

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)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

Імітаційна модель роботизованої виробничої ділянки

(тема)

Виконав: студент 2 курсу, гр. КТРСм-19-1
Мамін В.А.

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
освітньої програми Комп'ютеризовані та
робототехнічні системи

(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Безкоровайний В.В.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
зав. кафедри

(підпис)

Невлюдов І.Ш.

(прізвище, ініціали)

2020

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	<u>Автоматики і комп'ютеризованих технологій</u>
Кафедра	<u>Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки</u>
Рівень вищої освіти	<u>другий (магістерський)</u>
Спеціальність	<u>151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології</u>
Тип програми	<u>освітньо-професійна</u>
Освітня програма	<u>Комп'ютеризовані та робототехнічні системи</u>
	(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«_____» _____ 2020 р.

**ЗАВДАННЯ
НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ**

студентові _____ Маміну Віталію Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Імітаційна модель роботи роботизованої виробничої ділянки
затверджена наказом по університету від 02.11. 2020 р. № 1509 Ст.
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 07.12. 2020 р.
3. Вихідні дані до роботи Імітаційна модель роботи технологічного процесу виготовлення МЕМС-акселерометру, набір функціональних характеристик такі, як довжина черги та час перебування підкладок в черзі на всіх операціях технологічного процесу. Реалізація імітаційної моделі на мові програмуванні GPSS на персональному комп'ютері.
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити)
 - 4.1 Вступ.
 - 4.2 Огляд і аналіз проблем моделювання роботизованих виробничих ділянок.
 - 4.3 Вибір підходів до моделювання роботизованих виробничих ділянок.
 - 4.4 Розробка алгоритмів та програмного забезпечення.
 - 4.5 Питання охорони праці та безпеки життєдіяльності.
 - 4.5 Висновки.
 - 4.6 Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів). Демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 15 с., формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз вихідних даних та літератури за темою атестаційної роботи	08.09.2020	Виконано
2	Огляд та аналіз проблеми моделювання роботизованих виробничих ділянок	14.09.2020	Виконано
3	Постановка мети та задач дослідження	18.09.2020	Виконано
4	Вибір підходу до моделювання роботизованих виробничих ділянок	06.10.2020	Виконано
5	Розробка програмного засобу імітаційної моделі	06.11.2020	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки та презентації	25.11.2020	Виконано
7	Подання атестаційної роботи до екзаменаційної комісії	07.12.2020	Виконано

Дата видачі завдання 01 вересня 2020 р.

Студент

_____ (підпис)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Мамін В.А.

_____ (прізвище, ініціали)

проф. Безкоровайний В.В

_____ (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Атестаційна робота: 92 с., 1 табл., 29 рис., 2 дод., 22 джерела.

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ, МЕМС-АКСЕЛЕРОМЕТР, РОБОТИЗОВАНЕ ВИРОБНИЦТВО, ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС.

Мета роботи – розробка імітаційної моделі процесу функціонування роботизованої виробничої ділянки виготовлення компонентів мікроелектромеханічних акселерометрів з детермінованими та стохастичними характеристиками технологічних операцій.

Об'єкт дослідження – роботизована виробнича ділянка виготовлення мікроелектромеханічних (МЕМС) акселерометрів.

Предмет дослідження – функціональні характеристики роботизованої виробничої ділянки виготовлення компонентів мікроелектромеханічних акселерометрів.

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

У магістерській атестаційній роботі було розроблено імітаційну модель процесу функціонування роботизованої виробничої ділянки виготовлення компонентів МЕМС-акселерометра. Розроблено програмне забезпечення імітаційної моделі мовою програмування GPSS.

Отримані данні імітаційним методом дозволить оптимізувати роботу технологічного процесу виготовлення МЕМС-акселерометрів.

Результати магістерської атестаційної роботи апробовані в статті та на Міжнародній науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених.

ABSTRACT

Certification work: 92 pp., 1 tab., 29 fig., 2 app., 22 sources.

MEMS-ACCELEROMETER, ROTOTIZED PRODUCTION,
TECHNOLOGICAL EQUIPMENT, TECHNOLOGICAL PROCESS,
SIMULATION MODEL.

The purpose of the work is to develop a simulation model of the process of functioning of a robotic production site for the manufacture of components of microelectromechanical accelerometers with deterministic and stochastic characteristics of technological operations.

The object of research is a robotic production site for the manufacture of microelectromechanical (MEMS) accelerometers.

The subject of research - the functional characteristics of the robotic production site for the manufacture of components of microelectromechanical accelerometers.

Research methods - continuous-stochastic approach in system modeling, simulation model, analytical method, methods of modern information technologies. In the master's attestation work a simulation model of the process of functioning of the robotic production site for the manufacture of MEMS accelerometer components was developed. The software of the simulation model in the GPSS programming language has been developed. The obtained data by the simulation method will allow to optimize the work of the technological process of manufacturing MEMS accelerometers. The results of the master's attestation work were tested in the article and at the International scientific and technical conference of students, graduate students and young scientists.

ЗМІСТ

Список умовних скорочень.....	8
Вступ	9
1 Огляд та аналіз проблеми моделювання роботизованих виробничих ділянок.....	12
1.1 Роботизовані технологічні комплекси як об'єкти моделювання	12
1.2 Класифікація видів моделювання	19
1.3 Програмні засоби моделювання технологічних процесів	28
1.4 Висновки до 1 розділу.....	29
2 Вибір підходів до моделювання роботизованої виробничої ділянки..	30
2.1 MEMC-акселерометри як об'єкти виробництва	30
2.2 Структура технологічного процесу виготовлення MEMC-акселерометра.....	31
2.3 Підходи до моделювання виробничих технологічних процесів.	35
2.3.1 Дискретно-детермінований підхід	35
2.3.2 Безперервно-стохастичний підхід	38
2.4 Метод статистичного моделювання	40
2.5 Оцінка точності результатів моделювання.....	42
2.6 Висновки до 2 розділу	43
3 Розробка алгоритмів та програмного забезпечення.....	45
3.1 Вибір мови програмування та середовища розробки.....	45
3.1.1 Система програмування імітаційних моделей AnyLogic....	45
3.1.2 Мова програмування GPSS.....	46
3.2 Побудова Q-схеми.....	48
3.3 Опис програмного забезпечення.....	50
3.4 Приклад застосування імітаційної моделі.....	57
3.5 Висновки до 3 розділу.....	63
4 Питання охорони праці та безпеки життєдіяльності	64

	7
4.1 Висновки до 4 розділу.....	68
Висновки.....	69
Перелік джерел посилання	71
Додаток А Код програми імітаційної моделі.....	74
Додаток Б Презентаційні матеріали	76
Додаток В Відомість атестаційної роботи	92

СПИСОК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- АТСС – Автоматизована транспортно-складська система;
- АСІЗ – автоматизована система інструментального забезпечення;
- АСУ – автоматизована підсистема управління;
- ГАЛ – гнучкі автоматизовані лінія;
- ГАД – гнучкі автоматизовані ділянки;
- ГАЦ – гнучкі автоматизовані цехи;
- ГВС – гнучка виробнича система;
- ГВМ – гнучкі виробничі модулі;
- ЕА – електронної апаратури;
- ЕОМ – електронна обчислювальна машина;
- ДПС – двигун постійного струму;
- МЕМС – мікроелектромеханічний;
- МІМ – мови імітаційного моделювання
- МЗП – мови загального призначення
- РТК – роботизований технологічний комплекс;
- ПР – промисловий робот;
- ТП – технологічний процес;
- ЧЕ – чутливий елемент;
- ЧПУ – числове програмне керування.

ВСТУП

У всі періоди своєї історії людство знаходило способи покращення технологій своєї діяльності в плані якості, швидкості, безпеки та витрат ресурсів. Це особливо чітко прослідковується в сфері виробництва.

З появою таких винаходів як млин, друкарська машина, конвеєр, людство поступово зменшувало свою участь у виробництві. Апогеєм цієї тенденції став винахід автоматичного пристрою – робота. Роботизація виробництва частково або повністю (залежить від типу) виключила роль людини в виробництві. Роботизація виробництва – це елемент автоматизації, коли в виробництві людській ресурс частково або повністю замінюється роботизованою системою у промислових масштабах. Зараз найчастіше людей замінюють роботи в таких роботах, як переміщення та створення виробів. Перед сучасними роботизованими системами ставлять прості задачі, які вони можуть виконувати безперервно протягом тривалого часу. Гнучкість роботів в плані їх розмірів та їх висока точність надають їм велику перевагу перед використанням людських ресурсів.

Сучасні виробничі процеси ґрунтуються на впровадженні нових рішень та технологій Industry 4.0. Важливу роль в таких технологіях відіграють роботи та роботизовані комплекси, які повинні забезпечувати у виробничих процесах необхідні рівні точності, швидкодії, високої функціональності, низького енергоспоживання та витрат.

У процесах проектування, впровадження та використання роботизованих технологічних процесів виникає задача оцінки їх функціональних характеристик. В сучасних умовах вона розв'язується методами математичного (імітаційного) моделювання. При цьому використовувані моделі суттєві відрізняються у залежності від структури і параметрів технологічних процесів. Це обумовлює актуальність науково-

прикладних завдань розробки ефективних засобів імітаційного моделювання роботизованих виробничих ділянок.

Об'єктом дослідження є роботизована виробнича ділянка виготовлення мікроелектромеханічних (МЕМС) акселерометрів.

Предмет дослідження – функціональні характеристики роботизованої виробничої ділянки виготовлення компонентів мікроелектромеханічних акселерометрів.

Метою атестаційної роботи є розробка імітаційної моделі процесу функціонування роботизованої виробничої ділянки виготовлення компонентів мікроелектромеханічних акселерометрів з детермінованими та стохастичними характеристиками технологічних операцій.

Для досягнення мети атестаційної роботи необхідно:

- виконати огляд та аналіз проблеми моделювання роботизованих виробничих ділянок;
- проаналізувати особливості технологічних процесів виготовлення МЕМС-акселерометрів;
- розглянути особливості роботизованих технологічних комплексів як об'єктів моделювання;
- проаналізувати сучасні методи та програмні засоби комп'ютерного моделювання;
- розробити імітаційну модель процесу функціонування роботизованої виробничої ділянки виготовлення компонентів МЕМС-акселерометрів з детермінованими та стохастичними характеристиками технологічних операцій;
- розробити програмне забезпечення імітаційної моделі для визначення функціональних характеристик роботизованої виробничої ділянки;
- виконати задачі тактичного планування та провести серії машинних експериментів;
- провести аналіз та надати рекомендації щодо використання результатів роботи.

– оформити атестаційну роботу відповідно ДСТУ 3008-2015 [1], навчальному посібнику з дипломного проектування [2], методичних вказівок до випускної кваліфікаційної роботи рівня «Магістр» [3] та положенню про протидію академічному плагіату [4].

У процесі виконання роботи потребуються знання в сфері автоматизації, робототехніки, будови MEMC-акселерометрів і технологій їх виготовлення, математичного та комп'ютерного моделювання. Процес побудови імітаційної моделі передбачає вибір середовища та мови програмування, з використанням яких буде здійснено побудову моделі. Виходячи з цього необхідними будуть також знання та навички щодо середовищ та мов програмування для раціонального їх вибору за показниками їх зручності, швидкості та доступності.

Розробка імітаційної моделі роботизованої виробничої ділянки здійснена з використанням пакету програм GPSSW, який є досить зручним та простим у використуванні. Це дозволить у подальшому здійснювати доповнення та вдосконалення моделі в системах проектування та управління технологічними процесами.

Отримані за результатами моделювання характеристики процесу складання MEMC-акселерометрів можуть бути використані для оптимізації роботи автоматизованих виробничих ділянок при проектуванні й управлінні технологічними процесами.

1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИЗОВАНИХ ВИРОБНИЧИХ ДІЛЯНОК

1.1 Роботизовані технологічні комплекси як об'єкти моделювання

Головна ідея роботизованого технологічного комплексу полягає в тому, що промисловий робот повинен використовуватися в поєднанні з певним технологічним обладнанням, як, наприклад, преси, металорізальні верстати, зварювальні установки, установки для нанесення покриттів тощо, і призначений для виконання однієї або декількох конкретних технологічних операцій [5].

Застосування промислових роботів можна підрозділити на виконання роботами безпосередньо основних технологічних операцій, і виконання допоміжних операцій з обслуговування основного технологічного обладнання. До перших відноситься автоматичне виконання роботами процесів зварювання, складання, фарбування, нанесення покриттів, пайки, проведення контрольних операцій, упакування, транспортування і складування. До другої категорії відноситься автоматизація за допомогою роботів процесів механічної обробки (обслуговування різних металорізальних верстатів, шліфувальних і протяжних верстатів), пресів холодної та гарячої штампування, ковальського та ливарного устаткування, установок для термообробки, а також завантаження-розвантаження напівавтоматів дугового зварювання та контактних зварювальних машин, при автоматизації операцій складання [5].

Роботизований технологічний комплекс (РТК) складається з сукупності технологічного обладнання, промислового робота і засобів оснащення, що функціонують автономно та здійснюють багаторазові цикли.

Примітки.

1. РТК, призначені для роботи у ДПС, повинні мати автоматизовану систему переналадження і можливість вбудовуватися в систему.

2. В якості технологічного обладнання може бути використаний промисловий робот.

3. Засобами оснащення РТК можуть бути: пристрої накопичення, орієнтації, поштучної видачі об'єктів виробництва та інші пристрої, що забезпечують функціонування РТК.

При цьому мається на увазі одна одиниця технологічного устаткування і один промисловий робот.

Якщо кількість промислових роботів і одиниць технологічного обладнання більше одиниці, то тоді це буде роботизована технологічна ділянка (РТД) – сукупність роботизованих технологічних комплексів, зв'язаних між собою транспортними засобами і системою управління, або декілька одиниць технологічного обладнання, що обслуговуються одним або декількома промисловими роботами, в якій передбачена можливість зміни послідовності використання технологічного устаткування [6].

Роботизована технологічна лінія являє собою сукупність РТК, пов'язаних між собою транспортними засобами і системою управління, або декількох одиниць технологічного устаткування, що обслуговуються одним або декількома ПР для виконання операцій в прийнятій технологічній послідовності.

Таким чином, до складу роботизованого технологічного комплексу входять:

- технологічне обладнання;
- промисловий робот;
- допоміжне, транспортне обладнання.

Розглянемо проблему гнучкої автоматизації виробництва з метою встановити місце, яке займають у ній роботизовані технологічні комплекси.

