльної пасти. Автомат оснащений рамою для трафаретів з пневматичним натягненням трафаретів. Устаткування дозволяє виконувати нанесення паяльної пасти в автоматичному режимі.

Ще однією з важливих технологічних операцій є процес пайки, для якої використовується конвеєрні печі конвекційного оплавлення, а також установки пайки хвилею припою. Конструкція плит нагріву, конвекційних печей, розташованих в кожній зоні, дозволяє виробляти рівномірний нагрів друкованої плати. Особливості печей: система конвекції гарячого повітря розташована як з верхньої, так і з нижньої сторони кожної зони, незалежний контроль температури кожної зони. Нові моделі установок пайки хвилею припою відрізняються наявністю мікроконтролерів, великим LCD екраном, титановою ванною, конвекційним попередніми нагрівачем і т.п. Передові технології нагріву та контроль цього процесу дозволяють отримувати високу якість паяних з'єднань. Використовуючи функції контролю температури печі, можна виконувати операції пайки і клейового процесу як окремо, так і одночасно.

Для контролю якості складання друкованих вузлів використовується система автоматичного оптичного контролю, яка дозволяє проводити візуальний контроль монтажу (зруйновані, пропущені, встановлені полярно і перевернуті компоненти), контроль якості пайки (короткі замикання, злами і напливи припою). Для контролю якості пайки і правильності монтажу мікросхем в корпусах BGA використовується система оптичної інспекції.

Установники компонентів, установки трафаретного друку, печі оплавлення і системи контролю друкованих плат в лініях поверхневого монтажу об'єднуються з транспортною системою: автоматичні завантажувачі друкованих плат – автоматичне завантаження плат в лінію збірки. Розвантажувачі – вивантаження друкованих плат з транспортної системи лінії. Автоматичний завантажувач / розвантажувач друкованих плат поєднує операції завантаження / вивантаження друкованих плат і його може бути встановлено як в складі лінії, так і для окремого обладнання [13].

Також в деяких лініях необхідно зберігання чутливих до вологості компонентів, які здійснюються в камері сухого зберігання. Попередня сушка чутливих до вологості компонентів, в разі необхідності, здійснюється в сушильній шафі.

Для підвищення якості і надійності продукції, що виробляється лінію, оснащують таким допоміжним обладнанням, як системи ультразвукового та струменевого відмивання і системи зберігання електронних компонентів і друкованих плат.

Монтаж мікросхем в корпусі BGA здійснюється за допомогою автомата-установника, а також може бути виконаний на установнику паяльно-ремонтної станції. Ремонт блоків з мікросхемами в корпусі BGA і відновлення кулькових виводів мікросхем в корпусах BGA здійснюється за допомогою паяльно-ремонтної станції.

Можливо виготовлення друкованих вузлів з габаритами друкованої плати менше 65 мм x 60 мм і складної форми в групових заготовках з подальшим поділом друкованих вузлів з заготовки. При цьому вхідні друковані вузли можуть

кріпитися в заготовку при скрайбуванні або за допомогою ведення перемичок [14].

Виходячи з усього перерахованого вище, можна відтворити конфігурацію лінії графічно (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Конфігурація виробничої лінії поверхневого монтажу

1.3 Аналіз параметрів виробничих ліній

Як вже було з'ясовано, лінія складається з декількох самостійних агрегатів, які, в той же час, технологічно невіддільні один від одного.

Виходячи з цієї особливості виробничої лінії, оцінювати її можна і як цілу систему, і як сукупність окремих складових. Причому, в різних ситуаціях і для різного устаткування можуть використовуватися різні способи оцінки. Так, функціонуючу лінію прийнято аналізувати як єдине ціле, тому що тільки в комплексі вона здатна виробляти продукцію і приносити дохід. А ось при впровадженні нового обладнання лінію можуть оцінювати по її окремих компонентах [15].

Що стосується розрахункових методів, в оцінці вартості виробничих ліній використовують стандартні підходи: дохідний, витратний, порівняльний (наведені в порядку зменшення їх ефективності для оцінки даного виду майна).

Розглянемо декілька видів виробничої лінії і її характеристики.

SMD-лінія для прототипного виробництва (рис. 1.3):

– організація ділянки поверхневого монтажу з трьох основних одиниць обладнання;

– ручний настільний принтер трафаретного друку;

- настільний автоматичний установник SMD-компонентів;
- піч конвекційного оплавлення припою;
- продуктивність: 7000 комп / год;
- максимальний розмір ДП: 480 мм х 300 мм;
- спектр встановлюваних компонентів: від 0402 до 40 мм х 40 мм, LED, QFP, BGA;
- загальна кількість живильників: 46;
- максимальна температура пайки: 400 °С;
- стабільність температури: +/- 2 °С;
- кількість зон нагріву зверху / знизу: 4/4;
- кількість зон охолодження: 1.



Рисунок 1.3 – SMD-лінія для прототипного виробництва [15]

SMD-лінія для дрібно- і середнесерійних виробництв (рис. 1.4):

- організація автоматизованого ділянки поверхневого монтажу з семи основних одиниць обладнання;
- завантажувач друкованих плат в лінію;
- принтер трафаретного друку;
- проміжний конвеєр;
- монтажний автомат;
- піч конвекційного оплавлення припою;
- розвантажувач друкованих плат з лінії;
- продуктивність: до 10500 комп / год;
- спектр встановлюваних компонентів: від 0201 до 150 мм х 100 мм;

- максимальний розмір ДП: 650 мм х 440 мм;
- макс. кількість живильників: 160 шт (8 мм);
- максимальна температура пайки: 350 °С;
- стабільність температури: +/- 2 °С;
- кількість зон нагріву / охолодження: 6/1;
- кількість ДП в магазині: 50.



Рисунок 1.4 – SMD-лінія для дрібно- і середнесерійних виробництв [15]

SMD-лінія для середнесерійного виробництва (рис. 1.5):

- завантажувач друкованих плат з одного магазину;
- принтер трафаретного друку і рамою для трафаретів;
- проміжний конвеєр;
- монтажний автомат;
- інспекційний конвеєр;
- піч конвекційного оплавлення припою (з системою центральної підтримки ДП);
- розвантажувач друкованих плат в один магазин;
- продуктивність: до 30000 комп / год;
- спектр встановлюваних компонентів: від 0402 до 42 мм х 42 мм;
- макс. габарити ДП: 1200 мм х 510 мм;
- макс. кількість живильників: 120 шт (8 мм);

- максимальна температура пайки: 350 °С;
- стабільність температури: +/- 1 °С;
- кількість зон нагріву / охолодження: 8/2;
- кількість ДП в магазині: 50.



Рисунок 1.5 – SMD-лінія для середнесерійного виробництва [15]

SMD-лінія для великосерійних виробництв (рис. 1.6):

- організація автоматизованого ділянки поверхневого монтажу з восьми основних одиниць обладнання;
- завантажувач друкованих плат в лінію;
- принтер трафаретного друку;
- проміжний конвеєр;
- монтажний автомат;
- проміжний конвеєр;
- піч конвекційного оплавлення припою;
- розвантажувач-сортувальник друкованих плат;
- продуктивність: до 108000 комп / год;
- спектр встановлюваних компонентів: від 0402 до 42 мм x 42 мм;
- макс. габарити ДП: 1200 мм x 510 мм;
- макс. кількість живильників: 240 шт (8 мм);
- максимальна температура пайки: 350 °С;

- стабільність температури: +/- 1 °С;
- кількість зон нагріву / охолодження: 10/2;
- кількість ДП в магазині: 50.



Рисунок 1.6 – SMD-лінія для великосерійних виробництв [15]

Високопродуктивна SMD-лінія (рис. 1.7):

- завантажувач плат з 5 магазинів;
- завантажувач плат зі стосу (дестекер);
- система перевертоту ДП на 180°;
- лазерний маркіровщик;
- системи очищення ДП від пилу;
- робоча станція;
- автоматичний принтер трафаретного друку;
- вертикальний буфер;
- лінійна система паяльної пасти;
- буфери-разбракованці;
- високошвидкісний автомат-установник SMD компонентів;
- гнучкий багатфункціональний автомат-установник SMD компонентів;

- лінійна система SMD-компонентів;
- гнучкий високошвидкісний автомат-установник SMD-компонентів;
- піч конвекційного оплавлення припою в азотному середовищі TSM;
- охолоджуючий буфер;
- двухмагазинний розвантажник.

Технічні характеристики лінії:

- продуктивність: до 362.000 комп / год (2000 плат / добу);
- такт лінії: 2 с;
- спектр встановлюваних компонентів: від чіпів 03015 до роз'ємів довжиною 75 мм;
- макс. габарити ДП: 510 мм x 460 мм;
- макс. кількість живильників: 600 шт (8 мм);
- максимальна температура пайки: 350 °С;
- стабільність температури: +/- 1 °С;
- кількість зон нагріву / охолодження: 12/3;
- кількість ДП в магазині: 50.



Рисунок 1.7 – Високопродуктивна SMD-лінія [15]

Отже, якщо стоїть завдання здійснювати поверхневий монтаж з найкращими показниками якості, необхідна автоматична лінія поверхневого

монтажу, яка повинна складатися з відповідного обладнання (в залежності від типу виробництва). Причому знаходиться пряма залежність продуктивності лінії від швидкості установника SMD компонентів, як самої повільного ланки в лінії.

З порівняльних характеристик можна побачити, що найвища продуктивність у лінії з найбільшою кількістю обладнання, який включає в себе декілька установників, замість одного. Також вона дає можливість виробляти великі ДП, має більшу кількість живильників та високу температуру пайки. Мінус такої лінії в тому, що вона займає багато місця на виробництві.

В даній магістерській роботі буде розглянута високопродуктивна лінія від компанії Jabil.

1.4 Аналіз і вибір мови імітаційного моделювання

На всіх етапах проектування, створення й експлуатації комп'ютеризованих систем управління та систем автоматики постає необхідність аналізу їх окремих компонентів і систем загалом. Нелінійно зростають витрати часу, матеріальних, енергетичних і фінансових ресурсів на їх проектування, створення й експлуатацію. Задля скорочення витрат ресурсів та уникнення небажаних наслідків на всіх етапах їх життєвих циклів постає необхідність прийняття відносно них обґрунтованих проектних та управлінських рішень. Проте проведення натурних експериментів на самому об'єкті, як правило, неможливе (об'єкта ще немає, об'єкт недоступний, небезпека ушкодження об'єкта) або недоцільне (ризик великих втрат). Ефективним засобом аналізу таких об'єктів все частіше стає математичне моделювання, що здійснюється з використанням електронно-обчислювальних машин (ЕОМ) або персональних комп'ютерів [16].

При імітаційному моделюванні функціонування об'єкта відтворюється за допомогою спеціального моделювального алгоритму шляхом імітації елементарних явищ процесу зі збереженням їх логічної структури й послідовності протікання в часі. Це дозволяє за вхідними даними одержати відомості щодо

станів процесу в певні моменти часу i , таким чином, дає можливість оцінити характеристики об'єкта.

Під час проведення моделювання, розробки чи вибору моделей, методів та інструментальних засобів виникає задача оцінки його ефективності. Ефективність моделювання визначається на практиці шляхом співставлення ефекту від використання його результатів і витрат на його проведення. Це визначає основні вимоги, що ставляться до моделей. Ефективність математичного моделювання може оцінюватися рядом часткових критеріїв, у тому числі: точністю результатів моделювання; адекватністю, економічністю, універсальністю моделі.

Важливим моментом у процесі моделювання є вдалий вибір мови або пакета програм моделювання. Серед основних вимог, які висуваються до мов програмування, є такі: зручність опису процесу, що моделюється; зручність введення вхідних даних, внесення змін до структури і параметрів моделі; ефективність засобів аналізу і відображення результатів моделювання. Для розв'язання задач моделювання використовують мови загального призначення (МЗП) і мови імітаційного моделювання (МІМ).

