

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій  
(повна назва)

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

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

Другий (магістерський)  
(рівень вищої освіти)

Розробка об'єктно-орієнтованої моделі системи моніторингу  
технологічного процесу  
(тема)

Виконав:  
студент II курсу, групи АУТПм-22-2

Шахрай Р. Р.  
(прізвище, ініціали)

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

Тип програми Освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Автоматизоване  
управління технологічними процесами  
(повна назва освітньої програми)

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

Допускається до захисту  
Зав. кафедри КІТАР \_\_\_\_\_  
(підпис)

Невлюдов І. Ш.  
(прізвище, ініціали)

2024 р.

*Я, як студент ХНУРЕ (Шахрай Роман Романович), розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.*

Дата

06.01.2024 р.

Шахрай Р. Р.



ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет АКТ  
Кафедра КІТАР  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології  
Тип програми Освітньо-професійна  
Освітня програма Автоматизоване управління технологічними процесами  
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Зав. кафедри КІТАР \_\_\_\_\_  
(підпис)  
\_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

студентові Шахраю Роману Романовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка об'єктно-орієнтованої моделі системи моніторингу технологічного процесу

Затверджена наказом по університету від 03.11.2023 р. № 1286 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 25.01.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Об'єкт дослідження – система моніторингу виробничого технологічного процесу. Предмет дослідження – процес функціонування системи моніторингу виробничого технологічного процесу. Функція системи – імітаційне моделювання системи моніторингу технологічного процесу, збір обробка та візуалізація даних. Технічне забезпечення: IBM-сумісний персональний комп'ютер. Програмний засіб з веб-інтерфейсом.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі Вступ. Визначення мети, об'єкту та предмету дослідження. Аналіз сучасного стану моніторингу виробництва. Задачі керування на виробництві. Місце моніторингу у процесі керування виробництвом. Задача моделювання системи моніторингу у контексті керування виробництвом. Методи імітаційного та об'єктно-орієнтованого моделювання. Постановка задачі дослідження. Формалізація задачі моделювання. Застосування об'єктно-орієнтованого підходу для вирішення задачі моделювання. Розробка вимог до програмного додатку. Опис розробленої моделі. Висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Графічний матеріал у вигляді презентації – 12-15 аркушів формату А4.

6. Консультанти розділів роботи

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

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання та наліз завдання	13.11.2023	Виконано
2	Аналіз сучасного стану проблеми моніторингу виробництва	20.11.2023	Виконано
3	Постановка задачі дослідження	23.11.2023	Виконано
4	Вибір методів розв'язання	27.11.2023	Виконано
5	Розробка вимог до програмного засобу	29.11.2023	Виконано
6	Розробка програмного засобу	04.12.2023	Виконано
7	Опис розробленої моделі	07.12.2023	Виконано
8	Проведення експериментів	09.12.2023	Виконано
9	Розробка розділу охорони праці	11.12.2023	Виконано
10	Оформлення пояснювальної записки	25.12.2023	Виконано
11	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unichesk	29.12.2024	Виконано
12	Подання роботи на рецензію	02.01.2024	Виконано
13	Подання роботи на підпис завідувачу кафедри	23.01.2024	Виконано
14	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	25.01.2024	Виконано

Дата видачі завдання 06.11.2023 р.

Студент

(підпис)

Шахрай Р. Р.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

проф. Безкоровайний В. В.

(посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 86 с., 4 таблиці, 17 рисунків, 2 дод., 31 джерел.

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ,  
СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ, ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ, ОБ'ЄКТНО-  
ОРІЄНТОВАНА МОДЕЛЬ, ОПТИМІЗАЦІЯ.

Об'єкт дослідження – система моніторингу виробничого технологічного процесу.

Предмет дослідження – процес функціонування системи моніторингу виробничого технологічного процесу.

Мета роботи – підвищення ефективності автоматизованого керування виробництвом шляхом розробки об'єктно-орієнтованої моделі системи моніторингу технологічного процесу.

Методи дослідження: теорія систем, системний аналіз, імітаційне моделювання, об'єктно-орієнтоване моделювання, сучасні інформаційні технології.

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було досліджено один з аспектів проблеми керування виробництвом – задачу моделювання систем моніторингу виробництва в контексті управління виробництвом. Для формалізації та вирішення даної задачі запропоновано використовувати методи імітаційного та об'єктно-орієнтованого моделювання. Розроблено базову функціональну модель системи моніторингу з веб-інтерфейсом для збору, обробки та візуалізації даних. За результатами проведених досліджень надані рекомендації щодо використання моделі та застосування об'єктно-орієнтованого моделювання для вирішення даного класу задач.

Результати кваліфікаційної роботи апробовані у статті та тезах міжнародної конференції.

## ABSTRACT

Work contains: 86 pages, 4 tables, 17 figures, 31 sources, 2 applications.

AUTOMATED CONTROL SYSTEM, MODELING, MONITORING SYSTEM, OBJECT-ORIENTED MODEL, DECISION-MAKING, OPTIMIZATION.

The object of research is a system for monitoring the production process.

The subject of research is the process of functioning of the monitoring system of the production process.

Purpose - to increase the efficiency of automated production control by developing an object-oriented model of the process monitoring system.

Research methods: systems theory, systems analysis, simulation modeling, object-oriented modeling, modern information technologies.

In the course of the qualification work, one aspect of the production management problem was investigated - the task of modeling production monitoring systems in the context of production management. To formalize and solve this problem, it is proposed to use simulation and object-oriented modeling methods. A basic functional model of a monitoring system with a web interface for data collection, processing, and visualization has been developed. Based on the results of the research, recommendations are given on the use of the model and the application of object-oriented modeling to solve this class of problems.

The results of the qualification work were tested in the article and theses of the international conference.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	9
Вступ.....	10
1 Огляд сучасного стану проблеми моніторингу виробництва.....	12
1.1 Сучасне виробництво і системи керування технологічними процесами.....	12
1.2 Місце системи моніторингу в процесі керування виробництвом.....	15
1.3 Процес моніторингу технологічних процесів і його проблематика .....	16
1.4 Задача моделювання систем моніторингу виробничого технологічного процесу .....	19
1.4.1 Математичні методи моделювання інформаційних систем .....	20
1.4.2 Огляд сучасних інструментів імітаційного моделювання.....	22
1.5 Постановка мети та задач роботи.....	26
2 Постановка задачі та вибір методів розв'язання .....	28
2.1 Характеристика комплексу задач.....	28
2.2 Постановка задачі .....	29
2.3 Вихідна інформація.....	31
2.4 Вхідна інформація.....	31
2.5 Структура технологічного процесу виробництва МЕМС акселерометрів .....	32
2.6 Формалізація задачі .....	36
2.7 Вибір методу вирішення задачі моделювання.....	43
2.7.1 Метод імітаційного моделювання.....	43
2.7.1 Метод об'єктно-орієнтованого моделювання.....	44
2.9 Висновки до другого розділу.....	47
3 Розробка програмного засобу та аналіз результатів досліджень .....	48
3.1 Діаграми прецедентів .....	48
3.2 Визначення передумов розробки моделі.....	49
3.2.1 Діаграма класів.....	50
3.2.2 Програмне середовище Node-Red.....	52

	8
3.3 Опис розробленої моделі.....	53
3.4 Висновки, рекомендації та пропозиції щодо застосування та подальшого розвитку об'єкта дослідження.....	66
4 Заходи з охорони праці.....	68
4.1 Вимоги до приміщення.....	68
4.2 Заходи пожежної безпеки.....	69
Висновки .....	71
Перелік джерел посилання.....	73
Додаток А Апробація наукових результатів .....	77
Додаток Б Демонстраційний матеріал .....	87

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСУ – автоматизована система управління;

АСУТП – автоматизована система управління технологічними процесами;

МЕМС – мікроелектромеханічна система;

МОЕМС – мікрооптоелектромеханічна система;

ООА – об’єктно-орієнтований аналіз;

СМ – система моніторингу;

ТП – технологічний процес;

JS – JavaScript;

JSON – JavaScript Object Notation;

MES – Manufacturing Execution Systems;

UML – Unified Modeling Language.

