

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики та комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА **Пояснювальна записка**

рівень вищої освіти другий (магістерський)
Розробка імітаційної моделі технологічного процесу
виготовлення МЕМС-акселерометрів
(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи КІТПВм-21-1
Прінь К. В.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Безкоровайний В. В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Невлюдов І. III.

(прізвище, ініціали)

2022 р.

Я, як студентка ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавала і не одержувала недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«02» грудня 2022 р.

Прінь К.В.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма 151 Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри Невлюдов І.Ш.
(підпис)

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Студентові Прінь Катерині Віталіївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Розробка імітаційної моделі технологічного процесу виготовлення МЕМС-акселерометрів»

затверджена наказом університету від «07» листопада 2022 р. №1464 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії «07» грудня 2022 р.

3. Вихідні дані до роботи: Об'єкт дослідження – технологічний процес виготовлення МЕМС-акселерометрів. Предмет дослідження функціональні характеристики технологічного процесу виготовлення МЕМС-акселерометра. Предмет розробки імітаційна модель для визначення функціонально-часових характеристик технологічного процесу виготовлення МЕМС-акселерометрів. Технічне забезпечення ІВМ-сумісний ПК. Перелік використовуваних програмних засобів: ОС Microsoft Windows, мова або пакет імітаційного моделювання.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: Вступ. Аналіз МЕМС-акселерометрів та технологічних процесів їх виготовлення. Класифікація сучасних акселерометрів. Опис технологічного процесу виготовлення МЕМС-акселерометрів. Огляд засобів моделювання технологічних процесів. Постановка мети та задач дослідження. Математичне забезпечення задачі моделювання технологічного процесу. Постановка задачі створення імітаційної моделі. Вибір методу моделювання. Математичне забезпечення задачі. Розробка моделювального алгоритму. Розробка програмного забезпечення та експерименти. Вибір мови програмування та середовища розробки. Розробка програми. Планування машинних експериментів. Аналіз результатів. Охорона праці у лабораторії моделювання. Вимоги до приміщення. Заходи цивільного захисту. Заходи пожежної безпеки. Висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри): демонстраційний матеріал, представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) на аркушах формату А4 (16 сторінок).

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	Отримання, аналіз завдання, уточнення плану роботи	01.09.22	Виконано
2	Аналіз МЕМС-акселерометрів та технологічних процесів їх виготовлення	08.09.22	Виконано
3	Огляд сучасних засобів моделювання технологічних процесів	15.09.22	Виконано
4	Розробка математичного забезпечення задачі	29.09.22	Виконано
5	Розробка програмного забезпечення задачі	13.10.22	Виконано
6	Проведення експериментальних досліджень	27.10.22	Виконано
7	Підготовка публікацій за результатами дослідження	10.11.22	Виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	24.11.22	Виконано
9	Подання закінченої роботи науковому керівникові	26.11.22	Виконано
10	Усунення зауважень наукового керівника	01.12.22	Виконано
11	Подання роботи на рецензування	02.12.22	Виконано
12	Підготовка презентації	03.12.22	Виконано
13	Попередній захист	05.12.22	Виконано
14	Подання роботи до екзаменаційної комісії	07.12.22	Виконано

Дата видачі завдання _____

Студент _____ Прінь К. В.
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. Безкоровайний В. В.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 85 с., 2 табл., 19 рис., 3 дод., 32 джерела.

ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ, МЕМС-АКСЕЛЕРОМЕТР, МОДЕЛЮВАННЯ,
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС, ФУНКЦІОНАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

Об'єкт дослідження – технологічний процес (ТП) виготовлення МЕМС-акселерометра.

Предмет дослідження – функціональні характеристики ТП виготовлення МЕМС-акселерометра.

Мета роботи – підвищення точності визначення функціональних характеристик ТП виготовлення МЕМС-акселерометрів за рахунок розробки адекватної імітаційної моделі.

Методи дослідження – системний підхід, теорія ймовірностей, математична статистика, імітаційне моделювання, планування експериментів.

Для моделювання ТП було розроблено його імітаційну модель як багатофазної системи масового обслуговування. Розроблений моделювальний алгоритм реалізовано мовою імітаційного моделювання у середовищі пакету програм GPSS W.

Створена імітаційна модель чи її модифікації можуть застосовуватися на підприємствах і в організаціях, де вирішуються задачі проектування чи керування ТП виготовлення МЕМС-акселерометрів. Практичне використання розробленої моделі дозволить за рахунок врахування стохастичного характеру складових процесу підвищити точність визначення його функціональних характеристик.

Отримані результати апробовані на 3-х міжнародних науково-практичних конференціях.

ABSTRACT

Explanatory note contain: 85 pages, 2 tables, 19 figures, 3 appendices, 32 sources of information.

SIMULATION MODEL, MEMS ACCELEROMETER, SIMULATION, TECHNOLOGICAL PROCESS, FUNCTIONAL CHARACTERISTICS.

The object of research is the technological process of manufacturing a MEMS accelerometer.

The subject of the study is the functional characteristics of the manufacturing process of the MEMS accelerometer.

The purpose of the work is to increase the accuracy of determining the functional characteristics of the TP for the manufacture of MEMS-accelerometers by developing an adequate simulation model.

Research methods – system approach, theory of probabilities, mathematical statistics, simulation modeling, planning of experiments.

To simulate the technological process, its simulation model was developed as a multiphase mass service system. The developed simulation algorithm is implemented in the language of simulation modeling in the environment of the GPSS W program package.

The created simulation model or its modifications can be used at enterprises and organizations where the tasks of designing or managing the technological process of manufacturing MEMS accelerometers are solved. By taking into account the stochastic nature of the process components, the practical use of the developed model will allow to increase the accuracy of determining its functional characteristics.

The obtained results were tested at 3 international scientific and practical conferences.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ МЕМС-АКСЕЛЕРОМЕТРІВ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ.....	11
1.1 Класифікація сучасних акселерометрів	11
1.3.1 Опис мов моделювання	24
1.3.2 Опис пакетів програм моделювання систем	29
1.4 Вибір методу моделювання.....	30
1.4.1 Опис методів моделювання технологічних процесів.....	32
1.5 Постановка мети та задач дослідження	36
1.5 Висновки до першого розділу.....	38
2 МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАЧІ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ.....	39
2.1 Постановка задачі створення імітаційної моделі.....	39
2.3 Розробка Q-схеми та її опис	43
2.4 Розробка моделювального алгоритму.....	45
2.5 Висновки до другого розділу	50
3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТИ	51
3.1 Вибір мови програмування та середовища розробки.....	51
3.2 Розробка програми	52
3.3 Планування машинних експериментів	69
3.3 Аналіз результатів	72
3.4 Висновки до третього розділу.....	74
4 ОХОРОНА ПРАЦІ У ЛАБОРАТОРІЇ МОДЕЛЮВАННЯ	75
4.1 Вимоги до приміщення.....	75
4.2. Заходи цивільного захисту	77
4.3 Заходи пожежної безпеки.....	78
ВИСНОВКИ.....	80
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	82

Додаток А Демонстраційний матеріал.....	87
---	----

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АНГ – акселерометр з газом, що нагрівається.

ІМ – імітаційне моделювання.

МЕМС – мікроелектромеханічна система.

СМО – система масового обслуговування.

ТЕ – термоелементи з алюмінію та полікремнію.

ТП – технологічний процес.

ВСТУП

Однією з ключових технологій при створенні та виготовленні багатьох електронних пристроїв вважається технологія мікроелектромеханічних систем MEMS (Micro-Electro Mechanical Systems). Згідно прогнозам In-Stat/MDR ринок MEMS збільшується з кожним роком, та за думками аналітиків мікроелектромеханічні системи дозволять при мінімальних витратах збільшити чутливість та механічну віддачу пристроїв.

MEMS-акселерометр представляє собою складний об'єкт, бо мікроелектромеханічні системи отримуються шляхом комбінування механічних елементів, електроніки та датчиків, причому усі елементи можуть бути реалізовані у вигляді єдиного виробу. Тому розробка та виготовлення нових MEMS-акселерометрів пов'язані з складною науково-технічною задачею розробки технологічного процесу з урахуванням усіх вимог забезпечення функціональних параметрів, які залежать від типу та структури розроблюваного акселерометру.

Актуальність кваліфікаційної роботи полягає у тому, що MEMS-акселерометри все ширше використовуються у найрізноманітніших сферах нашого життя. Зростання обсягів їхнього виробництва передбачає оптимізацію відповідних технологічних процесів. Для оцінки з метою вибору найкращих варіантів побудови ТП використовується математичне комп'ютерне моделювання. Для підвищення точності результатів моделювання ТП з випадковими чинниками доцільним є використання статистичного імітаційного моделювання.

Мета роботи – підвищення точності визначення функціональних характеристик ТП виготовлення MEMS-акселерометрів за рахунок розробки адекватної імітаційної моделі.

Об'єкт дослідження – технологічний процес (ТП) виготовлення MEMS-акселерометра.

Предмет дослідження – функціональні характеристики ТП виготовлення МЕМС-акселерометра.

Методи дослідження – системний підхід, теорія ймовірностей, математична статистика, імітаційне моделювання, планування експериментів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- сформулювати постановку задачі моделювання технологічного процесу виготовлення МЕМС-акселерометрів;
- обрати метод та побудувати еквівалентну схему технологічного процесу;
- розробити моделювальний алгоритм розв’язання задачі;
- обрати мову програмування та середовище розробки програми;
- створити програму, яка реалізує поставлену задачу;
- провести перевірку працездатності розробки;
- спланувати, провести модельні експерименти, оцінити точність отриманих результатів;
- розглянути питання безпеки життєдіяльності співробітників у відділі моделювання.

Кваліфікаційна робота оформлена згідно з вимогами ДСТУ 3008 2015 [1], а також з рекомендаціями з підготовки і оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти [2].

Результати кваліфікаційної роботи опубліковані у матеріалах трьох міжнародних конференцій: доповіді на:

- V Міжнародну конференцію «Виробництво & Мехатронні Системи 2021» (м. Харків, 21-22 жовтня 2021 р.);
- 11-ту Міжнародну науково-технічну конференцію «Інформаційні системи та технології» (м. Харків, 22-25 листопада 2022 р.);
- Всеукраїнську науково-практичну конференцію здобувачів вищої освіти і молодих учених «Комп’ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві» (м. Харків, 23 листопада 2022 р.).

1 АНАЛІЗ МЕМС-АКСЕЛЕРОМЕТРІВ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЇХ ВИГОТОВЛЕННЯ

1.1 Класифікація сучасних акселерометрів

Найбільшого застосування в наш час набули акселерометри трьох типів: ємнісні акселерометри MEMS, п'єзоелектричні акселерометри, п'єзорезистивні та теплові акселерометри.

Ємнісні акселерометри MEMS. Мікроелектромеханічні системи (MEMS) – це технологія, яку можна використовувати для виготовлення більшості сучасних акселерометрів. Коли людина згадує акселерометри MEMS, вона, скоріше за все, має на увазі ємнісні акселерометри, хоча цю технологію можна використовувати також і для п'єзорезистивних акселерометрів. Ємнісні MEMS-акселерометри працюють на основі змін ємності сейсмічної маси під час прискорення.

Ємнісні акселерометри, що використовують технологію MEMS, вважаються найдешевшими, найпоширенішими та найменшими акселерометрами на ринку. Принцип таких акселерометрів полягає в розміщенні вантажу, встановленого на пружинах.

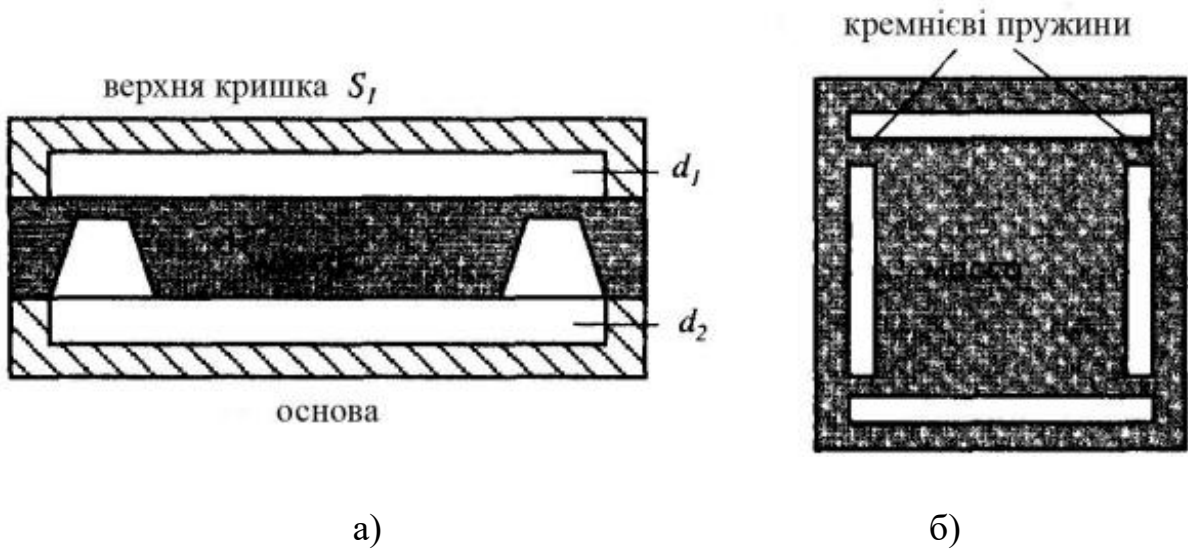
Один кінець пружини прикріплюється до обкладок гребінчастого конденсатора, а інший кінець пружини до закріпленого вантажу. Під впливом сили, яка діє на датчик, вантаж рухається на пружинах, що призводить до зміни відстані між конденсаторним елементом і масою [3].

На (рис. 1.1, а) зображено поперечний переріз ємнісного акселерометра, в якому інерційна маса розташована між основною крижкою та верхньою [4]. Маса підтримується чотирма кремнієвими пружинами (рис. 1.1, б).

Основна крижка та верхня відокремлені від маси відстанями $d1$ і $d2$. На рис. 1.2 зображена спрощена схема перетворювача.

Площа пластини конденсатора C_{mc} утвореного масою і верхнім електродом, що дорівнює S_1 , площа пластини другого конденсатора C_{mb} , утвореного масою та основою S_2 . Під час руху маси у напрямку до верхнього

електрода відстань d_1 зменшується, а відстань d_2 збільшується на ту саму величину.



а) поперечний переріз акселерометра, б) вид зверху на інерційну масу, підтримувану чотирма кремнієвими пружинами

Рисунок 1.1 – Ємнісний акселерометр з диференціальним конденсатором [5]

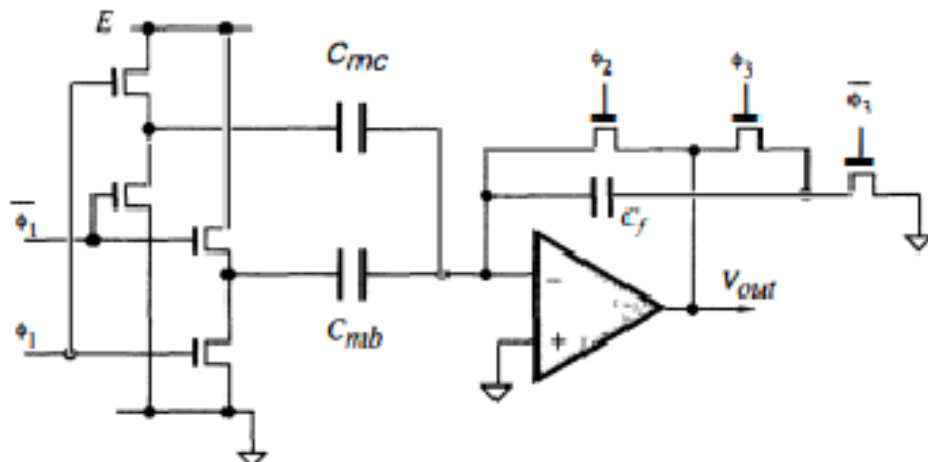


Рисунок 1.2 – Схема перетворювача ємність-напруга, яка реалізована на кремнієвій підкладці з датчиком [5]

Значення зміни відстані дорівнює механічній силі F_m , що діє на масу, поділений на коефіцієнт до кремнієвої пружини k :

$$\Delta = \frac{F_m}{k}. \quad (1.1)$$

Фактично, еквівалентна схема акселерометра справедлива лише тоді, коли ємність конденсаторів лінійно залежить від F_m . Акселерометр стоїть на вході керованого підсумовувача, вихідна напруга якого залежить від значень конденсаторів та від сили:

$$V_{out} = 2E \frac{C_{mc} - C_{mb}}{C_f}. \quad (1.2)$$

Рівняння (1.2) справедливе лише за малих змін ємностей датчика. Вихідний сигнал акселерометра залежить від температури та неузгодженості значень конденсаторів. Рекомендується проводити калібрування таких датчиків у всьому температурному діапазоні. Інший ефективний спосіб підвищення стабільності пристрою – розробка системи самокалібрування, що дозволяє компенсувати вплив електростатичних сил, що виникають, коли подається висока напруга або на основу, або на верхню кришку [4].

Технологія MEMS принесла акселерометрам нижчі витрати на виробництво та менші розміри. Завдяки цьому, такі акселерометри стали більш поширеними в повсякденному житті.

Ємнісні акселерометри MEMS застосовуються в переносних пристроях, мобільних приладах та побутовій електроніці. Завдяки низькій вартості та невеликим розмірам, однією з найбільших переваг MEMS акселерометрів є можливість їх установки на друкованій платі [5]. Майже всі мобільні пристрої мають акселерометр MEMS, а багато інших електронних пристроїв мають акселерометр для відстеження руху та навіть захист дисководу (для виявлення

падінь). Ємнісні MEMS-акселерометри найкраще підходять для вимірювання низькочастотної вібрації, руху та прискорення в стаціонарному стані. До недоліків MEMS акселерометрів слід віднести низьку точність вимірювань, що робить їх непридатними для спеціалізованих промислових застосувань. Також вони потерпають від поганого співвідношення сигнал/шум, обмеженої смуги пропускання та переважно обмежені меншими рівнями прискорення (менше 200g).

П'єзоелектричні акселерометри. П'єзоелектричний акселерометр – це один із найбільш часто використовуваних датчиків для вимірювання рівня вібрації. Також п'єзоелектричні акселерометри часто використовуються в промисловості для діагностики та контролю машин і пристроїв [6].

Принцип п'єзорезистивної дії – це широко використовувана технологія вимірювання для акселерометрів зі змінним струмом. Цей тип акселерометра забезпечений п'єзорезистивним матеріалом, який деформується під впливом зовнішньої сили, та призводить до зміни опору, після чого зміна опору перетворюється в електричний сигнал. Такі прилади можуть вимірювати прискорення в широкому частотному діапазоні: 0...13 кГц. При розробці відповідної конструкції п'єзорезистивні акселерометри можуть витримати перенавантаження, яке дорівнює 10 000g. П'єзорезистивні акселерометри мають дуже широку смугу пропускання, що дозволяє використовувати їх для вимірювання короткочасних (високочастотних) ударів, таких як краш-тестування.

П'єзорезистивні акселерометри характеризуються великим діапазоном вимірювань, завдяки чому вони здатні реєструвати високочастотні коливання з великою амплітудою, але такий акселерометр нечутливий до змін температури навколишнього середовища. Крім цього, в акселерометрів такого типу є проблеми з виявленням слабких сигналів, а також вони набагато дорожчі ємнісних MEMS акселерометрів [7].

Акселерометри, які реалізовані з дискретних компонентів та володіють індивідуальними температурними характеристиками, страждають від високої температури залежності вихідного напруження, що потребує ретельного підбору

параметрів складових елементів кожного датчика.