Прикладами МЗП, які найбільш широко використовувалися для програмування задач моделювання, є Fortran, Pascal, Delphi, C++. Основною перевагою МЗП вважається їх універсальність. Сьогодні МЗП використовуються здебільшого для створення пакетів програм моделювання. Основною перевагою МІМ є зручність програмування моделей і методів їх дослідження. МІМ залежно від способу формування системного часу моделювання поділяють на неперервні, неперервно-дискретні і дискретні.

Неперервні мови призначені для моделювання неперервних у часі процесів, що описуються диференціальними, різницеvими або алгебраїчними рівняннями, які пов'язують вихідні змінні з вхідними. До мов цієї групи належать MIMIC, Dynamo.

Неперервно-дискретні мови призначені для опису об'єктів, у яких присутні як неперервні, так і дискретні процеси. Прикладами мов цієї групи є GASP, ForSim.

Дискретні мови призначено для опису дискретних процесів. Їх характерною рисою є наявність засобів формування динамічних списків подій, які упорядковуються у часі. Сучасні дискретні мови орієнтовані на планування подій, перегляд видів діяльності та процесів. Прикладами мов цієї групи є SIMSCRIPT, Simula, GPSS [17].

У багатьох неперервних і дискретних мовах сьогодні створюються додаткові можливості. Наприклад, до складу мови GPSS World включено блок Integrate, що дозволяє проводити імітаційне моделювання неперервних процесів, а пакети неперервного моделювання Stella і Think мають убудовані елементи для дискретного моделювання.

Якщо порівнювати мови імітаційного моделювання, то для конкретної задачі в даній атестаційній роботі основними перевагами володіє мова GPSS.

Мова імітаційного моделювання GPSS (General Purpose System Simulation) орієнтована на опис процесів функціонування дискретних об'єктів типу систем масового обслуговування (СМО, Q-схем).

Пакет програм – GPSS World (GPSS W, General Purpose System Simulation World) фірми Minuteman Software – універсальне середовище моделювання дискретних і безперервних процесів, призначене для професійного імітаційного моделювання різнорідних об'єктів. Він містить графічні оболонки для створення моделей та інтерпретації результатів моделювання, мультимедійні засоби і відео, об'єктно-орієнтоване програмування й ін. В основу системи покладена мова імітаційного моделювання GPSS.

Система має великий набір команд для керування процесом моделювання, які можна використовувати в інтерактивному режимі або включати в модель. Забезпечено можливість проведення експериментів, згенерованих системою, користувальницьких і оптимізаційних. У системі GPSS W реалізовано процедуру візуалізації процесу функціонування моделі з використанням методів мультиплікації. Вона містить новий високошвидкісний транслятор, що працює в сотні разів швидше за його попередників. Для швидкого виправлення помилок використовується повноекранний текстовий редактор [18].

1.5 Постановка мети та задач дослідження

Проведений в оглядовій частині роботи аналіз сучасних конструкцій та характеристик автоматизованих ліній поверхневого монтажу показав широкі можливості її застосування у виробничому технологічному процесі. При виборі конструкції автоматизованої лінії враховуються задачі, які вона повинна виконувати, показники якості та продуктивності.

За результатами огляду та аналізу сучасних мов імітаційного моделювання для систем масового обслуговування встановлено, що мова GPSS дозволяє виконувати необхідне дискретне моделювання, яке можна проводити над даною лінією.

Це обумовлює актуальність задачі розробки імітаційної моделі керування виробництвом в рамках Індустрії 4.0.

Об'єктом дослідження є кіберфізичні виробничі системи.

Предметом дослідження є автоматичні системи управління виробничими лініями SMT-монтажу.

Мета роботи є розроблення Q-схеми моделювання виробничої лінії SMT-монтажу на мові GPSS.

Тому ставляться задачі:

- виконати огляд та аналіз лінії SMT-монтажу, обрати для неї обладнання;
- проаналізувати особливості технологічних процесів виготовлення ДП завдяки автоматизованим лініям;
- розглянути особливості автоматичних виробничих ліній як об'єктів моделювання;
- проаналізувати сучасні методи та програмні засоби комп'ютерного моделювання;
- розробити імітаційну модель процесу функціонування автоматичної виробничої лінії виготовлення ДП;
- розробити програмне забезпечення імітаційної моделі для визначення функціональних характеристик лінії SMT-монтажу;

- провести аналіз та надати рекомендації щодо використання результатів роботи;
- виконати розрахунок засобів електробезпеки та забезпечення безпечних умов праці в офісі розробників програмного забезпечення.

2 РОЗРОБКА Q-СХЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВИБІР ОБЛАДНАННЯ

2.1 Дослідження виробничої лінії SMT-монтажу

Проаналізувавши кіберфізичні виробничі системи, прийнято рішення проводити експериментальну частину над автоматизованою лінією SMT-монтажу.

Для прикладу розглянуто види конфігурації виробничої лінії компанії Jabil. Ділянка зазначена червоним обрана для процесу моделювання.

Вона включає в себе:

- пристрій завантаження магазину друкованих плат для виробництва друкованих плат на виробничій лінії SMT;
- автоматичний трафаретний принтер, який призначений для використання в конвеєрних лініях;
- з'єднувальний конвеєр для переміщення заготовок;
- човниковий конвеєр, який використовується для перенаправлення потоку друкованих плат в різні канали виробничої лінії;
- конвекційну лінійну піч для пайки оплавленням припойними пастами.

Обрана лінія зображена на рисунку 2.1.

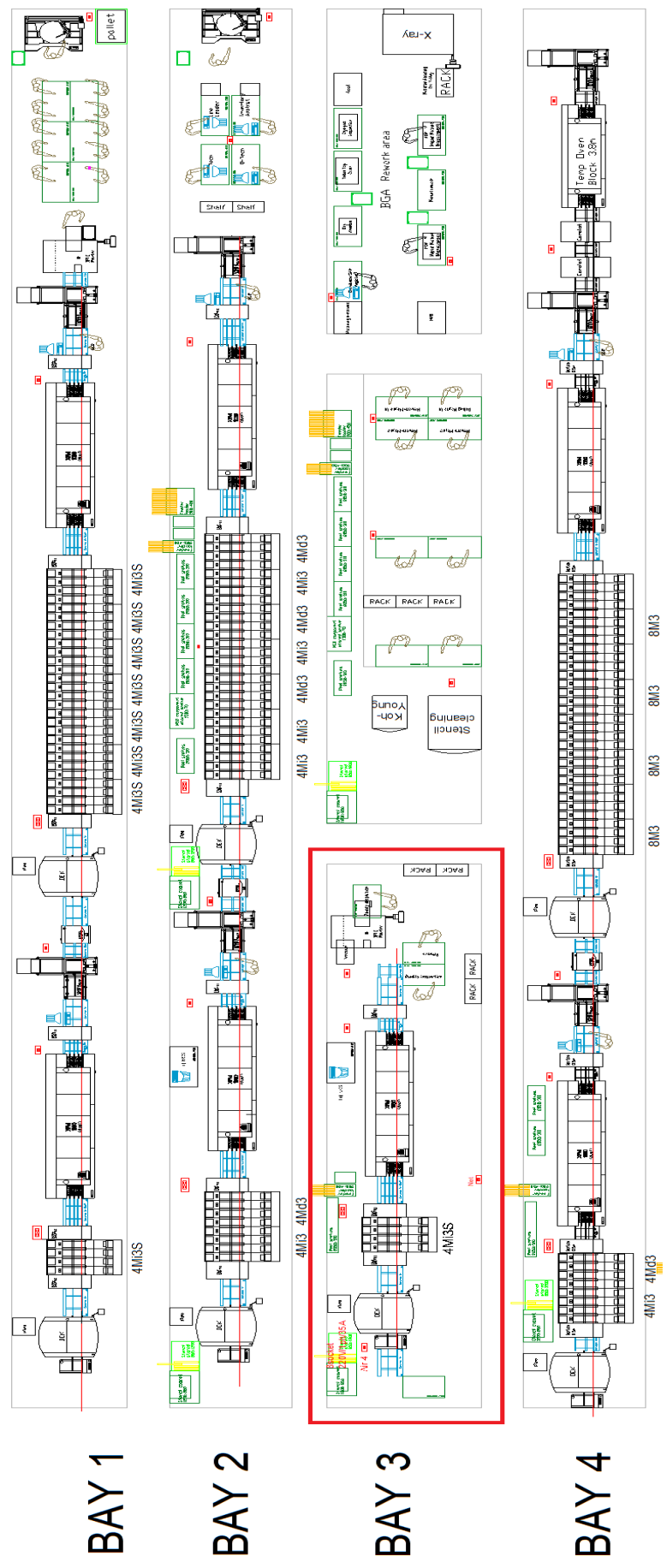


Рисунок 2.1 – Автоматизована лінія компанії Jabіl

2.2 Вибір обладнання

Дана лінія буде описуватися характеристиками і параметрами, які згадуються у підрозділі 1.3.

Отримавши поточну конфігурацію обраної лінії, можна перейти до вибору її складових.

Першим у складі автоматичної лінії є РСВ завантажувач LD-250M-SZ.

Пристрій завантажувача журнальних друкованих плат для виробництва друкованих плат на лінії SMT. Спеціальна конструкція з листового металу, яка може допомогти чіткіше зрозуміти стан роботи магазину. Суцільна конструкція підйомної платформи для лиття під тиском покращує стійкість обладнання. Контроль програмованого логічного контролера, робота кольорового інтерфейсу людина-машина. Використовується конструкція циліндричної пластини, швидкість і силу натискання можна регулювати. Допоміжна гальмівна система позиціонування, точне позиціонування, швидка швидкість підйому, висока ефективність виробництва. Незалежна система управління інтелектуальною власністю, багатofункціональна електрична схема та програмування, стабільна продуктивність, забезпечують гладку виробничу лінію, безпечну та надійну. Акустично-оптична сигналізація, оперативне повідомлення про помилку, проста в експлуатації та обслуговуванні. Стандартний режим зв'язку з сигналом SMEMA.

Характеристики:

- максимальний ефективний розмір друкованої плати: 330 мм x 250 мм (довжина * ширина);
- товщина друкованої плати: 0,5-4 мм;
- розмір журналу: 335 мм x 320 мм x 563 мм (Д x Ш x В);
- кількість друкованих плат завантаження магазину: 50 друкованих плат на кожну стійку;
- розмір обладнання: 1330 мм x 765 мм x 1250 мм (Д x Ш x В);
- час завантаження друкованої плати: 6-25 с, можна регулювати.

Вид завантажувача можна побачити на рисунку 2.2.



Рисунок 2.2 – РСВ завантажувач LD-250M-SZ [15]

Другим у складі автоматичної лінії автомат трафаретного друку DEK.

Автоматичні трафаретні принтери ASM DEK серії NeoHorizon призначені для використання в конвеєрних лініях в умовах масового (модель 01 iX) виробництва. Завдяки модульній конструкції автомати можна адаптувати під потреби конкретного виробництва. Принтери стандартно оснащуються напівавтоматичною системою завантаження трафарету, автоматичною системою очищення трафарету з вбудованою вакуумної помпою, системою швидкої зміни ракелів, системою автоматичного регулювання ширини конвеєра і програмним забезпеченням російською мовою.

Характеристики:

- час циклу друку, с: 11 (опціонально 8) + процес нанесення;
- розміри друкованої плати, мм: від $50 \times 40,5$ до $510 \times 508,5$;
- товщина друкованої плати, мм: від 0,2 до 6;
- час переходу з виробу на виріб, хв.: <2;
- час створення програми на новий виріб, хв.: <10.

Автомат трафаретного друку можна побачити на рисунку 2.3.