## ВСТУП

Будь-яке виробниче підприємство прагне володіти і застосовувати найновіші технології, як технічні, так і організаційні, оскільки вони надають змогу максимально оптимізувати ефективність підприємства. Останнім досягненням в області організації і управління технологічними процесами на виробництві є створення концепцій індустрії 4.0 та 5.0, в основі яких лежить принцип побудови глибоко автоматизованої технологічної лінії із застосуванням інтелектуального обладнання та просунутих інформаційних систем (індустрія 4.0), що в свою чергу призводить до зміни участі людини в роботі підприємства – оскільки з'являється необхідність високо кваліфікованому персоналі, здатному підтримувати і організовувати роботу обладнання, а також опрацьовувати дані та використовувати їх для подальшого розвитку підприємства.

Ключовим елементом у процесі керування таким виробництвом є автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУТП), які забезпечують збір та обробку інформації з обладнання та технологічних ділянок, а також здійснення керуючих впливів. Процес моніторингу виробництва забезпечує збір та передачу інформації між елементами системи і знаходиться на першому рівні АСУТП. Покращення цього процесу суттєво впливає на роботу АСУТП, тому при її проектуванні, особливої уваги заслуговує задача моделювання системи моніторингу технологічних процесів.

За умови якісного виконання цієї задачі, реалізована система моніторингу зможе забезпечити стабільний збір вичерпної інформації і її швидку передачу, що в свою чергу прискорить процес прийняття рішень та підвищить ефективність роботи всього підприємства. Актуальність цієї теми підтверджують численні публікації [1-3].

Об'єкт дослідження – система моніторингу виробничого технологічного процесу.

Предмет дослідження – процес функціонування системи моніторингу виробничого технологічного процесу.

Мета даної кваліфікаційної роботи – це підвищення ефективності автоматизованого керування виробництвом шляхом розробки об'єктно-орієнтованої моделі системи моніторингу технологічного процесу.

Для досягнення мети було застосовано методи дослідження були теорія систем, системний аналіз, імітаційне моделювання, об'єктно-орієнтоване моделювання, сучасні інформаційні технології.

Для досягнення мети кваліфікаційної роботи необхідно розв'язати такі задачі:

- виконати огляд сучасного стану проблеми моніторингу виробництва;
- провести аналіз задачі моделювання систем моніторингу технологічних процесів;
- провести аналіз, формалізацію та обрати методи для вирішення задачі моделювання систем моніторингу;
- розробити функціональну модель, застосувавши обрані методи;
- провести досліджень для надання рекомендацій щодо використання моделі та застосування обраних методів моделювання;
- оформити пояснювальну записку згідно з рекомендаціями [4], та вимогами ДСТУ 3008:2015 [5].

Розроблено базову функціональну модель системи моніторингу з веб-інтерфейсом для збору, обробки та візуалізації даних. За результатами проведених досліджень надані рекомендації щодо використання моделі та застосування об'єктно-орієнтованого моделювання для вирішення даного класу задач.

У процесі дослідження опубліковано статтю у збірнику студентських наукових статей [6] та підготовлено тези доповіді на міжнародний молодіжний форум [7].

## **1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ МОНІТОРИНГУ ВИРОБНИЦТВА**

Управління виробництвом – це комплексна система дій, спрямована на організацію роботи людей та обладнання для обробки певних ресурсів з метою отримання продукції, а також на забезпечення розвитку виробництва.

Мета управління виробництвом полягає в забезпеченні стабільного та ефективного функціонування організації. Це включає в себе оперативний збір та обробку інформації, прийняття рішень на основі аналізу отриманих даних, здійснення керуючих впливів відповідно до прийнятих рішень.

Управління виробництвом передбачає стратегічний підхід до забезпечення всіх інформаційних процесів на технологічних ділянках та підприємстві. Отже у процесі управління підприємством необхідно застосовувати системний підхід, враховуючи як поточні потреби, так і довгострокові перспективи розвитку організації.

### **1.1 Сучасне виробництво і системи керування технологічними процесами**

Сучасне виробництво радіоелектронних приладів – це складний процес, в якому взаємодіють різні етапи для перетворення сировинних ресурсів і електронних компонентів в готові продукти для споживачів або виробництва [7-8]. В рамках цього виробництва виділяють два типи автоматизованих систем: системи автоматизованого управління технологічним процесом (АСУТП) та системи автоматизованого управління виробництвом (АСУ). На рисунку 1.1 показана загальна структура цих систем.

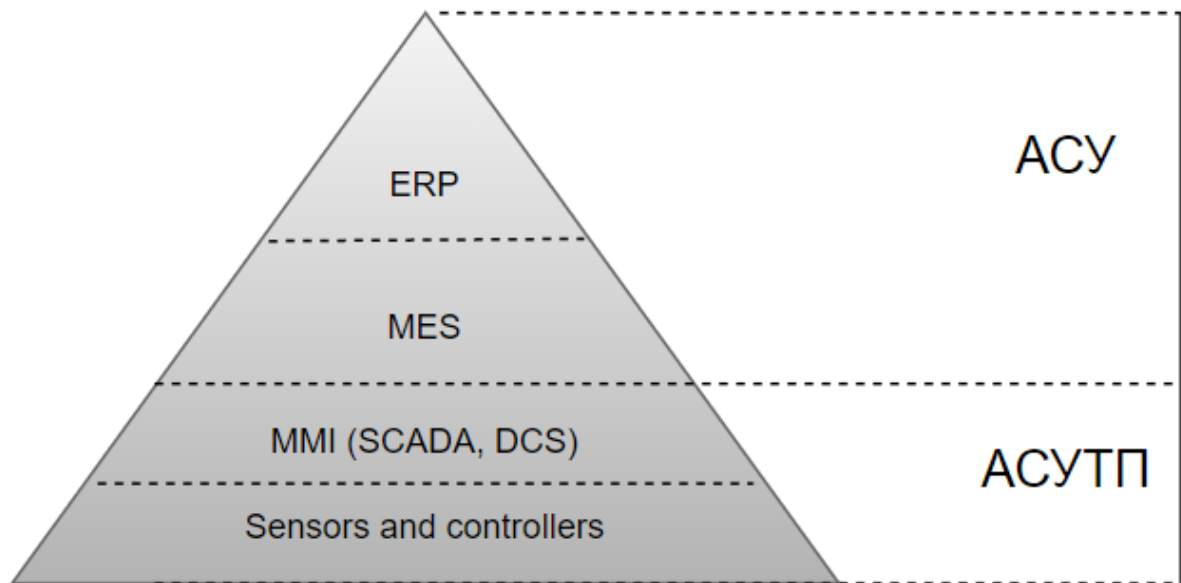


Рисунок 1.1 – Структура АСУ

Автоматизована система управління технологічним процесом – це сукупність технічних та програмних рішень, спрямованих на автоматизацію керування технологічними системами. Ця система включає в себе обладнання з програмованими контролерами, розподілені системи управління, системи диспетчерського управління та збору даних (SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition), а також інтерфейси для взаємодії між операторами та технічним обладнанням (ММІ – Man-Machine Interface або НМІ – Human-Machine Interface).