На рис. 1.3 зображено твердотільний акселерометр, який володіє широким динамічним діапазоном. Мікродатчик складається з трьох шарів кремнію. Внутрішній шар включає пружну підвісну конструкцію та інерційну масу, яка кріпиться всередині рамки на підвісі, з двох сторін якого розташовані тензодатчики [5].

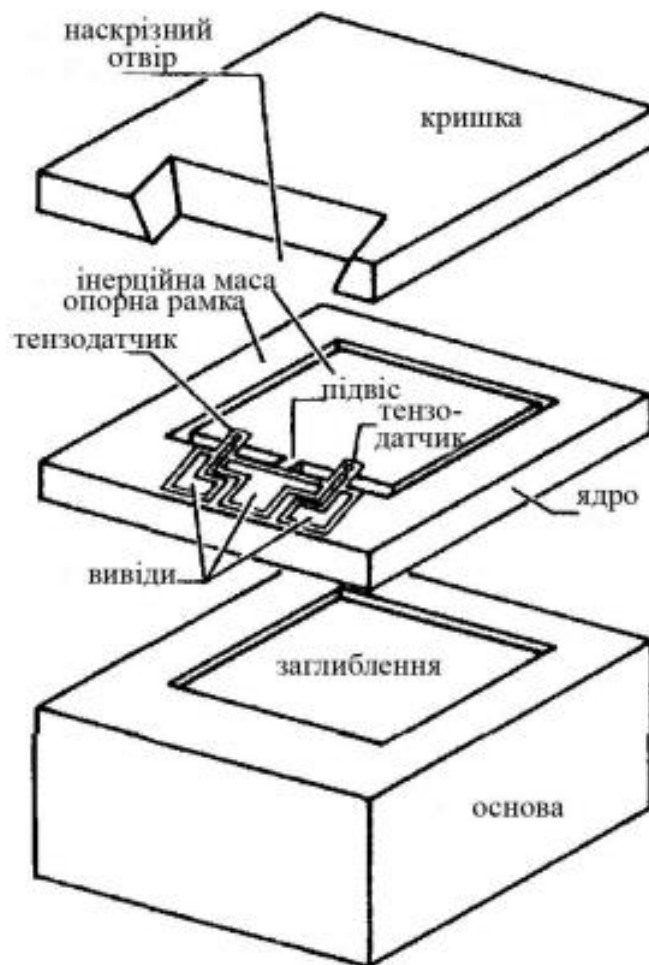


Рисунок 1.3 – Пристрій п'єзорезистивного акселерометра [3]

Зовнішні два шари – це кришка та основа, які захищають рухомі частини від зовнішніх забруднень. В зовнішніх шарах зроблені поглиблення, які дозволяють інерційній масі вільно переміщатися. Цей датчик має важливі особливості: чутлива вісь датчика лежить у площині підкладки, а у більшості аналогічних датчиків вона перпендикулярна підкладці. Під час дії прискорення

на чутливу вісь, інерційна маса повертається навколо підвісу. В зв'язку з невеликою довжиною тензодатчиків, малі переміщення викликають великі зміни опору [8].

П'єзорезистивні акселерометри. Робота п'єзоелектричного акселерометра схожа на принцип дії п'єзорезистивних систем, але під впливом прискорення вони не змінюють свого опору, а генерують електричну напругу певного значення. П'єзоелектричні акселерометри відрізняються високою чутливістю і точністю, завдяки чому вони знаходять застосування в багатьох галузях. Ці датчики працюють в частотному діапазоні менше 2 Гц...5 Гц. У якості чутливих елементів, час від часу, використовуються кварцеві кристали, але більш поширеним для використання вважається керамічні п'єзоелектричні матеріали. Кристал розташовується між інерційною масою та кожухом (рис. 1.4).

Мікродатчики зазвичай реалізуються із кремнію, який не має п'єзоелектричних властивостей, тож при створенні інтегрованого мікродатчика на кремнієву консольну балку наноситься тонка плівка з титанату свинця.

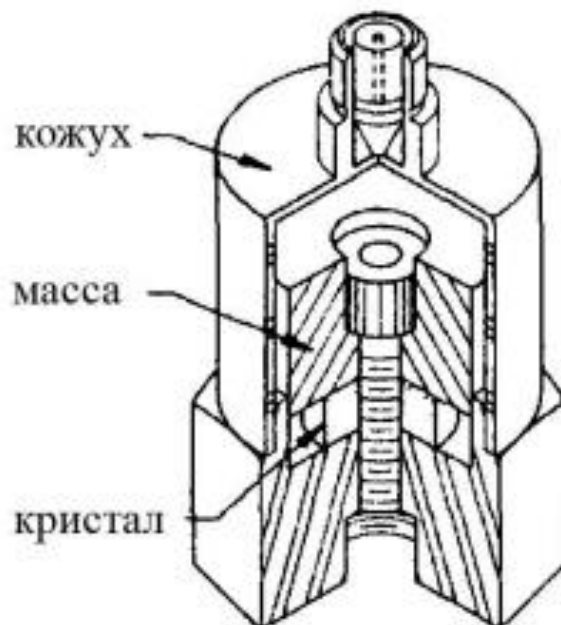


Рисунок 1.4 – Принципова схема п'єзоелектричного акселерометра [3]

Для поліпшення частотних характеристик сигнал посилюється за допомогою перетворювачів заряд-напруга або струм-напруга, які вбудовані в один корпус з п'єзоелектричним кристалом.

П'єзоелектричний акселерометр в режимі зарядки можна вважати найнадійнішим типом датчика завдяки здатності витримувати несприятливі умови навколишнього середовища.

Через високий імпеданс п'єзоелектричного акселерометра в режимі заряджання потрібен спеціальний кабель для захисту від шуму. Також необхідний підсилювач заряду, тому система зазвичай є трохи складнішою та дорожчою з цими акселерометрами [9].

Серед інших конструкцій акселерометра слід перелічити конструкції ІЕРЕ, які повсюди використовуються для вимірювання вібрацій. Акселерометри ІЕРЕ – це в основному п'єзоелектричні акселерометри в режимі заряду з підсилювачем заряду, вбудованим у акселерометр. Через це такі акселерометри не потребують спеціальних кабелів, та їх дуже легко інтегрувати у систему. Також, акселерометрам необхідне постійне джерело живлення постійного струму. Мікроелектронна схема, яка входить до складу акселерометра, обмежує його здатність витримувати несприятливі умови навколишнього середовища, в порівнянні з акселерометрами, які знаходяться в режимі заряджання. Акселерометри ІЕРЕ часто мають температурний діапазон від -40° до $+125^{\circ}$.

Теплові акселерометри. Принцип роботи теплових акселерометрів базується на тепловій конвекції та полягає в вимірюванні величини зміщення шару нагрітого повітря при його русі з прискоренням в геометричній повітряній порожнині над напівпровідниковою підкладкою в корпусі датчика [10]. Мініатюрність та відсутність твердотільних рухомих мас дозволяють зберегти працездатність акселерометрів при перенавантаженні 25 000 g (деякі акселерометри витримують 50 000 g).

Акселерометри з нагрівальною пластиною. Тепловий акселерометр складається з інерційної маси, яка закріплена на тонкій консольній балці. Консольна балка розташована поруч із тепловідвідною пластиною або між

тепловідвідними пластинами (рис. 1.5).

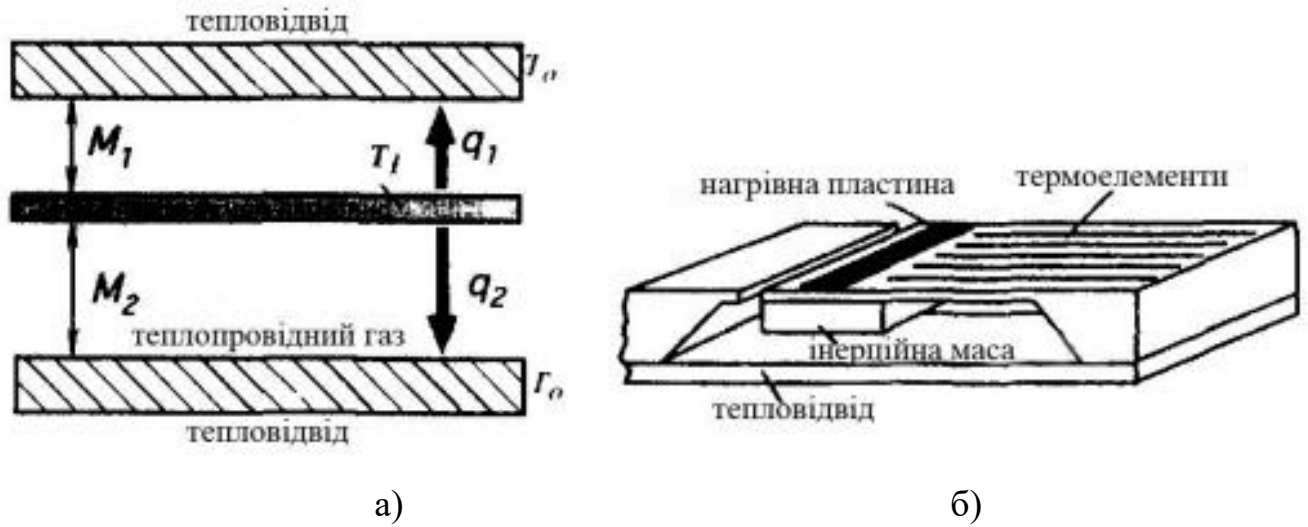


Рисунок 1.5 – Схема теплового акселерометра [5]

Температура в будь-якій точці консольної балки залежить від відстані між нею та опорою x , а також від величини зазорів від неї до тепловідводів [10].

Температуру можна знайти з диференційного рівняння:

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \lambda^2 T = 0, \quad (1.3)$$

де

$$\lambda = \sqrt{\frac{K_g (M_1 + M_2)}{L_{Sl} D M_1 M_2}}, \quad (1.4)$$

де K_g та K_{Sl} – коефіцієнти теплопровідності газу та кремнію;

D – товщина консольної балки.

Для граничних умов, за яких температура тепловідведення дорівнює нулю, рішення рівняння представлено у вигляді:

$$T(x) = \frac{P \sinh(\lambda x)}{W D K_{Sl} \lambda \cosh(\lambda L)}, \quad (1.5)$$

де W та L – ширина та довжина балки;

P – теплова потужність.

Для виміру температури на балці формується детектор температури, яким можуть виступати інтегровані в балку діоди, або нанесені на її поверхню послідовно з'єднані термопари. Ця температура, перетворена на електричний сигнал, і є мірою величини прискорення. Чутливість теплових акселерометрів дещо нижча, ніж у датчиків прискорень ємнісного і п'єзоелектричного типів, але вони менш схильні до впливу температурних змін навколишнього середовища.

Акселерометри з газом, що нагрівається. Такий акселерометр розроблений компанією MEMSIC Corporation. Акселерометр є двоосьовим вимірювачем прискорень. Принцип дії такого пристрою заснований на передачі тепла методом примусової конвекції. Конвекція може бути природною (обумовленою силою гравітації) та примусовою (необхідне застосування зовнішніх пристроїв). В акселерометрах з газом, що нагрівається (АНГ) джерелом такої зовнішньої сили є прискорення. Такі датчики визначають внутрішні зміни в процесі теплопередачі в замкнутому обсязі газу. АНГ функціонально еквівалентні традиційним акселерометрам з інерційною масою. У цьому випадку в ролі інерційної маси виступає нерівномірно нагрітий газ. Така інерційна маса має низку переваг у порівнянні з традиційною твердотільною масою. Головною перевагою є високий рівень допустимих навантажень (до 50 000g), що значно підвищує їх надійність [7]. Датчик складається з кремнієвої пластини, у центрі якої над поглибленням підвішений нагрівач (рис. 1.6). На самій пластині встановлено чотири датчики температури: термоелементи (TE) з алюмінію та полікремнію.

TE розташовуються на однаковій відстані з чотирьох сторін від нагрівача. TE визначають лише градієнт температур, тому лівий та правий TE можливо вважати одним TE, де ліва частина відповідає холодному спаю, а права частина відповідає гарячому.

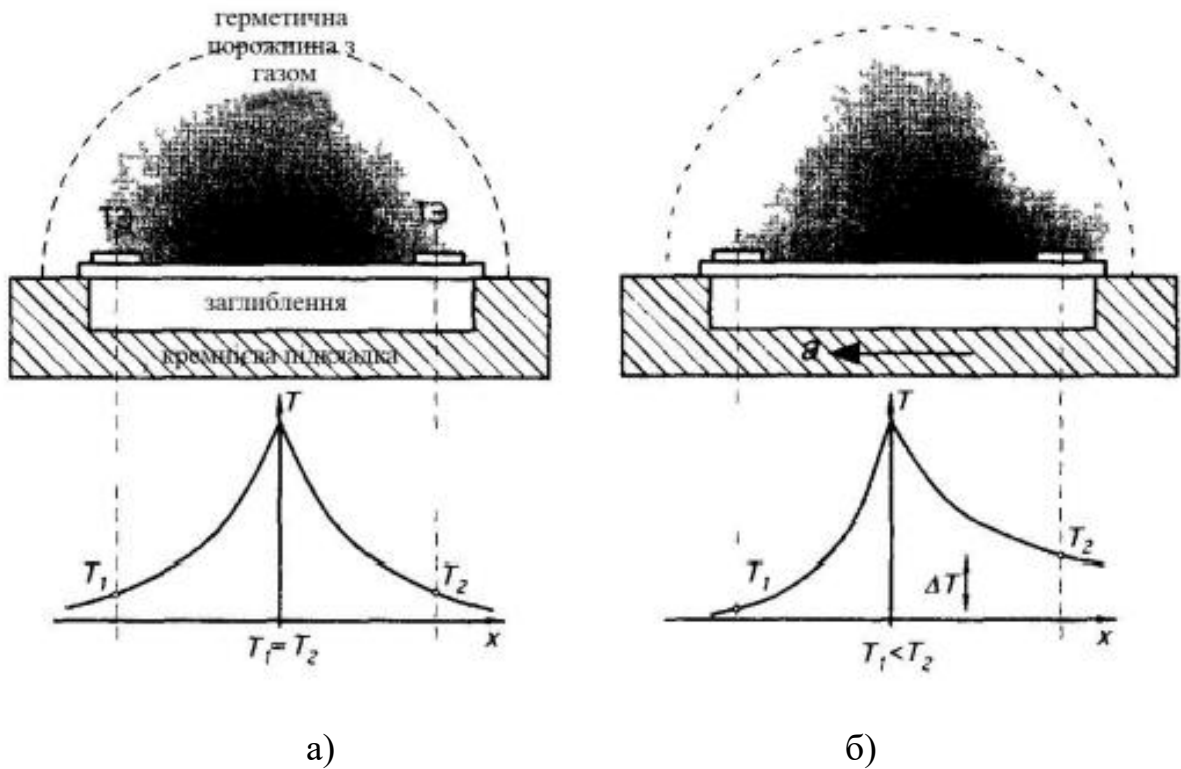


Рисунок 1.6 – Поперечний переріз АНГ уздовж осі x [3]

1.2 Особливості виробничих технологічних процесів

Сучасний технологічний процес може складатися з десятків, сотень або тисяч окремих операцій, також, процес може бути багатоваріантним і розгалужуватися залежно від різних умов. Вибір технології являє собою не лише вибір оснащення або інструментів. Необхідно забезпечити відповідність вимогам технічних умов, фінансових та планових показників [8].

Кожен технологічний процес можна поділити на типові технологічні ланцюги або операції і подати як технологічну схему.

Виділяють основні принципи проектування та організації виробничих технологічних процесів:

- спеціалізація – підвищення однорідності технології виробництва через свідоме обмеження різноманітності операцій;

- пропорційність – узгодженість пропускної (виробничої) спроможності виробничих підрозділів, окремих стадій виробничого процесу;
- паралельність – одночасне виконання окремих операцій і процесів з метою їх суміщення у часі;
- прямолінійність – на всіх стадіях та операціях технологічного процесу предмети праці мають пересуватися за найкоротшими маршрутами;
- безперервність – мінімізація прогалів у структурі технологічного циклу в дискретному виробництві шляхом синхронізації операцій, упровадження прогресивних методів оперативного управління виробництвом;
- ритмічність – забезпечення роботи всіх підрозділів підприємства за певним ритмом і з планомірною повторюваністю для рівномірного (в однакові проміжки часу) виробництва продукції;
- автоматичність – економічно обґрунтоване вивільнення людини від безпосередньої участі у виконанні операцій технологічного процесу;
- гнучкість – оперативна адаптація технологічного процесу до переходу на виготовлення іншої продукції.

Виробничий технологічний процес неможливий без реалізації одного або декількох технологічних процесів. Технологічний процес є частиною виробничого процесу, що пов'язана з послідовним перетворенням предмета праці в продукт виробництва. Технологічний процес здійснюється за встановленим порядком, на певному устаткуванні, при заданих технологічних параметрах (температурі, тиску, часі тощо) та при необхідній кількості сировини. Технологічний процес формується під впливом різноманітних чинників: соціального устрою суспільства, стану економіки, кількістю необхідної сировини, практичного досвіду виконавців виробництва (рис.1.7).

Для здійснення кожного технологічного процесу складається схема, в якій описуються або зображуються всі технологічні операції з виробництва продукції або створення певного виду послуг.

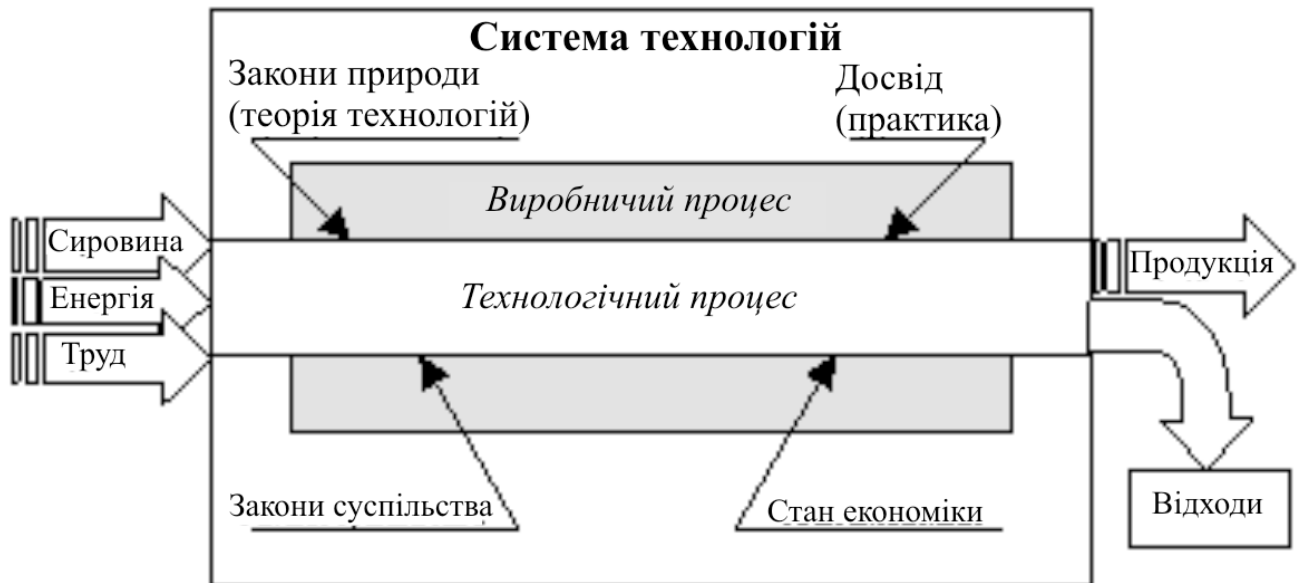


Рисунок 1.7 – Схема формування технологічного процесу під впливом чинників

Існують основні технологічні процеси – це ті, які забезпечують перетворення матеріалів на готову продукцію, та допоміжні – які забезпечують якісне виконання основних процесів, операцій. Допоміжні технологічні процеси використовують для обслуговування основного виробництва, наприклад, транспортування, пакування готової продукції тощо.