Рисунок 2.3 – Автомат трафаретного друку DEK 01 iX [15]

Третім у складі автоматичної лінії є з'єднувальний конвеєр СУА 460XL (рисунок 2.4).

Характеристики:

- регульована швидкість конвеєра: 0,5 – 20 м / хв.;
- ширина плат: 50 – 460 мм;
- довжина плат: 50 – 457 мм;
- товщина плат: 0,6 – 4,5 мм.



Рисунок 2.4 – З'єднувальний конвеєр [15]

Четвертим у складі автоматичної лінії є човниковий конвеєр NTM 910TVM 15000. Човниковий конвеєр використовується для транспортування друкованих плат з однієї лінії на дві або навпаки. Орієнтація при переміщенні не змінюється.

Характеристики:

- відстань переміщення 1500 мм;
- регулювання ширини конвеєра за допомогою рукоятки;
- управляється ПЛК;
- можливість вибору байпасного режиму;
- регульовані передні і задні положення упору;
- частотно-регульована швидкість переміщення;
- сертифікат CE;
- висота перенесення: 950 мм \pm 25 мм;
- напрямок потоку: зліва направо;
- машинний інтерфейс: SMEMA;
- концепція конвеєра: стрічка ESD;
- швидкість стрічки: 14 м / хв.;
- кромка друкованої плати: 3 мм;
- зазор між компонентами: верх 30 мм, низ 30 мм;
- час машинного циклу: \pm 18 секунд;
- модернізація сервоприводу для скорочення часу циклу;
- індивідуальне відстань переміщення (макс. 4000 мм);
- консольний вхідний або вихідний конвеєр (довжина 500 мм);
- довжина друкованої плати 80 мм - 457 мм;
- ширина друкованої плати 50 мм - 250 мм;
- розмір нерухомої рейки до переду (A) 234 мм;

Даний вид конвеєра зображено на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 – Човниковий конвеєр NTM 910TVM 15000 [15]

П'ятою складовою автоматичної лінії є автомат установки компонентів FUJI 4Mi3S. Автомати установки компонентів призначені для крупносерійного багатономенклатурного збирання електроніки, заснований на модульному нарощуванні. Компактний МЗ шириною 320 мм під 20 живильників оснащений індивідуальним дисплеєм для управління. Автомат універсальний – він і високопродуктивний, і функціональний завдяки широкому вибору настановних головок. Компактні і стандартні установчі модулі з різними установочними головками можуть використовуватися в будь-якій комбінації і в будь-якій кількості, що дозволяє гнучко варіювати виробничі потужності, виходячи з поточних потреб підприємства.

Автоматичне регулювання ширини конвеєра, автоматична зміна захоплень кожної головкою, можливість обслуговування автомата з одного боку і заміна моделей і настановних головок без зупинки виробництва дозволяють виробляти швидко переналагодження протягом декількох хвилин.

Платформа оснащена 4 змінними установочними головками, встановленими на двох порталних платформах, які дозволяють користувачеві перенастроювати машину, забезпечуючи справжню масштабованість для задоволення конкретних виробничих вимог. Блоки матричних лотків також можуть бути додані або

видалені за лічені секунди, що дозволяє машині адаптуватися до широкого спектру конфігурацій збірки. Заміна настановної головки дозволить переконфігурувати в точній відповідності виробничими потребами.

Характеристики:

- розмір друкованої плати (ДхШ): від 48 мм х 48 мм до 250 мм х 510 мм (подвійний конвеєр), від 48 мм х 48 мм до 250 мм х 610 мм (одинарний конвеєр);
- типи деталей: до 20 типів деталей (розраховується на 8-міліметрову стрічку);
- час завантаження друкованої плати: для подвійного конвеєра: 0 секунд (безперервна робота); для одиночного конвеєра: 2,5 секунди;
- точність розміщення: +/- 0,025 мм;
- продуктивність: 11 000 cph;
- виробнича потужність: H12HS: 22, 500 cph; H08: 10, 500 cph; H04: 6, 500 cph; H01: 4, 200 cph; G04: 6, 800 cph.

Фізичний вигляд автомата установки можна побачити на рисунку 2.6.



Рисунок 2.6 – Автомат установки компонентів FUJI 4Mi3S [15]

Наступною складовою автоматичної лінії є конвекційна лінійна піч для пайки оплавленням припойними пастами XPM 1030. Система оплавлення опалювальному з примусовою конвекцією і жорстким замкнутим циклом

управління процесом, створена для сучасних високопродуктивних середовищ збірки друкованих плат. Володіючи кращою теплопередачею в галузі, піч може працювати з будь-яким профілем при мінімально можливому заданому значенні, що зводить до мінімуму температурні відмінності по продукту і споживає менше енергії.

Характеристики:

- макс. ширина друкованої плати 450 мм;
- напрямок руху транспортного конвеєра: зліва направо;
- кількість вертикальних зон нагріву: 10;
- макс. робоча температура: 350 °С;
- кількість вертикальних зон охолодження: 3;
- інтерфейс SMEMA.

Реальний вигляд пристрою зображено на рисунку 2.7.



Рисунок 2.7 – Конвекційна лінійна піч XPM 1030 [15]

На рисунку 2.8 можна побачити відповідність кіберфізичного управління лінією з принциповою схемою виробничої лінії і з реальним виглядом управління виробничою лінією SMT монтажу.

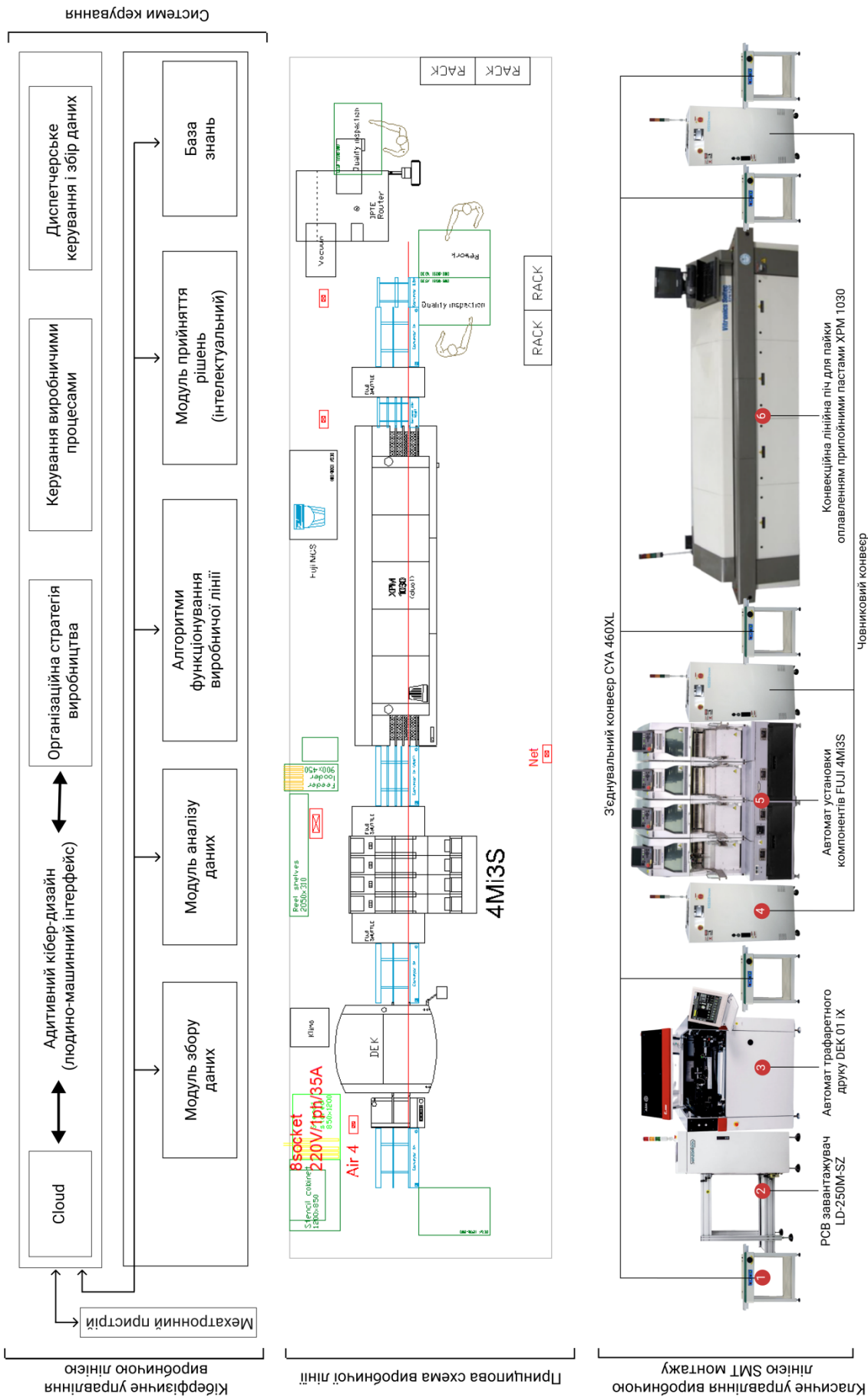


Рисунок 2.8 – Загальний вигляд модельованої системи

2.3 Розробка Q-схеми моделювання

Особливості моделювання автоматичної лінії розглянемо на прикладі використання як типових математичних схем систем масового обслуговування (Q-схем).

Системою масового обслуговування називається система, процес функціонування якої є, по суті, процесом обслуговування, який складається в наданні тієї чи іншої послуги, яка визначається з функціонального призначення системи. Об'єкт обслуговування в СМО називається вимогою або заявкою [19]. Загальноприйнята графічне представлення найпростішої СМО можна поглянути на рисунку 2.9.

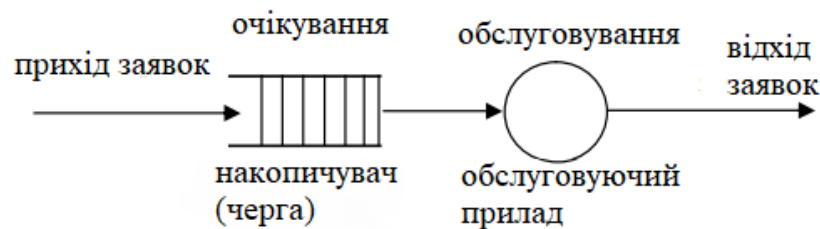


Рисунок 2.9 – Графічний вигляд найпростішої СМО

Процес функціонування СМО включає в загальному випадку наступні етапи:

- прихід (надходження) вимоги;
- очікування (при необхідності) в черзі;
- обслуговування в пристрої;
- догляд вимоги з системи.

Вивчення будь-якої системи, в тому числі і СМО, передбачає її формалізацію (опис), тобто визначення параметрів системи, необхідних і достатніх для аналізу характеристик її функціонування.

Для формалізації будь СМО необхідно описати:

- процес надходження заявок в систему;
- процес обслуговування заявок в системі;

– дисципліну обслуговування.

У загальному випадку моменти надходження заявок у систему S із зовнішнього середовища E утворюють вхідний потік, а моменти закінчення обслуговування утворюють вихідний потік обслужених заявок. Формалізуючи систему за допомогою Q -схеми, необхідно побудувати її структуру, використовуючи три основні типи елементів: D – джерела; H – накопичувачі; K – канали обслуговування заявок.

Q -схему можна вважати заданою, якщо визначені: потоки подій (вхідні потоки заявок і потоки обслуговування для кожного H і K); структура системи S (кількість фаз, кількість каналів обслуговування, кількість і ємність накопичувачів на кожній з фаз обслуговування заявок і зв'язки між D , H і K); алгоритми функціонування системи (дисципліни очікування заявок в H і вибору на обслуговування в K , правила виходу заявок із H і K).