Технологічний об'єкт управління (ТОУ) охоплює технічне обладнання, яке використовується для виконання технологічних процесів. Сюди входять технологічні агрегати і установки, групи верстатів, окремі виробничі одиниці (цехи, дільниці) і т. д. Ці об'єкти можуть функціонувати незалежно один від одного і виконувати власні технологічні завдання, а система управління спрямована на їх координацію та оптимізацію в рамках технологічного процесу [9-10].

До складу АСУТП входять:

- типові елементи автоматики: датчики, контролери, промислові комп'ютери, виконавчі пристрої і т.п., призначені для безпосереднього

управління технологічним об'єктом;

- єдина система операторського управління ТП у вигляді одного або декількох пультів управління (комп'ютерів);
- засоби обробки та архівування інформації про хід процесу;
- промислові мережі для інформаційного зв'язку всіх підсистем.

АСУТП будуються згідно трьохрівневого принципу, що зображено на рисунку 1.2.

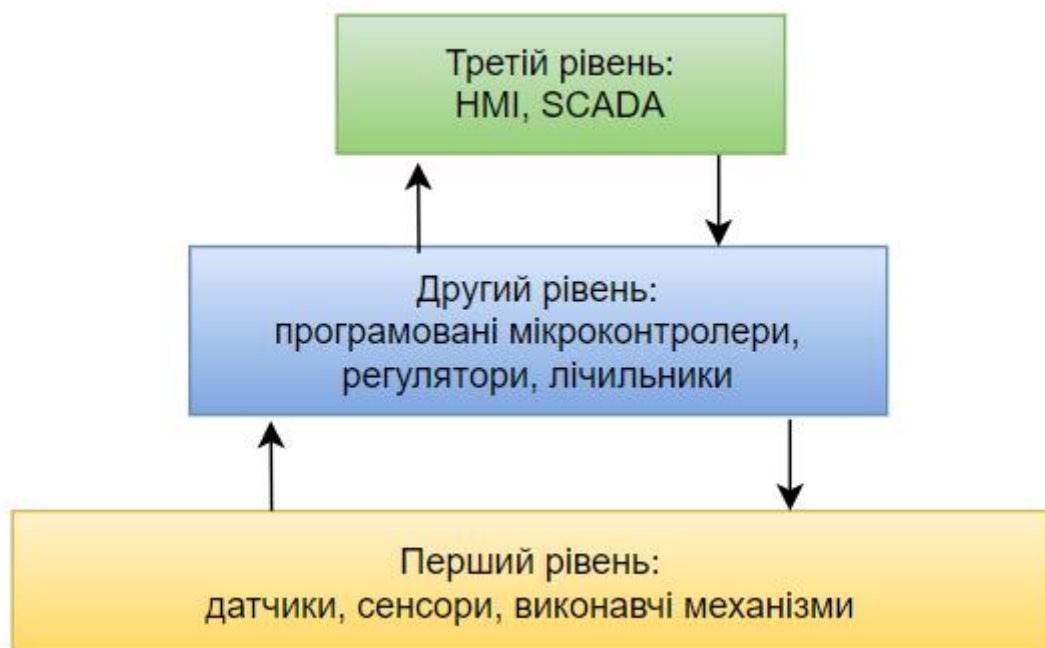


Рисунок 1.2 – Три рівні АСУТП

На першому рівні маємо обладнання, що складається з входів та виходів. Це включає в себе датчики та прилади вимірювання, які контролюють ключові параметри. Також сюди входять виконавчі пристрої, які впливають на ці параметри для досягнення заданих значень. На цьому рівні відбувається взаємозв'язок сигналів від датчиків зі входами системи управління і передача команд від управлінської системи до виконавчих пристроїв.

Другий рівень представляє собою рівень керування обладнанням і включає контролери, такі як програмовані контролери логіки (ПЛК). ПЛК

отримують інформацію про стан технологічного процесу від обладнання для вимірювань і датчиків, і вони генерують команди керування відповідно до заздалегідь налаштованих алгоритмів управління для виконавчих механізмів.

На третьому рівні управління розглядаються стратегічні завдання, до яких можна віднести різні види прогнозів, що визначають довгострокові тенденції розвитку підприємства. Це включає в себе можливість повної реконструкції, розширення виробництва, часткову модернізацію, перехід до виробництва абсолютно нових продуктів або модифікацію наявних моделей.

## 1.2 Місце системи моніторингу в процесі керування виробництвом

Для побудови ефективної автоматизованої системи керування складними технологічними процесами необхідно використовувати технології баз даних, інформаційно-комунікаційні рішення і інтелектуальні технології. При цьому використання Інтернету речей дозволяє стежити за станом обладнання та персоналу в режимі реального часу. Ці системи є основою для створення розумних підприємств в цифровій економіці, де інформаційні технології та розвиток інформаційного суспільства грають важливу роль [1-2].

Науково обґрунтована методологія використання такої важливої функціональної підсистеми управління, як моніторинг, повинна базуватися на чіткому визначенні цієї системи, встановленні її ролі у розв'язанні завдань, пов'язаних з створенням розвинутої ринкової економіки в Україні, а також визначенні її функцій і принципів створення та функціонування. Тому систему моніторингу слід розглядати як окремий напрям у складі основної функціональної підсистеми у системі управління виробничими об'єктами.

Моніторинг є найважливішим аспектом інформаційної діяльності. Таким чином, його також можна назвати інформаційним моніторингом. Однак зазвичай користуються терміном моніторинг, передбачаючи, що він включає в себе інформаційну складову.

Моніторинг є невід'ємною частиною процесів управління, який

пов'язаний з дослідженням конкретної проблеми, спостереженням за розвитком процесу.

Центральним принципом розумного підприємства є досягнення високої ефективності та гнучкості в управлінні складними завданнями при мінімізації витрат. Одним із способів розвитку таких підприємств є автоматизація моніторингу роботи обладнання та персоналу в реальному часі. Важливо, щоб системи моніторингу були мобільними і надавали можливість отримувати доступ до інформації з будь-якого місця і в будь-який час, використовуючи різні пристрої. Для цього використовуються мініатюрні мобільні пристрої, мережі датчиків, бездротові мережі, супутникову навігацію, хмарні технології та системи зберігання даних. Моніторинг повинен забезпечувати спостереження та прогнозування всіх етапів виробничого процесу для підвищення ефективності за допомогою оперативних коригувань [10-12].