1.2.1 Технологічний процес виготовлення акселерометрів

Виготовлення акселерометрів представляє собою певний набір етапів та операцій. Проаналізувавши інформацію щодо технологічного процесу виготовлення МЕМС-акселерометрів можливо виділити 14 загальних етапів процесу (рис. 1.8) [10].

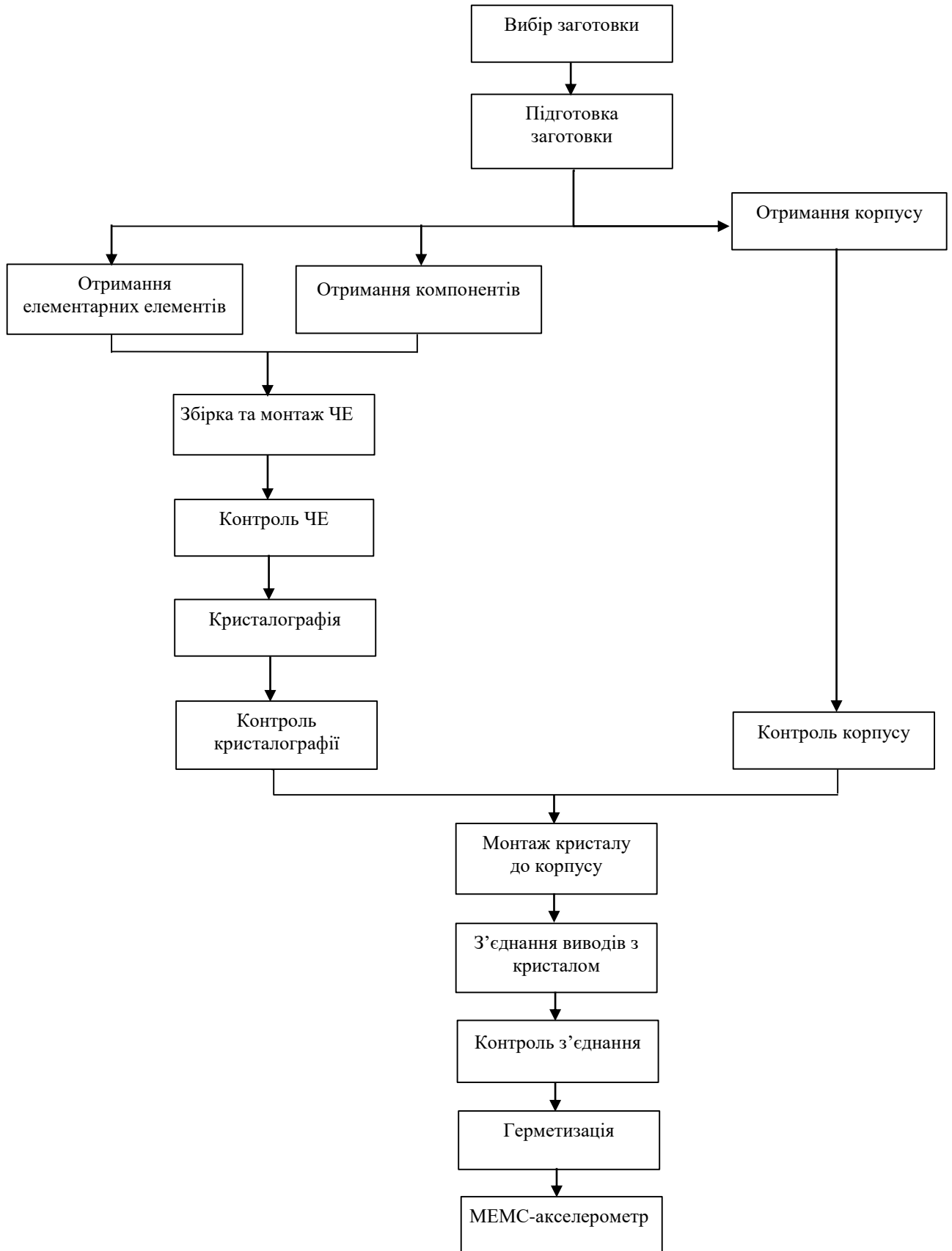


Рисунок 1.8 – Функціональна схема ТП виготовлення MEMS-акселерометра

1.3 Огляд засобів моделювання технологічних процесів

Основна частина виробництв у теперішній час складається з технологічних систем, які мають складну структурно функціональну організацію. Зазвичай, об'єкти управління у цих системах – конкретні технологічні процеси. Абсолютно будь-який технологічний процес можна представити у вигляді багатьох зв'язків, умов і підпроцесів. Кожне виробництво складається з етапів, на кожному з яких виробляються певні дії.

Послідовність етапів зазвичай описується за допомогою технологічної схеми, у якій кожен елемент повинен відповідати конкретному технологічному процесу.

Технологічний процес є складною динамічною системою, в якій взаємодіють обладнання, засоби, які необхідні для контролю та керування, допоміжні та транспортні пристрої тощо [11]. Тому робота не з самим процесом, а його моделлю у багатьох випадках дає можливість швидко дослідити його властивості та поведінку у будь-яких ситуаціях.

Математичне моделювання в такому випадку дозволяє створити абстрактну модель у вигляді опису об'єкта дослідження з використанням «математичної мови» та використовувати дану модель з метою отримання необхідних відомостей про реальний або проєктований технологічний процес [12].

Важливим етапом моделювання є оцінка адекватності створюваної моделі відповідно до реального об'єкта.

1.3.1 Опис мов моделювання

Під час вибору мови програмування необхідно звертати увагу на безліч вимог, серед яких є: можливість зручного введення вхідних даних, можливість зручного опису моделювального процесу та ефективність засобів аналізу.

Мови програмування *Pascal*, *C++* та *Delphi* є мовами загального

призначення, та найчастіше використовуються для програмування задач моделювання. Ці мови є універсальними, та частіше використовуються для створення пакетів програм моделювання [13].

Серед мов імітаційного моделювання у наш час виділяють неперервні, неперервно-дискретні та дискретні. До неперервних мов відносяться Dynamo та MIMIC, які призначені для моделювання неперервних процесів у часі, які описуються рівняннями, наприклад, диференціальними. До неперервно-дискретних мов належать GASP та ForSim [14]. Вони використовуються для опису об'єктів, де присутні неперервні та дискретні процеси. До дискретних мов належать GPSS та SIMSCRIPT. Вони орієнтовані на планування подій і перегляд видів діяльності, та використовуються для опису дискретних процесів .

Для написання магістерської роботи необхідно використовувати дискретні мови імітаційного моделювання, які будуть розглянуті ближче.

GPSS як мова імітаційного моделювання. Мова імітаційного моделювання GPSS (General Purpose System Simulation) використовується для опису функціонування дискретних об'єктів типу СМО. Мова користується широкою популярністю за рахунок розумної будови та загальної потужності. Загальні функції мови можуть бути легко вивчені, а додаткові потужні функції роблять цю мову ідеальною підходящою для моделювання складних систем. На цій мові реалізована значна кількість систем імітаційного моделювання, які представляють собою програні засоби, які здатні забезпечити етапи роботи з моделюю. В теперішній час існує декілька версій цієї мови, серед яких GPSS/H та GPSS World.

Принцип роботи GPSS базується на використанні методу Монте-Карло, операції якого, зазвичай виконуються автоматично.

Модель системи на GPSS подається у вигляді послідовних блоків, кожен з яких відповідає деякій підпрограмі. Окрім цього, кожен блок має певну кількість операндів, які відокремлюються один від одного комою. Слід зазначити, що положення операндів суворо фіксоване, а значить – відсутність операнда позначається комою.

Граматики мови *GPSS* подається у вигляді :

[<Номер рядка>][<Мітка>][<Оператор>][<Операнд>, ..., <Операнд>].

Оператор – це ключове слово, яке вказує конкретну функцію, яка виконується цим оператором. Оператор в залежності від типу може мати до дев'яти операндів, які розташовуються послідовно та позначаються літерами від А до І. Деякі оператори можуть не мати операндів, або ж вони можуть бути пропущені. Операнди задають параметри виконуваної функції.

Після трансляції програми у пам'яті ПК створюється модель, яка є сукупністю різного типу об'єктів. Кожен об'єкт має своє ім'я та номер. Ім'я об'єкта подається у вигляді послідовності букв латинського алфавіту, символу підкреслення та цифр. До кожного об'єкта існують відповідні числові атрибути, які описують стан цього об'єкта у цей момент модельного часу. Значення атрибутів можуть бути арифметичними або логічними. Існують стандартні числові атрибути, які доступні програмісту, та системні атрибути, які відносяться в цілому до моделі, а не до окремих об'єктів. Значення атрибутів після закінчення моделювання формуються та виводяться у вигляді звіту.

Створення та введення до моделі потоку заявок здійснюється за допомогою блока:

GENERATE A,B,C,D,E,

де *A, B, C, D, E* – операнди блока, які записуються у відповідних полях.

Початкове значення лічильника завершень подій задається операндом *A*:

START A,B,C,D .

Моделювання припиняється, якщо значення лічильника завершень подій стає меншим або дорівнює нулю, після чого видаються результати моделювання. Якщо поле *A* блока *TERMINATE*, який знищує *A* транзактів, залишиться

незаповненим, то значення лічильника залишиться без змін. У полі *B* вказується ознака відміни видачі результатів. У полі *C* вказується кількість завершень, після яких буде виконуватись проміжна видача результатів. У полі *D* може вказуватись ознака стандартної видачі інформації. Також, у моделі може бути декілька блоків *TERMINATE*, які можуть впливати на один лічильник [15].

Функції використовуються для опису залежностей у моделювальних системах. Вони задаються за допомогою рядка визначення функції й одного або більше рядків слідування.

Рядок визначення функції подається у вигляді:

$$\langle im'я \rangle \quad FUNCTION \quad A,B,$$

де *A* – аргумент функції;

B – тип функції.

Моделювання системи на GPSS представляє собою імітацію послідовності переходів системи, в деякий момент часу, з одного стану в інший. Тож надважливим є організація моделювання в часі. Час в GPSS-системах відображується у вигляді умовних одиниць. Приріст модельного часу на кожному кроці моделювання є випадковою величиною, яка дорівнює інтервалу часу між послідовними подіями.

Simscripт як мова імітаційного моделювання. Мова Simscripт є гнучкою та легкою для розуміння. Вона використовується у різноманітних сферах, наприклад, у задачах дослідження військових операцій і виробничих систем. Ця мова є подійно-орієнтованою, яка при необхідності може бути перетворена на мову, схожу на мову моделювання процесів. Модулі цієї мови це текстові описи з синтаксисом, близьким до англійської мови, що дозволяє з легкістю розуміти програми. Сама мова призначена для дискретного та дискретно-неперервного моделювання.

Узагальнена програма, що написана мовою Simscripт, складається з головного модуля, преамбули, у якій описуються структурні дані моделі, набору

процедурних модулів, параметрів моделі та опису графічного інтерфейсу, для якого додатково необхідно встановити пакет SIMGRAPHICS.

Усі процеси відбуваються у часі, у мові Simscript він модельний, тобто не пов'язаний з реальним часом, а змінюється відповідно зі станом моделі. Якщо ж подій немає або немає активних процесів, то Simscript зрушує час до найближчої активації процесу або події. Для реалізації цієї мови є диспетчер переключення конспекту процедури [12].

На сьогоднішній час мова Simscript має усі необхідні сучасні засоби розробки:

- приклади та документації;
- набір компонентів для розробки моделей Simulation Studio;
- інтегроване середовище розробки (IDE);
- SimScript-компілятор та виконувані бібліотеки.

Завдяки збільшенню продуктивності персональних комп'ютерів збільшилась зацікавленість до засобів імітаційного моделювання. Мова Simscript надає усі необхідні інструментальні засоби для створення моделей складних систем масового обслуговування (СМО) [13].

Мова GASP. Перша версія GASP була написана на Fortran 90, а наступні версії були написані на C++. У 2014 році GASP було переписано з нуля на C++, щоб покращити робочий процес програми, реалізувати вдосконалений алгоритм для оновлення атомарних позицій, видалити небажані застарілі функції та забезпечити більш розбірливий і послідовний формат введення та керування. Ця поточна версія, GASP v.5, складається з основного коду GASP і невеликого набору відповідних службових програм. Її було успішно скомпільовано та запущено в середовищах Windows, Linux і Mac OSX. Мова GASP підтримує моделювання безперервних, дискретних та комбінованих систем.

Імітаційна модель, яка створюється мовою GASP, має у своєму складі:

- підпрограми, що описують правила роботи системи;
- виконавчу рутину;
- інформацію, яка зберігається у списках та матрицях.

У своїй поточній формі GASP потребує вхідної структури у форматі XTL і контрольного вхідного файлу, що містить параметри та команди. GASP є у вільному доступі для дослідників. Потенційні користувачі мають надіслати електронного листа відповідному автору, щоб отримати копію коду, набір прикладів вхідних файлів і вичерпний посібник.

Початок роботи з мовою GASP постає у такому вигляді: користувач надає програму, після чого керування переходить до виконавчої процедури, яка і надалі буде контролювати моделювання до самісінького завершення.

Спочатку викликається DATIN. Ця підпрограма ініціалізує змінні безпосередньо або ж з рядку даних. GASP використовує метод «наступної дії» та «крок оцінки кроку», завдяки яким, мова може випереджати час. Спочатку починається перевірка наявності події часу для обробки [13]. Якщо відповідь задовільна, то подія буде оброблюватись за допомогою виклику EVNTS. Якщо відповідь незадовільна, то мова буде перевіряти наявність активного стану або рівняння похідних. При їх відсутності час буде зміщуватись від часу події до часу події. Після завершення виконання заданих умов обробка програми завершується. Після цього, викликається підпрограма SUMRY аби надати звіт та підпрограма OTRUT, яка перевірить кількість запусків, та подальші дії для програми, вихід з неї або початок нового запуску.

1.3.2 Опис пакетів програм моделювання систем

За допомогою пакетів програм моделювання здійснюється розв'язання задач моделювання. Такі пакети здійснюють автоматизацію процесів: створення математичних моделей, планування машинних експериментів, обробки та аналізу результатів моделювання тощо.

Пакети програм моделювання поділяються на пакети аналітичного моделювання, які дозволяють визначати траєкторію руху об'єкта, та на пакети імітаційного моделювання, які використовуються для дослідження складних систем та потребують лише побудови ідеограми процесу, а не програмування.

Прикладами пакетів програм аналітичного моделювання є *MatLab*, *MathCAD*, *Maple*, *Mathematica*.

Прикладами пакету програм імітаційного моделювання є *Simulink*, *VenSim*, та *GPSS W*.

Для вирішення задачі магістерської роботи необхідне використання пакету програм імітаційного моделювання, тож ці пакети будуть розглянуті детальніше.

Пакет *Simulink* включає в себе велику бібліотеку блоків для створення моделей різних об'єктів, таких як: лінійні, нелінійні, неперервні, дискретні, неперервно-дискретні, та дозволяє створювати імітаційні моделі за допомогою блок-діаграм.

Пакет *VenSim* використовується для реалізації концепції системної динаміки, яка базується на аналогії між процесами ресурсного обміну та процесами циркуляції потоків води в сполучених резервуарах. Моделюючий об'єкт зображується у вигляді динамічної системи, що складається з накопичувачів, які пов'язані між собою керованими потоками.

Пакет *GPSS W* має в своїй основі мову *GPSS*, та використовується для імітаційного моделювання об'єктів. Пакет містить оболонки для створення моделей та інтерпретації результатів моделювання. Також, пакет має набір команд для керування процесом моделювання, які можна включати в модель.

Окрім цього, в ньому реалізовано процедуру візуалізації процесу функціонування моделі з використанням методів мультиплікації, а для швидкого виправлення помилок використовується повноекранний текстовий редактор.

1.4 Вибір методу моделювання

Під час дослідження реальних систем та побудови їх моделей використовуються різні методи моделювання (рис. 1.9). Різноманітність методів залежить від усіх характеристик об'єкта, мети дослідження та вимог до створюваної моделі. Для забезпечення точного виконання поставленої задачі необхідно обрати відповідний метод моделювання. Перш ніж обирати

необхідний варіант, необхідно розглянути найпоширеніші до використання методи.

Моделювання за мірою повноти опису поділяється на *повне*, *неповне*, *наближене*, де при повному моделюванні будується модель рівна до об'єкта дослідження у часі та просторі. Під час використання неповного моделювання ця рівність не береться до уваги. Для наближеного моделювання беруться до уваги лише головні аспекти усієї системи [14].



Рисунок 1.9 – Класифікація методів моделювання систем

У залежності від характеру досліджуваних процесів системи, моделювання поділяється на такі види: детерміноване та стохастичне, статичне та динамічне, дискретне, дискретно-неперервне та неперервне.

Детерміноване моделювання процесів, для яких враховується відсутність впливів на систему, а стохастичне враховує випадкові процеси. Статичне моделювання використовується для опису стану системи у фіксований час, тоді як динамічне використовується для дослідження діяльності системи у часі.

Дискретне, неперервне, та дискретно-неперервне моделювання зазвичай використовують для опису процесів, які змінюються в часі.

Реальне та абстрактне моделювання використовують залежно від форми сприйняття об'єкта. Ці методи моделювання поділяються на такі види: наочне, символне, математичне, натурне та фізичне.

Наочне дозволяє відобразити процеси, які відбуваються в об'єкті.

Символьне подається у вигляді штучного процесу створення об'єкта та замінює реальний процес, та виражається через систему знаків та символів.

Фізичне моделювання подається у вигляді відтворення досліджуваного процесу на моделі, яка має однаковий з оригіналом математичний опис процесу функціонування. Натурне моделювання використовує дослідження на реальному об'єкті та згодом оброблює результати на основі теорії подібності.

Під час математичного моделювання здійснюється отримання характеристик реального об'єкта з використанням математичних співвідношень.

Математична модель зазвичай містить опис множини можливих станів. Математичне моделювання охоплює аналітичне та імітаційне моделювання. Наведені методи моделювання найчастіше використовуються при дослідженні соціальних, технологічних, економічних та адміністративних систем [15].

1.4.1 Опис методів моделювання технологічних процесів

Головна мета аналітичного моделювання полягає у побудові моделі, яка заснована на описі поведінки об'єкта або системи об'єктів.

Процеси функціонування системи при аналітичному моделюванні можуть записуватись у вигляді функціональних співвідношень, таких як алгебраїчні, інтегральні або диференціальні рівняння.

Результати аналітичного моделювання представляються у вигляді аналітичних виразів. Якщо підключити RC -ланцюг до джерела постійної напруги E , то можливо буде скласти аналітичний вираз для часової залежності напруги $u(t)$ на конденсаторі акселерометра C :

$$RC \frac{du(t)}{dt} + u(t) = E,$$

де R, C, E – компоненти даної моделі.

Створене лінійне диференційне рівняння є аналітичною моделлю простого лінійного ланцюга акселерометра. При початковій умові $u(0)=0$, аналітичне рівняння дозволяє знайти шукану залежність:

$$u(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}}).$$

Для вирішення такого рівняння необхідно прикладати певні зусилля або використовувати системи комп'ютерної алгебри, які є системами комп'ютерної математики з символьними обчисленнями. Для такого стандартного рівняння розв'язання задачі моделювання лінійного ланцюга акселерометра дає аналітичний вираз загального виду, тож його можна використовувати для опису роботи ланцюга будь-яких значень компонентів.