Найпростіша одноканальна СМО складається з: джерела D , яке генерує потік заявок, що потребують обслуговування; накопичувача H необмеженої ємності, в якому заявки чекають на обслуговування; каналу K , що обслуговує заявки. Обслуговування заявок відбувається в порядку їх надходження [20].

Q -схема, що описує процес функціонування технологічної ланки будь-якої складності, однозначно задається у виді:

$$Q = \langle W, U, H, Z, R, A \rangle, \quad (2.3)$$

де W – потік вимог;

U – потік обслуговувань;

H – множина внутрішніх параметрів;

Z – множина станів елементів;

R – взаємозв'язок елементів схеми;

A – алгоритми функціонування.

Проаналізувавши вище сказане необхідно скласти послідовність дій алгоритму моделювання для розробки Q-схеми.

Розглянемо алгоритм по кроках. Перед початком проведення моделювання ДП необхідно встановити основні параметри. Далі відбувається генерація заготовок. Генерація відбувається згідно з рівномірним законом розподілу.

Спочатку заготовка потрапляє до черги (H_1) перед етапом друку трафарету (K_1) та якщо черги не має – потрапляє до цієї операції. Якщо черга присутня – заготовка чекає поки всі попередні заготовки покинуть чергу та лише тоді вона потрапить до цієї операції.

Після опрацювання заготовки на етапі друку трафарету заготовка потрапляє до черги (H_2) перед етапом сортування заготовок (K_2) та якщо черги не має – потрапляє до цієї операції та виконується. Якщо черга присутня – заготовка чекає поки всі попередні заготовки покинуть чергу та лише тоді вона потрапить до цієї операції.

Далі заготовка, якщо попередні етапи пройшли успішно, відправляється в чергу (H_3) перед етапом установки компонентів (K_3) та якщо черги не має – потрапляє до цієї операції та виконується. Якщо черга присутня – заготовка чекає поки всі попередні заготовки покинуть чергу та лише тоді вона потрапить до цієї операції. А якщо ж попередні етапи пройшли з якимось дефектами, відправляється до черги (H_1) перед етапом друку трафарету та якщо черги не має – потрапляє до цієї операції та виконується. Якщо черга присутня – заготовка чекає поки всі попередні заготовки покинуть чергу та лише тоді вона потрапить до цієї операції.

Після опрацювання заготовки на етапі установки компонентів (K_3) заготовка потрапляє до черги (H_4) перед етапом сортування (K_4) та якщо черги не має – потрапляє до цієї операції та виконується. Якщо черга присутня – заготовка чекає поки всі попередні заготовки покинуть чергу та лише тоді вона потрапить до цієї операції. Якщо сортування пройшло успішно, вона потрапляє у чергу (H_5) перед операцією нанесення паяльної пасти (K_5), якщо ж ні, то повертається назад до черги (H_3) перед операцією установки компонентів (K_3).

Після цього заготівка потрапляє до черги (H_6) перед етапом сортування заготовок (K_6) та якщо черги не має – потрапляє до цієї операції та виконується. Якщо черга присутня – заготівка чекає поки всі попередні заготівки покинуть чергу та лише тоді вона потрапить до цієї операції.

Далі заготівка, якщо попередні етапи пройшли успішно заготівка завершує свою збірку та покидає технологічний процес. А якщо ж попередні етапи пройшли з якимось дефектами, відправляється до черги (H_5) перед етапом нанесення паяльної пасти (K_3) та якщо черги не має – потрапляє до цієї операції та виконується. Якщо черга присутня – заготівка чекає поки всі попередні заготівки покинуть чергу та лише тоді вона потрапить до цієї операції.

Після завершення моделювання результати обробляються та видаються користувачу на аналіз.

Задамо необхідні вихідні дані для імітаційного моделювання ТП виготовлення МЕМС акселерометрів:

- t_1 – час, для виконання етапу друку трафарету;
- t_2 – час, для виконання етапу контролю та сортування заготовок;
- t_3 – час, для виконання етапу установки необхідних компонентів;
- t_4 – час, для виконання етапу контролю та сортування заготовок;
- t_5 – час, для виконання етапу нанесення паяльної пасти;
- t_6 – час, для виконання етапу контролю та сортування заготовок.

Q-схема технологічного процесу виготовлення ДП зображена на рис. 2.10.

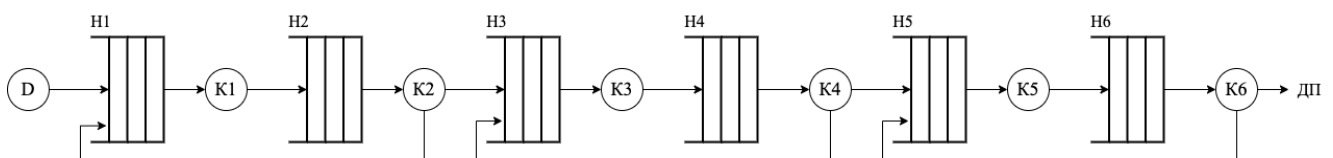


Рисунок 2.10 – Q-схема ТП виготовлення ДП

2.4 Розрахунок кількості прогонів для отримання необхідної точності

З метою забезпечення статистичної стабільності результатів статистичного моделювання відповідні оцінки розраховуються на основі великої кількості реалізацій N .

Приймається як оцінка розрахункового параметра a , що визначається за результатами статистичного моделювання $x_i, i = \overline{1, N}$, обрана величина \bar{x} .

Похибка (точність) оцінки визначається співвідношенням: $e = |a - \bar{x}|$.

Ймовірність α того, що похибка ε не перевищує заздалегідь визначеного значення ε^* , називається надійністю оцінки

$$P[|b - x| \leq \varepsilon^*] = \alpha. \quad (2.2)$$

При моделюванні необхідно встановити зв'язок між точністю, надійністю результатів і кількістю реалізацій алгоритму моделювання N , за допомогою яких вони визначаються.

Припустимо, що метою статистичного експерименту є модель M_M автоматичної виробничої лінії як системи S є визначення оцінки \bar{p} ймовірність події $p = p(A)$ (наприклад, того, що човниковий конвеєр для збереження та пере направлення деталей буде переповнено). Використовуємо частоту події як оцінку ймовірності $\bar{p} = n/N$ (де n – кількість випадків настання події A). У цьому випадку похибка оцінки

$$\varepsilon = t_\alpha \sqrt{\left(\frac{p(1-p)}{N}\right)}, \quad (2.3)$$

де t_α – табличний коефіцієнт (квантиль нормального розподілу ймовірностей).

За формулою (2.3) визначаємо кількість експериментів (реалізацій

алгоритму моделювання), необхідних для отримання оцінки \bar{a} з похибкою не більшою за ε і надійність α

$$N = \frac{t_{\alpha}^2 p(1-p)}{\varepsilon^2}. \quad (2.4)$$

При визначенні оцінки математичного очікування (наприклад, час виготовлення, заповнення накопичувачів перед пристроями тощо) ми використовуємо середнє арифметичне $x = \left(\frac{1}{N}\right) \sum x_i$.

Відповідні формули (2.3) і (2.4) для оцінки похибки та необхідної кількості спроб мають вигляд

$$\varepsilon = t_{\alpha} \sigma / \sqrt{N}, \quad (2.5)$$

$$N = t_{\alpha}^2 \sigma^2 / \varepsilon^2, \quad (2.6)$$

де ε – похибка оцінки;

t_{α} – табличний коефіцієнт, що відповідає необхідній достовірності результатів α (для $\alpha = 0,95$, $t_{\alpha} = 1,96$);

σ – середньоквадратичне відхилення оцінки \bar{x} ;

N – кількість реалізацій моделі.

При оцінці результатів статистичного моделювання роботи виробничого об'єкта та ймовірностей \bar{p} , і математичного очікування \bar{x} , необхідно використовувати обидві пари формул (2.3) – (2.4) і (2.5) – (2.6) та вибрати реалізації більшої кількості отриманих значень для необхідної кількості експериментів (реалізації алгоритму моделювання) [20].

2.5 Висновки до 2 розділу

В ході виконання даного розділу обрано фактичну виробничу автоматизовану лінію SMT-монтажу, завдяки якій розроблено схему співвідношення реального виду лінії з її кіберфізичним керуванням. Виконано підбір відповідного обладнання. Описано процес функціонування лінії у вигляді набору параметрів.

Це дозволило провести аналіз роботи лінії крок за кроком та виділити основні етапи ТП їх призначення і взаємозв'язки між ними. Схема відображає принцип моделювання ТП в найзагальнішому вигляді.

На її основі запланована розробка програмного забезпечення, для якої було розроблено моделювальний алгоритм ТП та подано технологічний процес вигляді Q-схеми.

3 РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Розробка алгоритму роботи програми

Для того щоб створити імітаційну модель автоматичної виробничої лінії для виготовлення ДП, спочатку потрібно створити Q-схему (рисунок 2.3). Потім програмний код записується за цією Q-схемою. Щоб написати цей програмний код, потрібно вибрати середовище та мову програмування. Мова програмування повинна спеціалізуватися на створенні моделей. Як згадувалося в розділі 1.4, мова GPSS є найпопулярнішою мовою програмування сьогодні, яка зосереджена на побудові саме імітаційних моделей [21].

Черги, які заявка (транзакт) повинен відстояти, коли пристрій обробки зайнятий, відіграють важливу роль у розробці програми. Черга – це група запитів, що очікують на розгляд. Для того, щоб додати черги в програму, потрібно побачити на рисунку, де саме потрібне існування черг. Цей рисунок точно відповідає Q-схемі. Транзакти надходять на пристрій обслуговування в певний час, чекають, поки настане їхня черга (за потреби), вони обслуговуються за принципами «першим прийшов, першим обслужений», «останнім прийшов, першим обслужений» або «випадковий вибір» і після цього вони йдуть.

Вбудована Q-схема має загалом шість черг. Кожна з цих черг розташована після кожного пристрою та кожного модуля. Транзакт, що вийшов на конвеєр, повинен відстояти чергу, якщо обслуговуючий пристрій зайнято іншим транзактом. Таких черг на шляху транзактів може бути стільки, скільки обслуговуючих пристроїв на шляху. У деяких транзактів та збірок, з певного моменту руху по конвеєру, з'являється перевірка якості. Це означає, що якщо все успішно, транзакт може переходити далі до наступного кроку, якщо ж ні, то він повертається у чергу, де роблять попередні кроки знов. Завдяки наочності схеми збірки, можна побачити створення будь-якого об'єкту з найменших деталей до

завершеного його вигляду.

Машинна програма інтерпретує модель, написану на мові GPSS, надаючи тим самим користувачеві можливість проведення експериментів з цією моделлю. Загалом, програмування на мові GPSS відбувається за допомогою операторів та їх параметрів. Оператори в GPSS записуються з першої позиції та у вільному форматі, тобто, відділені поля розміщуються з будь-якою кількістю відступів. Кожний оператор GPSS відноситься до одного з чотирьох типів:

- оператори блоки;
- оператори опису об'єкту;
- оператори управління;
- оператори команди.

Оператори блоки формують логіку функціонування моделі. GPSS має приблизно п'ятдесят різних видів блоків, кожний з котрих виконує свою конкретну функцію.

Оператори опису об'єкту слугують для визначення параметрів деяких об'єктів. Прикладами параметрів об'єкту можуть бути кількість каналів у багатоканальному приладі, кількість строк у матриці та інші.

Оператори управління слугують для контролю та управління процесів модулювання (прогонки моделі).

Оператори команди дають змогу управляти роботою інтегрування середі GPSS. Оператори команди та оператори управління загалом не входять в основну програму, а вводяться з клавіатури у процесі прогонки моделі.