### 1.3 Процес моніторингу технологічних процесів і його проблематика

Для організації моніторингу важливо застосовувати певну методичну структуру дій, яку рекомендує інформаційна практика. Ось основні кроки цієї структури [11]:

- Розуміння проблемної ситуації моніторингу, її структуру, виділення основних факторів і визначення мети. Для цього можна використовувати експертні методи, включаючи мозкову атаку.
- Чітке визначення меж предметної області, яка підлягає дослідженню, відповідно до цілей моніторингу.
- Створення структури системи моніторингу, виділення в ній змістовних рівнів ієрархії та алгоритмів для передачі результатів моніторингу від нижнього рівня до верхнього з метою формулювання цільових результатів моніторингу. Під час передачі інформації з нижчих рівнів вона проходить фільтрацію, яка може супроводжуватися додатковими звертаннями до інформації на нижніх рівнях. Відсутність таких звертань може погіршити

стійкість уявлення про траєкторію об'єкта, що спостерігається.

- уважний вибір індикативного набору ознак, за якими відбувається моніторинг. цей набір потрібно постійно аналізувати і, за необхідності, коригувати;
- ретельне вдосконалення моделі системи моніторингу, в якій чітко визначається послідовність формування основного результату із часткових результатів спостережень на об'єкті. обробка інформації для досягнення цієї мети зазвичай використовується у системах моніторингу.
- спеціальна увага приділяється засобам візуалізації результатів моніторингу, таким як монітори, графіки, таблиці, методи відображення розмірів і кольорів;
- зазвичай моніторинг передбачає постійне спостереження за об'єктом у часі. якщо не можлива часова вибірка, можна спробувати замінити її вибіркою по об'єктах, виявляючи закономірності, що спостерігаються при переході від одного об'єкта до іншого.

Слово моніторинг використовується для опису системи повторюваних цілеспрямованих спостережень за одним або кількома елементами системи в просторі та часі. Сама система моніторингу не включає в себе діяльність щодо управління якістю функціонування економічної системи, але надає інформацію для прийняття важливих рішень в цьому напрямку. Схема системи моніторингу подана на рисунку 1.3.

На схемі пунктиром позначені зворотні зв'язки системи.

Мета моніторингу технологічних процесів розумного підприємства полягає у вирішенні наступних завдань:

- збір даних про технологічні процеси в реальному часі;
- збереження та передпочаткова обробка даних з використанням хмарних технологій;
- аналітична та інтелектуальна обробка даних;
- візуалізація накопичених даних про технологічні процеси і подання результатів обробки у вигляді графіків і діаграм;

- генерація сигналів управління для виконавчих механізмів;
- прийняття управлінських рішень для керування технологічними процесами;
- формування звітів про стан технологічного процесу.

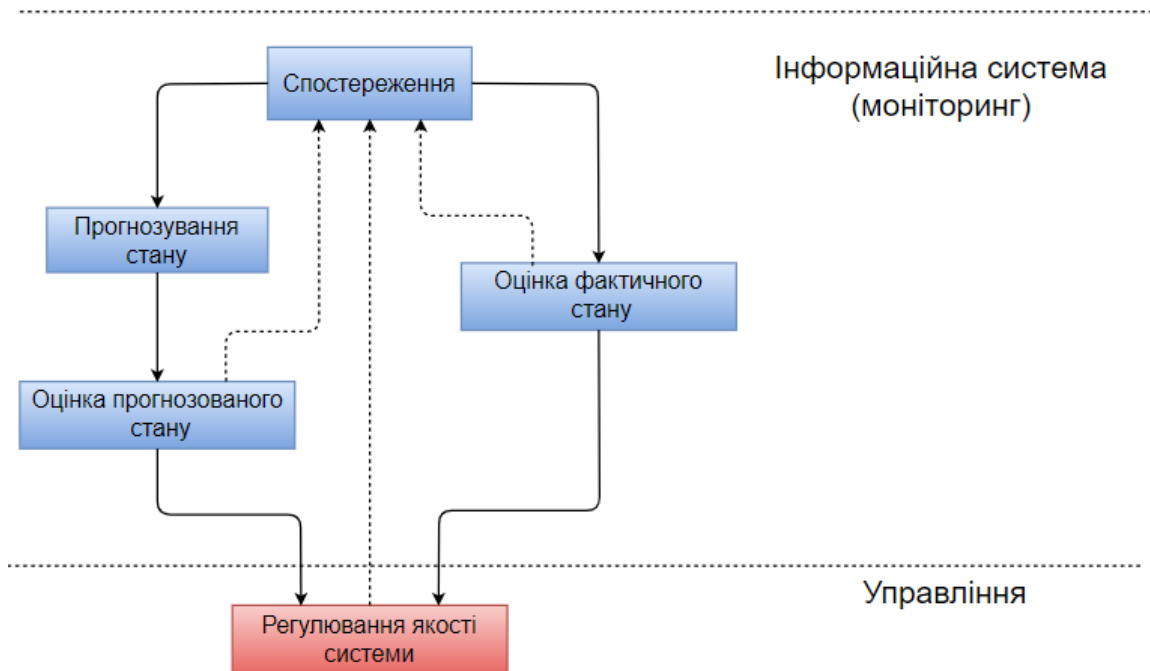


Рисунок 1.3 – Схема процесу моніторингу

Вимоги та принципи розроблення системи моніторингу технологічних процесів мають дві складові: апаратну та програмну [3].

У склад апаратної частини входять пристрої двох напрямів: засоби для збору інформації про технологічний процес (датчики) та пристрої, які отримують, обробляють та передають зібрану інформацію на інші рівні управління. Рекомендується використовувати як провідні, так і бездротові технології для взаємодії між цими компонентами. Апаратні компоненти, які використовуються для збору та попередньої обробки даних, повинні забезпечувати розв'язання завдань у реальному часі. Також важливо враховувати масооб'ємні характеристики, споживану потужність, життєвий цикл та надійність цих компонентів. Досягнення зменшення цих

характеристик та споживаної потужності, підвищення надійності і швидкодії комп'ютерних компонент можливе за допомогою використання систем на кристалі (SoC) та великих інтегральних схем (НВІС).

Програмна складова рішення може проектуватися в залежності від потреб конкретного користувача, але завжди слід закладати у рішення можливості стабільно підтримувати високонавантажені обчислення, працювати асинхронно та будуватися з використанням відкритого програмного забезпечення.

#### 1.4 Задача моделювання систем моніторингу виробничого технологічного процесу

Моделюванням називають процес представлення об'єкта, який досліджується, через його модель, та оперування з нею для отримання корисної інформації щодо об'єкта дослідження.

Модель – це представлення об'єкта, системи чи поняття в абстрактній формі, зручній для наукового дослідження [13–17]. В загальному випадку модель має структуру, зображену на рисунку 1.4. На ньому використано такі позначення:  $X$  – множина вхідних змінних системи;  $Y$  – множина вихідних змінних системи;  $P$  – множина параметрів;  $F$  – функція, функціонал, алгоритм або формальне подання залежності змінних  $Y$  від змінних  $X$ .