Гнучка виробнича система (ГВС) являє собою сукупність у різних поєднаннях технологічного обладнання з ЧПУ, роботизованих технологічних комплексів (РТК), гнучких виробничих модулів (ГВМ), ПР та інших механізмів, що розробляються і функціонують в автоматичному режимі протягом заданого інтервалу часу, що володіють властивістю автоматизованого переналагодження при виробництві виробів довільної номенклатури в установлених межах їх характеристик .

Відносна автономність виробничих одиниць – ГВМ, забезпечується координацією як єдиного цілого багаторівневою системою управління, що забезпечує зміну програми функціонування підсистем ГВС і тим самим – швидке переналагодження технології виготовлення при зміні об'єктів виробництва.

За організаційною структурою розрізняють наступні види ГВС: гнучкі автоматизовані лінії (ГАЛ), гнучкі автоматизовані цехи (ГАЦ), гнучкі автоматизовані ділянки (ГАД).

ГАЛ – ГВС, в якій технологічне обладнання розташоване у прийнятій послідовності технологічних операцій.

ГАД – ГВС, що функціонує за технологічним маршрутом, в якому передбачені можливість зміни послідовності використання технологічного устаткування.

ГАЦ – ГВС, що представляє собою в різних поєднаннях сукупність гнучких автоматизованих і роботизованих технологічних ліній і ділянок для виготовлення виробів заданої номенклатури.

Система забезпечення функціонування ГВС визначається як сукупність взаємопов'язаних автоматизованих систем, які забезпечують проектування виробів, технологічну підготовку їх виробництва, управління ГВС за допомогою ЕОМ та автоматичне переміщення предметів виробництва та технологічної оснастки [6].

ГВС складається з ряду основних автоматизованих підсистем: технологічної, транспортної, складської, контролю і управління.

Автоматизована технологічна підсистема ГВС. До складу технологічної підсистеми ГВС входить множина ГВМ спільно з необхідними засобами технологічного оснащення, призначених для виконання основних технологічних операцій виробництва, наприклад, електронної апаратури (ЕА) [6].

Автоматизована транспортно-складська система (АТСС) – підсистема взаємозв'язаних автоматизованих транспортних і складських пристроїв для укладання, зберігання, тимчасового накопичення, розвантаження та доставки предметів праці, технологічної оснащення [6].

Автоматизована підсистема управління ТП (АСУ ТП) складається з засобів обчислювальної техніки – керуючих ЕОМ, пов'язаних в єдиний комплекс за допомогою інтерфейсних пристроїв і ліній передачі даних, і програмного забезпечення. Вона призначена для управління окремими одиницями автоматизованого обладнання всіх підсистем і системи в цілому; базується на використанні обладнання з ЧПУ. Програмне управління ґрунтується на застосуванні програми, що визначає порядок дій з метою отримання необхідного результату [7].

Система управління охоплює всі рівні ієрархії ГВС; нижній рівень управління – ГПМ; середній рівень управління – ГАЛ і ГАД; вищий рівень управління – ГАЦ, тобто управління виробничими одиницями (лініями і ділянками) відповідно до заданого планом виробництва виробів.

Підсистема контролю ГВС вирішує завдання:

- отримання та передачі інформації про властивості, технічний стан і просторове розташування контрольованих об'єктів, а також про стан технологічного середовища;
- порівняння фактичних параметрів із заданими;
- передачі інформації про розузгодження для прийняття рішень на різних рівнях ГВС;
- отримання і представлення інформації про виконання функцій;

- автоматичної перебудови засобів контролю в межах заданої номенклатури контрольованих об'єктів;
- повноти та достовірності контролю.

Автоматизована система інструментального забезпечення (АСІЗ) – система взаємопов'язаних елементів, включає ділянки підготовки інструменту, його транспортування, накопичення, пристрої змін і контролю якості інструменту, що забезпечують підготовку, зберігання, автоматичну установку і заміну інструменту.

На базі існуючих промислових роботів (ПР) створено дуже багато різних роботизованих технологічних комплексів (РТК) для механічної обробки деталей. Вони за конструктивним виконанням також дуже різноманітні. Це залежить від особливостей обслуговуваного верстату, використовуваного робота та допоміжних пристроїв, їх конструкції та компоувального розміщення тощо. Токарний РТК, виконаний з порталним промисловим роботом із двозахватним пристроєм та накопичувачем деталей, розміщеним із торця верстату, представлений на рис. 1.1. Така компоновка займає невелику виробничу площу, а також має зручне розміщення обладнання для його обслуговування [7].



Рисунок 1.1 – Токарний роботизований комплекс SL-20APL

Оригінальним є РТК, де промисловий робот «РБ-242» приєднаний до передньої частини станини верстата (рис.1.2). Робот здійснює два обертових та один поступальний рух руки, яка переміщує двозахватний пристрій. Заготовки та оброблені деталі розміщуються на позиціях тактового столу.

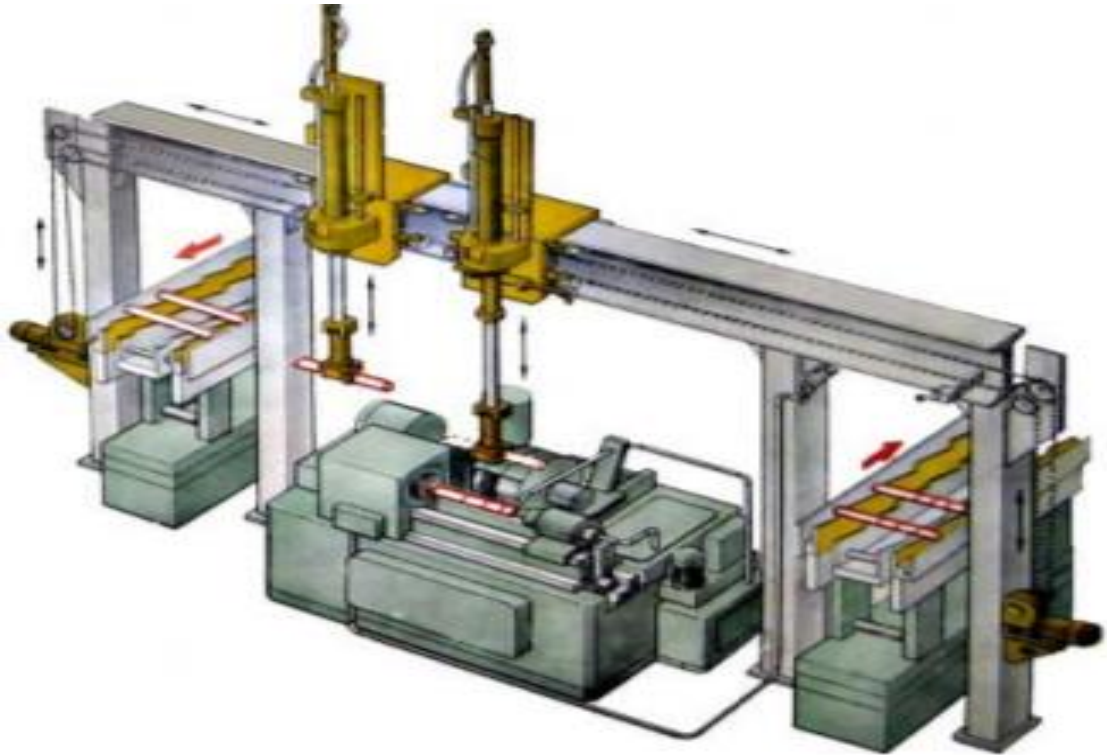


Рисунок 1.2 – Шліфувальний роботизований комплекс

З іншого боку, для їх завантаження на металорізальні верстати, в основному, використовують роботи з механічними захватами, які, в свою чергу, є також найбільш розповсюдженим виконанням таких пристроїв. Великих успіхів у створенні та впровадженні роботів досягли провідні технічно розвинені країни, які організували масове виробництво ПР. Так, у США широко використовуються роботи: «Версатран», «Юнімейт», «Prab-4200H», «Mark II», «S-900» та ін. Особливо інтенсивно впроваджуються роботи у виробництво Японії. Це такі відомі моделі: «Fanuc», «Kuka», «Mitsubishi», «Unimate Ltd», «Tokye keiki», «AM-3», «Robitus-RS» та ін. Серед розробок роботів інших країн можна відзначити: «ABB» та «Bosh»

(Німеччина), «Electrolux» (Швеція), «Hawker Siddeley» (Англія), «Tralffa» (Норвегія), «Пирин» (Болгарія), «Sigma» (Італія) і ін. Приклади деяких із них наведено на рис.1.3-1.4.



Рисунок 1.3 – Промисловий робот RV6L «Reis» (Німеччина)

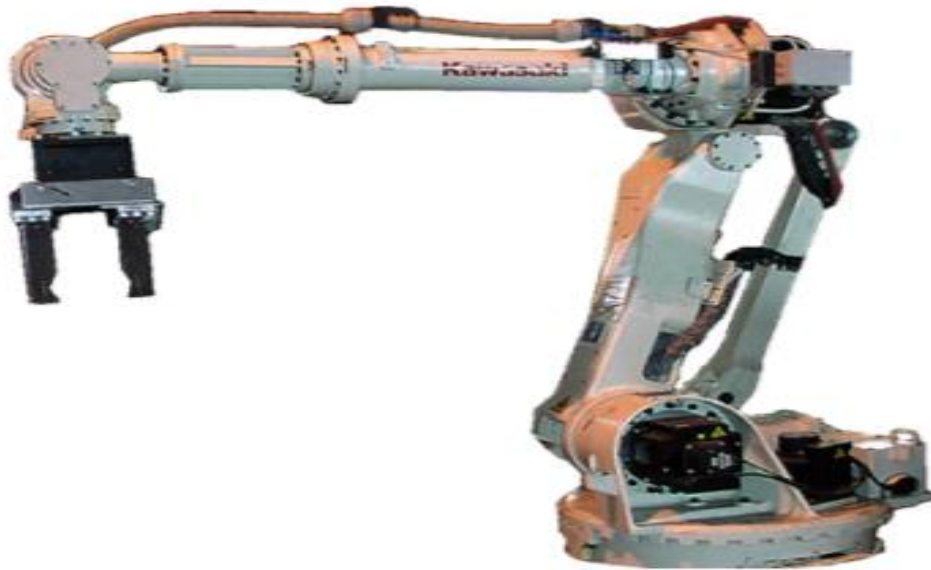


Рисунок 1.4 – Промисловий робот MX-420L «Kawasaki» (USA)

Розроблені конструкції роботів мають дуже різноманітні виконання. Так, вони можуть розміщуватися на підлозі з різних боків верстату, що обслуговується, встановлюватися на самому верстаті або над ним. Роботи конструктивно виконуються з однією рукою і одним захватом. Все більшого

поширення набувають дворукі чи багаторукі роботи з двозахватними чи багатовзахватними пристроями, що дозволяє значно підвищити продуктивність їх роботи. Роботи також відрізняються за типом системи координат, в якій вони працюють та іншими технічними характеристиками: вантажністю, типом приводу та системою керування, кількістю ступенів рухомості, швидкістю та точністю рухів тощо [7].

Ефективність автоматизації за рахунок застосування робототехники може бути досягнута тільки при комплексному підході до створення і впровадження промислових роботів, оброблювального устаткування, засобів управління, допоміжних механізмів та пристроїв і т. п. Проводити значний об'єм організаційно-технологічних заходів для одиничного впровадження ПР нерентабельно. Тільки розширене застосування ПР у складі складних роботизованих систем буде виправдано технічно, економічно і соціально. У порівнянні з традиційними засобами автоматизації, застосування ПР забезпечує велику гнучкість технічних і організаційних рішень, зниження термінів комплектації і запуску у виробництво гнучких автоматизованих систем. Підвищуючи продуктивність праці, відбувається зниження собівартості деталі, а, отже, і зниження ціни деталі. Так, застосовуючи РТК для всіх верстатів по технологічному процесу виготовлення деталі, досягають максимальної продуктивності і мінімальної собівартості виготовлення деталі. Крім того, застосовуючи такі автоматизовані системи, відбувається заміна важкої ручної праці людини на функцію контролю за роботою самого РТК, тобто відбувається поліпшення умов праці людини [7].

1.2 Класифікація видів моделювання

Науковою основою моделювання як методу пізнання і дослідження різних об'єктів і процесів є теорія подібності, в якій головним є поняття аналогії, тобто схожості об'єктів за деякими ознаками. Подібні

об'єкти називаються аналогами. Аналогія між об'єктами може встановлюватись за якісними і (або) кількісними ознаками.

Основним видом кількісної аналогії є математична подібність, коли об'єкти описуються за допомогою рівнянь і функцій. Функції та незалежні змінні називаються схожими, якщо вони співпадають з точністю до деякої константи. Окремими видами математичної подібності є геометрична подібність, яка встановлює подібність геометричних образів, і часова, що визначає подібність функції часу, для якої константа часу (масштаб) показує, в яких відношеннях знаходяться параметри функцій, такі як період, часова затримка тощо [8].

Іншим видом кількісної аналогії, який слід відзначити, є фізична подібність. Критерії фізичної подібності можна отримати, не маючи математичного опису об'єктів, наприклад на основі значень фізичних параметрів, які характеризують досліджуваний процес у природі й на моделі. За типом процесу розрізняють види подібності, для яких розроблено відповідні критерії – гідравлічні, електричні, аеродинамічні та ін.

Вивчення переходу від властивостей реальних об'єктів до властивостей системи є найважливішим завданням теорії систем. У загальній теорії систем визнається об'єктивність їх існування. Згідно з цією теорією, якщо реально існують взаємозв'язки між об'єктами, то існують і системи, які їм відповідають. Ця теорія ґрунтується на постулаті функціонально-структурного ізоморфізму об'єктів і явищ природи [9].

Якщо структура однієї системи і зовнішні функції її елементів ізоморфні структурі іншої системи і зовнішнім функціям її елементів, то зовнішні властивості цих систем не розрізняються в області їх ізоморфізму. У теорії систем цей постулат має не менше значення, ніж закони збереження матерії у фізиці або аксіоми в математиці. Разом з іншими постулатами він є підґрунтям для логічного, доказового розгортання теорії і дає можливість пояснити єдність закономірностей природи для об'єктів, які здаються несхожими і

незалежними один від одного. Ізоморфізм реальних систем є основою і логічним наслідком вищезазначеного постулату [10].

У теорії систем існує ще один важливий для моделювання постулат, який визначає, що описом структури і функцій деякої системи може бути інша ізоморфна стосовно неї система. Ця ізоморфність (подібність) двох систем стосується структур систем і функцій їх елементів. Одна з таких систем є моделлю іншої (оригіналу) і навпаки. Таких ізоморфних систем може бути безліч. Виникає проблема вибору або побудови системи, яка може бути моделлю досліджуваної системи.