До коду були внесені наступні оператори блоки:

а) GENERATE – блок, який створює транзакти через певні інтервали часу. GENERATE має шість параметрів : A, B, C, D, E, та F. Визначення параметрів блоку GENERATE:

- 1) параметр A – це середній інтервал часу між появами транзактів;
- 2) параметр B – це число в якому рівномірно розподілено значення інтервалу між появами транзактів $[A-B, A + B]$, цей параметр також може виступати в якості функції, але у цьому випадку, для визначення інтервалу,

значення A помножується на значення функції;

3) параметр C – це момент часу появи першого транзакта;

4) параметр D – це гранична максимальна кількість транзактів, які зможуть зайти до моделі через даний блок;

5) параметр E – це величина пріоритету транзакта. Число пріоритетів безмежно, найнижчий – E нульове, чим вище значення E , тим вище пріоритетність. Якщо операнд E не заданий, то транзакти мають нульовий пріоритет;

б) параметр F – це число параметрів у транзакта та їх тип (PB – байтовий цілий, PH – полусловний цілий, PF – повнословний цілий, PL – з плаваючою комою).

б) **TERMINATE** – блок, який знищує транзакти з моделі та зменшує значення лічильника завершення на A одиниць. **TERMINATE** має лише один параметр – A . Операнд A задає число, яке віднімається від вмісту спеціального лічильника – лічильника завершення, кожного разу, коли транзакт входить у даний блок;

в) **ADVANCE** – блок, який задержує транзакти на певний часовий проміжок та планує час початку наступного етапу обробки. **ADVANCE** має два параметри A та B . Операнд A – це середній інтервал часу затримки транзакта у даному операторі. Операнд B – це число в якому рівномірно розподілено значення інтервалу між затримками транзактів $[A-B, A + B]$, цей параметр також може виступати в якості функції, але у цьому випадку, для визначення інтервалу, значення A помножується на значення функції;

г) **SEIZE** – це блок, який виконує функцію затримки транзакта на певний період часу, який указаний у блоці **ADVANCE**. **SEIZE** має один параметр – A , якщо прилад з ім'ям A вільний, то транзакт займає його (переводить у стан "зайнято"), якщо немає, то транзакт ставиться в чергу до нього. Іменем приладу може бути числовий номер або послідовність від 3 до 5 символів;

г) **RELEASE** – це блок, який виконує функцію випуску транзакта у певний період часу, який указаний у блоці **ADVANCE**. **RELEASE** має один параметр – A .

Транзакт звільняє прилад з ім'ям А, тобто переводить його у стан "вільно";

д) QUEUE – це блок, котрий створює черги та збирає статистику про вхід транзакта до черги з ім'ям А. Блок QUEUE має лише один параметр – А;

е) DEPART – це блок, котрий збирає статистику про вихід транзакта з черги з ім'ям А. Блок DEPART має лише один параметр – А;

є) TRANSFER – блок для зміни напрямку переміщення транзактів. Безвідмовний блок TRANSFER може направити транзакти, що входять до нього, в блоки, відмінні від наступного. Блок має дев'ять операторів, з яких тут розглядаються тільки три, що використовувалися в роботі: А, В, С. Визначення параметрів:

1) А – ймовірність того, що транзакт повернеться до попереднього кроку через виявлення бракованого виробу;

2) В – мітка попереднього кроку, куди перейде транзакт з ймовірністю А, якщо не пройде перевірку;

3) С – мітка наступного кроку, куди перейде транзакт, якщо пройде перевірку;

ж) START – це блок, котрий починає роботу моделювання з указаної одиниці часу А. Блок START має лише один параметр – А.

З цього всього переліку у моделюванні даного завдання використовується всього два параметра А та В, бо інші параметри не входять в умову завдання та в даному випадку їх функції не потрібні.

Усі ці блоки, оператори та їх параметри потрібні для того, щоб створити задану модель, промоделювати її та оцінити вихідні параметри. Інформація вихідних параметрів включає статистичні дані по кожному з елементів, які використовуються в моделі, тобто по кожному з приладів, черг та інших [22].

3.2 Створення імітаційної моделі на базі GPSS

Для того, щоб алгоритмізувати модель, необхідно використовувати різні елементи, які складають модель, розглянуті в розділі 3.1. Останнім кроком є об'єднання цих елементів в єдиний загальний вигляд. Усю логічну схему моделі можна показати у вигляді блок-схеми.

Блок-схема – це ілюстрація алгоритму розв'язання або аналізу задачі з використанням геометричних елементів (блоків), що позначають операції, потік, дані тощо. Блок вхідних і вихідних даних позначається паралелограмом, блок обчислень (обробки) даних – прямокутником, блок прийняття рішення – ромбом, еліпс – початком і кінцем алгоритму [23]. Компоненти, використані для створення блок-схеми, показані на рисунку 3.1.

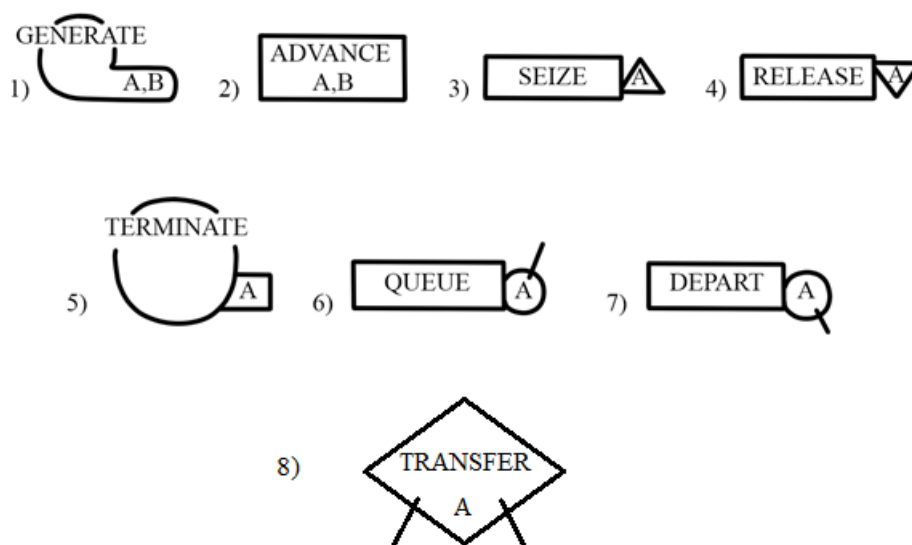


Рисунок 3.1 – Загальний вигляд необхідних для моделювання блоків

Блок-схема, яка ілюструє процес від початку генерування транзактів до виготовлення фінального виробу, що відповідає структурі Q-схеми зображена на рисунку 3.2.

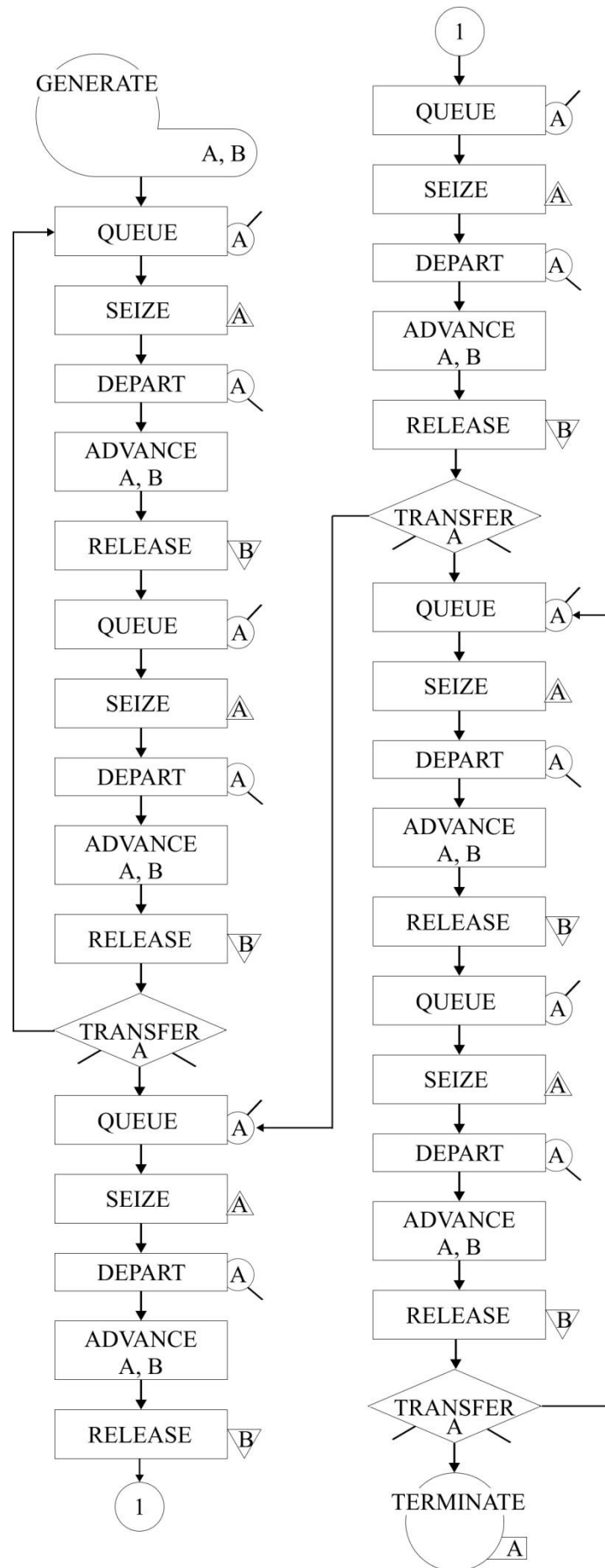


Рисунок 3.2 – Блок-схема роботи автоматичної лінії

Для моделювання процесу необхідно обрати дані часу кожного процесу, максимально наближенні до реальних:

- $t_1 = 11 \pm 3$ с – час, для виконання етапу друку трафарету;
- $t_2 = 18 \pm 1$ с – час, для виконання етапу контролю та сортування заготовок;
- $t_3 = 18 \pm 2,5$ с – час, для виконання етапу установки необхідних компонентів;
- $t_4 = 18 \pm 1$ с – час, для виконання етапу контролю та сортування заготовок;
- $t_5 = 250 \pm 5$ с – час, для виконання етапу нанесення паяльної пасти (попереднє нагрівання, підтримка температури, паяння);
- $t_6 = 18 \pm 1$ с – час, для виконання етапу контролю та сортування заготовок.

То ж, знаючи необхідний час і команди, можна приступити до написання коду програми.

Спершу, відобразимо роботу першого модуля – черги і виконання операцій.

Генеруємо наш потік заявок (транзактів) і обираємо час для цього. Далі наша заготовка займає чергу НК1, для того щоб перейти до каналу обслуговування К1. Після того як заготовка займає канал обслуговування К1 – друг трафарету (розділ 2.3), вона звільняє чергу НК1. Потім транзакт обслуговується, з середнім часом 11 с. та розкидом у 3 с. відносно середнього часу на виконання та після чого покидає канал обслуговування К1. Частина даної програми зображена на рисунку 3.3.

```
generate 10,5;
queue НК1;
seize К1;
depart НК1;
advance 11,3;
release К1;
```

Рисунок 3.3 – Генерація транзактів і виконання першого етапу моделювання

Якщо дивитися на Q-схему, зображену на рисунку 2.3, можна побачити, що є операції фільтрування, які дозволяють відсортувати браковані заготовки і переробити їх. Для цього необхідно використовувати деякі команди.