Аналітичні рішення при аналітичному моделюванні ТП є цінними для виявлення теоретичних закономірностей лінійних ланцюгів, систем або пристроїв. Їх складність зростає, якщо ускладнюється вплив на модель, та збільшується порядок та числа рівнянь стану, що описують ТП як об'єкт дослідження. Доступні результати можливо отримати при моделюванні об'єктів другого або ж третього порядку, але аналітичні вирази стають занадто складними, якщо збільшується порядок. Все ж таки, багато систем символьної математики, наприклад, Mathematica або MATLAB, здатні автоматизувати вирішення складних завдань аналітичного моделювання.

Аналітичні моделі, як правило статичні, і їх можливо отримати лише для

порівняльно простих ТП. Для складних виробничих ТП часто виникають великі математичні проблеми, тож для використання аналітичного методу потрібно значне спрощення. Таке спрощення має свої недоліки, наприклад, так можна буде отримати лише орієнтовані результати. Аналітичні моделі математично вірно відображують зв'язок між вхідними та вихідними змінними, але їх структура не відображує внутрішню структуру ТП як об'єкта дослідження. В аналітичних моделях можливо використовувати широкий арсенал математичних методів, що часто дозволяє знайти оптимальне рішення, та інколи, можливо провести аналіз чутливості. Однак, аналітичні рішення не завжди існують, а існуючи буває складно віднайти.

Альтернативою аналітичним моделям є імітаційні моделі, які є динамічними. Головна різниця між цими моделями полягає в тому, що імітаційні моделі будують алгоритм, який відображує послідовність розвитку процесів всередині ТП, як об'єкта, який досліджується, та відтворюють його поведінку на комп'ютері, замість того, аби створювати аналітичний опис взаємозв'язків між входами та виходами процесу. Імітаційне моделювання використовують, коли ТП як моделювальний об'єкт є таким складним, що важко адекватно описати його поведінку математичними рівняннями [16]. Тож, імітаційне моделювання може допомогти поділити велику модель ТП на частини, які можна використовувати окремо, або створювати нові, більш складні або простіші моделі.

При імітаційному моделюванні відтворюється алгоритм функціонування ТП як системи в часі. Елементарні явища, які є складниками процесу, імітуються зі збереженням логічної структури та послідовності проходження. Це дає можливість оцінити характеристики ТП як системи. Крім того, імітаційні моделі дозволяють легко враховувати наявність дискретних та безперервний елементів або нелінійні характеристики елементів ТП. Для такого моделювання характерним є відтворення явищ, які описуються моделлю, зі збереженням їх логічної структури та взаємозв'язком між змінними та параметрами ТП як системи [16].

Імітаційна модель представляє собою розвернуту схему с детально описаною структурою та поведінкою досліджуваного ТП. Для того, аби рішення, яке буде близьким до оптимального, інколи необхідно провести багато випробувань імітаційної моделі ТП. Але перевага перед аналітичним моделювання велика, бо ж за допомогою імітаційного моделювання можливо отримати такі дані, які с аналітичним моделювання, отримати складно або неможливо. Прикладом є вплив мінливості параметрів моделі, або поведінка моделі (рис. 1.10).



Рисунок 1.10 – Методи вирішення моделі

Не так давно імітаційні моделі вважалися не дуже вживаним методом, який використовувався лише тоді, коли неможливо було застосовувати аналітичні. Це було спричинено тим, що вже побудована аналітична модель ТП за допомогою того, або іншого методу могла б знайти оптимальне детерміноване рішення. На сьогоднішній день велика кількість аналітичних моделей мають обмежене застосування на практиці.

Коли неможливо або недоцільним є застосувати аналітичні моделі, на допомогу приходять імітаційні. Імітаційні моделі вважаються одними з найперспективніших при вирішенні задач, де важливими є випадковість, час та динаміка.

Для вірного порівняння двох методів доречним буде коротко переглянути ще й недоліки як аналітичних моделей так і імітаційних.

Аналітичні моделі частіше є більш складними для побудова, а інколи, їх неможливо взагалі побудувати.

Аналітичні моделі зазвичай дають довготривалі рішення (стаціонарні), а практика показує, що часто необхідне саме нестаціонарна поведінка ТП як системи.

Для аналітичних моделей неможливе використання програмного забезпечення, яке б прискорювало отримання достовірних результатів.

Недоліками ж імітаційних моделей є такі:

- імітаційне моделювання потребує проведення великої кількості випробувань, аби отримати гарну оцінку цільової функції для кожного рішення;
- використання імітаційного моделювання потребує оцінки великої кількості альтернативних рішень.

Тож не дивлячись на недоліки обох методів, для вирішення задач кваліфікаційної роботи буде обрано імітаційний метод моделювання. Він дозволить оцінити функціонально-часові характеристики ТП з урахуванням множини випадкових факторів.

1.5 Постановка мети та задач дослідження

Проведений огляд та аналіз існуючих акселерометрів показав різноманітність сфери їх застосування. Найбільше практичне застосування знаходять МЕМС-акселерометри. Якість і собівартість МЕМС-акселерометрів багато у чому визначається якістю й ефективністю процесів їхнього виготовлення. Оцінка характеристик ТП виготовлення МЕМС-акселерометрів

здійснюється на етапах їх розробки й управління ними. Технологічний процес створення МЕМС-акселерометрів досить складний, та може складатися з десятків (сотень) операцій, які необхідно узгоджувати за часом. Це допоможе уникнути простою обладнання і, таким чином, сприятиме зниженню собівартості виробів. У процесах проектування, удосконалення та керування ТП доцільно здійснювати його математичне моделювання.

За результатами огляду й аналізу сучасного стану проблеми було встановлено, що для реалізації поставленої мети дослідження краще всього використовувати імітаційне моделювання. Це обумовлено його здатністю визначати оцінки функціонально-часових характеристик ТП в умовах стохастичності та неповної визначеності вхідних даних (інтенсивностей потоків заготовок, відмов обладнання, виникнення браку, часу виконання технологічних операцій тощо).

Метою дослідження є підвищення точності визначення функціональних характеристик технологічного процесу виготовлення МЕМС-акселерометрів за рахунок розробки адекватної імітаційної моделі.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- сформулювати постановку задачі моделювання технологічного процесу виготовлення МЕМС-акселерометрів;
- обрати метод та побудувати еквівалентну схему технологічного процесу;
- розробити моделювальний алгоритм розв'язання задачі;
- обрати мову програмування;
- обрати середовище розробки програми;
- створити програму, яка реалізує поставлену задачу;
- провести перевірку працездатності розробки;
- спланувати, провести модельні експерименти, оцінити точність отриманих результатів;
- розглянути питання безпеки життєдіяльності співробітників у відділі моделювання.

1.6 Висновки до першого розділу

MEMS-акселерометр – це складова частина багатьох сучасних засобів автоматизації. Виготовлення нових MEMS-акселерометрів пов'язані зі складною науково-прикладною задачею оптимізації ТП з урахуванням усіх вимог забезпечення функціональних їх параметрів. ТП створення сучасних MEMS-акселерометрів є досить складними, вони можуть складатися десятків і сотень операцій, які необхідно узгоджувати за часом. Ефективним інструментом розв'язання цієї задачі в процесах проектування й керування ТП є математичне моделювання.

За результатами огляду й аналізу сучасного стану проблеми було встановлено, що для розв'язання задачі встановлення функціонально-часових характеристик ТП краще всього використовувати імітаційне моделювання. Його використання дозволить визначати оцінки обсягів випуску продукції, завантаження обладнання, необхідні розміри страхових заділів тощо в умовах стохастичності чи неповної визначеності вхідних даних, таких як інтенсивності потоків заготовок, відмови обладнання, виникнення браку, час виконання технологічних операцій тощо.

2 МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАЧІ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

2.1 Постановка задачі створення імітаційної моделі

У процесі проектування ТП виготовлення МЕМС-акселерометра може виникнути розбіжність у часі при виконанні етапів. Через це може виникнути простій обладнання, та брак комплектуючих, а це, у свою чергу, призводить до економічних витрат. Для уникнення цього та для оцінки технологічного процесу необхідно провести моделювання. Для вирішення цієї задачі найкраще підходить імітаційне моделювання.

Головна задача імітаційного моделювання технологічного процесу – це кількісна оцінка характеристик процесу виготовлення виробів, з урахуванням характеристик обладнання. При проектуванні ТП чи керуванні ним імітаційна модель дозволяє прогнозувати його продуктивність, завантаженість обладнання, необхідні страхові заділи, визначити необхідну кількість робочих місць, кількості обладнання або режимів роботи використовуваного обладнання для забезпечення безперебійної роботи виробництва [17].

Для імітаційного моделювання технологічного процесу МЕМС-акселерометрів необхідно задати його структуру та характеристики обладнання, які визначають тривалість всіх технологічних операцій, зокрема:

- час, необхідний для виконання етапу вибору заготовки;
- час, необхідний на виконання етапу отримання елементів;
- час, необхідний на виконання етапу отримання компонентів;
- час, необхідний на виконання збірки та монтажу чутливого елемента;
- час, необхідний на виконання контролю чутливого елемента;
- час, необхідний на виконання етапу виготовлення корпусів МЕМС-акселерометрів;
- час, необхідний на виконання збірки та монтажу МЕМС-акселерометра [9].

Необхідно для ймовірно заданих даних щодо інтенсивностей надходження заготовок, комплектуючих і заданого інтервалу моделювання визначити оцінки продуктивності ТП, завантаженість обладнання на кожній з операцій, розміри оборотних заділів (черг).

2.2 Технологічний процес як СМО

Під час проектування технологічного процесу інколи виникає розбіжність у часі виконуючих етапів. Насамперед, це призводить до простою обладнання та економічних витрат. Для того, аби провести оцінку отриманого технологічного процесу потрібно здійснити його моделювання. ТП в процесі моделювання може бути представлений як багатофазна СМО, яка є об'єктом дослідження в теорії масового обслуговування. Така дія дозволяє аналізувати наскільки ефективним є маршрут технологічного процесу та продуктивність потоків [9].

Системою масового обслуговування може бути будь-яка система, яка використовується для обслуговування потоку заявок. Поява вимог на обслуговування та завершення обслуговування у випадкові моменти часу є типовими для таких систем. Встановлення залежності між факторами, які визначають функціональні можливості системи масового обслуговування є предметом теорії масового обслуговування. Вивчення режиму функціонування обслуговуючої системи та дослідження явищ, що виникають у процесі обслуговування є основним завданням теорії системи масового обслуговування.

Під час надходження вимог у систему із зовнішнього середовища утворюється вхідний потік, а моменти закінчення обслуговування утворюють вихідний потік. Час, який вимог перебувають у черзі є однією з характеристик обслуговуючої системи. Цей час можливо скоротити, але за рахунок збільшення кількості обслуговуючих пристроїв. Таке збільшення потребує додаткових матеріальних витрат, та слід зазначити, що при цьому виникає збільшення часу простою пристрою через відсутність вимог на обслуговування.

Системи масового обслуговування класифікуються за такими ознаками:

- закону розподілу вхідного потоку заявок;
- кількості обслуговуючих приладів;
- закону розподілу часу обслуговування в обслуговуючих приладах;
- кількості місць в черзі;
- дисципліни обслуговування.

Існує велика кількість різноманітних систем масового обслуговування, які розрізняються за структурою або організацією процесу функціонування. Класифікація СМО за структурними елементами наведена на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Класифікація систем масового обслуговування

Для моделювання технологічного процесу частіше використовуються наступні типи СМО [18]:

- одноканальні СМО з очікуванням, які представляють собою один

обслуговуючий прилад з нескінченною чергою. Така СМО є найбільш поширеною при моделюванні;

– багатоканальні СМО з очікуванням, які представляють собою декілька обслуговуючих пристроїв, які працюють паралельно із загальною нескінченною чергою;

– одноканальні СМО з груповим обслуговуванням заявок представляють собою один обслуговуючий прилад з нескінченною чергою;

– одноканальні СМО з груповим надходженням заявок, які представляють собою один обслуговуючий прилад з нескінченною чергою.

У багатоканальній системі масового обслуговування потік заявок обслуговується ідентичними каналами [19]. Вибір обслуговуючого каналу може здійснюватися за мінімальним коефіцієнтом навантаження каналу, за жеребкуванням або ж за мінімальним значенням часу звільнення каналу.

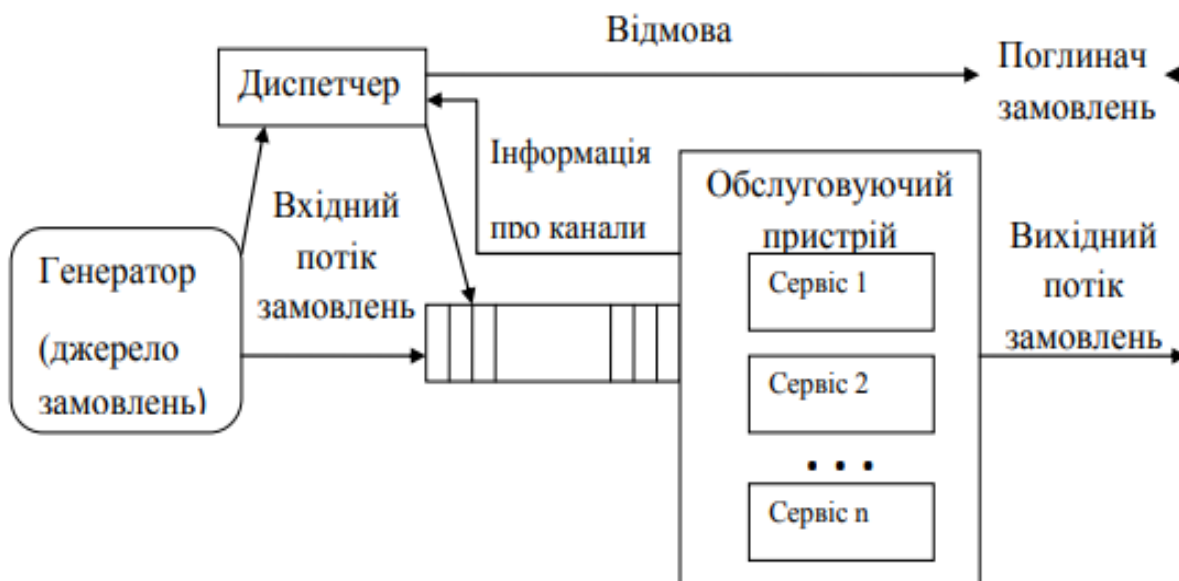


Рисунок 2.2 – Структурна схема багатоканальної системи масового обслуговування

Виходячи з дискретного та стохастичного характеру ТП виготовлення МЕМС-акселерометра будемо подавати у вигляді Q-схеми.

2.3 Розробка Q-схеми та її опис

При побудові структури СМО необхідно враховувати основні елементи:

- P – прилад обслуговування;
- D – джерела;
- H – черги або накопичувачі, в яких можуть зберігатися декілька заявок одночасно;
- K – канали обслуговування заявок.

Також необхідно знати набір правил, за якими заявки покидають H . Правило виглядає так: заявка покидає накопичувач, якщо він переповнений, або закінчився час очікування заявки в накопичувачі [20].

Окрім цього, необхідно враховувати правила для заявок, за якими вони залишаються у каналі. Набір можливих алгоритмів поведінки заявок можливо подати у вигляді оператора алгоритмів поведінки заявок A .

Q-схема, яка описує процес функціонування СМО може бути задана у вигляді:

$$Q = \langle W, U, H, Z, R, A \rangle,$$

- де
- W – потік заявок (заготовок, комплектуючих);
 - U – потік обслуговування;
 - H – правила, за якими заявки покидають накопичувач;
 - Z – стани системи;
 - R – зв'язки, які задають структуру схеми;
 - A – правила поведінки заявок.

Розроблена Q-схема представлена на рисунку . Об'єктом дослідження є покроковий технологічний процес виготовлення МЕМС-акселерометра. Джерелами виступають шаблони заготівки підкладок, які поступають до системи з певною інтенсивністю λ [21].

Обладнання на різних етапах технологічного процесу (рис. 2.3) постає у

вигляді відповідних каналів K_i , а саме:

- етапи 1-2 постають у вигляді K_1 ;
- етапи 3-4 постають у вигляді K_2 - K_3 ;
- етапи 5-14 постають у вигляді K_4 - K_{13} .

Також, необхідно задати необхідні дані, які були описані у постановці задачі (підрозділ 2.1):

- t_1 – час, необхідний для виконання етапів, пов'язаних з етапами підготовки підкладки(1-2);
- t_2 – час, необхідний на виконання етапу отримання корпусу (3);
- t_3 – час, необхідний на виконання етапу контролю корпусу (4);
- t_4 – час, необхідний на виконання етапу отримання елементів (5);
- t_5 – час, необхідний на виконання етапу отримання компонентів (6);
- t_6 – час, необхідний на виконання збірки та монтажу чутливого елемента (7);
- t_7 – час, необхідний на виконання етапу контролю чутливого елемента (8);
- t_8 – час, необхідний на виконання етапу кристалографії (9);
- t_9 – час, необхідний на виконання етапу контролю кристалографії (10);
- t_{10} – час, необхідний на виконання етапу здійснення монтажу кристалу до корпусу акселерометра(11);
- t_{11} – час, необхідний на виконання етапу з'єднання виводів з кристалом (12);
- t_{12} – час, необхідний на виконання етапу контролю з'єднання виводів з кристалом (13);
- t_{13} – час, необхідний на виконання етапу герметизації (14).

У загальному випадку час виконання всіх технологічних операцій задається випадковими величинами з заданими законами розподілу та параметрами.