Теорія подібності дає змогу встановити відношення еквівалентності (відповідності, схожості) між двома розглядуваними системами за деякими ознаками. Будь-яка з цих систем може існувати реально або бути абстрактною. Якщо система існує реально, то її можна вивчати, досліджуючи, яким чином пов'язані вхідні впливи з виходами системи. На основі результатів досліджень будується деяка абстрактна система, де відношення еквівалентності визначають тільки ті істотні властивості та аспекти поведінки, які у вихідній та абстрактній системах мають бути однаковими. М. Месарович відзначає, що, базуючись на спостереженнях і дослідженнях однієї системи, можна робити висновки про властивості та поведінку іншої. Здебільшого на практиці абстрактна система простіша за вихідну, якщо не враховувати тих аспектів, що визначають відношення еквівалентності [9].

Таким чином, можна перейти до визначення терміну «модель». У філософській літературі терміном «модель» позначають «деяку реально існуючу систему або ту, що представляється в думках, яка, заміщаючи і відображаючи в пізнавальних процесах іншу систему-оригінал, знаходиться з нею у відношенні схожості (подібності), завдяки чому вивчення моделі дає змогу отримати нову інформацію про оригінал». У цьому визначенні закладено генетичний зв'язок моделювання з теорією подібності, принципом аналогії. Таким чином, моделлю можна називати систему, яку використовують для дослідження.

Термін «модель» походить від латинського слова «modulus», тобто зразок, пристрій, еталон. У широкому значенні – це будь-який аналог (уявний, умовний: зображення, опис, схема, креслення тощо) певного об'єкта, процесу, явища («оригіналу» даної моделі), що використовується як його «замінник». Цей термін можна застосовувати також для позначення системи постулатів, даних і доведень, формального опису деякого явища або стану речей. Словник Вебстера визначає модель як «спрощений опис складного явища або процесу» [10].

У сучасній теорії управління використовуються моделі двох основних типів. Для технологічних об'єктів цей поділ відповідає «феноменологічним» і «дедуктивним» моделям. Під феноменологічними моделями розуміють переважно емпірично поновлені залежності вихідних даних від вхідних, як правило, з невеликою кількістю входів і виходів. Дедуктивне моделювання передбачає з'ясування та опис основних фізичних закономірностей функціонування всіх компонентів досліджуваного процесу і механізмів їх взаємодії. За допомогою дедуктивних моделей описується процес у цілому, а не окремі його режими [10].

Перший тип моделей – моделі даних, які не потребують, не використовують і не відображають будь-яких гіпотез про фізичні процеси або системи, з яких ці дані отримано. До моделей даних належать усі моделі математичної статистики. Останнім часом ця сфера моделювання пов'язується з експериментально-статистичними методами і системами, що істотно розширює методологічну базу для прийняття рішень під час розв'язання завдань аналізу даних і управління [10].

Другий тип моделей – системні моделі, які будуються в основному на базі фізичних законів і гіпотез про те, як система структурована і, можливо, як вона функціонує. Використання системних моделей передбачає можливість працювати в технологіях віртуального моделювання — на різноманітних тренажерах і в системах реального часу (операторські, інженерні, біомедичні

інтерфейси, різноманітні системи діагностики і тестування тощо). Саме системні моделі будуть ядром моделювання на сучасному етапі.

Для того щоб визначити види моделей, перш за все, потрібно вказати ознаки класифікації. Якщо враховувати, що моделювання – це метод пізнання дійсності, то основною ознакою класифікації можна назвати спосіб подання моделі. За цією ознакою розрізняють абстрактні і реальні моделі (рис. 1.5). Під час моделювання можливі різні абстрактні конструкції, проте, основною є віртуальна (уявна) модель, що відображає ідеальне уявлення людини про навколишній світ, який фіксується у свідомості через думки і образи. Віртуальна модель може представлятися у вигляді наглядної моделі за допомогою графічних образів і зображень [11].

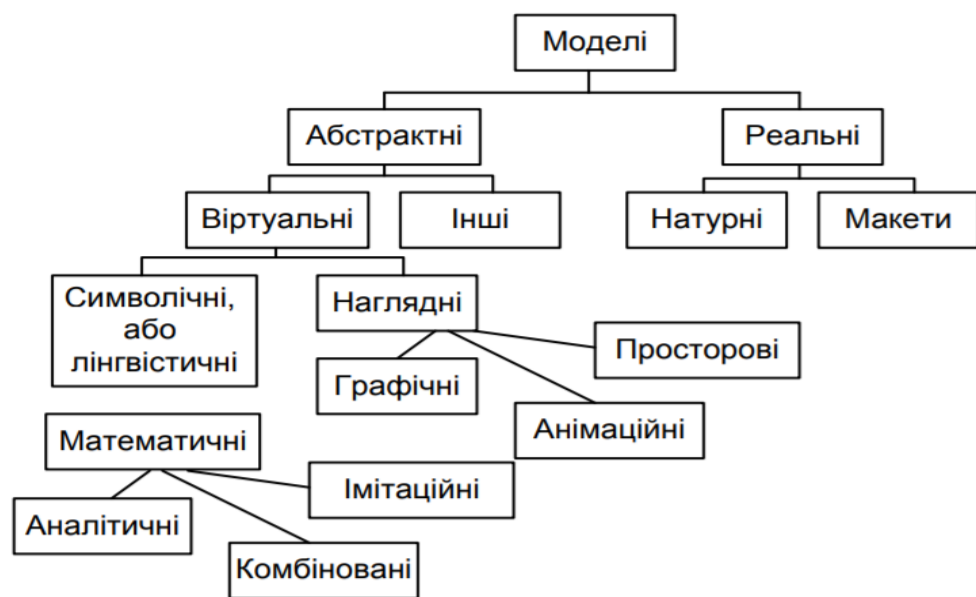


Рисунок 1.5 – Основні типи моделей

Наглядні моделі залежно від способу реалізації можна поділити на дво- або тривимірні графічні, анімаційні і просторові. Графічні й анімаційні моделі широко використовуються для відображення процесів, які відбуваються в модельованій системі. Графічні моделі застосовуються в системах автоматизованого проектування (computer-aided design, СА). Для відтворення тривимірних моделей за допомогою комп'ютера існує багато графічних

пакетів, найбільш поширені з яких: Corel DRAW, 3D Studio Max і Maya. Графічні моделі є базою всіх комп'ютерних ігор, а також застосовуються під час імітаційного моделювання для анімації.

Щоб побудувати модель у формальному вигляді, створюють символічну, або лінгвістичну, модель, яка відповідала б високому рівню абстрактного опису, як це було вказано вище. На базі її отримують інші рівні опису.

Основним видом абстрактної моделі є математична модель. Її вид залежить як від природи реального об'єкта, так і від задач дослідження об'єкта та необхідної достовірності і точності розв'язку цієї задачі. Будь-яка математична модель, як і всяка інша, описує реальний об'єкт лише з деякою мірою наближення до дійсності.

Для аналітичної моделі характерно те, що процеси функціонування елементів системи записуються у вигляді деяких функціональних співвідношень (алгебри, інтегрально-диференціальних, кінцево-різницевих і т. п.) або логічних умов. Аналітична модель може бути досліджена такими методами:

а) аналітичним, коли прагнуть отримати в загальному вигляді явні залежності для шуканих характеристик;

б) чисельним, коли, не вміючи розв'язувати рівняння в загальному вигляді, прагнуть отримати числові результати при конкретних початкових даних;

в) якісним, коли, не маючи розв'язку в явному вигляді, можна знайти деякі властивості розв'язку (наприклад, оцінити сталість розв'язку).

Якнайповніше дослідження процесу функціонування системи можна провести, якщо відомі явні залежності, що пов'язують шукані характеристики з початковими умовами, параметрами і змінними системи S . Проте такі залежності вдається отримати тільки для порівняно простих систем. При ускладненні систем дослідження їх аналітичним методом наштовхується на значні труднощі, які часто бувають нездоланими. Тому, бажаючи

використовувати аналітичний метод, в цьому випадку йдуть на суттєве спрощення початкової моделі, аби мати можливість вивчити хоча б загальні властивості системи. Таке дослідження на спрощеній моделі аналітичним методом допомагає отримати орієнтовні результати для визначення точніших оцінок іншими методами. Чисельний метод дозволяє досліджувати порівняно з аналітичним методом ширший клас систем, але при цьому отримані розв'язки носять приватний характер. Чисельний метод особливо ефективний при використанні комп'ютерів [11].

В окремих випадках дослідника системи можуть задовольнити і ті висновки, які можна зробити при використанні якісного методу аналізу математичної моделі. Такі якісні методи широко використовуються, наприклад, в теорії автоматичного управління для оцінки ефективності різних варіантів систем управління.

В імітаційній моделі відтворюється процес функціонування системи S у часі, імітуються елементарні явища, що складають процес, із збереженням їх логічної структури і послідовності протікання в часі, що дозволяє за початковими даними отримати зведення про стани процесу в певні моменти часу, які дають можливість оцінити характеристики системи S .

Основною перевагою використання імітаційних моделей порівняно з аналітичними моделями є можливість розв'язання складніших задач. Імітаційні моделі дозволяють досить просто враховувати такі фактори, як наявність дискретних і безперервних елементів, нелінійні характеристики елементів системи, численні випадкові дії тощо, які часто створюють труднощі при аналітичних дослідженнях. Нині імітаційне моделювання – найбільш ефективний метод дослідження великих систем, а часто і єдиний практично доступний метод отримання інформації про поведінку системи, особливо на етапі її проектування.

Коли результати, отримані при відтворенні на імітаційній моделі процесу функціонування системи S , є реалізаціями випадкових величин і функцій, тоді для знаходження характеристик процесу потрібне його

багаторазове відтворення з подальшою статистичною обробкою інформації і доцільно як метод машинної реалізації імітаційної моделі використовувати метод статистичного моделювання. Спочатку був розроблений метод статистичних випробувань, що є чисельним методом, який застосовувався для моделювання випадкових величин і функцій, імовірнісні характеристики яких співпадали з розв'язками аналітичних задач (така процедура отримала назву метода Монте-Карло). Потім цей прийом почали застосовувати і для машинної імітації з метою дослідження характеристик процесів функціонування систем, схильних до випадкових дій, тобто з'явився метод статистичного моделювання [12].

Таким чином, методом статистичного моделювання надалі називатимемо метод машинної реалізації імітаційної моделі, а методом статистичних випробувань (Монте-Карло) називатимемо чисельний метод розв'язання аналітичних задач.

Метод імітаційного моделювання дозволяє розв'язувати задачі аналізу великих систем S , включаючи задачі оцінки: варіантів структури системи, ефективності різних алгоритмів управління системою, впливу зміни різних параметрів системи. Імітаційне моделювання може бути покладене також в основу структурного, алгоритмічного і параметричного синтезу великих систем, коли потрібно створити систему із заданими характеристиками при певних обмеженнях, яка є оптимальною за деякими критеріями оцінки ефективності.

Використання комбінованих (аналітико-імітаційних) моделей при аналізі і синтезі систем дозволяє об'єднати переваги аналітичних й імітаційних моделей. При побудові комбінованих моделей проводиться попередня декомпозиція процесу функціонування об'єкта на складові підпроцеси, і для тих з них, де це можливо, використовуються аналітичні моделі, а для решти підпроцесів будуються імітаційні моделі. Такий комбінований підхід дозволяє охопити якісно нові класи систем, які не можуть бути досліджені з використанням тільки аналітичного й імітаційного моделювання окремо.

На відміну від абстрактних, реальні моделі існують у природі, і з ними можна експериментувати. Реальні моделі – це такі моделі, в яких хоча б один компонент є фізичною копією реального об'єкта. Залежно від того, в якому співвідношенні перебувають властивості системи і моделі, реальні моделі можна поділити на натурні і макетні [13].

Натурні (фізичні) моделі – це існуючі системи (або їх частини), на яких ведуться дослідження. Натурні моделі повністю адекватні реальній системі, що дає можливість отримувати високу точність і достовірність результатів моделювання. Істотні недоліки натурних моделей – це неможливість моделювання критичних й аварійних режимів їх роботи і висока вартість.

Макетні моделі – це реально існуючі моделі, що відтворюють модельовану систему в певному масштабі. Іноді такі моделі називаються масштабними. Параметри моделі і системи відрізняються між собою. Числове значення цієї відмінності називається масштабом моделювання, або коефіцієнтом схожості. Ці моделі розглядаються в рамках теорії схожості, яка в окремих випадках передбачає геометричну схожість оригіналу і моделі для відповідних масштабів параметрів. Прості макетні моделі – це пропорційно зменшені копії існуючих систем, які відтворюють основні властивості системи або об'єкта залежно від мети моделювання. Макетні моделі широко використовуються під час вивчення фізичних та аеродинамічних процесів, гідротехнічних споруд і багатьох інших технічних систем.

Залежно від можливості змінювати в часі свої властивості моделі поділяються на статичні і динамічні. Статичні моделі, на відміну від динамічних, не змінюють своїх властивостей в часі. Динамічні моделі, як правило, є імітаційними. Залежно від того, яким чином відтворюються в часі стани моделі, розрізняють дискретні, неперервні і дискретно-неперервні (комбіновані) моделі.

Відповідно до співвідношень між станами системи і моделі розрізняють детерміновані і стохастичні моделі. Останні, на відміну від детермінованих

моделей, враховують імовірнісні явища і процеси, що відбуваються в системі [13].

Враховуючі ці данні було обрано імітаційну модель. На відміну від інших видів моделей вона дозволяє розв'язувати складні задачі. Є найбільш ефективний метод дослідження великих систем, а часто і єдиний практично доступний метод отримання інформації про поведінку системи, особливо на етапі її проектування.

1.3 Програмні засоби моделювання технологічних процесів

Важливим моментом у процесі моделювання роботизованих виробничих ділянок є вдалий вибір мови або пакета програм імітаційного моделювання. Серед основних вимог, які висуваються до сучасних мов програмування, є: зручність опису виробничого процесу, що моделюється; зручність введення вхідних даних щодо виробничого процесу, внесення змін до структури і параметрів моделі процесу; ефективність засобів аналізу і відображення результатів моделювання виробничого процесу.

Для розв'язання задачі моделювання роботизованих виробничих ділянок можна використати мови загального призначення (МЗП) або мови імітаційного моделювання (МІМ).

Прикладами МЗП, які найбільш широко використовувалися для програмування задач моделювання виробничих процесів, Java, C++, C#, Python. Основною перевагою МЗП є їхня універсальність. Сьогодні вони використовуються здебільшого для створення пакетів програм моделювання.

Основною перевагою МІМ є зручність програмування моделей роботизованих виробничих ділянок і методів їх дослідження. МІМ залежно від способу формування системного часу моделювання поділяють на неперервні, неперервно-дискретні і дискретні [13].