Вирішенням задачі моделювання є система, яка складається з наступних елементів:

- множина вхідних даних, які характеризують певне технологічне рішення: кількість і параметри устаткування, тривалість операцій, стохастичні змінні тощо;
- модель, яка відтворює алгоритм ТП та оперує вхідними даними;
- множина вихідних даних.

Отже задача моделювання ТП процесу включає розробку його моделі, розробку її інформаційного і технічного забезпечення та проведення

досліджень можливих технологічних рішень. А у контексті проектування чи керування ТП, можлива умова забезпечення інтеграції або взаємодії системи моделювання з іншими частинами САПР або АСУ.

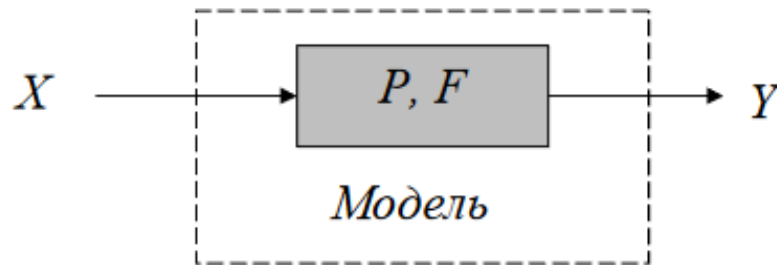


Рисунок 1.4 – Структура моделі

Однією з проблем моделювання є інтерпретація ТП, об'єктів над якими виконуються технологічні операції та устаткування яке їх проводить. Залежно від складності об'єкту, можливості його фізичного відтворення, часової природи процесів, стохастичного чи детермінованого характеру ТП використовують різні методи моделювання.

У рамках даної роботи задача моделювання розглядається в контексті процесу моніторингу виробничих ТП. Відповідно, об'єктом моделювання буде виступати система моніторингу, яка розглядається як фізична та інформаційна система.

#### 1.4.1 Математичні методи моделювання інформаційних систем

За формою подання об'єкта розрізняють два види моделювання: реальне і уявне. Реальне передбачає фізичну реалізацію моделі або дослідження на вже існуючому об'єкті і є найбільш достовірним та адекватним, але його можливості, зазвичай, дуже обмежені через ризик великих витрат або взагалі неможливість, небезпечність реалізації. Уявне моделювання – це єдиний спосіб дослідження об'єктів, які ще не були практично реалізовані або немає можливості їх фізичного відтворення, а також це найбільш гнучкий та

економний метод моделювання існуючих систем, який може бути реалізований дослідником самостійно, за допомогою широкого спектру спеціального програмного забезпечення або за допомогою чисельних методів.

Найпоширенішим методом явного моделювання є комп'ютерне математичне моделювання під яким розуміється: ... процес установа відповідності реальному об'єкту математичного об'єкта, що називається математичною моделлю, та експериментування з цією моделлю для отримання характеристик досліджуваного об'єкта [17–21]. Існують три види математичного моделювання (рисунок 1.5).

Аналітичне – якщо представлення залежності  $F$  вихідних змінних  $Y$  від вхідних її змінних  $X$  представлений у вигляді відомих аналітичних функцій (алгебраїчних, інтегро-диференціальних рівнянь тощо): Аналітичні моделі можуть досліджуватися аналітичними (коли прагнуть отримати в загальному вигляді явні залежності для шуканих характеристик), чисельними (коли, не маючи можливості отримати розв'язок у загальному вигляді, прагнуть отримати числові результати для конкретних початкових даних) або якісними (коли знаходяться деякі властивості розв'язку, наприклад, оцінка стійкості об'єкта) методами [8 –12].



Рисунок 1.5 – Види методів математичного моделювання

Імітаційне – якщо опис системи не піддається опису аналітичними функціями, але процес функціонування їх може бути описаний алгоритмом

імітації, під яким розуміють відтворення за допомогою комп'ютерної програми процесу функціонування складної системи в часі. У результаті багатократних прогонів імітаційної моделі дослідник отримує інформацію про властивості реальної системи.

До переваг імітаційного моделювання можна віднести можливість дослідження більш складних систем. Імітаційні моделі надають змогу досить просто враховувати такі фактори, як наявність дискретних і неперервних елементів, нелінійні характеристики елементів системи, випадкові впливи та інші, які є суттєвою перешкодою для аналітичних досліджень.

#### 1.4.2 Огляд сучасних інструментів імітаційного моделювання

Сьогодні існує маса програмних засобів для моделювання, нижче розглянуті найпоширеніші та найбільш універсальні пакети програм, які охоплюють широкий спектр методів моделювання, в тому числі й імітаційне моделювання систем та технологічних процесів [17–23].

GPSS (General Purpose Simulation System) – система моделювання складних об'єктів загального призначення [20–23].

Версія GPSS World для ОС Windows має розширені можливості, через те, що середовище користувача має інтегровані функції роботи в Інтернет, тобто GPSS World є об'єктно-орієнтованою мовою. Візуальне представлення інформації мови GPSS World надає можливість спостерігати та фіксувати внутрішні механізми функціонування моделей. Інтерактивність мови GPSS World також дає можливість досліджувати процес моделювання та управляти ним. Інтегровані засоби аналізу даних дозволяють розраховувати допустимі інтервали і проводити дисперсійний аналіз. Реалізована функція автоматично створювати та виконувати складні оптимізуючі експерименти. GPSS World має ряд анімаційних можливостей як абстрактної візуалізації, так і наближених реалістичних динамічних зображень.

Система ARIS (розроблена компанією IDS Scheer AG (Німеччина) – це

концепція та сімейство програмних продуктів, що базується на ній, які використовуються для докладного опису, аналізу, подальшого вдосконалення бізнес-процесів підприємства та управління ними [24].

Перевагою системи ARIS є [25]:

- вдалиий графічний інтерфейс;
- невисокі системні вимоги до програмного продукту
- розширена база даних;
- динамічне моделювання;
- можливість імпортування даних у інші системи імітаційного моделювання.

Визначена розробниками цінова політика компанії, яка розрахована на європейський ринок технологій, значно зменшує можливість використання її на ринку України власниками підприємств та виробничих організацій, що реалізують одиничне та дрібносерійне виробництво. Це і є основним недоліком системи [25].

Більш сучасний підхід до розробки програмного забезпечення базується на об'єктно-орієнтованій методології, яка використовує концептуальне моделювання предметної області [26]. Основні принципи цього підходу будемо розглядати, використовуючи мову UML (Unified Modeling Language – уніфікована мова моделювання), що є системою символів та діаграм для моделювання систем з об'єктно-орієнтованою концепцією.

Особливість цієї методології полягає в тому, що вона описує не лише процедури, необхідні для вирішення задачі, але також об'єкти, які беруть участь у цих процедурах та забезпечують їх виконання. Ці процедури не виконуються абстрактно, а залежать від конкретних об'єктів та їх властивостей, які описані в програмі. Таким чином, робота процедур визначається їх взаємодією з об'єктами [26].