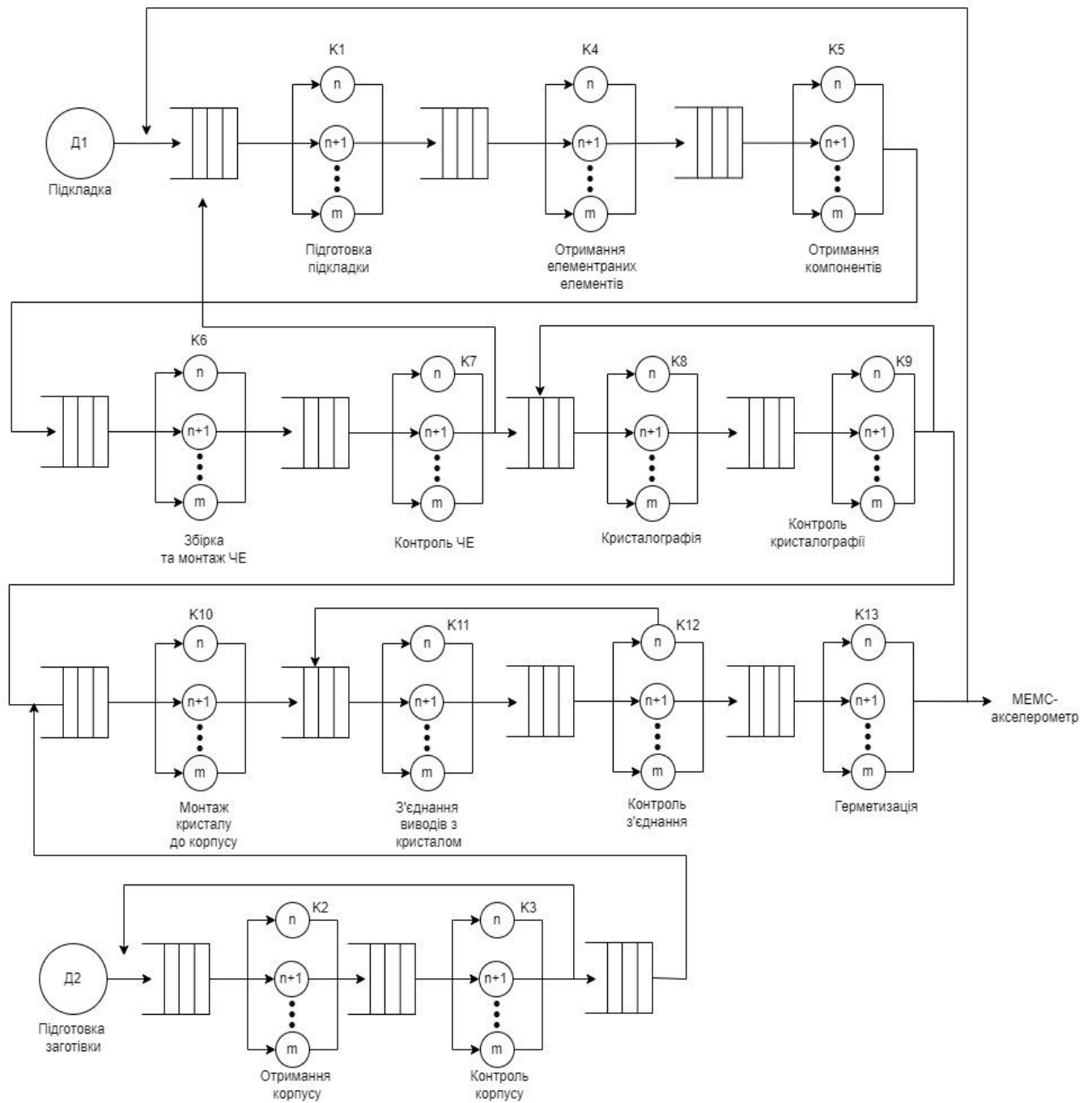


Рисунок 2.3 – Q-схема ТП виготовлення MEMS-акселерометра

2.4 Розробка моделювального алгоритму

Моделювальний алгоритм будемо будувати за універсальним часовим принципом Δt . ТП виготовлення досліджуваного об'єкта буде розглядатися у вигляді послідовної зміни станів у n -вимірному просторі

$x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$.

Задача моделювання динаміки полягає у тому, аби побудувати функції стану $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$.

Для того, аби встановити траєкторію переміщення предмета виробництва, насамперед, має бути встановлена відповідність математичної моделі, котра буде поєднувати функції $x(t)$ зі змінними, параметрами об'єкта, часом та початкові умови [22].

Розіб'ємо проміжок дослідження $[t_0, T]$ на інтервали, ширина яких буде складати $\Delta t = const$. Перед початком моделювання лічильник часу буде мати значення $t = t_0$.

Стан процесу матиме значення $x(t_0)$. Через деякий час Δt лічильник часу матиме значення $t_1 = t_0 + \Delta t$, а стан $x_i(t_1) = x_i(t_0 + \Delta t)$, $i = \overline{1, n}$, буде визначений за співвідношеннями математичної моделі.

Далі здійснюється перехід до наступного моменту часу $t_2 = t_1 + \Delta t$ та визначається стан ТП.

Схема алгоритму моделювання ТП виготовлення МЕМС-акселерометра представлена на рис. 2.4.

Детальніше розглянемо фрагмент моделювального алгоритму, на прикладі процесу виготовлення підкладки.

Спочатку, заготівка надходить до черги К1, якщо черга вільна, то заготівка потрапляє до етапу «Підготовка підкладки» та виконується за час t_1 . Якщо черга зайнята, то заготівка чекає на звільнення з черги і тільки потім вона потрапляє до цього етапу [23].

У такий самий спосіб заготівка проходить етапи:

- К4 «Отримання елементарних елементів» за час t_4 ;
- К5 «Отримання компонентів» за час t_5 ;
- К6 «Збірка та монтаж ЧЕ за час t_6 ;
- К7 «Контроль ЧЕ» за час t_7 .

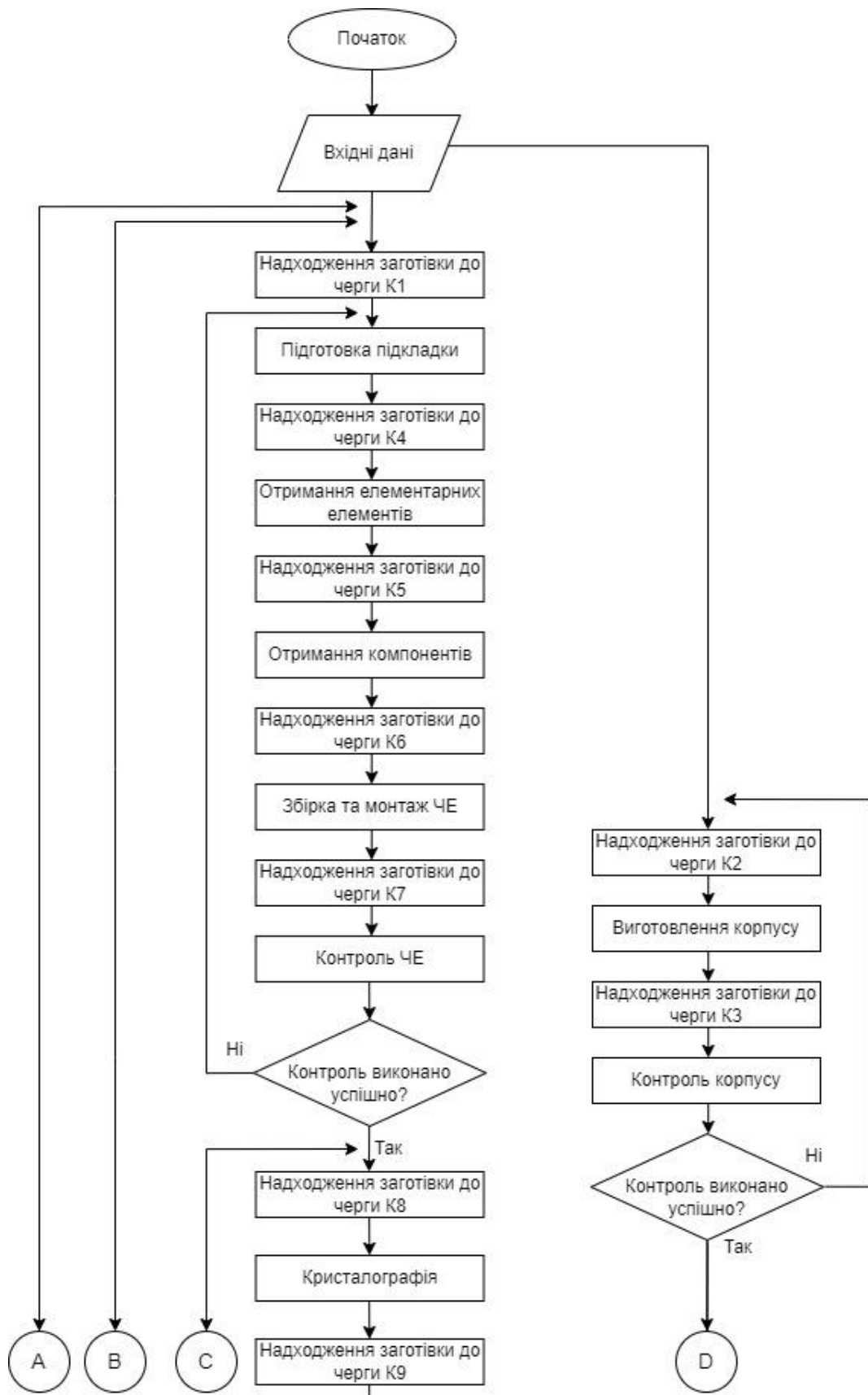


Рисунок 2.4 – Моделювальний алгоритм ТП, аркуш 1

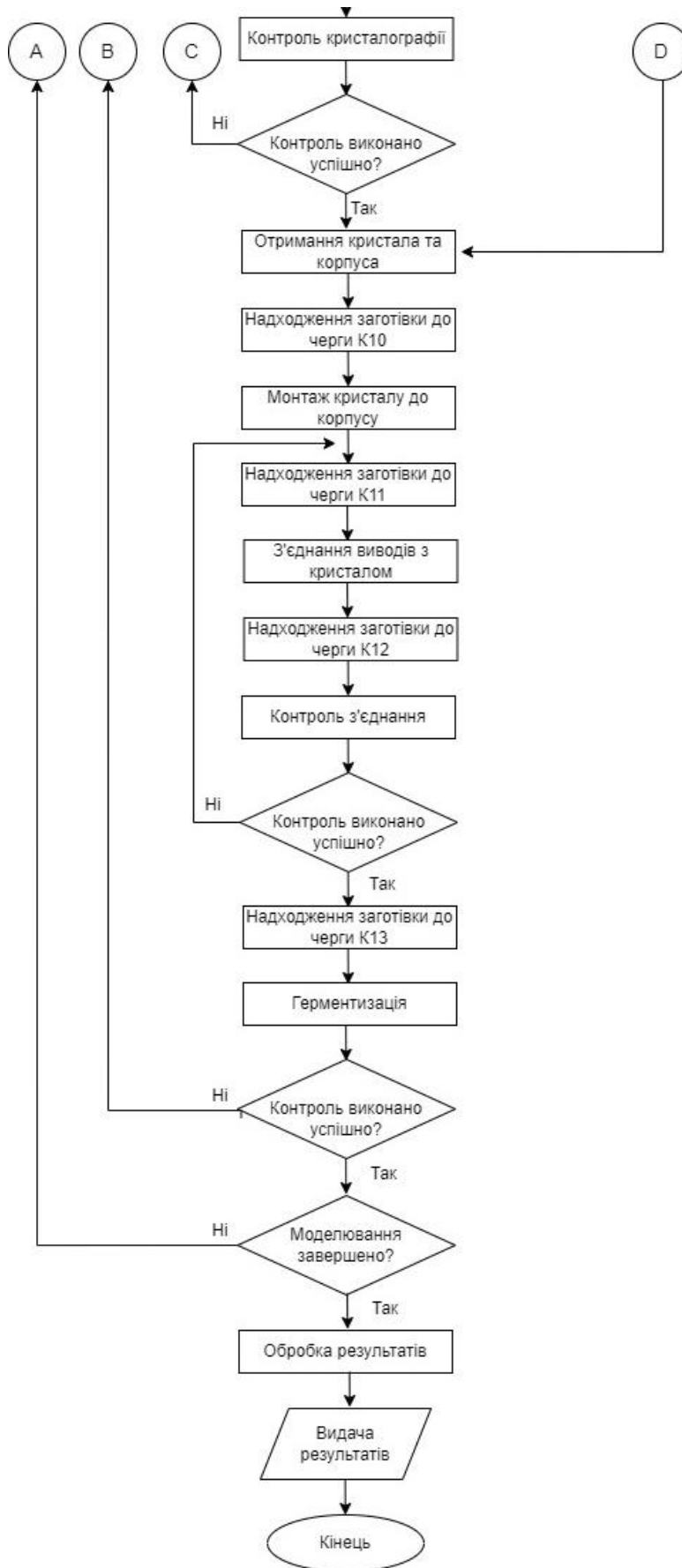


Рисунок 2.4, аркуш 2

Після етапу К7 з ймовірністю p_1 заготовка надходить до черги каналу К8 «Кристалографія» виконується за час t_8 , а з ймовірністю $1 - p_1$, яка дорівнює 0,15, надходить до черги К1 та проходить його за час t_1 , за умови відсутності черги. Якщо черга зайнята, то заготовка чекає на звільнення черги і тільки потім вона потрапляє до цього етапу.

Після етапу «Кристалографія», заготовка надходить в чергу до етапу К9 «Контроль кристалу», який виконується за час t_9 , за умови відсутності черги. Якщо черга зайнята, то заготовка чекає на звільнення черги і тільки потім вона потрапляє до цього етапу.

Після цього з ймовірністю p_2 заготовка надходить до черги етапу К10 «Монтаж кристалу до корпусу», який виконується за час t_{10} , за умови відсутності черги. Якщо черга зайнята, то заготовка чекає на звільнення черги і тільки потім вона потрапляє до цього етапу.

Після цього з ймовірністю $1 - p_2$, яка дорівнює 0,05, заготовка повертається в чергу перед етапом «Кристалографія», який виконується за час t_8 , при умові відсутності черги. Якщо черга зайнята, то заготовка чекає на звільнення черги і тільки потім вона потрапляє до цього етапу.

Після етапу «Монтаж кристала в корпус» заготовка надходить в чергу етапу К11 «З'єднання виводів з кристалом», який виконується за час t_{11} , за умови відсутності черги. Якщо черга зайнята, то заготовка чекає на звільнення черги і тільки потім вона потрапляє до цього етапу.

Після цього заготовка надходить до черги етапу К12 «Контроль з'єднання», який виконується за час t_{12} , за умови відсутності черги. Якщо черга зайнята, то заготовка чекає на звільнення черги і тільки потім вона потрапляє до цього етапу.

Після цього заготовка з ймовірністю p_3 надходить до черги етапу 13 «Герметизація», який виконується за час t_{13} , за умови відсутності черги. Якщо черга зайнята, то заготовка чекає на звільнення черги і тільки потім вона потрапляє до цього етапу.

З ймовірністю $1 - p_3$, яка дорівнює 0,1, заготовка повертається в чергу перед етапом К11 «З'єднання виводів з кристалом», який виконується за час t_{11} , за

умови відсутності черги. Якщо черга зайнята, то заготівка чекає на звільнення черги і тільки потім вона потрапляє до цього етапу.

Після завершення етапу «Герметизація» заготівка з ймовірністю p_4 надходить до наступного етапу «Моделювання завершено?». З ймовірністю $1 - p_4$, яка дорівнює 0,15, заготівка повертається до етапу К1 «Підготовка підкладки» та проходить його за час за час t_1 за умови відсутності черги. Якщо черга зайнята, то заготівка чекає на звільнення черги і тільки потім вона потрапляє до цього етапу.

Після завершення етапу «Моделювання завершено?» моделювання ТП виготовлення МЕМС-акселерометра завершується. Після цього результати моделювання оброблюються та їх отримує користувач.

2.5 Висновки до другого розділу

Виходячи з дискретності та стохастичності розглянутого ТП виготовлення МЕМС-акселерометрів, запропоновано розглядати його як багатофазну СМО. Це дозволило обрати для моделювання дискретно-стохастичний підхід. В рамках цього підходу виконана формалізація процесу з використанням багатофазної Q-схеми.

Для розробленої Q-схеми побудовано моделювальний алгоритм, який відображає всі технологічні операції та зв'язки між ними. Розроблений алгоритм слугує основою для розроблюваного програмного засобу імітаційного моделювання ТП виготовлення МЕМС-акселерометрів.

3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТИ

3.1 Вибір мови програмування та середовища розробки

У пункті 1.3.1 кваліфікаційної роботи було розглянуто мови загального призначення (МЗП) та мови імітаційного моделювання (МІМ).

Для розробки необхідного програмного забезпечення перевага надається мовам імітаційного моделювання, а саме дискретним мовам імітаційного моделювання, тому як виробничий процес є дискретним [24]. Провівши порівняння доступних дискретних мов, таких як, *GPSS* та *SIMSCRIPT*, завдяки великому переліку переваг було обрано мову *GPSS* для написання магістерської роботи.

Головними перевагами мови *GPSS* є розумна побудова та загальна потужність. Завдяки цьому, загальні функції мови легкі для вивчення, а додаткові потужні функції, роблять її ідеальною для моделювання систем.

Моделювання системи на *GPSS* представляє собою імітацію послідовності переходів системи, в деякий момент часу, з одного стану в інший. Тож надважливим є організація моделювання в часі.

Система *GPSS World* є універсальним та найбільш відомим середовищем моделювання, яка призначена для професійного моделювання різноманітних процесів та систем [25]. За допомогою цієї системи можливо ефективно моделювати однаково як виробничі, так і невиробничі процеси, наприклад, вуличний рух, різні системи масового обслуговування, проведення військових дій, роботу торгівельних центрів тощо. Система додатково має такі переваги: вона є прозорою (структура моделі не є чорним ящиком), тож допускає нестандартну обробку даних, та є вільною від обмежень аналітичних та чисельних методів. Система дозволяє проводити експерименти, які згенеровані системою, або користувачем. Окрім цього, вбудовано потужний текстовий редактор, який призначений для створення та редагування різноманітних імітаційних моделей, та має великий набір команд для управління

процесом моделювання.

Використання системи моделювання *GPSS World* суттєво прискорює процес моделювання та дослідження різноманітних систем масового обслуговування.

3.2 Розробка програми

На основі створеного алгоритму моделювання та Q-схеми технологічного процесу виготовлення MEMC-акселерометрів буда написана програма з використанням мови *GPSS* [26].

Під час написання програми найчастіше використовувалися такі оператори:

- GENERATE – вводить транзакти до моделі;
- QUEUE – поміщає заготівку до черги;
- LOGIC – логічний перемикач;
- LOOP – здійснює повторне проходження транзактом ланцюга блоків;
- START – здійснює управління процесом моделювання;
- RELEASE – звільняє пристрій;
- GATE – додатковий блок, який перевіряє стан приладів, пам'яті, логічних ключів;
- TERMINATE – видаляє транзакт.
- ENTER – поміщає транзакт до пам'яті;
- LEAVE – виводить транзакт з пам'яті;
- ASSIGN – змінює значення параметру транзакта;
- DEPART – видаляє транзакт з черги;
- SEIZE – займає прилад;
- ADVANCE – затримує транзакт на певний час.

Приклад коду для виконання етапу «Підготовка підкладки» наведено на рис. 3.1.

```

; Підготовка підкладки
Phase1          ASSIGN PhaseNumber,1
                QUEUE Queue1
                GATE NU P$DeviceNumber
                DEPART Queue1

                ASSIGN PhaseTime1,M1
PhaseChannelWork1 LOOP PhaseChannelCount1,ChannelWork
                ASSIGN PhaseTime2,M1
                TABULATE PhaseTimeTable

                TRANSFER ,Phase2

```

Рисунок 3.1 – Послідовність команд етапу «Підготовка підкладки»

Спочатку за допомогою ASSIGN відбувається визначення фази, у якій буде відбуватися робота. Після чого, за допомогою QUEUE позначається черга з якою відбувається робота, у даному випадку Queue1 [26]. GANE NU позначає, що прилад не зайнятий, після чого за допомогою DEPART видаляється транзакт з черги. У кожного транзакту є значення, яке відповідає за час, який транзакт знаходиться у системі, та запам'ятовуємо значення за допомогою ASSIGN. За допомогою LOOP вказується цикл, у якому вказується змінна та значення, скільки разів цей цикл повинен пропрацювати. За допомогою ASSIGN, запам'ятовується нове значення, яке визначає значення транзакту після проходження циклу, та за допомогою TABULATE значення заноситься до таблиці. Після чого, за допомогою TRANSFER відбувається перехід до наступного блоку.

Після завершення моделювання ТП виготовлення MEMC-акселерометра була згенерована блок-діаграма, яка представлена на рис. 3.2.

Створена програма дозволяє отримати характеристики, які необхідні будуть для оцінки ТП, наприклад: коефіцієнт завантаження каналів, час виконання етапів, максимальна довжина черги, час перебування заготовок в черзі. По закінченню проведення імітаційного моделювання ТП надається звіт, який представлено на рис. 3.3.