Неперервні мови призначені для моделювання неперервних у часі технологічних процесів, які описуються диференціальними, різницеvими або

алгебраїчними рівняннями. До мов цієї групи належать, зокрема, MIMIC, Dynamo.

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

Дискретні мови призначено для опису дискретних технологічних процесів.

Характерною рисою мов цієї групи є наявність у них засобів формування динамічних списків подій, які упорядковуються у часі. Дискретні мови (SIMSCRIPT, Simula, GPSS) орієнтовані на планування подій, перегляд видів діяльності та процесів [13].

У багатьох неперервних і дискретних мовах сьогодні створюються комбіновані можливості. Так до складу мови GPSS W включено блок Integrate, який дозволяє проводити імітаційне моделювання неперервних процесів. Пакети неперервного моделювання процесів Stella і Think мають вбудовані елементи для дискретного моделювання.

1.4 Висновки до 1 розділу

Основаючись на дослідженні роботизованих виробничих ділянок як об'єктів для моделювання робиться вибір в моделювання процесу роботи такої роботизованої ланки, як технологічний процес(ТП) виготовлення МЕМС-акселерометрів. Для цього потребуються більш поглибленні дослідження в методах та підходах в моделюванні процесів.

2 ВИБІР ПІДХОДІВ ДО МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИЗОВАНОЇ ВИРОБНИЧОЇ ДІЛЯНКИ

2.1 МЕМС-акселерометри як об'єкти виробництва

Для імітаційного моделювання роботизованої виробничої ділянки за основу було взято матеріал статті [18], де розглядалось впровадження таких технологій, як Industry 4.0 та IoT.

Використання таких технологій дозволяє застосовувати великі обчислювальні ресурси, їх швидке нарощування та їх збільшення. В цих технологіях насамперед використовуються сучасні технічні засоби автоматизації(регулятори, сенсори, виконавчі пристрої), які забезпечують необхідну точність та швидкість. Ці технології мають малі габарити, що в свою чергу означає, що вони є досить низьке енергопостачання та вартість. Зважаючи на це, ці технології застосовують датчики з використанням МЕМС.

МЕМС акселерометри являють собою складовою частиною багатьох автоматизованих систем широкого спектру задач. У в'язку з їх актуальністю та широкому застосуванню вони є пріоритетною технологією для наукових досліджень, метою яких є розробка їх нових конструктивних рішень в плані ефективного використання їх фізичних властивостей, які ґрунтуються на особливостях конструкцій чутливого елемента (далі – ЧЕ) та датчика. Розробка та технологія виробництва МЕМС акселерометрів є складною науковою задачею розробки їх процесу виготовлення з урахуванням вимог до необхідних функціональних та геометричних параметрів. Сучасні технологічні методи та прийоми мікроелектроніки широко використовуються в виготовленні МЕМС, тому є безліч варіантів технологічних процесів та їх послідовностей. Зважаючи на сказане вище, все сильніше зростає потреба в нових системах автоматизованого проектування, які задовольняють потреби в

синтезу ефективних і оптимальних технологічних процесах (далі – ТП). При такому розвитку підходи до ТП виготовлення МЕМС акселерометрів мають враховувати вимоги до стандартів Industry 4.0, що передбачають зворотній зв'язок між різними частинами підприємства, для оперативної роботи систем автоматизованого проектування до виробничих умов отримувати необхідну і достатню інформацію з великого потоку. На сьогоднішній день особливе значення мають такі питання, як: автоматизація синтезу ТП з урахуванням технічної бази підприємства, робота підсистем під різним рівнем навантаження. Всі ці питання можна вирішити побудовою імітаційної моделі цього ТП, яка дозволить відстежити її динаміку та отримати динамічні характеристики для подальшого їх використання в оптимізації ТП.

2.2 Структура технологічного процесу виготовлення МЕМС-акселерометра

Усі ТП виготовлення МЕМС-акселерометрів являють собою систему з послідовно-паралельними операцій. В цьому разі описується реалізація ТП з кінцевою множиною видів міакселерометрів та кінцевих множин технологічного обладнання. Процес виготовлення МЕМС акселерометра включає множини операцій. Кожний МЕМС акселерометр співвідноситься на кожну операцію та зіставляється з множиною технологічного обладнання.

Операції, які працюють паралельно, використовують загальну подачу сировини та її підготовку до подачі. Ці процеси потребують складання графіків роботи для мінімізації виробничих витрат як для окремих процесів, так і для виробництва для зниження витрат виробництва.

ТП виготовлення МЕМС різняться продуктивністю та собівартістю, які в свою чергу відрізняються особливою послідовністю зміни показників якості. Головною метою є деяка рівновага між забезпеченням заданих параметрів якості та оптимальних витрат матеріальних ресурсів та часу, що можна досягнути за рахунок вибору черговості та змісту технологічних операцій.

Технічні обладнання, що використовуються на лініях ТП виготовлення МЕМС акселерометрів, являють собою автоматизованою робочою ланкою по якій йде матеріальний потік, який має початок та кінець операції. Для узгодження цих операцій при послідовних операцій виготовлення МЕМС акселерометра їх синхронізація повинна бита зіставлена так, щоб початок і кінець операції повинен проходить без простою обладнання.

При цьому необхідно синхронізувати роботи технологічної лінії так, щоб мінімізувати число виробничих змін, скоротити число переналадок завантаженням більш щільним завантаженням технологічного обладнання.

Враховуючи сказане вище було взято ТП виробництва МЕМС акселерометра, яка складається з чотирьох етапів.

В перший етап входить вибір матеріалу та його аналіз, його подальша застосовування в виробленні перших підкладок та підготовка їх до застосовування в наступних етапах.

Другий етап включає в себе множину процесів для отримання чутливого елемента (далі – ЧЕ). В етап входять операції отримання елементарних елементів, які потім беруть участь в операціях виготовлення компонентів ЧЕ. З отриманих компонентів збирається ЧЕ.

Окремим етапом йде підбір сировини та виготовлення з неї корпусів для МЕМС акселерометрів.

Останнім етапом йде сама складання МЕМС-акселерометра з отриманих частин ЧЕ та корпусу. Також в етапі окремою операцією йде вирощування кристалу та його з'єднання з іншими компонентами МЕМС акселерометра.

Структуру ТП виготовлення МЕМС-акселерометра можна побачити на рис. 2.1:

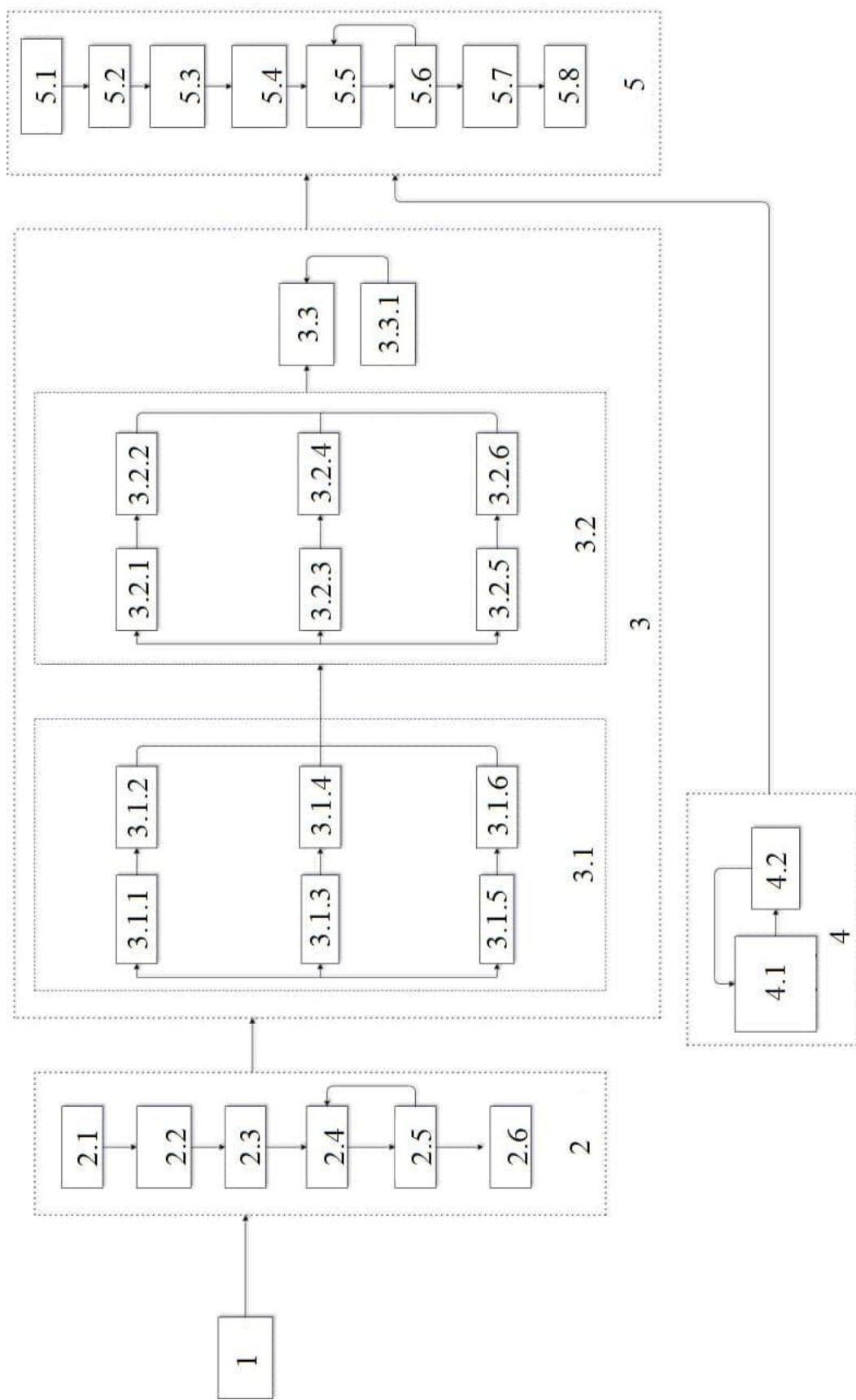


Рисунок 2.1 – Схема ТП виготовлення MEMS-акселерометра

На рис. 2.1 є такі позначення:

- 1 – матеріали;
- 2 – етап підготовки підложки;
 - 2.1 – аналіз сировини;
 - 2.2 – порізка на пластини;
 - 2.3 – контроль порізки;
 - 2.4 – хімічна обробка;
 - 2.5 – контроль порізки;
 - 2.6 – сушіння пластин;
- 3 – етап отримання ЧЕ;
 - 3.1 – операції отримання елементарних елементів;
 - 3.1.1 – елементарний елемент 1;
 - 3.1.2 – елементарний елемент 2;
 - 3.1.3 – елементарний елемент 3;
 - 3.1.4 – контроль якості;
 - 3.1.5 – контроль якості;
 - 3.1.6 – контроль якості;
 - 3.2 – операції отримання компонентів ЧЕ;
 - 3.2.1 – компонент 1;
 - 3.2.2 – компонент 2;
 - 3.2.3 – компонент 3;
 - 3.2.4 – контроль якості;
 - 3.2.5 – контроль якості;
 - 3.2.6 – контроль якості;
 - 3.3 – складання та монтаж ЧЕ;
 - 3.3.1 – контроль якості з'єднань;
- 4 – етап отримання корпусів МЕМС-акселерометрів;
 - 4.1 – операції отримання корпусів МЕМС-акселерометрів;
 - 4.2 – контроль якості;
- 5 – етап складання та монтажу МЕМС-акселерометрів; контроль якості;

- 5.1 – кристалографія;
- 5.2 – оцінка якості;
- 5.3 – шліфування, полірування кристалів;
- 5.4 – монтаж кристалів в корпуси;
- 5.5 – з'єднання виводів з кристалом;
- 5.6 – контроль з'єднань;
- 5.7 – установка в корпусі та герметизація;
- 5.8 – вихідний контроль.

2.3 Підходи до моделювання виробничих технологічних процесів

ТП виготовлення МЕМС акселерометра представлена як багатоканальна система масового обслуговування. Для її моделювання потрібно обрати один із методів та підходів до моделювання. Головною метою моделі буде з максимальною точністю змодельовати її роботу, знайти вихідні динамічні характеристики роботи ТП виробництва МЕМС акселерометра. Для цього необхідно провести дослідження в таких підходах моделювання, як дискретно-детермінований та неперервно-стохастичний.

2.3.1 Дискретно-детермінований підхід

У межах дискретно-детермінованого підходу до моделювання виробничих процесів змінні вхідного впливу $x(t)$, впливу зовнішнього середовища $v(t)$ і власні параметри $h(t)$ роботизованої виробничої ділянки як об'єкта моделювання вважаються детермінованими і такими, що змінюються у дискретному часі t . Цей підхід покладено в основу математичного апарату теорії скінчених автоматів. На основі цієї теорії об'єкт подається у вигляді автомата, який переробляє дискретну інформацію та змінює свої внутрішні стани лише в допустимі наперед задані моменти часу [14].

Скінченним називається автомат, у якого множини допустимих внутрішніх станів, вхідних і вихідних сигналів є скінченними. Формально скінченний автомат можна подати як математичну схему (F -схему), яка визначається шістьма елементами:

- множиною вхідних сигналів X ;
- множиною вихідних сигналів Y ;
- скінченною множиною внутрішніх станів Z ;
- початковим станом $z_0 \in Z$;
- функцією переходів $\varphi(z, x)$;
- функцією виходів $\psi(z, x)$.

Автомат, що задається F -схемою виду $F = \langle X, Y, Z, z_0, \varphi, \psi \rangle$, функціонує в дискретному часі, моментами якого є такти. У кожному t -му такті на вхід автомата, який перебуває у стані $z(t)$, подається деякий сигнал $x(t)$, на який автомат реагує переходом у $(t+1)$ -му такті у новий стан $z(t+1)$ з видачою вихідного сигналу.

Розрізняють детерміновані скінчені автомати 1-го і 2-го роду. Система рівнянь, яка описує роботу детермінованого скінченого автомата 1-го роду має вигляд:

$$z(t+1) = \varphi[(z(t), x(t)], \quad y(t) = \psi [z(t), x(t)], \quad t=0, 1, 2, \dots \quad (2.1)$$

Автомат, що функціонує за законом (2.1) називається автоматом Мілі.

Система рівнянь для автомата 2-го роду має вигляд:

$$z(t+1) = \varphi[(z(t), x(t)], \quad y(t) = \psi [z(t), x(t-1)], \quad t=0, 1, 2, \dots \quad (2.2)$$

Автомат 2-го роду, для якого функція виходів $y(t) = \psi [z(t)]$ не залежить від вхідної змінної, називається автоматом Мура [13].