Об'єктно-орієнтоване моделювання та розробка програмного забезпечення включає кілька етапів:

- об'єктно-орієнтований аналіз (OOA): цей етап включає

моделювання, розробку та аналіз системи з точки зору класів та об'єктів, що існують в предметній області;

- об'єктно-орієнтований дизайн (OOD): на цьому етапі шляхом розкладання на об'єкти створюється об'єктна модель системи;
- об'єктно-орієнтоване програмування (ООР): на цьому етапі програма подається як набір об'єктів, де кожен є екземпляром певного класу, і класи формують ієрархію спадкування [26].

Для побудови об'єктної моделі складної системи необхідно представити систему в канонічній формі. Це означає, що система має дві ортогональні ієрархії: ієрархію класів та ієрархію об'єктів. Ця об'єктно-орієнтована декомпозиція системи дозволяє розкрити її повну структуру, включаючи класи та об'єкти.

Прикладом такої програми є система ITHINK (розроблена компанією High Performance Systems (США) є засобом аналізу ситуації, інструментом управління і планування [27].

ITHINK – це об'єктно-орієнтований, компактний пакет прикладних програм з Desktop-інтерфейсом, який забезпечує обчислювальну, графічну та інформаційну підтримку процедур багаторівневого системного аналізу складних процесів організації політики, бізнесу, управління, фінансів тощо.

За допомогою пакету ITHINK можна створити модель виробничо-збутового циклу підприємства, який включає в себе всі елементи від закупівлі сировини та закінчуючи його виробництвом і реалізацією. В сферу потенційного застосування системи входить транспорт та розподільні системи обслуговування виробництва.

Пакет ITHINK не вимагає спеціальних навичок і володіння складними математичними методами, не пред'являє великих вимог до використовуваного апаратного забезпечення (процесор 486 або більш потужний, 8 Мб RAM, Windows 95 та наявність 13 Мб вільної пам'яті на жорсткому диску).

Завдяки своїй простоті головним недоліком пакету ITHINK є невелика кількість функцій в порівнянні з іншими системами моделювання [27].

Node-RED – це інноваційний візуальний інструмент для розробки програмних систем, який базується на концепції вузлів та зв'язків. Його графічний інтерфейс полегшує розробку та взаємодію з різними системами, надаючи зручний інтерфейс для створення потоків обробки даних.

Node-RED надає візуальний інтерфейс для розробки, де програмування виконується за допомогою вузлів та їхніх зв'язків. Це полегшує створення та редагування складних логічних структур.

Велика кількість вбудованих вузлів та можливість додавання власних розширень дозволяє вам розробляти різноманітні застосунки від IoT до веб-серверів.

Node-RED підтримує різні мережеві та промислові протоколи, такі як MQTT, HTTP, CoAP, і дозволяє легко інтегрувати пристрої та системи.

Є вузли для обробки тексту, аналізу даних, керування потоками, роботи з базами даних, графіками та інші, що робить Node-RED потужним інструментом.

Node-RED користується популярністю у розробників, і велика активна спільнота сприяє вирішенню проблем та обміну ідеями. Розширення та плагіни додають нові функціональності.

Використання Node-RED у Контексті Об'єктно-Орієнтованого Моделювання:

Вузли в Node-RED можна розглядати як об'єкти. Кожен вузол представляє функціональність, а зв'язки між вузлами визначають потік даних та контрольні точки.

Вузловий інтерфейс Node-RED надає вам можливість моделювати об'єктно-орієнтовані структури, де вузли відповідають об'єктам, а зв'язки - взаємодії між об'єктами.

Node-RED підтримує модульність, яка визначається за допомогою вузлів. Ви можете створювати власні вузли та модулі, розширюючи функціональність.

Розробка потоків в Node-RED дозволяє застосовувати об'єктно-

орієнтовані підходи до створення багатофункціональних та зручних застосунків.

Node-RED використовується як інструмент для створення різних систем, від IoT до веб-сервісів, та може служити зручним інструментом для моделювання об'єктно-орієнтованих структур у виробничих процесах. Його візуальний підхід полегшує взаємодію та розробку, особливо у випадках, коли важко або дорого впроваджувати традиційні програмні рішення [28-29].

### 1.5 Постановка мети та задач роботи

Проаналізувавши сучасний стан проблеми моніторингу у процесі керування ТП, можемо зробити висновок про те, що вирішення комплексу задач пов'язаних з проектуванням і моделюванням систем управління ТП та їх підсистем залишається актуальним, оскільки вони пов'язані з розвитком виробничих та інформаційних технологій і методи та засоби їх вирішення потребують постійного вдосконалення.

Моделювання об'єктів та систем є зручним і ефективним інструментом у вирішенні задач проектування та керування різних систем і ТП. Сьогодні існує багато методів моделювання, а також сучасні, зручні та ефективні програмні засоби для побудови та дослідження моделей. Актуальною задачею є розробка і вдосконалення процесу моделювання систем моніторингу технологічних процесів. Також актуальним є завдання інтеграції компонентів моделювання у процеси проектування та керування, їх автоматизація.

Метою даної роботи є підвищення ефективності керування виробничим технологічним процесом за рахунок розробки моделі системи моніторингу ТП методом об'єктно-орієнтованого імітаційного моделювання для визначення і дослідження її функціональних характеристик. Модель має надавати змогу відтворення та оцінки функціонально-вартісних характеристик системи моніторингу ТП, а також мати можливість інтеграції в інформаційну систему керування.

Для досягнення мети кваліфікаційної роботи необхідно розв'язати такі задачі:

- виконати огляд сучасного стану проблеми керування виробничими технологічними процесами та їх моніторингу;
- провести аналіз задач керування та моделювання систем моніторингу технологічних процесів;
- провести аналіз методів та засобів моделювання системи моніторингу виробничих технологічних процесів;
- провести аналіз особливостей технологічного процесу виробництва МЕМС акселерометрів;
- визначити вхідні та вихідні дані, провести формалізацію задачі моделювання системи моніторингу виробництва МЕМС акселерометрів;
- обрати засіб моделювання та розробити імітаційну модель ТП виробництва МЕМС акселерометрів;
- виконати планування експериментів, провести визначення функціональних характеристик системи моніторингу виробництва МЕМС акселерометрів та зробити висновки по роботі.

## 2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА ВИБІР МЕТОДІВ РОЗВ'ЯЗАННЯ

Задача даної кваліфікаційної роботи полягає у розробці та дослідженні моделі системи моніторингу виробничого ТП та її інформаційного забезпечення, яка буде придатна для інтеграції або використання програмними засобами проектування, керування, прийняття рішень, статистичного аналізу та ін.

### 2.1 Характеристика комплексу задач

Задача моделювання в цій роботі розглядається у контексті комплексу завдань автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУ ТП). Основна мета цієї системи полягає в тому, щоб допомагати диспетчеру та керівнику підприємства швидко приймати оптимальні рішення з управління виробничим процесом, а також здійснювати керуючий вплив в автоматизованому або автоматичному режимі. При цьому, основою АСУТП виступає система моніторингу ТП, яка забезпечує автоматичний збір інформації про стан обладнання та протікання ТП.