Loc	Block Type	Current C...	Entry Co...	Retry Ch...	Line Nu...	Include-...
SETUP1	ASSIGN	0	0	0	17	0
2 ASN	ASSIGN	0	0	0	18	0
3 ASN	ASSIGN	0	0	0	19	0
4 ASN	ASSIGN	0	0	0	20	0
5 ASN	ASSIGN	0	0	0	21	0
6 ASN	ASSIGN	0	0	0	22	0
7 ASN	ASSIGN	0	0	0	23	0
8 ASN	ASSIGN	0	0	0	24	0
9 TRA	TRANSFER	0	0	0	26	0
SETUP2	ASSIGN	0	0	0	28	0
11 ASN	ASSIGN	0	0	0	29	0
12 ASN	ASSIGN	0	0	0	30	0
13 ASN	ASSIGN	0	0	0	32	0
14 ASN	ASSIGN	0	0	0	33	0
15 ASN	ASSIGN	0	0	0	34	0
16 ASN	ASSIGN	0	0	0	35	0
17 TRA	TRANSFER	0	0	0	37	0
18 GEN	GENERATE	0	0	0	40	0
19 TRA	TRANSFER	0	0	0	41	0
20 GEN	GENERATE	0	0	0	44	0
21 TRA	TRANSFER	0	0	0	45	0
FINISH	TERMINATE	0	0	0	47	0
PHASE1	QUEUE	0	0	0	50	0
24 GAT	GATE	0	0	0	51	0
25 LOG	LOGIC	0	0	0	52	0
26 DEP	DEPART	0	0	0	53	0
PHAS...	SEIZE	0	0	0	55	0
28 ADV	ADVANCE	0	0	0	56	0
29 REL	RELEASE	0	0	0	57	0
30 ASN	ASSIGN	0	0	0	58	0
31 LOO	LOOP	0	0	0	59	0
32 TRA	TRANSFER	0	0	0	60	0
PHASE2	LOGIC	0	0	0	63	0
34 QUE	QUEUE	0	0	0	64	0
35 GAT	GATE	0	0	0	65	0
36 LOG	LOGIC	0	0	0	66	0
37 DEP	DEPART	0	0	0	67	0
PHAS...	SEIZE	0	0	0	69	0
39 ADV	ADVANCE	0	0	0	70	0
40 REL	RELEASE	0	0	0	71	0
41 ASN	ASSIGN	0	0	0	72	0
42 LOO	LOOP	0	0	0	73	0
43 TRA	TRANSFER	0	0	0	74	0
PHASE3	LOGIC	0	0	0	78	0
45 QUE	QUEUE	0	0	0	79	0
46 GAT	GATE	0	0	0	80	0
47 LOG	LOGIC	0	0	0	81	0
48 DEP	DEPART	0	0	0	82	0
PHAS...	SEIZE	0	0	0	84	0
50 ADV	ADVANCE	0	0	0	85	0
51 REL	RELEASE	0	0	0	86	0
52 ASN	ASSIGN	0	0	0	87	0
53 LOO	LOOP	0	0	0	88	0
54 TRA	TRANSFER	0	0	0	89	0
PHASE4	LOGIC	0	0	0	90	0
56 QUE	QUEUE	0	0	0	91	0
57 GAT	GATE	0	0	0	92	0
58 LOG	LOGIC	0	0	0	93	0
59 DEP	DEPART	0	0	0	94	0
PHAS...	SEIZE	0	0	0	96	0
61 ADV	ADVANCE	0	0	0	97	0
62 REL	RELEASE	0	0	0	98	0

Рисунок 3.2 – Блок-діаграма алгоритму імітаційного моделювання ТП виготовлення МЕМС акселерометра, аркуш 1

63 ASN	ASSIGN	0	0	0	99	0
64 LOO	LOOP	0	0	0	100	0
65 TRA	TRANSFER	0	0	0	101	0
PHASE5	LOGIC	0	0	0	106	0
67 QUE	QUEUE	0	0	0	107	0
68 GAT	GATE	0	0	0	108	0
69 LOG	LOGIC	0	0	0	109	0
70 DEP	DEPART	0	0	0	110	0
PHAS...	SEIZE	0	0	0	112	0
72 ADV	ADVANCE	0	0	0	113	0
73 REL	RELEASE	0	0	0	114	0
74 ASN	ASSIGN	0	0	0	115	0
75 LOO	LOOP	0	0	0	116	0
76 TRA	TRANSFER	0	0	0	117	0
PHASE6	LOGIC	0	0	0	122	0
78 QUE	QUEUE	0	0	0	123	0
79 GAT	GATE	0	0	0	124	0
80 LOG	LOGIC	0	0	0	125	0
81 DEP	DEPART	0	0	0	126	0
PHAS...	SEIZE	0	0	0	128	0
83 ADV	ADVANCE	0	0	0	129	0
84 REL	RELEASE	0	0	0	130	0
85 ASN	ASSIGN	0	0	0	131	0
86 LOO	LOOP	0	0	0	132	0
87 TRA	TRANSFER	0	0	0	133	0
PHASE7	LOGIC	0	0	0	138	0
89 QUE	QUEUE	0	0	0	139	0
90 GAT	GATE	0	0	0	140	0
91 LOG	LOGIC	0	0	0	141	0
92 DEP	DEPART	0	0	0	142	0
PHAS...	SEIZE	0	0	0	144	0
94 ADV	ADVANCE	0	0	0	145	0
95 REL	RELEASE	0	0	0	146	0
96 ASN	ASSIGN	0	0	0	147	0
97 LOO	LOOP	0	0	0	148	0
98 LOG	LOGIC	0	0	0	149	0
99 LOG	LOGIC	0	0	0	151	0
100 E...	ENTER	0	0	0	152	0
101 G...	GATE	0	0	0	153	0
102 L...	LOGIC	0	0	0	154	0
103 LEA	LEAVE	0	0	0	155	0
104 TER	TERMINATE	0	0	0	156	0
PHAS...	LOGIC	0	0	0	159	0
106 Q...	QUEUE	0	0	0	160	0
107 G...	GATE	0	0	0	161	0
108 L...	LOGIC	0	0	0	162	0
109 DEP	DEPART	0	0	0	163	0
PHAS...	SEIZE	0	0	0	165	0
111 A...	ADVANCE	0	0	0	166	0
112 REL	RELEASE	0	0	0	167	0
113 A...	ASSIGN	0	0	0	168	0
114 L...	LOOP	0	0	0	169	0
115 T...	TRANSFER	0	0	0	170	0
PHAS...	LOGIC	0	0	0	173	0
117 Q...	QUEUE	0	0	0	174	0
118 G...	GATE	0	0	0	175	0
119 L...	LOGIC	0	0	0	176	0
120 DEP	DEPART	0	0	0	177	0
PHAS...	SEIZE	0	0	0	179	0
122 A...	ADVANCE	0	0	0	180	0
123 REL	RELEASE	0	0	0	181	0
124 A...	ASSIGN	0	0	0	182	0
125 L...	LOOP	0	0	0	183	0
126 L...	LOGIC	0	0	0	184	0

Рисунок 3.2, аркуш 2

Loc	Block Type	Current C...	Entry Co...	Retry Ch...	Line Nu...	Include-...
126 L...	LOGIC	0	0	0	184	0
127 L...	LOGIC	0	0	0	186	0
128 E...	ENTER	0	0	0	187	0
129 G...	GATE	0	0	0	188	0
130 L...	LOGIC	0	0	0	189	0
131 LEA	LEAVE	0	0	0	190	0
132 A...	ASSIGN	0	0	0	191	0
133 T...	TRANSFER	0	0	0	192	0
PHAS...	QUEUE	0	0	0	197	0
135 G...	GATE	0	0	0	198	0
136 L...	LOGIC	0	0	0	199	0
137 DEP	DEPART	0	0	0	200	0
PHAS...	SEIZE	0	0	0	201	0
139 A...	ADVANCE	0	0	0	202	0
140 REL	RELEASE	0	0	0	203	0
141 A...	ASSIGN	0	0	0	204	0
142 L...	LOOP	0	0	0	205	0
143 T...	TRANSFER	0	0	0	206	0
PHAS...	LOGIC	0	0	0	209	0
145 Q...	QUEUE	0	0	0	210	0
146 G...	GATE	0	0	0	211	0
147 L...	LOGIC	0	0	0	212	0
148 DEP	DEPART	0	0	0	213	0
PHAS...	SEIZE	0	0	0	215	0
150 A...	ADVANCE	0	0	0	216	0
151 REL	RELEASE	0	0	0	217	0
152 A...	ASSIGN	0	0	0	218	0
153 L...	LOOP	0	0	0	219	0
154 T...	TRANSFER	0	0	0	220	0
PHAS...	LOGIC	0	0	0	223	0
156 Q...	QUEUE	0	0	0	224	0
157 G...	GATE	0	0	0	225	0
157 G...	GATE	0	0	0	225	0
158 L...	LOGIC	0	0	0	226	0
159 DEP	DEPART	0	0	0	227	0
PHAS...	SEIZE	0	0	0	229	0
161 A...	ADVANCE	0	0	0	230	0
162 REL	RELEASE	0	0	0	231	0
163 A...	ASSIGN	0	0	0	232	0
164 L...	LOOP	0	0	0	233	0
165 T...	TRANSFER	0	0	0	234	0
PHAS...	LOGIC	0	0	0	239	0
167 Q...	QUEUE	0	0	0	240	0
168 G...	GATE	0	0	0	241	0
169 L...	LOGIC	0	0	0	242	0
170 DEP	DEPART	0	0	0	243	0
PHAS...	SEIZE	0	0	0	244	0
172 A...	ADVANCE	0	0	0	245	0
173 REL	RELEASE	0	0	0	246	0
174 A...	ASSIGN	0	0	0	247	0
175 L...	LOOP	0	0	0	248	0
176 L...	LOGIC	0	0	0	249	0
177 TER	TERMINATE	0	0	0	250	0
178 G...	GENERATE	0	0	0	259	0
179 TER	TERMINATE	0	0	0	260	0

Рисунок 3.2, аркуш 3

START TIME	END TIME	BLOCKS	FACILITIES	STORAGES
0.000	1000.000	166	23	2
NAME	VALUE			
CHANNELWORK	52.000			
DEVICENUMBER	10008.000			
DEVICENUMBERPHASEERROR33	10003.000			
DEVICENUMBERPHASEERROR7	10002.000			
DEVICETIME1	10004.000			
DEVICETIME2	10005.000			
DEVICETIME3	10006.000			
PHASE1	57.000			
PHASE2	63.000			
PHASE21	105.000			
PHASE22	111.000			
PHASE3	69.000			
PHASE31	123.000			
PHASE32	130.000			
PHASE33	136.000			
PHASE34	143.000			
PHASE4	75.000			
PHASE5	81.000			
PHASE6	87.000			
PHASE7	93.000			
PHASECHANNELCOUNT1	10012.000			
PHASECHANNELCOUNT2	10013.000			
PHASECHANNELCOUNT21	10009.000			
PHASECHANNELCOUNT22	10010.000			
PHASECHANNELCOUNT3	10014.000			
PHASECHANNELCOUNT31	10019.000			
PHASECHANNELCOUNT32	10020.000			
PHASECHANNELCOUNT33	10021.000			
PHASECHANNELCOUNT34	10022.000			
PHASECHANNELCOUNT4	10015.000			
PHASECHANNELCOUNT5	10016.000			
PHASECHANNELCOUNT6	10017.000			
PHASECHANNELCOUNT7	10018.000			
PHASECHANNELWORK1	61.000			
PHASECHANNELWORK2	67.000			
PHASECHANNELWORK21	109.000			
PHASECHANNELWORK22	115.000			
PHASECHANNELWORK3	73.000			
PHASECHANNELWORK31	128.000			
PHASECHANNELWORK32	134.000			
PHASECHANNELWORK33	140.000			
PHASECHANNELWORK34	147.000			
PHASECHANNELWORK4	79.000			
PHASECHANNELWORK5	85.000			
PHASECHANNELWORK6	91.000			
PHASECHANNELWORK7	97.000			

Рисунок 3.3 – Звіт за результатами імітаційного моделювання ТП

виготовлення МЕМС акселерометрів, аркуш 1

PHASECHANNELWORK6	91.000
PHASECHANNELWORK7	97.000
PHASECOMPLETED22	10029.000
PHASECOMPLETED7	10030.000
PHASEERROR22	156.000
PHASEERROR23	159.000
PHASEERROR24	162.000
PHASEERROR5	150.000
PHASEERROR7	153.000
PHASENUMBER	10007.000
PHASES22	10001.000
PHASES7	10000.000
QUEUE1	10027.000
QUEUE2	10031.000
QUEUE21	10011.000
QUEUE22	10028.000
QUEUE3	10032.000
QUEUE31	10037.000
QUEUE32	10038.000
QUEUE33	10039.000
QUEUE34	10040.000
QUEUE4	10033.000
QUEUE5	10034.000
QUEUE6	10035.000
QUEUE7	10036.000
SETUP1	1.000
SETUP2	42.000
STOREDPHASECHANNELCOUNT22	10025.000
STOREDPHASECHANNELCOUNT23	10026.000
STOREDPHASECHANNELCOUNT6	10023.000
STOREDPHASECHANNELCOUNT7	10024.000
TRANSFERD1	3.000
TRANSFERD2	44.000
TRANSFERWORK	29.000

LABEL	LOC	BLOCK TYPE	ENTRY COUNT	CURRENT	COUNT	RETRY
SETUP1	1	ASSIGN	168	0	0	
	2	ASSIGN	168	0	0	
TRANSFERD1	3	ASSIGN	197	0	0	
	4	ASSIGN	197	0	0	
	5	ASSIGN	197	0	0	
	6	ASSIGN	197	0	0	
	7	ASSIGN	197	0	0	
	8	ASSIGN	197	0	0	
	9	ASSIGN	197	0	0	
	10	ASSIGN	197	0	0	
	11	ASSIGN	197	0	0	
	12	ASSIGN	197	0	0	
	13	ASSIGN	197	0	0	
	14	ASSIGN	197	0	0	
	15	ASSIGN	197	0	0	

Рисунок 3.3, аркуш 2

	15	ASSIGN	197	0	0
	16	ASSIGN	197	0	0
	17	ASSIGN	197	0	0
	18	TEST	197	0	0
	19	TEST	20	0	0
	20	TEST	20	0	0
	21	TEST	20	0	0
	22	TEST	20	0	0
	23	TEST	20	0	0
	24	TEST	6	0	0
	25	TEST	6	0	0
	26	TEST	6	0	0
	27	TEST	0	0	0
	28	TEST	0	0	0
TRANSFERWORK	29	TEST	2512	0	0
	30	TEST	1855	0	0
	31	TEST	1692	0	0
	32	TEST	1391	0	0
	33	TEST	1271	0	0
	34	TEST	1086	0	0
	35	TEST	991	0	0
	36	TEST	819	0	0
	37	TEST	638	0	0
	38	TEST	279	0	0
	39	TEST	208	0	0
	40	TEST	81	0	0
	41	TEST	46	0	0
SETUP2	42	ASSIGN	163	0	0
	43	ASSIGN	163	0	0
TRANSFERD2	44	ASSIGN	181	0	0
	45	ASSIGN	181	0	0
	46	TEST	181	0	0
	47	TEST	0	0	0
	48	GENERATE	168	0	0
	49	TRANSFER	168	0	0
	50	GENERATE	163	0	0
	51	TRANSFER	163	0	0
CHANNELWORK	52	SEIZE	2526	0	0
	53	ADVANCE	2526	14	0
	54	RELEASE	2512	0	0
	55	ASSIGN	2512	0	0
	56	TRANSFER	2512	0	0
PHASE1	57	ASSIGN	177	0	0
	58	QUEUE	177	11	0
	59	GATE	166	0	0
	60	DEPART	166	0	0
PHASECHANNELWORK1	61	LOOP	823	0	0
	62	TRANSFER	164	0	0
PHASE2	63	ASSIGN	164	0	0
	64	QUEUE	164	0	0
	65	GATE	164	0	0

Рисунок 3.3, аркуш 3

	65	GATE	164	0	0
	66	DEPART	164	0	0
PHASECHANNELWORK2	67	LOOP	327	0	0
	68	TRANSFER	163	0	0
PHASE3	69	ASSIGN	163	0	0
	70	QUEUE	163	0	0
	71	GATE	163	0	0
	72	DEPART	163	0	0
PHASECHANNELWORK3	73	LOOP	464	22	0
	74	TRANSFER	139	0	0
PHASE4	75	ASSIGN	139	0	0
	76	QUEUE	139	18	0
	77	GATE	121	0	0
	78	DEPART	121	0	0
PHASECHANNELWORK4	79	LOOP	241	0	0
	80	TRANSFER	120	0	0
PHASE5	81	ASSIGN	120	0	0
	82	QUEUE	120	25	0
	83	GATE	95	0	0
	84	DEPART	95	0	0
PHASECHANNELWORK5	85	LOOP	280	2	0
	86	TRANSFER	91	0	0
PHASE6	87	ASSIGN	97	0	0
	88	QUEUE	97	2	0
	89	GATE	95	0	0
	90	DEPART	95	0	0
PHASECHANNELWORK6	91	LOOP	190	0	0
	92	TRANSFER	95	0	0
PHASE7	93	ASSIGN	95	0	0
	94	QUEUE	95	9	0
	95	GATE	86	0	0
	96	DEPART	86	0	0
PHASECHANNELWORK7	97	LOOP	258	0	0
	98	TRANSFER	86	0	0
	99	LOGIC	72	0	0
	100	ENTER	72	0	0
	101	GATE	72	0	0
	102	LOGIC	72	0	0
	103	LEAVE	72	0	0
	104	TRANSFER	72	0	0
PHASE21	105	ASSIGN	181	0	0
	106	QUEUE	181	0	0
	107	GATE	181	0	0
	108	DEPART	181	0	0
PHASECHANNELWORK21	109	LOOP	362	0	0
	110	TRANSFER	181	0	0
PHASE22	111	ASSIGN	181	0	0
	112	QUEUE	181	0	0
	113	GATE	181	0	0
	114	DEPART	181	0	0
PHASECHANNELWORK22	115	LOOP	540	0	0

Рисунок 3.3, аркуш 4

	116	TRANSFER	179	0	0
	117	LOGIC	161	88	0
	118	ENTER	73	1	0
	119	GATE	72	0	0
	120	LOGIC	72	0	0
	121	LEAVE	72	0	0
	122	TERMINATE	72	0	0
PHASE31	123	ASSIGN	72	0	0
	124	ASSIGN	72	0	0
	125	QUEUE	72	0	0
	126	GATE	72	0	0
	127	DEPART	72	0	0
PHASECHANNELWORK31	128	LOOP	143	0	0
	129	TRANSFER	71	0	0
PHASE32	130	ASSIGN	77	0	0
	131	QUEUE	77	0	0
	132	GATE	77	0	0
	133	DEPART	77	0	0
PHASECHANNELWORK32	134	LOOP	204	24	0
	135	TRANSFER	51	0	0
PHASE33	136	ASSIGN	51	0	0
	137	QUEUE	51	15	0
	138	GATE	36	0	0
	139	DEPART	36	0	0
PHASECHANNELWORK33	140	LOOP	71	0	0
	141	TRANSFER	35	0	0
	142	TRANSFER	0	0	0
PHASE34	143	ASSIGN	29	0	0
	144	QUEUE	29	6	0
	145	GATE	23	0	0
	146	DEPART	23	0	0
PHASECHANNELWORK34	147	LOOP	69	0	0
	148	TRANSFER	23	0	0
	149	TERMINATE	22	0	0
PHASEERROR5	150	ASSIGN	8	0	0
	151	ASSIGN	8	0	0
	152	TRANSFER	8	0	0
PHASEERROR7	153	ASSIGN	14	0	0
	154	ASSIGN	14	0	0
	155	TRANSFER	14	0	0
PHASEERROR22	156	ASSIGN	18	0	0
	157	ASSIGN	18	0	0
	158	TRANSFER	18	0	0
PHASEERROR33	159	ASSIGN	6	0	0
	160	ASSIGN	6	0	0
	161	TRANSFER	6	0	0
PHASEERROR34	162	ASSIGN	1	0	0
	163	ASSIGN	1	0	0
	164	TRANSFER	1	0	0
	165	GENERATE	1	0	0