Візьмемо за приклад чергу НК2. Транзакт займає її, для того щоб перейти до каналу обслуговування К2. Після того, як транзакт попадає туди, він звільняє чергу і обслуговується. Далі йде перевірка і ймовірність того, що дана заготовка пройде контроль та перейде на наступну мітку BLL дорівнює 0.9, відповідно, що вона не пройде дорівнює 0.1 і повернеться назад на мітку DLL. Частина даної програми зображена на рисунку 3.4.

```

DLL      queue НК1;
         seize К1;
         depart НК1;
         advance 11,3;
         release К1;
         queue НК2;
         seize К2;
         depart НК2;
         advance 18,1;
         release К2;
         transfer 0.9,DLL,BLL;
BLL      queue НК3;

```

Рисунок 3.4 – Моделювання контролю якості

Кінцевий етап – робота таймера. Генерація на протязі 3600 с. Код відповідний за роботу даного етапу зображено на рисунку 3.5.

```

;timer
         generate 3600;
         terminate 1;
         start 1;

```

Рисунок 3.5 – Відображення роботи таймера

Після завершення операції моделювання автоматичної виробничої лінії, у блоці Window/Simulation Window/Blocks Window пакета програм імітаційного моделювання GPSS World згенеровано блок-діаграму, представлену на рисунку 3.6.






































	1 GEN	GENERATE	0	351	0	2	0
	DLL	QUEUE	47	374	0	3	0
	3 SEI	SEIZE	0	327	0	4	0
	4 DEP	DEPART	0	327	0	5	0
	5 ADV	ADVANCE	1	327	0	6	0
	6 REL	RELEASE	0	326	0	7	0
	7 QUE	QUEUE	127	326	0	8	0
	8 SEI	SEIZE	0	199	0	9	0
	9 DEP	DEPART	0	199	0	10	0
	10 ADV	ADVANCE	1	199	0	11	0
	11 REL	RELEASE	0	198	0	12	0
	12 TRA	TRANSFER	0	198	0	13	0
	BLL	QUEUE	3	196	0	14	0
	14 SEI	SEIZE	0	193	0	15	0
	15 DEP	DEPART	0	193	0	16	0
	16 ADV	ADVANCE	1	193	0	17	0
	17 REL	RELEASE	0	192	0	18	0
	18 QUE	QUEUE	0	192	0	19	0
	19 SEI	SEIZE	0	192	0	20	0
	20 DEP	DEPART	0	192	0	21	0
	21 ADV	ADVANCE	1	192	0	22	0
	22 REL	RELEASE	0	191	0	23	0
	23 TRA	TRANSFER	0	191	0	24	0
	CLL	QUEUE	158	173	0	25	0
	25 SEI	SEIZE	0	15	0	26	0
	26 DEP	DEPART	0	15	0	27	0
	27 ADV	ADVANCE	1	15	0	28	0
	28 REL	RELEASE	0	14	0	29	0
	29 QUE	QUEUE	0	14	0	30	0
	30 SEI	SEIZE	0	14	0	31	0
	31 DEP	DEPART	0	14	0	32	0
	32 ADV	ADVANCE	0	14	0	33	0
	33 REL	RELEASE	0	14	0	34	0
	34 TRA	TRANSFER	0	14	0	35	0
	35 TER	TERMINATE	0	11	0	36	0
	36 GEN	GENERATE	0	1	0	38	0
	37 TER	TERMINATE	0	1	0	39	0

Рисунок 3.6 – Блок-діаграма алгоритму імітаційного моделювання

Ця програма імітаційного моделювання виробничої лінії дозволяє отримати певні характеристики для оцінки, а саме: час етапу моделювання, коефіцієнт завантаження каналу (обладнання) на кожному етапі, довжину черги, час транзактів в черзі перед кожним етапом. Після моделювання автоматичної виробничої лінії ДП надається звіт, який представлений на рисунках 3.7 – 3.9.

START TIME	END TIME	BLOCKS	FACILITIES	STORAGES
0.000	3600.000	37	6	0

NAME	VALUE
BLL	13.000
CLL	24.000
DLL	2.000
HK1	10000.000
HK2	10002.000
HK3	10004.000
HK4	10006.000
HK5	10008.000
HK6	10010.000
K1	10001.000
K2	10003.000
K3	10005.000
K4	10007.000
K5	10009.000
K6	10011.000

Рисунок 3.7 – Перша частина результату роботи програми

LABEL	LOC	BLOCK TYPE	ENTRY COUNT	CURRENT COUNT	RETRY
	1	GENERATE	351	0	0
DLL	2	QUEUE	374	47	0
	3	SEIZE	327	0	0
	4	DEPART	327	0	0
	5	ADVANCE	327	1	0
	6	RELEASE	326	0	0
	7	QUEUE	326	127	0
	8	SEIZE	199	0	0
	9	DEPART	199	0	0
	10	ADVANCE	199	1	0
	11	RELEASE	198	0	0
	12	TRANSFER	198	0	0
BLL	13	QUEUE	196	3	0
	14	SEIZE	193	0	0
	15	DEPART	193	0	0
	16	ADVANCE	193	1	0
	17	RELEASE	192	0	0
	18	QUEUE	192	0	0
	19	SEIZE	192	0	0
	20	DEPART	192	0	0
	21	ADVANCE	192	1	0
	22	RELEASE	191	0	0
	23	TRANSFER	191	0	0
CLL	24	QUEUE	173	158	0
	25	SEIZE	15	0	0
	26	DEPART	15	0	0
	27	ADVANCE	15	1	0
	28	RELEASE	14	0	0
	29	QUEUE	14	0	0
	30	SEIZE	14	0	0
	31	DEPART	14	0	0
	32	ADVANCE	14	0	0
	33	RELEASE	14	0	0
	34	TRANSFER	14	0	0
	35	TERMINATE	11	0	0
	36	GENERATE	1	0	0
	37	TERMINATE	1	0	0

Рисунок 3.8 – Друга частина результату роботи програми

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME	AVAIL.	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
K1	327	0.996	10.968	1	307	0	0	0	47
K2	199	0.993	17.956	1	185	0	0	0	127
K3	193	0.961	17.928	1	181	0	0	0	3
K4	192	0.957	17.945	1	180	0	0	0	0
K5	15	0.978	234.732	1	16	0	0	0	158
K6	14	0.071	18.233	1	0	0	0	0	0

QUEUE	MAX	CONT.	ENTRY	ENTRY (0)	AVE. CONT.	AVE. TIME	AVE. (-0)	RETRY
HK1	47	47	374	1	23.470	225.919	226.524	0
HK2	127	127	326	1	63.505	701.286	703.444	0
HK3	4	3	196	17	1.524	28.000	30.659	0
HK4	1	0	192	43	0.227	4.250	5.477	0
HK5	158	158	173	1	75.578	1572.724	1581.868	0
HK6	1	0	14	14	0.000	0.000	0.000	0

FEC	XN	PRI	BDT	ASSEM	CURRENT	NEXT	PARAMETER	VALUE
307	0		3604.539	307	5	6		
353	0		3611.213	353	0	1		
185	0		3611.314	185	10	11		
180	0		3614.283	180	21	22		
181	0		3615.043	181	16	17		
16	0		3822.041	16	27	28		
354	0		7200.000	354	0	36		

Рисунок 3.9 – Третя частина результату роботи програми

Пояснимо значення окремих стовпців у звіті (рис. 3.7 – 3.9), які знадобляться в наступних розділах для математичних розрахунків.

У стандартний звіт включаються такі основні показники:

- час моделювання системи – *END TIME*;
- кількість обслуговуваних заявок у каналі – *ENTRIES*;
- коефіцієнт використання каналу – *UTIL*;
- середній час обслуговування заявки в каналі – *AVE. TIME*;
- максимальна довжина черги – *MAX*;
- середня довжина черги – *AVE. CONT*;
- середній час перебування заявки в черзі – *AVE. TIME*.

3.3 Аналіз отриманих результатів дослідження

Проводиться машинний експеримент з моделлю досліджуваної та конструйованої системи з метою отримання інформації про характеристики експлуатаційного потоку цього об'єкта. Цю інформацію можна отримати як для аналізу характеристичних кривих, так і для їх оптимізації за заданих граничних умов, тобто для синтезу структури, алгоритмів і параметрів системи. Залежно від мети моделювання автоматичної лінії існують різні підходи до організації імітаційного експерименту. Основне завдання таких експериментів — отримати необхідну інформацію про досліджувану систему з обмеженими ресурсами (машинним часом, пам'яттю тощо). Що до приватних завдань, які вирішуються при плануванні машинних випробувань, належать завдання скорочення машинного часу, необхідного для моделювання, підвищення точності та надійності результатів моделювання, перевірка адекватності моделі тощо [25].

Щоб визначити математичне очікування коефіцієнта навантаження каналу, дисперсію коефіцієнта навантаження каналу та оцінити точність результатів моделювання, необхідно виконати кілька запусків моделі. Припустимо початкову кількість ітерацій моделі $N = 10$ разів.

Математичне очікування коефіцієнта завантаження лінії розраховується по формулі (3.1):

$$\bar{k} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i, \quad (3.1)$$

де k_i – коефіцієнт завантаження лінії на i -тій реалізації алгоритму.

Математичне сподівання частоти підключення ресурсів в лінії обчислюється за формулою (3.2):

$$\bar{n} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i, \quad (3.2)$$

де n_i – максимальна довжина черги на i -тій реалізації алгоритму.

Дисперсію коефіцієнта навантаження каналів розраховується по формулі (3.2):

$$D(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{k} - k_i)^2. \quad (3.3)$$

Дисперсію середньої кількості транзактів у черзі обчислимо за формулою (3.3):

$$D(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{n} - n_i)^2. \quad (3.4)$$

Для всіх значень дисперсії середнє квадратичне відхилення обчислимо за формулою (3.4):

$$\sigma = \sqrt{D_k}. \quad (3.5)$$

Підставимо до формули (3.1) відповідні значення з результатів моделювання зображених на рисунку 3.7:

$$\bar{k} = \frac{1}{10} \cdot 8261 \approx 0,826.$$

Підставимо до формули (3.2) відповідні значення з результатів моделювання зображених на рисунку 3.7:

$$\bar{n} = \frac{1}{10} \cdot 566 \approx 5,6792.$$

Підставимо до формули (3.3) відповідні значення:

$$D(k) = \frac{1}{10} \cdot 0,013758 \approx 0,001376.$$

Підставимо до формули (3.4) відповідні значення:

$$D(n) = \frac{1}{10} \cdot 0,08974 \approx 0,008974.$$

Підставимо до формули (3.5) попередньо знайдене значення:

$$\sigma = \sqrt{D_k} \approx 0,037094.$$

Знайдені значення допоможуть знайти необхідні параметри, які були згадані в підрозділі 2.4. Отже, підставивши в формулу 2.5 необхідні коефіцієнти, знайдемо точність оцінки математичного очікування:

$$\varepsilon = \frac{1,96 \cdot 0,037}{\sqrt{10}} = 0,02293.$$

Так похибка коефіцієнта завантаження виробничої лінії менша, ніж допустима величина ($\varepsilon = 0,5$).

Для визначення кількості реалізацій, які потрібно провести для того, щоб отримати задовільну похибку, скористаємося формулою (2.6). Результат обчислення числа прогонів моделі:

$$N = \frac{1,96^2 \cdot 0,037^2}{0,023^2} = 9,9.$$

Також обчислимо похибку оцінки ймовірності настання подій для всіх

етапів контролю. Похибка оцінки ймовірності обчислюється за формулою (3.4):

$$\varepsilon_i = t_p \sqrt{\frac{p_i(1-p_i)}{N}}, \quad (3.6)$$

де t_p – табличний коефіцієнт, що відповідає заданій достовірності результатів. Для достовірності 0,95 значення коефіцієнта $t_p = 1,96$.

Підставимо до формули (3.6) відповідні значення для етапу перевірки якості після етапу нанесення трафарету на заготовки ДП, де ймовірність переходу до етапу установки компонентів на ДП складає 0,9:

$$\varepsilon_1 = 1,96 \sqrt{\frac{0,9(1-0,9)}{10}} = 0,186.$$

Так як подальші перевірки мають таку ж саму ймовірність = 0,9, зазначимо, що похибка оцінки ймовірності наростання подій для контролю після установки компонентів і після оплавлення ДП мають таке ж саме значення = 0,186.