Вирішення задачі моделювання СМ дозволяє визначити оптимальну структуру ТП та АСУ, конфігурацію обладнання задіяного у виробництві і його управлінні, ключові параметри обладнання та продукту, дослідити можливі варіанти реалізації системи та їх перспективи.

Основними завданнями цього комплексу є оцінка і контроль режиму роботи СМ, прийняття рішень щодо вибору та налаштування устаткування, а також реагування на аварійні ситуації.

Моделювання системи моніторингу спрямоване на оцінку та дослідження ефективності технологічних рішень, виявлення недоліків, аналіз функціонування в різних умовах та аварійних ситуаціях.

Об'єктами моделювання є вузли та кластери інформаційної системи, розташовані на технологічних ділянках автоматизованого ТП. Модель також повинна враховувати логіку функціонування цих елементів.

Визначення умов і параметрів моделювання, а також характеристик моделі, здійснює інженер або оператор автоматизованого технологічного процесу. Множина можливих технологічних рішень визначається різноманітністю наявних технічних засобів для модифікації технологічного процесу даного типу та може включати як наявні технічні рішення, так і теоретичні концепції, які можуть бути реалізовані через налаштування режиму роботи або розробку нових технічних засобів.

## 2.2 Постановка задачі

Задача даної кваліфікаційної роботи полягає у розробці та дослідженні об'єктно-орієнтованої імітаційної моделі системи моніторингу виробничого ТП, та її інформаційного забезпечення, яка буде придатна для інтеграції або використання програмними засобами проектування, керування, прийняття рішень, статистичного аналізу та ін.

Задача моніторингу в загальному вигляді описується як процес збору інформації від давачів та її своєчасне представлення у вигляді корисних даних оператору. У контексті виробничого ТП задача моніторингу може бути пов'язана із моніторингом стану обладнання або контролю якості виконання технологічних операцій на ділянках виробництва.

Дана робота має на меті розробку гнучкої та функціональної моделі системи моніторингу, яка може бути використана у якості програмного модуля прийому, обробки та візуалізації корисних даних, а також надаватиме змогу досліджувати характеристики системи моніторингу в цілому, режимів її роботи, а також її елементів та їх взаємодію між собою та системами вищого рівня.

Нижче наведені основні вимоги до розроблюваної моделі:

- можливість отримання, обробки і відображення даних в режимі реального часу;
- можливість працювати на різних платформах і середовищах;

- можливість зміни конфігурації і налаштування моделі без суттєвого редагування коду;
- можливість імітації робочого процесу та отримання статистичних даних досліджень.

Дослідивши модель СМ виробничого ТП, користувач має отримати загальну характеристику СМ при заданих умовах, яка включає критерії описані нижче.

Економічність – характеризує відношення затрачених ресурсів до об'єму виготовленої продукції.

Оперативність – описує часові показники функціонування системи, такі як середній час очікування та обробки умовної сутності.

Продуктивність – характеризує відношення об'єму оброблених сутностей до затраченого часу роботи системи.

Точність – визначає, наскільки отримані вимірювання відповідають реальному стану об'єктів.

Стійкість – характеризує здатність системи забезпечувати нормальне функціонування під дією різних впливів, таких як електромагнітні перешкоди, коливання температури, вологості та інших факторів виробничого середовища.

Масштабованість – здатність системи розширюватися або зменшуватися залежно від збільшення чи зменшення обсягу моніторингу.

Швидкодія – визначає швидкість збору, обробки та відображення даних моніторингу.

У майбутній моделі необхідно передбачити вплив стохастичних змінних, наприклад випадкові інтервали генерації та обробки даних, похибки вимірювальних пристроїв або ймовірність переривання та втрати пакетів інформації, на деякі характеристики.

Також треба визначити залежність вихідних даних від вхідних параметрів системи, при заданій конфігурації моделі. При цьому, під конфігурацією розуміється кількість і характеристики задіяного у СМ

обладнання, спосіб його з'єднання у єдину інформаційну мережу, алгоритм генерації, передачі та попередньої обробки даних.

### 2.3 Вихідна інформація

Результати моделювання повинні надавати повну інформацію для оцінки та вибору найбільш ефективних технологічних рішень з множини можливих.

Отже вихідна інформація моделі може включати наступні дані:

- порядковий номер набору вхідних даних;
- візуалізація отриманих з кожної ділянки даних;
- повідомлення про досягнення критичних показників стану обладнання або технологічної ділянки, або виготовлення браку;
- завантаженість кожного каналу обробки даних (у %);
- рекомендований об'єм оперативної пам'яті для кожного каналу обробки даних;
- об'єм згенерованих і оброблених даних;
- продуктивність СМ;
- сумарні витрати на її функціонування (ум. од.);
- об'єм повторної обробки та браку;
- ймовірність втрати даних.

Набір вихідних даних можна доповнювати і змінювати за бажанням користувача. Результати будуть записуватися у вихідний файл, який можна використовувати іншими програмними засобами для формування статистики, вибору найбільш оптимального рішення тощо.

### 2.4 Вхідна інформація

Вхідна інформація, необхідна для побудови моделі та імітації алгоритму моніторингу ТП. В умовах поставленої задачі вхідна інформація може

включати:

- межі моделювання (кінцевий об'єм або час виробництва);
- пропорції часу для моделювання;
- часові інтервали виконання технологічних операцій, генерації та обробки даних;
- витрати ресурсів та сировини на виробництво та роботу обладнання;
- ймовірність виготовлення браку на кожній технологічній ділянці;
- кількість датчиків та мікроконтролерів СМ використовуваних на кожній технологічній ділянці і топологія їх з'єднання;
- об'єм генерованих даних, що надходять від датчиків до МК;
- пропускна здатність каналів зв'язку;
- час обробки даних МК;
- інтервал часу, за який слід робити записи необхідної інформації вихідний файл.

Вхідна інформація описується натуральними числами, точність яких допускається з округленням до десятитисячних.

Джерелом цієї інформації може виступати набір змінних програми, який може зберігатись у самій моделі (програмі) або в окремому файлі.

## 2.5 Структура технологічного процесу виробництва MEMS акселерометрів

У рамках виконання кваліфікаційної роботи, з метою конкретизації задачі та досягнення наочності і практичності результатів роботи, розробка моделі системи моніторингу ТП буде здійснюватися на прикладі ТП виробництва MEMS акселерометрів.

На кожному етапі технологічного процесу виробництва MEMS акселерометрів використовується спеціалізоване обладнання для виконання ТО та контролю якості і відповідності виробленого продукту заданим

параметрам. Нижче перераховано основні етапи виробництва із зазначення ключових параметрів моніторингу та обладнання для кожної операції:

Перший етап – підготовка субстрату (підкладка), виготовлення основи МЕМС акселерометра, на яку в подальшому будуть наноситись функціональні шари пристрою. Зазвичай основу виготовляють у вигляді пластини з силікону.

Параметри моніторингу: габарити та гладкість субстрату, наявність дефектів на поверхні.

Обладнання: механічне обробне обладнання для різання та обробки силіконових пластин.

Поверхневий профілометр для гладкості поверхні – вимірює мікротопографію поверхні, дозволяючи оцінити гладкість та нерівності.