Рисунок 3.3, аркуш 5

---	-----	-	-	-
166	TERMINATE	1	0	0

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE. TIME	AVAIL.	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
1	166	0.991	5.970	1	310	0	0	11	0
2	328	0.328	1.000	1	309	0	0	0	0
3	327	0.654	2.000	1	0	0	0	0	0
4	327	0.654	2.000	1	331	0	0	0	0
5	164	0.328	2.000	1	150	0	0	0	0
6	163	0.976	5.988	1	307	0	0	0	0
7	140	0.974	6.955	1	261	0	0	0	22
8	121	0.967	7.989	1	228	0	0	18	0
9	107	0.959	8.959	1	174	0	0	27	0
10	95	0.950	9.996	1	168	0	0	9	2
11	86	0.086	1.000	1	0	0	0	0	0
12	83	0.166	2.000	1	0	0	0	0	0
13	83	0.249	3.000	1	0	0	0	0	0
201	18	0.180	10.000	1	0	0	0	0	0
202	18	0.351	19.517	1	324	0	0	0	0
203	17	0.510	30.000	1	0	0	0	0	0
299	6	0.054	9.000	1	0	0	0	0	0
300	78	0.774	9.918	1	166	0	0	0	0
301	77	0.764	9.917	1	164	0	0	0	0
302	46	0.914	19.862	1	107	0	0	6	24
303	30	0.894	29.788	1	67	0	0	15	0
304	23	0.092	4.000	1	0	0	0	0	0
305	23	0.115	5.000	1	0	0	0	0	0

QUEUE	MAX	CONT.	ENTRY	ENTRY (0)	AVE. CONT.	AVE. TIME	AVE. (-0)	RETRY
QUEUE21	2	0	181	161	0.019	0.102	0.928	0
QUEUE1	12	11	177	3	6.364	35.955	36.575	0
QUEUE22	3	0	181	124	0.138	0.765	2.428	0
QUEUE2	1	0	164	164	0.000	0.000	0.000	0
QUEUE3	1	0	163	9	0.236	1.446	1.531	0
QUEUE4	18	18	139	6	8.342	60.017	62.724	0
QUEUE5	26	25	120	10	12.278	102.315	111.616	0
QUEUE6	4	2	97	83	1.554	16.023	111.019	0
QUEUE7	10	9	95	83	3.930	41.365	327.473	0
QUEUE31	2	0	72	53	0.211	2.928	11.096	0
QUEUE32	2	0	77	77	0.000	0.000	0.000	0
QUEUE33	15	15	51	16	6.654	130.480	190.127	0
QUEUE34	7	6	29	23	2.505	86.387	417.539	0

STORAGE	CAP.	REM.	MIN.	MAX.	ENTRIES	AVL.	AVE. C.	UTIL.	RETRY	DELAY
PHASE37	1	1	0	1	72	1	0.020	0.020	0	0
PHASE322	1	0	0	1	73	1	0.988	0.988	0	88

Рисунок 3.3, аркуш 6

LOGICSWITCH			VALUE	RETRY		
PHASECOMPLETED22			0	0		
PHASECOMPLETED7			0	1		

FEC KN	PRI	BDT	ASSEM	CURRENT	NEXT	PARAMETER	VALUE
150	0	1000.022	150	53	54	DEVICENUMBER	5.000
						PHASECHANNELCOUNT2	1.000
						PHASENUMBER	2.000
						PHASECHANNELCOUNT1	0.000
						PHASECHANNELCOUNT33	2.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT33	2.000
						PHASECHANNELCOUNT32	3.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT32	3.000
						PHASECHANNELCOUNT7	3.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT7	3.000
						PHASECHANNELCOUNT6	2.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT6	2.000
						PHASECHANNELCOUNT34	3.000
						PHASECHANNELCOUNT31	2.000
						PHASECHANNELCOUNT5	3.000
						PHASECHANNELCOUNT4	2.000
						PHASECHANNELCOUNT3	3.000
331	0	1000.022	331	53	54	DEVICENUMBER	4.000
						PHASECHANNELCOUNT22	1.000
						PHASENUMBER	22.000
						PHASECHANNELCOUNT21	0.000
309	0	1000.022	309	53	54	DEVICENUMBER	2.000
						PHASECHANNELCOUNT1	3.000
						PHASENUMBER	1.000
						PHASECHANNELCOUNT33	2.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT33	2.000
						PHASECHANNELCOUNT32	3.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT32	3.000
						PHASECHANNELCOUNT7	3.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT7	3.000
						PHASECHANNELCOUNT6	2.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT6	2.000
						PHASECHANNELCOUNT34	3.000
						PHASECHANNELCOUNT31	2.000
						PHASECHANNELCOUNT5	3.000
						PHASECHANNELCOUNT4	2.000
						PHASECHANNELCOUNT3	3.000
						PHASECHANNELCOUNT2	2.000
168	0	1000.369	168	53	54	DEVICENUMBER	10.000
						PHASECHANNELCOUNT5	1.000
						PHASENUMBER	5.000
						PHASECHANNELCOUNT4	0.000

Рисунок 3.3, аркуш 7

						PHASECHANNELCOUNT4	0.000
						PHASECHANNELCOUNT3	0.000
						PHASECHANNELCOUNT2	0.000
						PHASECHANNELCOUNT1	0.000
						PHASECHANNELCOUNT33	2.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT33	2.000
						PHASECHANNELCOUNT32	3.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT32	3.000
						PHASECHANNELCOUNT7	3.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT7	3.000
						PHASECHANNELCOUNT6	2.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT6	2.000
						PHASECHANNELCOUNT34	3.000
						PHASECHANNELCOUNT31	2.000
228	0	1001.369	228	53	54		
						DEVICENUMBER	8.000
						PHASECHANNELCOUNT4	1.000
						PHASENUMBER	4.000
						PHASECHANNELCOUNT3	0.000
						PHASECHANNELCOUNT2	0.000
						PHASECHANNELCOUNT1	0.000
						PHASECHANNELCOUNT33	2.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT33	2.000
						PHASECHANNELCOUNT32	3.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT32	3.000
						PHASECHANNELCOUNT7	3.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT7	3.000
						PHASECHANNELCOUNT6	2.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT6	2.000
						PHASECHANNELCOUNT34	3.000
						PHASECHANNELCOUNT31	2.000
						PHASECHANNELCOUNT5	3.000
333	0	1001.413	333	0	50		
334	0	1001.603	334	0	48		
307	0	1002.021	307	53	54		
						DEVICENUMBER	6.000
						PHASECHANNELCOUNT3	2.000
						PHASENUMBER	3.000
						PHASECHANNELCOUNT2	0.000
						PHASECHANNELCOUNT1	0.000
						PHASECHANNELCOUNT33	2.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT33	2.000
						PHASECHANNELCOUNT32	3.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT32	3.000
						PHASECHANNELCOUNT7	3.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT7	3.000
						PHASECHANNELCOUNT6	2.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT6	2.000
						PHASECHANNELCOUNT34	3.000
						PHASECHANNELCOUNT31	2.000
						PHASECHANNELCOUNT5	3.000
						PHASECHANNELCOUNT4	2.000

Рисунок 3.3, аркуш 8

174	0	1004.369	174	53	54	DEVICENUMBER	9.000	
						PHASECHANNELCOUNT5	2.000	
						PHASENUMBER	5.000	
						PHASECHANNELCOUNT4	0.000	
						PHASECHANNELCOUNT3	0.000	
						PHASECHANNELCOUNT2	0.000	
						PHASECHANNELCOUNT1	0.000	
						PHASECHANNELCOUNT33	2.000	
						STOREDPHASECHANNELCOUNT33	2.000	
						PHASECHANNELCOUNT32	3.000	
						STOREDPHASECHANNELCOUNT32	3.000	
						PHASECHANNELCOUNT7	3.000	
						STOREDPHASECHANNELCOUNT7	3.000	
						PHASECHANNELCOUNT6	2.000	
						STOREDPHASECHANNELCOUNT6	2.000	
						PHASECHANNELCOUNT34	3.000	
						PHASECHANNELCOUNT31	2.000	
310	0	1005.022	310	53	54	DEVICENUMBER	1.000	
						PHASECHANNELCOUNT1	4.000	
						PHASENUMBER	1.000	
						PHASECHANNELCOUNT33	2.000	
						STOREDPHASECHANNELCOUNT33	2.000	
						PHASECHANNELCOUNT32	3.000	
						STOREDPHASECHANNELCOUNT32	3.000	
						PHASECHANNELCOUNT7	3.000	
						STOREDPHASECHANNELCOUNT7	3.000	
						PHASECHANNELCOUNT6	2.000	
						STOREDPHASECHANNELCOUNT6	2.000	
						PHASECHANNELCOUNT34	3.000	
						PHASECHANNELCOUNT31	2.000	
						PHASECHANNELCOUNT5	3.000	
						PHASECHANNELCOUNT4	2.000	
						PHASECHANNELCOUNT3	3.000	
						PHASECHANNELCOUNT2	2.000	
67	0	1006.369	67	53	54	DEVICENUMBER	302.000	
						PHASECHANNELCOUNT33	1.000	
						PHASENUMBER	32.000	
						PHASECHANNELCOUNT32	0.000	
						PHASECHANNELCOUNT31	0.000	
						PHASECHANNELCOUNT7	0.000	
						PHASECHANNELCOUNT6	0.000	
						PHASECHANNELCOUNT5	0.000	
						PHASECHANNELCOUNT4	0.000	
						PHASECHANNELCOUNT3	0.000	
						PHASECHANNELCOUNT2	0.000	
						PHASECHANNELCOUNT1	0.000	
						STOREDPHASECHANNELCOUNT33	2.000	
						STOREDPHASECHANNELCOUNT32	3.000	
						STOREDPHASECHANNELCOUNT7	3.000	

Рисунок 3.3, аркуш 9

						STOREDPHASECHANNELCOUNT6	2.000
						PHASECHANNELCOUNT34	3.000
107	0	1006.369	107	53	54		
						DEVICENUMBER	302.000
						PHASECHANNELCOUNT32	1.000
						PHASENUMBER	32.000
						PHASECHANNELCOUNT31	0.000
						PHASECHANNELCOUNT7	0.000
						PHASECHANNELCOUNT6	0.000
						PHASECHANNELCOUNT5	0.000
						PHASECHANNELCOUNT4	0.000
						PHASECHANNELCOUNT3	0.000
						PHASECHANNELCOUNT2	0.000
						PHASECHANNELCOUNT1	0.000
						PHASECHANNELCOUNT33	2.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT33	2.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT32	3.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT7	3.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT6	2.000
						PHASECHANNELCOUNT34	3.000
166	0	1006.369	166	53	54		
						DEVICENUMBER	300.000
						PHASECHANNELCOUNT31	1.000
						PHASENUMBER	31.000
						PHASECHANNELCOUNT7	0.000
						PHASECHANNELCOUNT6	0.000
						PHASECHANNELCOUNT5	0.000
						PHASECHANNELCOUNT4	0.000
						PHASECHANNELCOUNT3	0.000
						PHASECHANNELCOUNT2	0.000
						PHASECHANNELCOUNT1	0.000
						PHASECHANNELCOUNT33	2.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT33	2.000
						PHASECHANNELCOUNT32	3.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT32	3.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT7	3.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT6	2.000
						PHASECHANNELCOUNT34	3.000
164	0	1006.369	164	53	54		
						DEVICENUMBER	301.000
						PHASECHANNELCOUNT32	2.000
						PHASENUMBER	32.000
						PHASECHANNELCOUNT31	0.000
						PHASECHANNELCOUNT7	0.000
						PHASECHANNELCOUNT6	0.000
						PHASECHANNELCOUNT5	0.000
						PHASECHANNELCOUNT4	0.000
						PHASECHANNELCOUNT3	0.000
						PHASECHANNELCOUNT2	0.000
						PHASECHANNELCOUNT1	0.000
						PHASECHANNELCOUNT33	2.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT33	2.000

Рисунок 3.3, аркуш 10

						STOREDPHASECHANNELCOUNT7	3.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT6	2.000
						PHASECHANNELCOUNT34	3.000
261	0	1006.369	261	53	54		
						DEVICENUMBER	7.000
						PHASECHANNELCOUNT3	1.000
						PHASENUMBER	3.000
						PHASECHANNELCOUNT2	0.000
						PHASECHANNELCOUNT1	0.000
						PHASECHANNELCOUNT33	2.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT33	2.000
						PHASECHANNELCOUNT32	3.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT32	3.000
						PHASECHANNELCOUNT7	3.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT7	3.000
						PHASECHANNELCOUNT6	2.000
						STOREDPHASECHANNELCOUNT6	2.000
						PHASECHANNELCOUNT34	3.000
						PHASECHANNELCOUNT31	2.000
						PHASECHANNELCOUNT5	3.000
						PHASECHANNELCOUNT4	2.000
324	0	1008.694	324	53	54		
						DEVICENUMBER	202.000
						PHASECHANNELCOUNT22	2.000
						PHASENUMBER	22.000
						PHASECHANNELCOUNT21	0.000
335	0	2000.000	335	0	165		

Рисунок 3.3, аркуш 11

Далі будуть розглянуті певні параметри, які будуть необхідні для подальшої роботи (рис.3.4 та рис.3.5.).

QUEUE	MAX	CONT.	ENTRY	ENTRY(0)	AVE.CONT.	AVE.TIME	AVE.(-0)	RETRY
QUEUE21	2	0	181	161	0.019	0.102	0.928	0
QUEUE1	12	11	177	3	6.364	35.955	36.575	0
QUEUE22	3	0	181	124	0.138	0.765	2.428	0
QUEUE2	1	0	164	164	0.000	0.000	0.000	0
QUEUE3	1	0	163	9	0.236	1.446	1.531	0
QUEUE4	18	18	139	6	8.342	60.017	62.724	0
QUEUE5	26	25	120	10	12.278	102.315	111.616	0
QUEUE6	4	2	97	83	1.554	16.023	111.019	0
QUEUE7	10	9	95	83	3.930	41.365	327.473	0
QUEUE31	2	0	72	53	0.211	2.928	11.096	0
QUEUE32	2	0	77	77	0.000	0.000	0.000	0
QUEUE33	15	15	51	16	6.654	130.480	190.127	0
QUEUE34	7	6	29	23	2.505	86.387	417.539	0

Рисунок 3.4 – Фрагмент звіту статистики черг

Загальний опис параметрів, які представлені на рис. 3.5:

- QUEUE – інформація про ім'я черги;
- MAX – інформація про максимальну довжину черги;
- CONT – інформація про поточну довжину черги,
- ENTRY – інформація про загальну кількість входів;
- ENTRY (0) – інформація про кількість «нульових» входів;
- AVE. CONT – інформація про середню довжину черги;
- AVE.TIME – інформація про середній час перебування заготовки у черзі;
- AVE.(-0) – інформація про середній час перебування у черзі, без «нульових» входів;
- RETRY – кількість заготовок, які чекають на особливі умови.

FACILITY	ENTRIES	UTIL.	AVE.	TIME	AVAIL.	OWNER	PEND	INTER	RETRY	DELAY
1	166	0.991	5.970	1	310	0	0	11	0	
2	328	0.328	1.000	1	309	0	0	0	0	
3	327	0.654	2.000	1	0	0	0	0	0	
4	327	0.654	2.000	1	331	0	0	0	0	
5	164	0.328	2.000	1	150	0	0	0	0	
6	163	0.976	5.988	1	307	0	0	0	0	
7	140	0.974	6.955	1	261	0	0	0	22	
8	121	0.967	7.989	1	228	0	0	18	0	
9	107	0.959	8.959	1	174	0	0	27	0	
10	95	0.950	9.996	1	168	0	0	9	2	
11	86	0.086	1.000	1	0	0	0	0	0	
12	83	0.166	2.000	1	0	0	0	0	0	
13	83	0.249	3.000	1	0	0	0	0	0	
201	18	0.180	10.000	1	0	0	0	0	0	
202	18	0.351	19.517	1	324	0	0	0	0	
203	17	0.510	30.000	1	0	0	0	0	0	
299	6	0.054	9.000	1	0	0	0	0	0	
300	78	0.774	9.918	1	166	0	0	0	0	
301	77	0.764	9.917	1	164	0	0	0	0	
302	46	0.914	19.862	1	107	0	0	6	24	
303	30	0.894	29.788	1	67	0	0	15	0	
304	23	0.092	4.000	1	0	0	0	0	0	
305	23	0.115	5.000	1	0	0	0	0	0	

Рисунок 3.5 – Фрагмент звіту статистики щодо каналів обслуговування

Загальний опис параметрів, які представлені на рис. 3.5:

- FACILITY – інформація про назву обслуговуючого каналу;
- ENTRIES – інформація про кількість заготівок, які пройшли через обслуговуючого каналу;
- UTIL – інформація про ймовірне завантаження обслуговуючого каналу;
- AVE. TIME – інформація про середній час обслуговування однієї заготівки обслуговуючим каналом;
- AVAIL – інформація про стан готовності обслуговуючого каналу на момент кінця моделювання (1 – готовий до обслуговування наступної заготівки; 0 – не готовий);
- OWNER – інформація про номер останньої заготівки, яка займає обслуговуючий канал (якщо не займалося, то значення 0);
- PEND – інформація про кількість заготівок, які очікують обслуговуючий канал і знаходяться в режимі переривання;
- INTER – інформація про кількість заготівок, що переривають обслуговуючий канал на даний момент;
- RETRY – інформація про кількість заготівок, які очікують особливих умов, що залежать від стану об'єкта типу «обслуговуючий канал»;
- DELAY – інформація про кількість заготівок, які очікують заняття або звільнення обслуговуючого каналу.

3.3 Планування машинних експериментів

На основі звіту, отриманого після закінчення моделювання ТП виготовлення MEMC-акселерометра була створена та заповнена таблиця 3.1, у якій відображуються отримані характеристики ТП.

Для отримання стійких оцінок характеристик ТП необхідно розв'язати задачу тактичного планування експериментів. Зокрема, для того, аби визначити

математичне сподівання коефіцієнта навантаження каналів, дисперсію коефіцієнта навантаження каналів та оцінку точності моделювання, необхідно провести множину попередніх прогонів моделі.

Кількість прогонів $N=10$. Результати отримані після прогонів, відображено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.1 – Характеристики ТП виготовлення МЕМС-акселерометра

Етап ТП	Коефіцієнти завантаження каналів k_i	Час виконання етапів t_i , с	Максимальна довжина черги n_i	Час перебування заготовок в черзі t_{q_i} , с	Кількість готових виробів
Q_1	0,986	11	24	48,339	163
Q_2	0,330	2	1	0,000	163
Q_3	0,659	98	1	1,424	139
Q_4	0,657	8	18	60,017	120
Q_5	0,326	24	26	102,315	94
Q_6	0,976	1	14	16,023	78
Q_7	0,974	5	10	41,365	71
Q_8	0,967	1	2	0,102	202
Q_9	0,959	4	3	0,765	71
Q_{10}	0,950	10	2	2,928	70
Q_{11}	0,086	98	2	0,000	47
Q_{12}	0,166	30	15	130,480	31
Q_{13}	0,249	9	7	86,387	23
Σ	–	301	113	477,8	1272
Середнє значення	0,637	23,1	8,7	36,8	98

Таблиця 3.2 – Характеристики ТП виготовлення МЕМС-акселерометра отримані підчас прогонів програми

Номер експерименту	Коефіцієнти завантаження каналів k_i	Максимальна довжина черги n_i	Час перебування заготовок в черзі t_{q_i} , с	Кількість готових виробів
1	0,986	24	48,339	23
2	0,993	24	99,243	22
3	0,990	25	52,614	20
4	0,999	16	40,504	20
5	0,975	25	41,806	17
6	0,994	15	28,078	22
7	0,987	12	28,640	25
8	0,933	18	48,301	23
9	0,993	16	40,420	20
10	0,988	22	33,113	23

Математичне сподівання коефіцієнта завантаження каналів розраховується за формулою (3.1) [28]:

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

де k_i – коефіцієнт завантаження каналу на i -му етапі.