Це також менше за допустиму величину коефіцієнту похибки ($\varepsilon = 0,5$).

3.4 Питання охорони праці та безпеки життєдіяльності

Офісний працівник зобов'язаний дотримуватися правил внутрішнього трудового розпорядку та графіків роботи, які передбачають: час початку та закінчення роботи (зміни), перерви на відпочинок та харчування, порядок днів відпочинку, чергування та інші питання робочого часу.

Офісний працівник зобов'язаний користуватися функціональними вимикачами, розетками, вилками, патронами та іншим електрообладнанням; не залишати увімкнені прилади та електроприлади без нагляду, вимикати електроосвітлення (крім аварійних) після закінчення роботи; палити тільки у спеціально відведених і обладнаних місцях; при використанні під час роботи

легкозаймистих і горючих матеріалів прибирати їх у вогнетривке місце, не залишати в приміщенні після роботи будь-які використані миючі засоби; дотримуватись чинних протипожежних правил.

У разі порушення (невиконання) вимог нормативно-правових актів з охорони праці службовець притягується до дисциплінарної, а у відповідних випадках і до матеріальної та кримінальної відповідальності в порядку, встановленому законодавством, локальними нормативними актами.

На робочому місці службовець проходить початковий інструктаж з техніки безпеки та проходить стажування, навчальні курси з монтажу та експлуатації використовуваних приладів, перевірку знань з електробезпеки (з приладами, що працюють від мережі), теоретичних знань та набутих знань з безпечних методів праці.

Під час роботи офісний працівник проходить інструктаж з охорони праці – раз на півроку.

Охорона праці має такі положення. Після проходження інструкції з електробезпеки, I-група з електробезпеки присуджується особам, які не мають спеціальної електротехнічної підготовки, але мають базові уявлення про небезпеку електричного струму та заходи безпеки. Особи I групи повинні бути ознайомлені з правилами надання першої допомоги потерпілим від ураження електричним струмом.

Електричний струм, що протікає через тіло людини, може впливати на частини тіла у вигляді опіків і металізації шкіри або нервової системи і м'язів, що може призвести до м'язових спазмів, дихальної недостатності, фібриляції (хаотичного посмикування серцевого м'яза) і зупинки серця, яка, у свою чергу, може призвести до летального результату.

Дія електричного струму на різних людей залежить від ряду умов. Таким чином, опірність організму людини значно знижується при роботі в умовах підвищеної вологості та високої температури (вище +30°C), коли людина потіє, коли шкіра та одяг забруднені чи зволожені пилом, коли людина перебуває в втомленому, більш збудженому, дратівливому, нетверезому стані. Особливо

небезпечно потрапляти під напругу людям, які страждають на нервові та серцеві захворювання, оскільки вони мають дуже низький опір електричному струму.

Розрахований опір людини електричному струму приймається рівним 1000 Ом. Змінний струм силою не більше 0,05 А. Струм силою більше 0,05 А - 0,1 А небезпечний і може призвести до летального результату. Безпечною напругою для людини є напруга до 42 В в нормальних умовах і до 12 В в умовах підвищеної небезпеки (вологість, висока температура, металева підлога тощо).

Промислові системи поділяються на три категорії за умовами ураження електричним струмом: особливо небезпечні, небезпечні та не ризиковані. Приміщення є особливо небезпечними і характеризуються одночасною наявністю двох і більше ознак: високої вологості, високої температури (вище 30 °С), електропровідного пилю, струмопровідних підлог, стін тощо.

Приміщення підвищеної небезпеки характеризуються однією з ознак, зазначених вище. Ці ознаки відсутні в приміщеннях, де немає підвищеного ризику.

Ураження електричним струмом можливе для людини в наступних випадках:

- якщо людина торкнулася до струмоведучих споруд або провідника електричного струму і стоїть на підлозі або струмопровідній конструкції;
- якщо людина торкнулася одночасно руками або іншими частинами тіла двох електричних провідників, незалежно від того, чи знаходяться вони на струмопровідній конструкції. Дотик до струмоведучих частин призводить до спазматичного скорочення м'язів, внаслідок чого пальці потерпілого, що тримає дрот руками, можуть бути настільки стиснуті, що вивільнити дрот з рук стає неможливим.

Усі електроприлади та електроприймачі, металеві корпуси вимикачів і розподільних пунктів, коробки повинні мати надійне захисне заземлення.

Струмопровідні частини електрообладнання, автоматичні вимикачі, розподільні щити повинні мати надійні кожухи та двері без відкритих отворів, зазорів і поблизу запірною пристрою.

Усім працівникам категорично забороняється замінювати перегорілі електричні лампи, плавкі вставки та інші елементи електропроводки та обладнання, а також намагатися самостійно усунути несправності в електроприймачах.

Вимоги до умов праці мають таке значення. Джерела світла, такі як лампи та вікна, значно погіршують точність відображення та призводять до фізіологічних перешкод, які можуть проявлятися у значному стресі, особливо при тривалій роботі. Відображення, включаючи відбиття від вторинних джерел світла, слід звести до мінімуму.

Для захисту від надмірної яскравості вікна можна використовувати штори та ширми.

У кімнатах, де розташований комп'ютер, необхідно вказати такі значення коефіцієнта відбиття: для стелі: 60 % – 70 %, для стін: 40 % – 50 %, для підлоги: близько 30 %. Для інших поверхонь і робочих меблів: 30 % – 40 %.

Правильно спроектоване та виконане промислове освітлення покращує зорові умови праці, знижує втому, підвищує ефективність праці, позитивно впливає на робоче середовище та психологічний вплив на працівника, покращує працездатність та зменшує травматизм. При недостатньому освітленні це призводить до перенапруження очей, послаблює пильність, призводить до передчасної втоми. Занадто яскраве освітлення викликає дискомфорт в очах. Неправильний напрямок світла на робочому місці може призвести до різких тіней, відблисків і дезорієнтації. Всі ці причини можуть призвести до нещасного випадку або захворювання, тому важливо правильно розрахувати освітленість.

При виконанні робіт категорії високої зорової точності значення коефіцієнта природної освітленості повинно бути не менше 1,5 %, а при виконанні зорових робіт середньої точності – не менше 1,0 %. Як штучні джерела світла зазвичай використовуються люмінесцентні лампи, які попарно об'єднуються, утворюючи лампи, які повинні бути розміщені рівномірно по робочій поверхні.

Вимоги до освітлення приміщень, де встановлені комп'ютери, враховують,

що при високоточній візуальній роботі загальна освітленість повинна становити 300 лк, а комбінована – 750 лк; Подібні вимоги для робіт середньої точності - 200 лк і 300 лк відповідно.

Крім того, все поле зору має бути освітлено досить рівномірно – це основна вимога. Іншими словами, ступінь освітленості кімнати і яскравість екрану повинні бути приблизно однаковими, оскільки яскраве світло в периферійній зоні огляду значно збільшує навантаження на очі і, як наслідок, призводить до швидкої втоми.

Важливою передумовою навколишнього середовища є також мікроклімат, необхідною передумовою життєдіяльності людини є підтримка постійної температури тіла за допомогою терморегуляції. Комп'ютери є значним джерелом тепла, що може призвести до підвищення температури та зниження відносної вологості в приміщенні. У приміщенні, де встановлені комп'ютери, необхідно дотримуватись деяких параметрів мікроклімату. Гігієнічні норми визначають кількість параметрів мікроклімату, що створюють комфортні умови (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Параметри мікроклімату для холодного та теплого періоду

Період року	Параметри мікроклімату	Величина
Холодний	Температура повітря в приміщенні	22 °С ...24 °С
	Відносна вологість	40 %...60 %
	Швидкість руху повітря	до 0,1
Теплий	Температура повітря в приміщенні	23 °С ...25 °С
	Відносна вологість	40 %...60 %
	Швидкість руху повітря	0,1 м/с ...0,2 м/с

Об'єм приміщення, в якому розміщуються працівники, не може бути менше 19,5 м³ на одну особу з урахуванням максимальної кількості працюючих одночасно. Норми подачі свіжого повітря в приміщення, в яких розташовані робочі місця, наведені в таблиці 5.2.

Для забезпечення комфортних умов використовуються як організаційні методи, так і технічні засоби, але шум погіршує умови праці, шкідливо

впливаючи на організм людини. При роботі в умовах тривалого впливу шуму виникають дратівливість, головний біль, запаморочення, погіршення пам'яті, підвищена стомлюваність, зниження апетиту, біль у вусі. Такі порушення в ряді органів і систем людського організму можуть призвести до негативних змін настрою людини і навіть стресу.

Таблиця 5.2 – Норми подачі свіжого повітря в приміщення, де розмішені комп'ютерів

Характеристика приміщення	Витрати триманого в приміщенні свіжого повітря, м ³ /на одну людину в годину
Об'єм до 20 м ³ на людину	Не менше 30
20 м ³ ...40 м ³ на людину	Не менше 20
Більш 40 м ³ на людину	Природна вентиляція

Через підвищене споживання енергії та психологічні проблеми шум може призвести до концентрації уваги, порушення фізіологічної функції та втоми. Все це можливо, працездатність людини і її працездатність, якість і безпека. При тривалому впливі інтенсивного шуму понад 80 дБ слух людини стає частковим або шерстистим.

Рівень шуму на робочих місцях інженерів не повинен перевищувати 50 дБ, а в залах з мотором – 65 приладів. Щоб знизити рівень шуму від стін і стелі приміщення, де встановлено прилад, стіни та стеля приміщення, де встановлено пристрій, можуть гудіти. Рівень вібрації в приміщеннях дата-центрів можна постійно знижувати, встановивши установку.

Відповідно до Закону України «Про цивільний захист» про об'єкти господарської діяльності (ОГД) створюється система цивільного захисту (ЦЗ). На ОГД системи цивільного захисту покладаються такі основні завдання:

- повідомлення працівників ОГД про надзвичайну ситуацію або подію, що наближається;
- забезпечення заходів колективного та індивідуального захисту працівників;

- планування та виконання спеціальних заходів для забезпечення стійкої роботи в надзвичайних ситуаціях;
- створення, підготовка та підтримка в постійній готовності спецпідрозділів ГЗ, їх оснащення спецзасобами.

Начальник системи ліквідації наслідків стихійного лиха ОГД є головою адміністрації.

Заступники голови ОГД призначаються основними ОГД:

- заступник начальника відділу евакуації та розподілу;
- заступник начальника відділу будівництва з інженерно-технічних питань;
- заступник начальника ГЗ з матеріально-технічного забезпечення.

Для організації та управління виконанням конкретних завдань ГЗ при ОГД будуть створені такі органи: штаб ГЗ; евакуаційна комісія; комісія з технологічної та екологічної безпеки та надзвичайних ситуацій (ТЕБ і НС); служби штабу [28].

У цьому приміщенні не використовуються небезпечні матеріали, речовини та пристрої. Основна причина надзвичайної ситуації – пожежа.

Тому в цьому розділі детально розглядаються теми протипожежного захисту.

Відповідно до НАПБ Б.03.002-2007 лабораторні приміщення з пожежо- та вибухонебезпечністю належать до класу Б, оскільки температура займання речовин, що зберігаються та використовуються у приміщенні, вище 61 °С. Відповідно до ДБН В.1.1.7-2002 лабораторні приміщення належать до I ступеня вогнестійкості, виготовлені з цегли, бетону, залізобетону з використанням панелей та негорючих матеріалів. Приміщення має категорію пожежної небезпеки П-Па за НПАОП 40.1-1.01-97, оскільки використовуються тверді горючі речовини. Запобігання утворенню джерел займання в легкозаймистому середовищі досягається контролем електромережі та дотриманням правил протипожежного захисту. Основна причина, яка може виникнути в цьому приміщенні – коротке замикання.