Закони функціонування детермінованих скінченних автоматів можуть бути подані у табличному, матричному або графічному вигляді.

При табличному і матричному способах подання скінченного автомата рядки відповідають вхідним сигналам автомата, а стовпці – його станам (табл. 2.1). На перетині i -го рядка та j -го стовпця таблиці переходів міститься відповідне значення функції переходів $\varphi[z_i, x_j]$, а в таблиці виходів – значення функції виходів $\psi[z_i, x_j]$.

Таблиця 2.1 – Таблиці переходів і виходів скінченного автомата

Входи	Стани автомата			Стани автомата		
	z_0	z_1	z_2	z_0	z_1	z_2
x_1	z_2	z_0	z_0	y_1	y_1	y_2
x_2	z_0	z_2	z_1	y_1	y_2	y_1

Спрямований граф скінченного детермінованого автомата є набором вершин, що відповідають різним станам автомата і з'єднуючих їх дуг, які відображають переходи автомата (рис. 2.2).

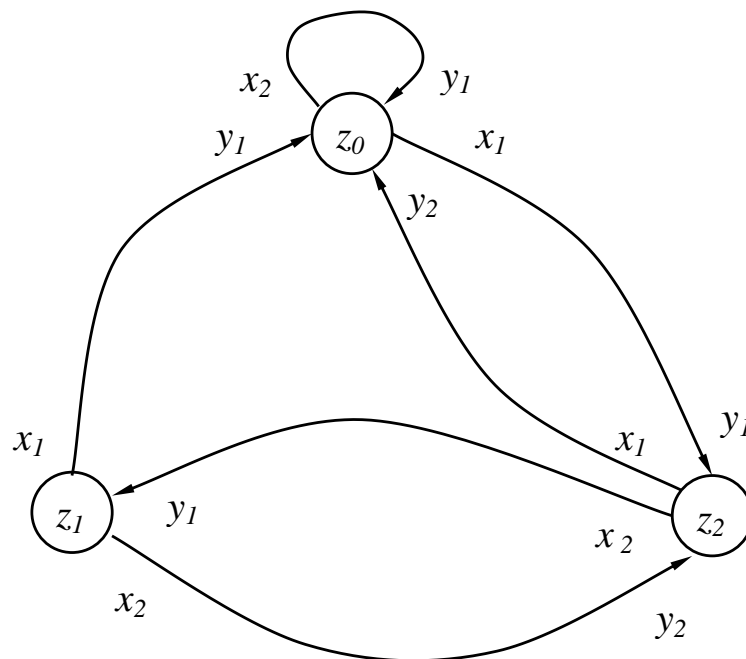


Рисунок 2.2 – Граф автомата, що поданий у табл. 2.1

Детерміновані скінчені автомати є зручним засобом опису процесів функціонування роботів, тривалості елементарних циклів у яких є

постійними величинами. Дослідження моделей у межах дискретно-детермінованого підходу здійснюється засобами імітаційного моделювання [15].

2.3.2 Безперервно-стохастичний підхід

Особливості неперервно-стохастичного підходу до моделювання роботизованої виробничої ділянки розглянемо на прикладі використання як типових математичних схем систем масового обслуговування (Q -схем).

Системи масового обслуговування є класом математичних схем, для формалізації процесів функціонування систем, у яких можливе виникнення черг та, які за своєю суттю є процесами обслуговування.

Характерним для роботи таких об'єктів є стохастичний характер процесу функціонування (випадкова поява заявок на обслуговування і завершення обслуговування у випадкові моменти часу) [15].

У елементарному акті обслуговування виділяються дві складові: очікування обслуговування заявкою і власне обслуговування заявки. Це можна подати у вигляді приладу обслуговування Π_i , що складається з накопичувача (або черги) заявок H_i , у якому може водночас перебувати $l_i = \overline{0, L_i}$ заявок (де L_i – ємність i -го накопичувача), і каналу обслуговування K_i (рис. 2.3). На елементи приладу Π_i надходять потоки подій: у накопичувач H_i – потік заявок (матеріалів, заготівок, деталей тощо) w_i ; на обслуговуючий канал K_i – потік обслуговувань (тривалість виконання операцій ТП) u_i .

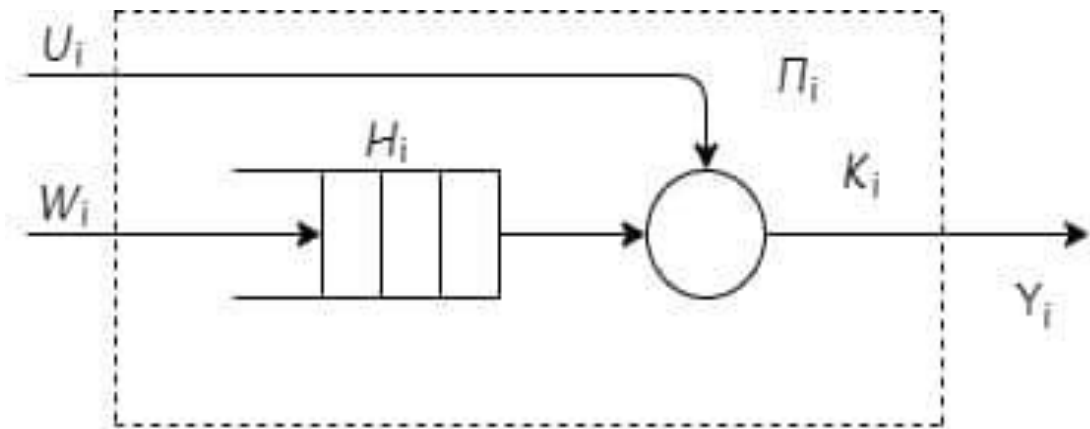


Рисунок 2.3 – Структурна схема обслуговуючого приладу, що імітує роботу одиничного обладнання

Як потік подій розглядається їх послідовність, що відбуваються одна за одною у випадкові моменти часу. Розрізняють потоки однорідних і неоднорідних подій. Потік подій називається однорідним, якщо він характеризується тільки моментами їх надходження. Потік неоднорідних подій характеризується не тільки моментами настання, але й ознаками (тип матеріалів, заготівок, деталей тощо; приналежність до можливості виконання операції на тому чи іншому обладнанні тощо) подій [16].

Процес функціонування приладу обслуговування Π_i (обладнання ТП) можна подати як процес зміни станів його елементів у часі $z_i(t)$. Перехід у новий стан означає зміну кількості заявок, які в ньому перебувають (у каналі K_i чи в накопичувачі H_i). Вектор станів для Π_i , що імітує роботу одиничного обладнання, має вигляд $\vec{z}_i = (z_i^H, z_i^K)$, де z_i^H – стан накопичувача; z_i^K – стан каналу ($z_i^K = 0$ – канал вільний, $z_i^K = 1$ – канал зайнятий).

Під час моделювання більшості технологічних об'єктів використовуються не окремі прилади обслуговування, а їх сукупності. Якщо канали K_i різних приладів обслуговування, що імітують технологічне обладнання, з'єднані паралельно, то має місце багатоканальна Q -схема.

Якщо прилади P_i та їхні паралельні композиції з'єднані послідовно, то має місце багатозадачна Q -схема. В останньому випадку для задання Q -схеми необхідно використати оператор сполучення R , що відображує взаємозв'язок елементів структури (технологічного обладнання) між собою [17].

Виробничі ТП можуть подаватись розімкнутими й замкнутими Q -схемами. У розімкнутій Q -схемі вихідний потік не може знову надійти на попередній елемент (зворотний зв'язок відсутній). У замкнутих Q -схемах існують зворотні зв'язки, за якими заявки рухаються в напрямку, зворотному руху вхід-вихід. У технологічних процесах це відповідає ситуаціям без повторної та з повторною обробкою.

Для повного задання Q -схеми необхідно також описати алгоритм її функціонування A , який визначає набір правил поведінки заявок у системі в різних ситуаціях. Залежно від місця виникнення подібних ситуацій розрізняють дисципліни очікування заявок у накопичувачах й обслуговування заявок елементарними каналами.

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.

2.4 Метод статистичного моделювання

У процесах дослідження і проектування виробничих систем при

побудові та реалізації комп'ютерних моделей (аналітичних та імітаційних) широко використовується метод статистичних випробувань (Монте-Карло). Він ґрунтується на використанні випадкових чисел (можливих значень випадкових величин із заданими розподілами імовірностей) [17].

Статистичне моделювання є методом отримання за допомогою комп'ютера статистичних даних щодо процесів, які відбуваються у досліджуваній виробничій системі S . Для отримання оцінок функціональних характеристик виробничої системи статистичні дані обробляються і класифікуються з використанням методів математичної статистики.

Сутність методу статистичного моделювання зводиться до побудови для процесу функціонування досліджуваної виробничої системи S моделювального алгоритму, який імітує поведінку і взаємодію її елементів з урахуванням детермінованих або випадкових вхідних впливів (надходження заготовок, матеріалів, деталей тощо) і впливів зовнішнього середовища E , і реалізації цього алгоритму з використанням програмно-технічних засобів комп'ютера [17].

Розрізняють дві області застосування методу статистичного моделювання: для дослідження стохастичних процесів та для розв'язання детермінованих задач виробництва. Основною ідеєю, що використовується у процесі розв'язання детермінованих задач проектування чи управління виробництвом методом статистичного моделювання, є заміна детермінованої задачі еквівалентною схемою стохастичної системи. Вихідні характеристики еквівалентної системи збігаються з результатом розв'язання детермінованої задачі. При цьому замість точного розв'язку задачі знаходиться наближений, похибка якого зменшується зі збільшенням кількості реалізацій моделювального алгоритму N .

Як результат статистичного моделювання виробничої системи S отримують серію часткових значень шуканих величин або функцій. Їх статистична обробка отримати відомості щодо поведінки реального виробничого об'єкта або процесу в довільні моменти часу (рис. 2.4). Якщо

кількість реалізацій моделювального алгоритму N є достатньою, то отримані результати моделювання системи здобувають статистичну стійкість. Вони з достатньою точністю можуть бути прийняті як оцінки шуканих характеристик процесу функціонування виробничої системи S [17].

Теоретичною основою методу статистичного комп'ютерного моделювання виробничих систем є граничні теореми теорії ймовірностей (центральна гранична, Бернуллі, Чебишева, Пуассона), які гарантують якість статистичних оцінок при великій кількості випробувань (реалізацій) N .

Практично прийнятні в ході статистичного моделювання кількісні оцінки характеристик виробничих систем часто можуть бути отримані вже за порівняно невеликих значень кількості експериментів N .

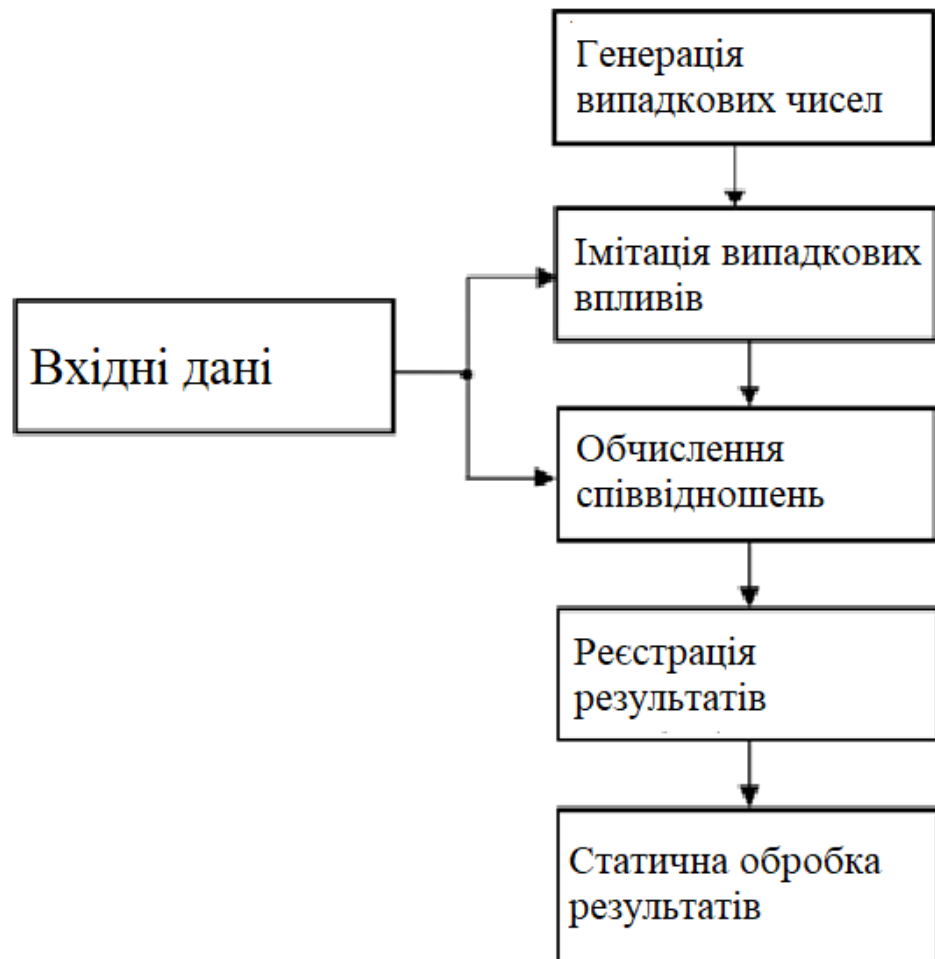


Рисунок 2.4 – Загальна схема методу статистичного моделювання виробничих систем

2.5 Оцінка точності результатів моделювання

Для забезпечення статистичної стійкості результатів статистичного моделювання відповідні оцінки обчислюють на основі великої кількості реалізацій N .

Нехай як оцінка деякого оцінюваного параметра a , що визначається за результатами статистичного моделювання x_i , $i = \overline{1, N}$, обрана величина \bar{x} . Похибка (точність) оцінки визначається за співвідношенням: $e = |a - \bar{x}|$. Ймовірність α того, що похибка ε не перевищить наперед задане значення ε^* , називається достовірністю оцінки

$$P[|a - \bar{x}| \leq \varepsilon^*] = \alpha. \quad (2.4)$$

У процесі моделювання необхідно встановити залежність між точністю, достовірністю результатів і кількістю реалізацій моделювального алгоритму N , за якими вони визначаються.