Після підстановки значень до формули (3.1) значень з таблиці 3.1:

$$\bar{k} = \frac{1}{10} \cdot 8808 \approx 0,89.$$

Дисперсію коефіцієнта навантаження каналів розраховується за формулою (3.2):

$$D(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{k} - k_i)^2. \quad (3.2)$$

Після підстановки значень до формули (3.2) значень з таблиці 3.1:

$$D(k) = \frac{1}{10} \cdot 0,007945 \approx 0,000794.$$

3.3 Аналіз результатів

Точність оцінок математичного сподівання розраховується за формулою (3.3):

$$\varepsilon = \frac{t_p \cdot \sqrt{D}}{\sqrt{N}}, \quad (3.3)$$

де \sqrt{D} – середньоквадратичне відхилення;

t_p – табличний коефіцієнт, який відповідає заданій достовірності результатів.

Для достовірності 0,95 значення коефіцієнта $t_p = 1,96$.

Після підстановки до формули (3.3) відповідних значень:

$$\varepsilon = \frac{1,96 \cdot 0,028178}{\sqrt{10}} \approx 0,017.$$

Обчислимо похибку оцінки ймовірності настання подій для всіх етапів контролю. Похибка оцінки ймовірності обчислюється за формулою (3.4) [27]:

$$\varepsilon_i = t_p \sqrt{\frac{p_i(1-p_i)}{N}}, \quad (3.4)$$

де t_p – табличний коефіцієнт, який відповідає заданій достовірності результатів.

Для достовірності 0,95 значення коефіцієнта $t_p = 1,96$.

Після підстановки до формули (3.4) відповідних значень для етапу «Контроль ЧЕ», де ймовірність переходу до етапу «Підготовка підкладки» складає 0,15:

$$\varepsilon_1 = 1,96 \sqrt{\frac{0,15(1-0,15)}{10}} = 0,016.$$

Підставимо до формули (3.4) відповідні значення для етапу «Контроль кристалографії», де ймовірність переходу до етапу «Кристалографія» складає 0,05:

$$\varepsilon_2 = 1,96 \sqrt{\frac{0,05(1-0,05)}{10}} = 0,134.$$

Підставимо до формули (3.4) відповідні значення для етапу «Контроль з'єднання», де ймовірність переходу до етапу «Монтаж кристалу в корпус» складає 0,1:

$$\varepsilon_3 = 1,96 \sqrt{\frac{0,1(1-0,1)}{10}} = 0,185.$$

Підставимо до формули (3.4) відповідні значення для етапу «Герметизація», де ймовірність переходу до етапу «Підготовка підкладки» складає 0,15:

$$\varepsilon_4 = 1,96 \sqrt{\frac{0,15(1-0,15)}{10}} = 0,221.$$

Підставимо до формули (3.4) відповідні значення для етапу «Контроль корпусу», де ймовірність переходу до етапу «Отримання корпусу» складає 0,2:

$$\varepsilon_4 = 1,96 \sqrt{\frac{0,2(1-0,2)}{10}} = 0,247.$$

Таким чином встановлено, що максимальна похибка результатів моделювання розглянутого фрагмента ТП виготовлення MEMC-акселерометра не перевищує 0,247.

3.4 Висновки до третього розділу

За результатами аналізу сучасних мов імітаційного моделювання для програмування імітації ТП виготовлення MEMC-акселерометрів обрану просту та достатньо потужну мову GPSS та систему моделювання GPSS World.

Використання GPSS World дозволило суттєво прискорити процес створення моделі, проведення та обробки результатів моделювання. та дослідження різноманітних систем масового обслуговування.

Після розробки програми моделювання було розв'язано основні задачі тактичного планування комп'ютерних експериментів. Це дозволило визначити необхідну кількість експериментів та оцінити точність отриманих статистичних оцінок характеристик ТП виготовлення MEMC-акселерометрів.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ У ЛАБОРАТОРІЇ МОДЕЛЮВАННЯ

4.1 Вимоги до приміщення

Розглянемо питання охорони праці та безпеки життєдіяльності в лабораторії моделювання технологічних процесів. Огляд та аналіз умов праці розробників проводиться з точки зору виявлення можливих небезпечних виробничих факторів, які можуть бути створені технічними засобами, технологічним процесом або неправильною організацією праці на робочих місцях [28].

Приміщення лабораторії для моделювання має такі характеристики:

- висота стелі 2,7 м;
- віконні отвори – 20 м²;
- площа приміщення становить 36 м².

Згідно НПАОП 40.1-1.21-98 приміщення лабораторії може бути віднесене до приміщень без підвищеної безпеки через відсутність чинників, які б вказували на підвищену небезпеку. Приміщення чисте, сухе та провітрюване. Підлога приміщення ізольована [28].

Робота у лабораторії моделювання вважається легкою фізичною роботою, та відноситься до категорії 1А, згідно якої енерговитрата до 120 ккал/год [29].

Встановлено такі нормативні параметри мікроклімату згідно з ДСН-3.3.6.042-99.

У холодну пору року:

- температура повітря 22-24 °С;
- відносна вологість повітря 40-60 %;
- швидкість руху повітря 0,1 м/с;

У теплу пору року:

- температура повітря 23-25 °С;
- відносна вологість повітря 40-60 %;
- швидкість руху повітря 0,1 м/с;

Для підтримки вказаних параметрів мікроклімату в холодну пору року використовується опалення, а в теплу пору року застосовується кондиціонування повітря.

В лабораторії працює 5 дослідників, знаходиться 5 ПЕОМ. На робочому місці встановлена ПЕОМ з LCD монітором, місце організовано згідно з НПАОП 0.00-1.28-10 та ДСТУ 12.2.032-78. Параметри робочого столу мають заміри:

- ширина 800-1300 мм;
- висота 720 мм;
- глибина 800-1000 мм.

Столи з моніторами необхідно розміщувати в положенні відносно вікон так, аби природне світло було зліва. Робочі столи повинні бути розташовані відносно один одного на відстані > 2 м. Монітори слід розташовувати так, аби відстань між ними була $> 1,3$ м.

Виконувана робота в лабораторії вимагає використання ламп, норми освітлення мають бути в межах 200-500 лк. Освітлення згідно ДБН В.2.5-28-2006 здійснюється системою загального рівномірного освітлення.

Розрахункова формула методу розрахунку освітлення:

$$W = \frac{W_{\Sigma}}{S}, \quad (4.1)$$

де W – питома потужність, Вт/м²;

S – площа приміщення, м²;

W_{Σ} – загальна потужність освітлювальної установки Вт, яка розраховується за формулою:

$$W_{\Sigma} = W_{cb} \cdot n_{cb}, \quad (4.2)$$

де W_{cb} – потужність одного світильника, Вт;

n_{cb} – кількість світильників в приміщенні, шт;

$$W_{\Sigma} = 100 \cdot 7 = 700 \text{ Вт} , \quad (4.3)$$

$$W = \frac{700}{36} = 19,4 \text{ Вт/м}^2.$$

Питомій потужності 19,4 Вт/м² відповідає освітленість в 300 лк при мінімальній допустимій освітленості 200 лк.

Виконувана робота в лабораторії відноситься до групи В (розробка нових програм, налагодження програм тощо). Згідно ДСАН ПиН 3.3.2-007-98, для розробників встановлюється 8-ми годинний робочий день.

Впродовж робочого дня у розробника відсутня фізична активність та навантаження, тому що робота виключно сидяча та безперервна. Через таке навантаження та недотримання вимог безпеки під час роботи за комп'ютером у розробника можуть з'явитися симптоми напруження, а саме головний біль напруження, почервоніння та відчуття сухості в очах, болі у поясниці, провокування варикозного розширення вен нижніх кінцівок.

Для того, аби уникнути перенапруги очей необхідно дотримуватися відстані до монітору близько 80 см. Клавіатура повинна бути розташована на відстані 100..300 мм від краю стола. Для зняття втоми під час роботи рекомендується виконувати фізичні вправи і вправи для очей. Також, необхідно робити перерви на 10 хвилин кожні 50 хвилин роботи. У самому приміщенні лабораторії необхідно проводити регулярне вологе прибирання та провітрювання, бажано, після кожної робочої години.

4.2. Заходи цивільного захисту

Згідно з Законом України «Про цивільну оборону» повинна бути створена система цивільного захисту [31].

Система цивільного захисту повинна:

- повідомляти співробітників про надзвичайну ситуацію або її можливе виникнення;
- забезпечити співробітників засобами індивідуального захисту;
- спланувати необхідні спеціальні умови для забезпечення функціонування в умовах надзвичайної ситуації.

У лабораторії, де проводиться розробка, не зберігаються та не використовуються небезпечне обладнання, речовини або матеріали, тож причиною виникнення надзвичайної ситуації може бути лише пожежа.

4.3 Заходи пожежної безпеки

Приміщення лабораторії виконано з цегли та бетону. Згідно з ДБН В.1.1.7-2002 воно відноситься до I ступеня вогнестійкості. Приміщення має ІІа категорію пожеженебезпеки згідно з НПАОП 40.1-1.01-97. Для того, аби не допустити пожежі у приміщенні необхідно здійснювати контроль мережі електроживлення і дотримуватись правил пожежної профілактики. Відповідно до ДСТУ 12.1.004-9 пожежна безпека забезпечується системами протипожежного захисту. Згідно з ДБН В.2.5.-13-98 в приміщенні розміщено два точкових димових пожежних сповіщувачів, кожен з яких контролює площу до 70 м². Згідно НАПБ Б01.008-2004 в приміщенні встановлені вуглекислотні вогнегасники ВВК-1 з розрахунку 1 вогнегасник на 2 ПК, але не менше 2 на приміщення (в лабораторії є 3 вогнегасника ВВК-1,4).

Також проводяться інформаційно-організаційні заходи:

- проведення інструктажу персоналу;
- розроблення алгоритму дій керівництва на випадок виникнення пожежі;
- встановлено схема евакуації при пожежі у центрі лабораторії.

4.4 Висновки до четвертого розділу

Для забезпечення комфортних і безпечних умов праці в лабораторії

моделювання технологічних процесів розглянуто питання охорони праці та безпеки життєдіяльності.

Зокрема, з урахуванням можливих небезпечних виробничих факторів, які можуть бути створені технічними засобами, технологічним процесом або неправильною організацією праці на робочих місцях, сформовано вимоги до приміщення лабораторії моделювання ТП та встановлено параметри мікроклімату для холодної та теплої пір року, а також розрахунок необхідної кількості світильників у приміщенні.

З урахуванням особливостей військового стану відповідно до Закону України «Про цивільну оборону» визначено вимоги до системи цивільного захисту. повинна.

Виходячи з того, що в лабораторії моделювання не зберігаються та не використовуються небезпечне обладнання, речовини або матеріали, а причиною виникнення надзвичайної ситуації може бути лише пожежа, запропоновано головні заходи пожежної безпеки.

ВИСНОВКИ

Під час виконання кваліфікаційної роботи було запропоновано рішення актуальної науково-прикладної задачі підвищення точності визначення функціональних характеристик технологічного процесу виготовлення МЕМС-акселерометрів за рахунок розробки адекватної імітаційної моделі.

За результатами огляду й аналізу сучасного стану проблеми встановлено, що МЕМС-акселерометр – це складова частина багатьох засобів автоматизації, розробка та виготовлення нових МЕМС-акселерометрів пов'язані з необхідністю розробки спеціальних технологічних процесів з урахуванням усіх вимог забезпечення їх функціональних параметрів. ТП виготовлення МЕМС-акселерометрів можуть містити десятки чи сотні операцій, які необхідно узгоджувати за часом, що допоможе уникнути простою обладнання.

Для моделювання технологічного процесу виготовлення МЕМС-акселерометра було обрано та використано імітаційне моделювання. Технологічний процес виготовлення МЕМС-акселерометра було представлено у вигляді СМО. Була створена Q-схема, яка охоплює усі етапи ТП. Додатково було створено моделювальний алгоритм, на основі якого здійснено розробку програмного забезпечення.

Після розробки програми моделювання було розв'язано основні задачі тактичного планування комп'ютерних експериментів. Це дозволило визначити необхідну кількість експериментів та оцінити точність отриманих статистичних оцінок характеристик ТП виготовлення МЕМС-акселерометрів.

Створена імітаційна модель чи її модифікації можуть застосовуватися на підприємствах і в організаціях, де вирішуються задачі проектування чи керування ТП виготовлення МЕМС-акселерометрів. Практичне використання розробленої моделі дозволить за рахунок врахування стохастичного характеру складових процесу підвищити точність визначення його функціональних характеристик.

За результатами досліджень кваліфікаційної роботи було підготовлено

доповіді на: V Міжнародну конференцію «Виробництво & Мехатронні Системи 2021» (м. Харків, 21-22 жовтня 2021 р.) [24]; 11-ту Міжнародну науково-технічну конференцію «Інформаційні системи та технології» (м. Харків, 22-25 листопада 2022 р.) [32]; Всеукраїнську науково-практичну конференцію здобувачів вищої освіти і молодих учених «Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві» (м. Харків, 23 листопада 2022 р.) [33].

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

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

2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 55 с.

3. An Introduction to MEMS. By PRIME Faraday Partnership Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering Loughborough University, Loughborough, 2016. URL: http://www.lboro.ac.uk/microsites/mechman/research/ipmktn/pdf/Technology_review/anintroductiontomems.pdf (дата звернення: 05.09.2022).

4. Безвесільна, О. М., Демчук Р. О. Автоматизований ємнісний акселерометр на основі МЕМС-технології. 2014. URL: <http://eztuir.ztu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/102/68.pdf?sequence=3> (дата звернення 11.09.2022).

5. Фрайден Дж. Современные датчики: Справочник: пер. с англ. М.: Техносфера, 2015. 592.

6. Nevludov I., Yevsieiev V., Miliutina S., Bortnikova V. Accelerometer parameters decomposition model for technological process design automation // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Комп'ютерні системи проектування теорія і практика. Львів, 2015. № 828. С. 11–15.

7. Дослідження мікроелектромеханічних систем: методичні вказівки:

навч.посіб./ Нац. авіац. ун-т., Київ, 2020. С.116.

8. Pham L., DeSimone A. Vibration Rectification in MEMS Accelerometers. Analog Devices, Inc., 2017.

9. Piezoelectric Tri-axial Accelerometer, 2013 URL: <http://www.nanotech.dtu.dk/Researchmega/Forskningsgrupper/MEMSAppliedSensors/NewResearch/Mechanical-Sensors/Triaxial-Accelerometer> (дата звернення: 18.11.2019).

10. Сисоева С. Автомобільні акселерометри. Ч.3. Класифікація та аналіз базових робочих принципів. 2012. С. 42–49.

11. Бортікова В.О. Моделі та методи автоматизованого проектування технологічних процесів виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів: дис. ...асп. : 05.13.12. Харків, 2019. 248 с.

12. Технологічний процес. Лекція в Google. URL: <https://sterbrust.tech/tehnologii/tehnologicheskijj-process.html> (дата звернення: 21.09.22).

13. GPSS Language, 2014. URL: <http://codingrus.ru/readarticle.php> (дата звернення: 10.11.2022).

14. Разные языки программирования и их применение. Лекция в Google. URL: <https://habr.com/company/yandex/blog/272759> (дата звернення: 12.10.22).

15. Безкоровайний В. В. Моделювання систем: конспект з лекцій: навч.посіб. / Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. Харків, 2019. 174 с.

16. D'Oliveira, Rafael GL, Salim El Rouayheb, David Karpuk. GASP codes for secure distributed matrix multiplication. 2020.

17. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень. Частина 1 : навч.посіб. / Кветний Р. Н та ін. ВНТУ, Вінниця, 2017. 193 с.

18. Стеценко, І.В. Моделювання систем: навч. посіб. / Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси, 2010. 399 с.

19. Кудрявцев Є.М. GPSS World. Основи імітаційного моделювання різних систем / ДМК Прес, 2004. 320 с.

20. Юданова В.В. Імітаційне моделювання систем багатоканальних систем. 2019. URL: <http://simulation.su/uploads/files/default/2019-yudanova-1.pdf>

(дата звернення: 1.11.2022).

21. Лацин, Н. Д., Ларін О. О. Розробка універсальної імітаційної моделі багатофазних СМО. 2019. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35133180> (дата звернення 18.11.2022).

22. Кулик К. О, Вислоух С. П. Імітаційне моделювання технологічних процесів. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/31635> (дата звернення: 05.09.2022).

23. Томашевський В.М. Моделювання систем: навч. посіб.: ВНУ, Луцьк 2015. 352 с.

24. Невлюдов І. Ш., Пономарьова Г. В., Бортнікова В.О. Імітаційна модель технологічного процесу виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів: матеріали наук.-теорет. конф. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського, 2018. С. 204–210.

25. Karian Zaven A., Edward J. Dudewicz. Modern statistical, systems, and GPSS simulation. 2020. URL: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781003067993/modern-statistical-systems-gpss-simulation-second-edition-zavenkarian-edward-dudewicz> (дата звернення 03.12.2022).

26. Безкоровайний В., Іванюк О., Прінь К. Технологія реінжинірингу розподілених баз даних систем керування виробництвом // Виробництво & Мехатронні Системи 2021: матеріали V Міжнародної конференції, Харків, 21-22 жовтня 2021 р.: тези доповідей / редкол. І.Ш. Невлюдов. Харків, 2021. С. 104-106.

27. Шумиляк Л., Жихаревич В., Остапов С. Про сучасні методи імітаційного моделювання теплової динаміки // Вісник ВПІ, 2018. Вип. 3. С. 75–80.

28. GPSS. Формування звіту // Сайт 2011. URL: <https://www.sql.ru/forum/835899/gpss-formirovanie-otcheta> (дата звернення: 13.11.2022).

29. Репін Ю. В. Безпека та захист людини в надзвичайній ситуаціях: навч. посіб. Миколаїв, 2005. 192 с.

30. Єфремова О. С. Збірник інструкцій з охорони праці: навч. посіб. 2008.

384 с.

31. Закон України «Про охорону праці» // Відомості Верховної Ради України (ВВР). 1992. с.668. URL: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>. (дата звернення 03.12.2022).

32. Прінь К., Безкоровайний В. Моделювання технологічного процесу виготовлення МЕМС-акселерометрів // Інформаційні системи та технології: матеріали 11-ї Міжнародної наук.-техн. конф. Ч. 2 (м. Харків, 22-25 листоп. 2022 р.), Х.: ХНУРЕ, 2022. С. 11–12. URL: https://istconf.sedep.online/archive/ist_2022_part_2.pdf (дата звернення 03.12.2022).

33. Прінь К. В., Безкоровайний В. В. Імітаційна модель технологічного процесу виготовлення МЕМС-акселерометрів // Всеукраїнська наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених «Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві» (м. Харків, 23 листоп. 2022 р.), Харків: ХНАДУ. URL: https://mf.khadi.kharkov.ua/fileadmin/user_upload/_imported/uploads/%D0%9F%D0%A0%D0%9E%D0%93%D0%A0%D0%90%D0%9C%D0%90_%D0%90%D0%9A%D0%86%D0%A2_2022.pdf (дата звернення 03.12.2022).