Пожежний захист гарантується системами протипожежного захисту та протипожежного захисту згідно ДСТУ 12.1.004-91. Система протипожежного

захисту являє собою комплекс організаційних заходів і технічних засобів для ліквідації пожежної обстановки і включає такі заходи:

- попередження утворення запального середовища;
- запобігання утворенню джерел вогню в легкозаймистому середовищі.

Відповідно до ДБН В.2.5.-13-98 у приміщенні встановлюють два точкових димових сповіщувача, які контролюють площу до 86 м² кожен.

Відповідно до НАПБ В01.008-2004 у приміщенні містяться первинні вогнегасні засоби – вогнегасники вуглекислотні ВВК-1,4 з розрахунку 1 вогнегасник на 3 ПК, але не менше 2 на кімнату.

Організаційна діяльність:

- особовий склад протипожежної охорони проінструктований;
- розроблені заходи щодо поведінки адміністрації при пожежі;
- на видному місці прикріплена схема евакуації на випадок пожежі [29].

3.5 Висновки до третього розділу

Після розробки Q-схеми, на якій можна побачити розташування черг, важливим етапом був вибір блоків GPSS, котрі використовувались у програмі, для моделювання процесу збірки виробу. За допомогою розглянутих блоків була створена блок-схема, яка представляла алгоритм розв'язування або аналізу задачі за допомогою геометричних елементів (блоків), які позначають операції, потік, дані тощо. На основі всіх виконаних етапів та для підтвердження працездатності і ефективності розробленої та удосконаленої імітаційної моделі, здійснено розробку програми моделювання технологічних процесів виготовлення друкованих плат за допомогою автоматизованої виробничої лінії.

У програмі проведено ряд моделювань, за результатами якого отримані:

- коефіцієнти завантаження каналів;
- час виконання кожного з етапів;
- довжину черги;
- час перебування заготовок в черзі.

Використовуючи отримані результати моделювання, розраховано:

- математичне очікування коефіцієнта завантаження лінії;
- математичне сподівання частоти підключення ресурсів в лінії;
- дисперсію коефіцієнта навантаження каналів;
- дисперсію середньої кількості транзактів у черзі;
- середнє квадратичне відхилення;
- точність оцінки математичного очікування;
- кількість реалізацій (числа прогонів);
- похибку оцінки ймовірності настання подій для всіх етапів контролю.

Аналіз умов праці проводиться з метою виявлення можливих (потенційно) небезпечних і шкідливих виробничих факторів, що виникають через технічні засоби, технологічні процеси та неправильну організацію праці на виробництві. У контексті цього оцінено фактори виробничого середовища та робочого процесу.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи основну увагу приділено розробленню імітаційної моделі автоматичної виробничої лінії.

У першому розділі проведено дослідження виробничих ліній в Smart Manufacturing, а саме проаналізовано, що таке Індустрія 4.0, з чого вона складається, її підсистему – кіберфізичні виробничі системи. Розглянуто види ліній-SMD, її структуру, конструкцію і характеристики. За результатами аналізу встановлено, що в процесах проектування, впровадження та використання роботизованих технологічних процесів виникає проблема оцінки їх функціональних властивостей. На даний момент це можна виправити за допомогою методів математичного (імітаційного) моделювання. Тому проведено аналіз існуючих мов моделювання і обрано саме мову імітаційного моделювання – GPSS. Це говорить про актуальність поставленої задачі.

Далі основуючись на принципах, розглянутих раніше, обрано виробничу лінію, за допомогою якої проведено експериментальне дослідження. Це автоматизована лінія компанії Jabil. Подальшою дією був вибір конфігурації обладнання лінії і аналіз параметрів її складових. На основі всіх даних побудовано загальний вигляд модельованої системи (рисунок 2.8), який дає розуміння, які саме дії проходять при виготовленні ДП і як це виглядає. Отже, знаючи це, визначено загальний вигляд системи масового обслуговування і розроблено Q-схему.

Завершальним кроком є написання програмного забезпечення для моделювання технологічного процесу виготовлення друкованих плат у пакеті імітаційного моделювання GPSS World. У рамках тактичного планування машинних експериментів наведено математичні співвідношення для оцінки точності отримуваних результатів та необхідної кількості прогонів моделі.

Проаналізувавши результати моделювання, отримано:

– математичне очікування коефіцієнта завантаження лінії \bar{k} ;

- математичне сподівання частоти підключення ресурсів в лінії \bar{n} ;
- дисперсію коефіцієнта навантаження каналів $D(k)$;
- дисперсію середньої кількості транзактів у черзі $D(n)$;
- середнє квадратичне відхилення σ ;
- точність оцінки математичного очікування ε ;
- кількість реалізацій (числа прогонів) N ;
- похибку оцінки ймовірності настання подій для всіх етапів контролю ε_i .

Отримані результати дозволять оптимізувати параметри роботи автоматичної виробничої лінії з виготовлення ДП, що допоможе позбавитись черг, позбавитись перевантажень, підвищити продуктивність і за рахунок цього надасть можливість для зменшення вартості продукції. Та у майбутньому може бути використана для розроблення моделі при проектуванні нових виробничих ліній такого типу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методичні вказівки до розробки й оформлення кваліфікаційної роботи студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 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, В.В. Євсєєв, С.П. Новоселов, О.М. Цимбал., – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 50 с.

2. ДСТУ 3008: 2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. – К.: ДП “УкрНДНЦ”, 2016. – 30 с.

3. Положення про протидію академічному плагіату в ХНУРЕ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://nure.ua/wpcontent/uploads/Main_Docs_NURE.html.

4. Положення про кваліфікаційну роботу здобувача вищої освіти на другому (магістерському) рівні [Електронний ресурс] : Наказ ХНУРЕ від 06 травня 2021 р. No 143. – Режим доступу : https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/143-vid-06.05.2021-pro-vvedennja-v-diju-rishennja-vchenoi-radi -universitetu.pdf

5. Невлюдов І.Ш. Дипломне поєктування для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології»: Навч. посібник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова. – К. : пр. Космонавта Комарова, 1, 2016. – 245 с.

6. Китайгородский М.Д. ИНДУСТРИЯ 4.0 И ЕЕ ВЛИЯНИЕ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБРАЗОВАНИЕ – [Електронний ресурс]. // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – №11-2. – С. 290-294; – Режим доступу. – URL: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=37320>

7. Индустрия 4.0 – [Електронний ресурс]. // Индустрия 4.0. – Режим доступу. – URL: [https://www.it.ua/ru/knowledge-base/technology-innovation/industry-](https://www.it.ua/ru/knowledge-base/technology-innovation/industry-4)

8. Vladyslav Yevsieiev, Nataliia Demska. (2021). Study of the Structure of Cyber-Physical Production Systems in Industry 4.0. The I International scientific-practical conference “Problems of modern science and practice”, September 21-24, 2021, Boston, USA p. 431-434. DOI: 10.46299/ISG.2021.II.I

9. Жгунова А.Є. Моделювання адитивних технологій в рамках Індустрії 4.0 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2021) [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2021. – Вип. 1. – 158 с.

10. Nevliudov I., Yevsieiev V., Maksymova S., Filippenko I. Development of an architectural-logical model to automate the management of the process of creating complex cyber-physical industrial systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol 4. No 3(106). С.44–52. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.210761.

11. Невлюдов І.Ш., Євсєєв В.В., Бортникова В.О. Розробка програмного модуля для автоматизованого проектування технологічного процесу виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових прац. (2015). Випуск 3(35). С 107–112.

12. Yevsieiev V. Visual components formal description development for the automated design of software products and modules for computer-integrated production technological preparation systems. Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки. 2018. Том 29 (68) № 1 Частина 1. С.143–147. DOI: 10.31474/2075-4272-2018-1-31-24-31.

13. Цуканов, А. И. Технологии монтажа и демонтажа узлов и элементов радиоэлектронной и радиотелевизионной аппаратуры [Текст] : учебно-методическое пособие. / А. И. Цуканов, О. В. Кучевасов ; СПб ГБ ПОУ «Колледж электроники и приборостроения». – СПб., 2017. – 105 с.

14. Жгунова А.Є., Бабак І.В. Дослідження виробничих ліній SMT монтажу / А.Є. Жгунова, І.В. Бабак // Виробництво & Мехатронні Системи 2021: матеріали V-ої Міжнародної конференції, Харків, 21-22 жовтня 2021 р.: тези доповідей /

[редкол. І.Ш. Невлюдов (відповідальний редактор)].-Харків: [електронний друк], 2021. – с. 75 – 77.

15. Поверхностный монтаж печатных плат [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.imp.lg.ua/index.php/ru/contract-manufacturing/contract-manufacturing-2>. – Загол. з екрану.

16. Математичне моделювання: Конспект лекцій / Упоряд. В.В. Безкорвайний. – Харків: ХНУРЕ, 2010. – 116 с.

17. Моисеев А. В., Моисеев Д. А. Имитационное моделирование систем массового обслуживания, описывающих процесс производства продукции //Научный альманах. – 2015. – №. 7. – С. 724-727.

18. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука: Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 480 с.

19. Титоренко М. В., Баженов Р. И. Об имитационном моделировании систем массового обслуживания в среде GPSS //Nauka-rastudent. ru. – 2014. – №. 11. – С. 38-58.

20. Оценка достоверности результатов имитационного моделирования по результатам аналитического моделирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-dostovernosti-rezultatov-imitatsionnogo-modelirovaniya-po-rezultatam-analiticheskogo-modelirovaniya/viewer>. – Загол. з екрану.

21. Шрайбер Т. Д. Моделирование на GPSS/Пер. с англ./Пер. ВИ Гаргера, ИЛ Шмуйловича; Ред. МА Файнберг //М.: Машиностроение. – 1980. – 592 с.

22. Боев В. Д. Моделирование систем. Инструментальные средства GPSS WORLD. – БХВ-Петербург, 2004. – 368 с.

23. Кудрявцев Е.М. GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем [Текст] / Е.М. Кудрявцев. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 320 с.

24. Кузьменко В.М. Спеціальні мови програмування. Програмні та інструментальні засоби моделювання складних систем [Текст] : навч. посібник / В.М. Кузьменко. – Харків: ХТУРЕ, 2000. – 324 с.

25. Паничев, В.В. П16 Оценка эффективности систем массового

обслуживания в среде GPSS World: методические указания к выполнению лабораторных работ / В.В. Паничев; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2013. – 83 с.

26. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисциплін «Моделювання систем» для студентів спеціальності 7.080401 – Інформаційні управляючі системи та технології та "Математичне моделювання" для студентів спеціальності 7.091401 – Системи управління та автоматики / Упор. В.В. Безкорвайний, З.А. Імангулова, Н.І. Калита. – Харків: ХНУРЕ, 2005. – 48 с.

27. Кузьменко В.М. Спеціальні мови програмування. Програмні та інструментальні засоби моделювання складних систем: навч. посібник / В.М. Кузьменко. – Харків: ХТУРЕ, 2000. – 324 с.

28. Закон № 2694 — Закон України «Об охране труда» от 14.10.92 г. № 2694-ХІІ.

39. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці» у випускних роботах ОКР «бакалавр» усіх форм навчання / Упоряд.: Б.В. Дзюндзюк, В.А. Айвазов, Т.Є. Стиценко. – Харків: ХНУРЕ, 2012. – 28 с.

30. Жгунова А.Є. Використання ультразвукових датчиків в мобільних роботах АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА ПРИЛАДОБУДУВАННЯ («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2021) [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків : ХНУРЕ, 2021. – Вип. 1. – 158 с.