Будемо вважати, що метою статистичного експерименту з моделлю M_M роботизованої виробничої ділянки як системи S є визначення оцінки \bar{p} ймовірності появи події $p = p(A)$ (наприклад, того, що накопичувач комплектуючих деталей буде переповнений). Як оцінку ймовірності використаємо частоту настання події $\bar{p} = n/N$ (де n – кількість випадків настання події A). У цьому випадку похибка оцінки становитиме

$$\varepsilon = t_\alpha \sqrt{(p(1-p)/N)}, \quad (2.5)$$

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

Із формули (2.5) визначимо кількість експериментів (реалізацій моделювального алгоритму), необхідних для отримання оцінки \bar{a} з похибкою не вище ніж ε і достовірністю α .

$$N = t_{\alpha}^2 p(1 - p) / \varepsilon^2. \quad (2.6)$$

При визначенні оцінки математичного очікування (наприклад часу виготовлення продукції, заповнення накопичувачів перед обладнанням тощо) використаємо середнє арифметичне $x = (1 / N) \sum x_i$.

Відповідні формули (2.5) і (2.6) для оцінки похибки і необхідної кількості експериментів матимуть вигляд

$$\varepsilon = t_{\alpha} \sigma / \sqrt{N}; \quad (2.7)$$

$$N = t_{\alpha}^2 \sigma^2 / \varepsilon^2, \quad (2.8)$$

де σ – середньоквадратичне відхилення оцінки \bar{x} .

Якщо за результатами статистичного моделювання роботизованої виробничої ділянки здійснюється оцінка і ймовірності \bar{p} , і математичного очікування \bar{x} , необхідно використати обидві пари формул (2.5) – (2.6) і (2.7) – (2.8) та оберемо для необхідної кількості експериментів (реалізацій моделювального алгоритму) реалізацій більше з отриманих значень [17].

2.6 Висновки до 2 розділу

На основі досліджених даних о підходах до моделювання робиться вибір в сторону будування імітаційної моделі неперервно-стохастичним підходом за допомогою будування Q-схеми.

3 РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ТА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1 Вибір мови програмування та середовище розробки

Для того, що побудувати імітаційну модель ТП виготовлення MEMC-акселерометра, по-перше необхідно побудувати Q-схему роботи ТП виготовлення MEMC-акселерометра. По цій Q-схемі потім пишеться програмний код. Для написання цього програмного коду необхідно обрати середовище та мову програмування. Мова програмування повинна бути спеціалізована на будівництві моделей. На сьогоднішній день найпопулярнішими мовами програмування, які орієнтовані на будівництво моделей, є AnyLogic та GPSS.

3.1.1 Система програмування імітаційних моделей AnyLogic

AnyLogic не зовсім є самою мовою програмування, це система, яка оснований на мові програмування Java. Середовищем для програмування для цієї системи найчастіше всього є Eclipse.

Завдяки інструментам, бібліотекам та графічним інтерфейсам AnyLogic можливо своєчасне реалізування моделей широкого спектру задач, а саме: логістика, виробництво, бізнес, стратегічний розвиток ринку та компаній. Так як AnyLogic оснований на гнучкій мові програмування Java, це дозволяє враховувати будь-який аспект процесу системи, що моделюється, з достатнім рівнем деталізації. І як в java, AnyLogic підтримує значну кількість бібліотек с готовими розробленими моделями та модулями.

Прикладне застосування AnyLogic може розповсюджуватися на різні рівні систем, а саме може бути застосовано на мезо-, мікро- та макрорівнях. Існує безліч додатків прикладного застосування середовища AnyLogic – від функціонування управління економікою до функціонування підприємств.

Моделі логічних мереж та транспортні системи є найрозповсюдженими класами імітаційних моделей

Середовище AnyLogic також часто використовують оригінальні додатки в нових напрямках дослідження процесів та систем в економіці. Так, наприклад, Середовище AnyLogic розповсюджено в нових гілках економіки – інформаційна та поведінкова економіка.

На базі комплексу моделей досліджується прогнозування поведінки користувачів різної продукції та послуг. Різні об'єкти стали ціллю промислового впровадження в моделюванні. Це видно в порівняльному аналізі результаті імітаційних експериментів, які були проведені на різних територіальних одиницях для різних соціальних верств населення.

Використання середовища AnyLogic досить корисно в ситуаціях з непередбачуваними розвитками подій, великою кількістю елементів зі складними зв'язками між ними.

Отже, імітаційні експерименти, які проводяться на середовищі AnyLogic, надають такі можливості:

- побудова імітаційних моделей сценарію розвитку подій для знаходження оптимального рішення;
- робота складних систем може бути представлена у вигляді окремих операцій, змін їхніх станів та їх зв'язку;
- порівняння модельного представлення процесу з реальною з метою її оптимізації.

3.1.2 Мова програмування GPSS

GPSS (General Purpose Simulation System) – мова програмування, яка спеціалізується на будівництві різнопланових імітаційних моделей систем масового обслуговування.

GPSS має власну платформу GPSS W, яка забезпечує отримання кількісних та якісних результатів моделювання, при цьому система залишається керованою та прозорою в реальному часу.

На відміну від AnyLogic, система GPSS не може реалізувати отримані результати в графічній схемі, тому що не має вбудованих графічних архетипів, з якими можна візуалізувати отримані дані. Також так як GPSS World є більш трудомістким в порівнянні з системою AnyLogic із-зі відсутності відповідних візуальних налагоджених моделей.

Але на відміну від системи AnyLogic, GPSS World має середу моделювання, яка дозволяє програмну реалізацію імітаційної моделі з її подільною візуальною реалізацією.

Отже, середовище GPSS має такі особливості:

- транслятор моделі високої ефективності;
- об'єктно-орієнтований інтерфейс будування моделі;
- експерименти, які можуть програмуватися та автоматично аналізуватися в реальному часі;
- бібліотека процедури PLUS TM,
- об'єкти моделювання можуть виконувати велику множину задач;
- призначений для користувача і програмний введення і виведення даних;
- більш ніж 20 вбудованих розподілів ймовірності;
- інтегрований мову програмування (PLUS TM);
- гарячі клавіші для швидких взаємодій;
- нові блоки GPSS: ADOPT , DISPLA PC, PL US, INTEGRA TION OPEN /CLOSE / READ / WRITE / SEEK, блоки, що підтримують введення / виведення даних імітаційної моделі;
- 13 різних графічних типів уявлень (графіків) результатів моделювання;
- автоматичне інтегрування звичайних диференціальних рівнянь;

- повна сумісність з мовами програмування GPSS / PC™;
- автоматичні генератори експерименту;
- пакетний режим з керованим виходом;
- відладчик коду з широкими можливостями;
- можливість динамічного виклику зовнішніх функцій.

Саме із-за прозорості та керованості система для програмування моделі ТП виготовлення МЕМС-акселерометра була обрана мова програмування GPSS.

3.2 Побудова Q-схеми

Для будування Q-схеми ТП виробництва МЕМС-акселерометрів необхідно формалізувати її. При будові структури було виділено три основних елемента: Д – джерела, К – канали обслуговування та Ч – черги.

Д1 – це джерела заготовки підкладки та сировина для отримання ЧЕ. Д2 – це сировина для отримання корпусу МЕМС-акселерометрів.

Етапи вибору сировини та підготовки підкладки до наступних етапів виробництва відображені в каналах Д та К1 відповідно.

Етап отримання елементарних елементів та контролю його якості відображений каналами К2, К3, К4 та К5, К6, К7 відповідно.

Етап отримання компонентів ЧЕ та їх контроль якості відображений каналами К8, К9, К10 та К11, К12, К13 відповідно.

На каналах К14 та К15 відображені етапи складання ЧЕ та його контроль якості.

Канали обслуговування являють собою етапи виготовлення МЕМС-акселерометра, які відповідають структурі виготовлення МЕМС-акселерометра (рис. 2.1) та відображаються на Q-схемі (рис. 3.1).

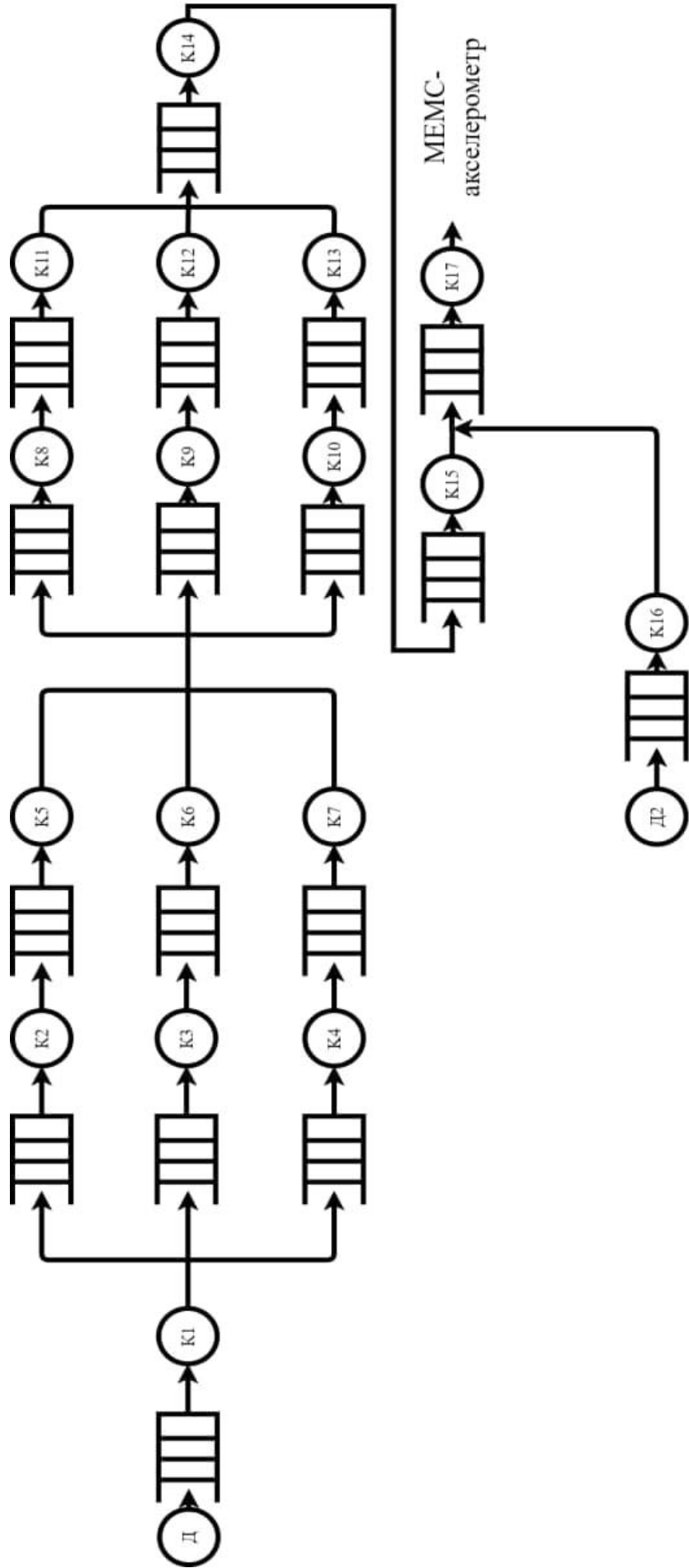


Рисунок 3.1 – Q-схема TP виготовлення MEMS-акселерометру

D2 та K16 відображають окремий етап вибору сировини та виготовлення корпусу для МЕМС-акселерометра.

K1 відображає власне складання МЕМС-акселерометра.

При імітаційному моделюванні також задаються вихідні дані часу роботи кожного каналу Q-схеми:

- t_1 – час вибору сировини та етапу підготовки підкладки;
- $t_2 - t_4$ – час на виконання операцій отримання елементарних елементів(балки, анкера та пластини);
- $t_5 - t_7$ – час на виконання операцій контролю якості отриманих елементів;
- $t_8 - t_{10}$ – час на виконання операцій отримання компонентів ЧЕ;
- $t_{11} - t_{13}$ – час на виконання операцій контролю якості отриманих компонентів ЧЕ;
- t_{14} – час на виконання операції складання ЧЕ;
- t_{15} – час на виконання операції контролю якості отриманих ЧЕ;
- t_{16} – час на виконання операції складання корпусу МЕМС-акселерометра;
- t_{17} – час на виконання операції складання МЕМС-акселерометра.

3.3 Опис програмного забезпечення

Основою імітаційної моделі стала типова структура ТП виготовлення МЕМС-акселерометра. Її вхідна інформація являє собою результатом синтезу ТП на основі методів багатокритеріальної оптимізації та методів інтелектуального аналізу даних.

Характеристики технологічних операцій оцінюються на виробництві, де береться реальне обладнання виробництва. Вхідні дані впродовж виробничого процесу змінюють свої значення.

Отже, маючи Q-схему та вихідні дані, можна побудувати імітаційну модель за допомогою обраної мови програмування GPSS. Для моделювання процесу необхідно обрати дані часу кожного процесу, максимально наближенні до реальних:

- $t_1 = 6 \pm 1$ хв – середній час вибору сировини та етапу підготовки;
- $t_2 - t_4 = 206 \pm 10, 223 \pm 13$ та 223 ± 12 хв – середній час на виконання операцій отримання балки, анкера та пластини відповідно;
- $t_5 - t_7 = 2$ хв – середній час на виконання операцій контролю якості отриманих елементів;
- $t_8 - t_{10} = 151 \pm 6, 163 \pm 10$ та 151 ± 9 хв – час на виконання операцій отримання пальців, пружин та анкерів відповідно;
- $t_{11} - t_{13} = 2$ хв – середній час на виконання операцій контролю якості отриманих компонентів ЧЕ;
- $t_{14} = 18$ хв – середній час на виконання операції складання ЧЕ;
- $t_{15} = 3$ хв – середній час на виконання операції контролю якості отриманих ЧЕ;
- $t_{16} = 14$ хв – середній час на виконання операції складання корпусу МЕМС-акселерометра;
- $t_{17} = 9$ хв – середній час на виконання операції складання МЕМС-акселерометра.

В процесі імітації роботи ТП виготовлення МЕМС-акселерометра враховується характер розподілу випадкових величин виконання операцій, значення якої отримується та коригується впродовж реальної роботи ТП за результатами оцінки роботи обладнання.

Перш за все відображується в програмі генерація надходження та етап підготовки (рис. 3.2):

```
GENERATE 10,2  
QUEUE K1  
SEIZE K1  
DEPART K1  
ADVANCE 6  
RELEASE K1
```

Рисунок 3.2 – Процес генерації сировини та етап підготовки підкладки

Потім йде розподіл підкладок по трьом операціям виготовлення елементарних елементів, а саме балка, анкери та пластин(рис. 3.3):

```
TRANSFER .5, met1  
TRANSFER .33, met2  
TRANSFER .16, met3
```

Рисунок 3.3 – Розподіл підкладок по трьом операціям

Слід зазначити, що підкладки надходять не рівномірно, це пов'язане з тим, що на етапі виготовлення компонентів ЧЕ при виготовленні компонентів потребуються різні елементарні елементи.

При розподілі підкладок проводиться етап виготовлення елементарних елементів. Щоб не захарашувати код програми, етап оцінки якості йде відразу після виготовлення.

Цей процес відображується на рисунках 3.4, 3.5 та 3.6:

```

MET1  QUEUE B
      SEIZE B
      DEPART B
      ADVANCE 206
      RELEASE B
      QUEUE KB
      SEIZE KB
      DEPART KB
      ADVANCE 2
      RELEASE KB|

```

Рисунок 3.4 – Операція виготовлення балки та її оцінка якості

```

MET2  QUEUE A
      SEIZE A
      DEPART A
      ADVANCE 223
      RELEASE A
      QUEUE KA
      SEIZE KA
      DEPART KA
      ADVANCE 2
      RELEASE KA
      TRANSFER , PROMEJ

```

Рисунок 3.5 – Операція виготовлення анкери та її оцінка якості

```

MET3  QUEUE PLA
      SEIZE PLA
      DEPART PLA
      ADVANCE 223
      RELEASE PLA
      QUEUE KP
      SEIZE KP
      DEPART KP
      ADVANCE 2
      RELEASE KP
      TRANSFER , PROMEJ

```

Рисунок 3.6 – Операція виготовлення пластини та її оцінка якості

Потім отримані елементарні елементи розподіляються по трьом операціям виготовлення компонентів ЧЕ. Як вище зазначалось, ці три компоненти потребують різні елементарні елементи: для виготовлення пальців потребується балка, анкера та пластина; для виготовлення пружини потребується балка та пластина; для виготовлення інерційної маси необхідна тільки балка. Виходячи с цього, балка є пріоритетним елементарним елементом, потім йдуть анкера та пластина по пріоритетності.

Сам розподіл має такий вигляд (рис. 3.7):

```
PROMEJ TRANSFER 5, met4
TRANSFER 33, met5
TRANSFER 16 ,met6
```

Рисунок 3.7 – Розподіл отриманих елементарних елементів по трьом компонентам

Потім йдуть операції виготовлення компонентів ЧЕ. Як воно було в етапі виготовлення елементарних елементів, операції оцінки якості компонентів йдуть відразу після операцій їх виготовлення. В програмному кодї воно виглядає так (рис. 3.8, 3.9 та 3.10):

```
MET4  QUEUE PL
        SEIZE PL
        DEPART PL
        ADVANCE 151
        RELEASE PL
        QUEUE KPL
        SEIZE KPL
        DEPART KPL
        ADVANCE 2
        RELEASE KPL
        TRANSFER , met7
```

Рисунок 3.8 – Операція виготовлення пальців та їх оцінка якості

```

MET5  QUEUE PR
      SEIZE PR
      DEPART PR
      ADVANCE 163
      QUEUE KPR
      SEIZE KPR
      DEPART KPR
      ADVANCE 2
      RELEASE KPR
      RELEASE PR
      TRANSFER ,met7

```

Рисунок 3.9 – Операція виготовлення пружин та їх оцінка якості

```

MET6  QUEUE IM
      SEIZE IM
      DEPART IM
      ADVANCE 151
      RELEASE IM
      QUEUE KIM
      SEIZE KIM
      DEPART KIM
      ADVANCE 2
      RELEASE KIM
      TRANSFER , met7

```

Рисунок 3.10 – Операція виготовлення інерційної маси та її оцінка якості

Після отримання компонентів чутливого елемента, йде етап його складання та його оцінка якості (рис 3.11 та 3.12):

```

MET7  QUEUE ZB,3
      SEIZE ZB
      DEPART ZB
      ADVANCE 18
      ASSEMBLE 3
      RELEASE ZB

```

Рисунок 3.11 – Операція складання чутливого елемента

```
QUEUE ZBKT  
SEIZE ZBKT  
DEPART ZBKT  
ADVANCE 3  
RELEASE ZBKT
```

Рисунок 3.12 – Оцінка якості зібраного чутливого елемента

Окремою операцією йде вибір сировини та виготовлення корпусу МЕМС-акселерометра (рис. 3.13):

```
GENERATE 10,5  
QUEUE KOR  
SEIZE KOR  
DEPART KOR  
ADVANCE 14  
RELEASE KOR
```

Рисунок 3.13 – Вибір сировини та виготовлення корпусу

І нарешті йде процес складання самого МЕМС-акселерометра (рис. 3.14):

```
-----  
QUEUE ZBR  
SEIZE ZBR  
DEPART ZBR  
ADVANCE 9  
RELEASE ZBR  
TERMINATE 1  
START 1000  
-----
```

Рисунок 3.14 – Етап складання МЕМС-акселерометра

3.4 Приклад застосування імітаційної моделі

Розглянемо детально етапи імітаційного моделювання ТП виготовлення МЕМС-акселерометра. Основною задачею цієї моделі буде оптимізація роботи технологічного процесу за рахунок знаходження на операційних каналах застою в черзі та час знаходження їх в черзі при різному часі надходження сировини в технологічних процес.

Отже, маючи імітаційну модель та час виконання всіх операцій в технологічному процесі, можна змодельовати процес та зробити висновки на отриманих результатах. Але перед цим треба знайти ще декілька змінних значень.

Якщо відомо час кожної операції, а саме: $t_1 = 6$ хв; $t_2 - t_4 = 206 \pm 10$, 223 ± 13 та 223 ± 12 хв; $t_5 - t_7 = 2$ хв; $t_8 - t_{10} = 151 \pm 6$, 163 ± 10 та 151 ± 9 хв; $t_{11} - t_{13} = 2$ хв; $t_{14} = 18$ хв. $t_{15} = 3$ хв; $t_{16} = 14$ хв; $t_{17} = 9$ хв.

Необхідно знайти загальних час складання МЕМС-акселерометра. Але так як операції отримання елементарних елементів та компонентів реалізуються паралельно, то слід з цих операцій обрати максимальний час, за який операція буде виконана. У свою чергу, для початку роботи операцій отримання компонентів, необхідно певна кількість елементарних елементів, а саме для виготовлення пальців необхідна балка, анкера та пластина, для пружини балка та пластина та для інерційної маси тільки балка.

Для початку роботи операцій отримання компонентів ЧЕ необхідно 3 балки, 2 пластина та 1 анкера. Отже, треба обрати найбільшу суму часу складання кожного елементарного елемента. При підсумованні часу виробництва найбільш часу потребується на виробництво балок, а саме 618 хв.

Найбільше часу на виробництво компонентів ЧЕ бере на себе виробництво пружин, а саме 163 хв.

Знаючи ці значення, можна їх всіх підсумувати для знаходження часу складання МЕМС-акселерометра за формулою (3.1):

$$T_3 = t_1 + t_e + t_k + t_{ke} + t_{kk} + t_{14} + t_{16} + t_{17}, \quad (3.1)$$

де t_e – найбільша сума часу виготовлення окремого елементарно го елемента;

t_k – найбільший час виготовлення окремого компоненту ЧЕ;

t_{ke} – загальний час оцінки якості елементарного елемента;

t_{kk} – загальний час оцінки якості компоненту ЧЕ.

При підсумуванні всіх операцій загальна кількість часу на отримання одного МЕМС-акселерометра становить $T_3 = 829$ хв чи близько 14 год.

Зазвичай, час робочої зміни становить 8 год, тобто на збірку одного МЕМС-акселерометра уходить майже два повних робочих дня. При роботі в 5 робочих днів чи робочого тижня виробляється 3 МЕМС-акселерометра. Якщо відомо, що на збірку чутливого елемента необхідно сировини в кількості 6 одиниць, а на збірку корпусу 1 одиниця, можна припустити що на 1 робочий тиждень виділяється 18 одиниць сировина на виготовлення чутливого елемента та 3 одиниці сировини на виготовлення корпусу МЕМС-акселерометра.

Задачею є прогнати три рази імітаційну модель роботи ТП виготовлення МЕМС-акселерометра за робочий тиждень, змінюючи при цьому час надходження на технологічний процес 18 одиниць сировини: на першому прогоні на технологічний процес надходить одразу 18 одиниць сировини; на другому 9 одиниць одразу, 9 після близько 414 хв; на третьому надходить одразу 6 деталей та 6 кожні 276 хв. Знайти найбільше значення виникнення черги на кожному етапі та найбільший час перебування сировини у черзі. Орієнтуючись на отримані значення, обрати найоптимальніший варіант часу надходження сировини на технологічний процес.

Слід зазначити, що K_e та K_k – це найбільші черги із трьох операцій отримання елементарних елементів та компонентів ЧЕ відповідно. А K_{ke} та K_{kk} – це операції контролю якості, яких проводиться за однаковим проміжком часу.

Прогнавши три рази імітаційну модель роботи ТП виготовлення МЕМС-акселерометра за робочий тиждень, змінюючи при цьому час надходження на технологічний, отримуємо такі результати (рис. 3.15 – 3.20):

```

GPSS World Simulation Report - DIPLOM.30.1

Thursday, December 03, 2020 21:34:56

START TIME      END TIME  BLOCKS  FACILITIES  STORAGES
0.000           636.000   93      12          0

NAME            VALUE
A               10001.000
B               10003.000
IM              10005.000
K1              10000.000
KA              10006.000
KB              10004.000
KP              10008.000
MET1            22.000
MET2            35.000
MET3            46.000
MET4            58.000
MET5            65.000
MET6            72.000
MET7            78.000
PI              10007.000
PL              10007.000
PLA             10002.000
ZB              10009.000
ZBKT            10010.000
ZBR             10011.000

```

Рисунок 3.15 – Перша частина першого прогону імітаційної моделі

```

FACILITY        ENTRIES  UTIL.   AVE. TIME AVAIL.  OWNER  PEND  INTER  RETRY  DELAY
K1               18  0.170   6.000  1          0    0    0    0    0
A                3  0.989  209.667  1          7    0    0    0    3
PLA              3  0.980  207.667  1          8    0    0    0    0
B                3  0.970  205.667  1          9    0    0    0    6
KB               2  0.006   2.000  1          0    0    0    0    0
IM               2  0.475  151.000  1          0    0    0    0    0
KA               2  0.006   2.000  1          0    0    0    0    0
PL               2  0.285  90.500  1          5    0    0    0    2
KP               2  0.006   2.000  1          0    0    0    0    0
ZB               3  0.085  18.000  1          0    0    0    0    0
ZBKT             3  0.014   3.000  1          0    0    0    0    0
ZBR              3  0.042   9.000  1          0    0    0    0    0

QUEUE           MAX CONT.  ENTRY  ENTRY(0)  AVE. CONT.  AVE. TIME  AVE. (-0)  RETRY
K1              16  0      18        1          1.358     48.000     50.824    0
A               5  3       6         1          3.585    380.000    456.000    0
PLA             2  0       3         1          0.967    205.000    307.500    0
B               8  6       9         1          6.066    428.667    482.250    0
KB              1  0       2         2          0.000     0.000     0.000    0
IM              1  0       2         2          0.000     0.000     0.000    0
KA              1  0       2         2          0.000     0.000     0.000    0
PL              3  2       4         1          1.489    236.750    315.667    0
KP              1  0       2         2          0.000     0.000     0.000    0
ZB              1  0       3         3          0.000     0.000     0.000    0
ZBKT            1  0       3         3          0.000     0.000     0.000    0
ZBR             1  0       3         3          0.000     0.000     0.000    0

FEC XN  PRI      BDT      ASSEM  CURRENT  NEXT  PARAMETER  VALUE
9        0      637.000  9      25      26
7        0      676.000  7      38      39
8        0      682.000  8      49      50
5        0      757.000  5      62      63

```

Рисунок 3.16 – Друга частина першого прогону імітаційної моделі

GPSS World Simulation Report - DIPLOM.33.1

Thursday, December 03, 2020 21:42:43

START TIME	END TIME	BLOCKS	FACILITIES	STORAGES
0.000	841.000	93	12	0

NAME	VALUE
A	10002.000
B	10003.000
IM	10005.000
K1	10000.000
KA	10008.000
KB	10004.000
KP	10006.000
MET1	22.000
MET2	35.000
MET3	46.000
MET4	58.000
MET5	65.000
MET6	72.000
MET7	78.000
PI	10012.000
PL	10007.000
PLA	10001.000
ZB	10009.000
ZBKT	10010.000
ZBR	10011.000

Рисунок 3.17 – Перша частина другого прогону імітаційної моделі

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME	AVAIL.	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
K1	8	0.056	5.875	1	8	0	0	0	1
PLA	3	0.536	150.333	1	7	0	0	0	0
A	2	0.530	223.000	1	0	0	0	0	0
B	2	0.490	206.000	1	0	0	0	0	0
KB	2	0.005	2.000	1	0	0	0	0	0
IM	2	0.359	151.000	1	0	0	0	0	0
KP	2	0.005	2.000	1	0	0	0	0	0
PL	1	0.180	151.000	1	0	0	0	0	0
KA	2	0.005	2.000	1	0	0	0	0	0
ZB	3	0.064	18.000	1	0	0	0	0	0
ZBKT	3	0.011	3.000	1	0	0	0	0	0
ZBR	3	0.032	9.000	1	0	0	0	0	0

QUEUE	MAX	CONT.	ENTRY	ENTRY(0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE.(-0)	RETRY
K1	2	1	9	3	0.049	4.556	6.833	0
PLA	1	0	3	3	0.000	0.000	0.000	0
A	1	0	2	2	0.000	0.000	0.000	0
B	1	0	2	2	0.000	0.000	0.000	0
KB	1	0	2	2	0.000	0.000	0.000	0
IM	1	0	2	2	0.000	0.000	0.000	0
KP	1	0	2	2	0.000	0.000	0.000	0
PL	3	2	3	1	1.439	403.333	605.000	2
KA	1	0	2	2	0.000	0.000	0.000	0
ZB	1	0	3	2	0.008	2.333	7.000	0
ZBKT	1	0	3	3	0.000	0.000	0.000	0
ZBR	1	0	3	3	0.000	0.000	0.000	0
PI	1	1	1	0	0.231	194.000	194.000	1

FEC XN	PRI	BDT	ASSEM	CURRENT	NEXT	PARAMETER	VALUE
8	0	842.000	8	12	13		
7	0	1059.000	7	49	50		
10	0	1245.000	10	0	8		
11	0	1247.000	11	0	1		

Рисунок 3.18 – Друга частина другого прогону імітаційної моделі

GPSS World Simulation Report - DIPLOM.34.1

Thursday, December 03, 2020 21:46:43

START TIME	END TIME	BLOCKS	FACILITIES	STORAGES
0.000	702.000	93	12	0

NAME	VALUE
A	10002.000
B	10003.000
IM	10005.000
K1	10000.000
KA	10008.000
KB	10004.000
KP	10006.000
MET1	22.000
MET2	35.000
MET3	46.000
MET4	58.000
MET5	65.000
MET6	72.000
MET7	78.000
PI	10012.000
PL	10007.000
PLA	10001.000
ZB	10009.000
ZBKT	10010.000
ZBR	10011.000

Рисунок 3.19 – Перша частина третього прогону імітаційної моделі

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME	AVAIL.	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
K1	9	0.077	6.000	1	0	0	0	0	0
PLA	3	0.839	196.333	1	7	0	0	0	0
A	3	0.830	194.333	1	8	0	0	0	0
B	3	0.774	181.000	1	9	0	0	0	0
KB	2	0.006	2.000	1	0	0	0	0	0
IM	2	0.430	151.000	1	0	0	0	0	0
KP	2	0.006	2.000	1	0	0	0	0	0
PL	1	0.215	151.000	1	0	0	0	0	0
KA	2	0.006	2.000	1	0	0	0	0	0
ZB	3	0.077	18.000	1	0	0	0	0	0
ZBKT	3	0.013	3.000	1	0	0	0	0	0
ZBR	3	0.038	9.000	1	0	0	0	0	0

QUEUE	MAX	CONT.	ENTRY	ENTRY(0)	AVE. CONT.	AVE. TIME	AVE. (-0)	RETRY
K1	2	0	9	3	0.064	5.000	7.500	0
PLA	1	0	3	3	0.000	0.000	0.000	0
A	1	0	3	3	0.000	0.000	0.000	0
B	1	0	3	3	0.000	0.000	0.000	0
KB	1	0	2	2	0.000	0.000	0.000	0
IM	1	0	2	2	0.000	0.000	0.000	0
KP	1	0	2	2	0.000	0.000	0.000	0
PL	3	2	3	1	1.330	311.333	467.000	2
KA	1	0	2	2	0.000	0.000	0.000	0
ZB	1	0	3	2	0.010	2.333	7.000	0
ZBKT	1	0	3	3	0.000	0.000	0.000	0
ZBR	1	0	3	3	0.000	0.000	0.000	0
PI	1	1	1	0	0.276	194.000	194.000	1

FEC XN	PRI	BDT	ASSEM	CURRENT	NEXT	PARAMETER	VALUE
9	0	777.000	9	25	26		
7	0	782.000	7	49	50		
8	0	788.000	8	38	39		
10	0	830.000	10	0	8		
11	0	831.000	11	0	1		

Рисунок 3.20 – Друга частина третього прогону імітаційної моделі

3.5 Висновки до 3 розділу

Основаючись на отриманих результатах прогону трьох імітаційних моделей видно, що найбільше скупчення черги збирається в операціях отримання елементарних елементів. Оптимальним вибором часу та кількості надходження матеріалу є значення третього варіанту прогону імітаційної моделі, а саме надходження шести одиниць матеріалу кожні 276 хв. Для отримання більш точних результатів рекомендується прогнати імітаційну модель роботи ТП виготовлення МЕМС-акселерометру протягом місяця с різними значеннями часу та кількості матеріалу за одну партію.

4 ПИТАННЯ ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ

Для отримання якісних та своєчасних результатів дослідження та роботи над програмним продуктом необхідно вирішити таке питання безпеки життєдіяльності персоналу, як правильний розподіл людських ресурсів на процесі, шляхом знаходження показників витрат праці людино-годинами.

Базовий показник для визначення складових витрат праці розраховується за формулою:

$$T = T_0 + T_\delta + T_a + T_n + T_{\text{н}} + T_{\text{док}}, \quad (4.1)$$

де T – загальні витрати труда, люд. годин;

T_0 – витрати труда на опис завдання;

T_δ – витрати на розгляд предметної області;

T_a – витрати на розробку алгоритму рішення задачі;

T_n – витрати на програмування;

$T_{\text{н}}$ – витрати на настроювання програми;

$T_{\text{док}}$ – витрати на підготовку документації.

Всі складові визначаються через умовне число операторів Q :

$$Q = q \cdot c (1 + p), \quad (4.2)$$

де q – кількість операторів;

c – коефіцієнт складності завдання (приймається від 1,25 до 2);

p – коефіцієнт корекції програми, який враховує новизну проекту (для абсолютно нової програми дорівнює 0,1).

Візьмемо число операторів 23. З них 19 – кількість робітників виробництва, 4 – інженерів-лаборантів, які будуть використовувати даний програмний продукт. Коефіцієнт складності програми приймемо за 1,5, тому що програмне забезпечення середньої складності.

Програма нова, тому коефіцієнт корекції програми візьмемо 0,1.

Підставивши отримані дані в формулу, отримаємо:

$$Q = 23 \cdot 1,5 \cdot (1 + 0,1) = 38. \quad (4.3)$$

Залежно від складності продукту T_0 візьмемо діапазон от 1 до 5 люд. год. Програмний продукт середньої складності, тому T_0 візьмемо 3 люд. год. T_0 визначається за формулою:

$$T_0 = (Q \cdot B) / (S_0 \cdot k), \quad (4.4)$$

де B – коефіцієнт збільшення витрат роботи внаслідок недостатнього опису завдання (1,2-1,5);

S_0 – кількість операторів на 1 люд. год;

k – коефіцієнт кваліфікації працівників.

Таким чином, з огляду на стаж працівника до 2-х років, приймаємо коефіцієнт 0,8.

$$T_{\partial} = (38 \cdot 1,2) / (1 \cdot 0,8) = 57 \text{ люд. год.} \quad (4.5)$$

T_a визначається за формулою:

$$T_a = Q / (S_a \cdot k), \quad (4.6)$$

$$S_a = 1 - 2,$$

де S_a – кількість операторів, зайнятих розробкою блок-схеми, доводиться на 1 люд.год.

$$T_a = 38 / (2 \cdot 0,8) = 24 \text{ люд. год.} \quad (4.7)$$

Витрати на програмування розрахуємо за формулою:

$$T_n = Q(S_n \cdot k), \quad (4.8)$$

$$S_n = 1 - 2,$$

де S_n – кількість операторів, зайнятих програмуванням на 1 люд. год.

$$T_n = 38 / (2 \cdot 0,8) = 24 \text{ люд. год.} \quad (4.9)$$

Витрати на настройку програми розрахуємо наступним чином:

$$T_n = Q / (S_n \cdot k) \quad (4.10)$$

$$S_n = 1 - 2,$$

де S_n – кількість операторів, зайнятих налаштуванням, яке припадає на 1 люд. год.

Витрати на підготовку документації знайдемо за формулою:

$$T_{\text{док}} = T_{\text{др}} + T_{\text{док}}, \quad (4.11)$$

де $T_{\text{др}}$ – затрати труда на підготовку матеріалу рукописи;

$T_{\text{док}}$ – затрати труда на редагування, роздруківку і оформлення документів.

$$T_{\text{др}} = Q / (S_{\text{др}} \cdot k), \quad (4.12)$$

$$S_{\text{др}} = 1 - 2,$$

де $S_{\text{др}}$ – кількість операторів, зайнятих підготовкою матеріалів в рукопису, який припадають на 1 люд. год.

$$T_{\text{др}} = 38 / (1 \cdot 0,8) = 24 \text{ люд. год.} \quad (4.13)$$

$T_{\text{док}}$ визначається за формулою:

$$T_{\text{док}} = 0,75 \cdot T_{\text{др}} = 0,75 \cdot 24 = 18 \text{ люд. год.}, \quad (4.14)$$

$$T = 38 + 57 + 24 + 24 + 24 + 18 = 185 \text{ люд. год.} \quad (4.15)$$

Отримане значення загальної трудомісткості необхідно відредагувати з урахуванням рівня мови програмування:

$$T_{кор} = T \cdot k_{кор} = 185 \cdot 0,9 = 167, \quad (4.16)$$

де $k_{кор}$ – коефіцієнт враховує рівень мови програмування (0,8 – 1).

Час роботи персонального комп'ютера (фонд часу) при створенні програмного продукту визначається за формулою:

$$\Phi_{ч} = 1,15 \cdot (T_{п} + T_{д} + T_{н}) \cdot k_{кор}, \quad (4.17)$$

$$\Phi_{ч} = 1,15 \cdot (24 + 24 + 24) \cdot 0,9 = 75,$$

де 1,15 – коефіцієнт, який враховує витрати часу на профілактичні роботи.

4.1 Висновки до 4 розділу

Отримані результати витрат праці людино-годинами можна використати для розподілу людських ресурсів для їх збільшення комфорту умов праці, що дозволить отримати більш якісні та своєчасні результати дослідження та роботи над програмним продуктом.

ВИСНОВКИ

У ході виконання магістерської атестаційної роботи було виконано огляд та аналіз проблеми моделювання роботизованих виробничих ділянок, проаналізовано особливості технологічних процесів виготовлення МЕМС-акселерометрів, розглянуто особливості роботизованих технологічних комплексів як об'єктів моделювання та проаналізовано сучасні методи та програмні засоби комп'ютерного моделювання.

За результатами аналізу встановлено, що у процесах проектування, впровадження та використання роботизованих технологічних процесів виникає задача оцінки їх функціональних характеристик. У сучасних умовах вона розв'язується методами математичного (імітаційного) моделювання. При цьому використовувані моделі суттєві відрізняються у залежності від структури і параметрів технологічних процесів. Це обумовлює актуальність науково-прикладних завдань розробки ефективних засобів імітаційного моделювання роботизованих виробничих ділянок.

На цій основі розроблено імітаційну модель процесу функціонування роботизованої виробничої ділянки виготовлення компонентів МЕМС-акселерометрів з детермінованими та стохастичними характеристиками технологічних операцій. Програмне забезпечення імітаційної моделі для визначення функціональних характеристик роботизованої виробничої ділянки реалізовано у пакеті імітаційного моделювання GPSS W. У рамках тактичного планування машинних експериментів наведено математичні співвідношення для оцінки точності отримуваних результатів та необхідної кількості прогонів моделі.

Отримані данні дозволять оптимізувати параметри технологічного процесу виготовлення МЕМС-акселерометрів, що допоможе зменшити страхові заділи, підвищити завантаження обладнання і за рахунок цього надасть можливість для зниження собівартості продукції.

Результати магістерської атестаційної роботи опубліковано в збірнику студентських наукових статей Харківського національного університету радіоелектроніки та апробовано на Всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві» [20].

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення [Текст]. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 31 с.
2. Невлюдов, І.Ш. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальностей 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [Текст]: навч.посіб. І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарева, Г.В. Пономарьова. – К.: Київ – 58, пр. Космонавта Комарова, 1, 2016. – 320 с.
3. Методичні вказівки «З розробки й оформлення магістерської атестаційної роботи для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітні програми: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» [Текст] / Упоряд. І.Ш. Невлюдов, В.В. Косенко, В.В. Євсєєв. – Харків: ХНУРЕ, 2019. – 55 с.
4. Положення про протидію академічному плагіату в ХНУРЕ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE.html. – (дата звернення: 29.09.2020).
5. Белянина, П.М. Гнучкі виробничі комплекси [Текст] / Під. ред. П.М. Белянина. – М.: Машинобудування, 1984. – 384с. (рос. мовою).
6. Майорова, С.А. Гнучке автоматичне виробництво [Текст] / Під. ред. С.А. Майорова. – М.: Машинобудування, 1985. – 456с. (рос. мовою).
7. Роботизовані технологічні комплекси (РТК) у гнучкої автоматизації виробництва. Призначення і класифікація РТК. Місце РТК в гнучкої автоматизації виробництва [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://ua-referat.com/Роботизовані_технологічні_комплекси_РТК_в_гнучкої_автоматизації_виробництва. – (дата звернення: 22.11.2020).

8. Соколовський, Я. І. Моделювання систем у GPSS World : навч. посібник [Текст] / Ю.В. Шабатура, Я.І. Виклюк, І. М. Крошний ; за наук. ред. В. В. Пасічника ; Міністерство освіти і науки України, Нац. лісотех. університет України. – Львів: Новий Світ-2000, 2016. – 288 с.

9. Стеценко, І.В. Моделювання систем [Текст] // навч. посібник / І.В. Стеценко, С.А. Яковлев; Міністерство освіти і науки України, Черкас. держ. технол. університет. – Черкаси: ЧДТУ, 2010. – 399 с.

10. Советов, Б.Я. Моделирование систем. [Текст] // М.: Высш. шк., 2001. – 343 с.

11. Томашевський, В.М. Моделювання систем. [Текст] //М.: Видавнича група ВНУ, 2005. – 352 с.

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

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

14. Томашевский, В.М. Имитационное моделирование в среде GPSS [Текст] // Бестселлер, 2003. – 416 с.

15. Горбачев, В.А. Технологии моделирования систем [Текст] // учеб. пособие / Харьков: «Компания СМІТ», 2005. – 162 с.

16. Усачев, Ю.И. Моделирование роботизированных комплексов [Текст] // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ). 2016, № 2 (23). – С. 98-100.

17. Безкоровайний, В.В. Конспект лекцій дисципліни «Математичне моделювання» для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [Текст] / В.В. Безкоровайний. – Харків: ХНУРЕ, 2018. – 120 с.

18. Невлюдов, І.Ш. Імітаційна модель технологічного процесу виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів. [Текст] // І.Ш. Невлюдов, В.О. Бортнікова / Вчені записки Таврійського національного

університету імені В.І. Вернадського Серія / Технічні науки. – Київ, 2018. – Том. 29 (68). – № 1, 2018. – Частина 1. – С. 210-216.

19. Мамін, В.А. Імітаційне моделювання роботизованої виробничої ділянки // Автоматизація та приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2020) [Текст] / В.В. Безкоровайний// збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків: ХНУРЕ, 2020. – Вип. 2. – С. 257.

20. Мамін, В. А. Концептуальне моделювання роботизованої виробничої ділянки // Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві [Електронний ресурс] / В. В. Безкоровайний // Всеукр. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, 25 листоп. 2020 р. Секція: Математичне моделювання технологічних процесів : тези доп. / Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. – Харків, 2020. Режим доступу: <https://dspace.khadi.kharkov.ua/dspace/handle/123456789/3216> (дата звернення 01.12.2020 р.).

21. Анфилатов, В.С. Системный анализ в управлении [Текст] // А.А. Емельянов, А.А. Кукушкин М.: Финансы и статистика, 2003. – 368 с.

22. Петров, Э.Г. Методы и средства принятия решений в социально-экономических и технических системах [Текст] / Э.Г. Петров, М.В. Новожилова, И.В. Гребенник, Н.А. Соколова / Под общ ред. Э.Г. Петрова. – Херсон: ОЛДІ-плюс, 2003. – 380 с.