Еліпсометр для визначення товщини субстрату: Вимірює зміни поляризації світла, що відбивається від поверхні, для визначення оптичних властивостей та товщини шару.

Поверхневий дефектоскоп для виявлення чистоти поверхні: Використовується для виявлення мікро- та нанодефектів на поверхні матеріалу.

Другий етап – нанесення покриття, тонкого шару ізоляційного матеріалу на субстрат для створення основи для подальших шарів та структур.

Параметри моніторингу: товщина та рівномірність покриття.

Обладнання: системи для хімічного відкладання тонкого шару покриття.

Профілометр – використовуються для міряння вертикальних різниць висот на поверхні, що дозволяє визначити товщину покриття. Розглядаючи профіль поверхні, можна визначити однорідність товщини покриття.

Інтерферометр – можуть вимірювати довжину хвилі світла, яка проходить через покриття, щоб визначити товщину. Зміни в інтерференційному зображенні вказують на однорідність покриття.

Третій етап – фотолітографія, тобто створення шаблонів мікроструктур за допомогою світлочутливого матеріалу (фоторезисту) та експозиції через маску.

Параметри моніторингу: роздільна здатність, точність позиціонування.

Обладнання: фотолітографічні системи, маски, ультрафіолетові джерела світла.

Оптичні сенсори та камери. Спеціальні оптичні системи використовуються для вимірювання розмірів маски та визначення роздільної здатності. Камери та датчики світла реєструють деталі маски під час експозиції.

Енкодери, лазерні інтерферометри, п'єзоелектричні датчики. Використання енкодерів та інших датчиків для точного визначення позиції маски та субстрату. Лазерні інтерферометри можуть вимірювати навіть дуже малі відхилення, а п'єзоелектричні датчики можуть реагувати на мікрометрові зсуви.

Четвертий етап – літографії або видалення матеріалу за допомогою хімічних процесів або фізичного видалення з тих місць, де було використано фоторезист.

Параметри моніторингу: розміри вирізаних структур, глибина етчінгу.

Обладнання: Процесори етчінгу (реактивне іонно-плазмове освітлення), хімічні камери.

Скануючий електронний мікроскоп (СЕМ) – надає високороздільні зображення поверхні субстрату, дозволяючи вимірювати глибину та розміри структур.

Оптичні профілометри з інтерферометрією – вимірює висоту та форму структур за допомогою оптичних вимірювань та інтерферометрії.

П'ятий етап – процес депонування або нанесення додаткових шарів матеріалів (металів чи діелектриків) для формування конструкції MEMS.

Параметри моніторингу: товщина відкладеного шару, однорідність.

Обладнання: випарювання або процеси хімічного відкладання.

Еліпсометр – використовується для вимірювання оптичних властивостей тонких плівок, що дозволяє визначити їхню товщину.

Рентгенівська флуоресценція – метод, де рентгенівське випромінювання

використовується для визначення складу матеріалу. Зміни у флуоресцентному сигналі можуть вказувати на зміни в товщині та однорідності шару.

Шостий етап – процес етчінгу, тобто видалення надлишкового матеріалу зі створених шарів, формуючи бажану мікроструктуру.

Параметри моніторингу: глибина етчінгу, профіль видалених областей.

Обладнання: Обладнання для мокрого чи сухого етчінгу.

Інтерферометри – використання інтерферометрів для вимірювання змін у довжині хвиль може допомогти визначити товщину шарів матеріалу під час етчінгу.

Мас-спектрометри – можуть застосовуватися для аналізу хімічних складових у процесі етчінгу та контролю швидкості хімічних реакцій.

Сьомий етап – літографія другого рівня, повторення фотолітографії та етапу літографії для створення другого рівня мікроструктур або нових шарів.

Параметри моніторингу: синхронізація нових масок, розміри та розташування структур.

Обладнання: аналогічне обладнанню для першого рівня літографії.

Восьмий етап – створення електричних з'єднань між компонентами MEMS акселерометра.

Параметри моніторингу: омичний опір, якість з'єднань.

Обладнання: Машина для нанесення металевих шарів, системи формування контактів.

Тестери з'єднань (Continuity Testers) використовуються для виявлення відсутності обривів або коротких з'єднань.

Імпедансні вимірювачі використовуються для оцінки електричної якості контактів та перевірки взаємодії між різними матеріалами.

Дев'ятий етап – нанесення захисного шару для забезпечення довговічності та захисту пристрою від зовнішніх факторів.

Параметри моніторингу: товщина покриття, однорідність.

Обладнання: системи для нанесення захисних покриттів.

Оптичні контуроміри – Використовують проекційні та оптичні методи

для вимірювання форми та висоти поверхні покриття.

Інколи до ТП виробництва МЕМС акселерометрів включають етапи виробництва або контролю якості корпусів пристроїв. Цей процес є окремою гілкою і може виконуватись паралельно з будь-яким етапом, зазначеним вище. В рамках даної роботи зроблено припущення, що корпуси акселерометрів отримуються вже готовими і лише проходять контроль якості паралельно з етапом повторної літографії, оскільки при виконанні цієї операції може використовуватись аналогічне обладнання.

## 2.6 Формалізація задачі

Базова модель СМ має відтворювати процес збору, обробки та візуалізації інформації при виконанні та контролі якості кожної ТО. Розробка базової моделі передбачає створення структури СМ і використання вхідних даних наближених до реальної системи, проте які не повторюють точно існуючий ТП.

Формалізація задачі моделювання передбачає наочне представлення структури та алгоритму СМ згідно описаного ТП, проведення чіткого розмежування та описання елементів СМ, математичний опис вхідних і вихідних даних, за умови необхідності їх розрахунків.

Складемо перелік параметрів моніторингу ТП і обладнання, який буде описувати послідовність ТО із зазначенням ключових параметрів контролю якості їх виконання та стану технологічних ділянок, необхідних для виконання цієї операції (таблиця 2.1).

Наведені параметри діляться на вже згадані категорії: параметри стану ділянки і контролю якості виконаних операцій. Відповідно до цих категорій можна визначити правила, за якими будуть генеруватися повідомлення від окремих датчиків на технологічних ділянках, оскільки логічно припустити, що параметри стану ділянок і обладнання мають зніматись постійно, тобто регулярно через фіксовані проміжки часу. Також слід зазначити, що ці дані є

критично важливими у процесі керування виробництвом і тому обов'язково мають бути візуалізовані на екрані оператора.

В свою чергу, параметри контролю якості можуть зніматись тільки після виконання операції, при цьому послідовне виконання технологічних операцій включає в себе допоміжні переходи, такі як транспортування продукції між ділянками, догляд обладнання тощо.

Це означає, що генерація даних, щодо параметрів контролю якості, відбувається через динамічні проміжки часу і у залежності від результатів виконання попередньої операції.

Але слід зазначити, що час генерації і відповідно об'єм даних буде однаковим або майже однаковим, оскільки об'єкти сканування є типовими і не практично відрізнятимуться габаритами.

Таблиця 2.1 – Перелік параметрів моніторингу ТП і обладнання

№	Назва операції	Параметри моніторингу	Кількість давачів
1	Підготовка субстрату (підкладки)	<ul style="list-style-type: none"> <li>– об'єм наявної сировини;</li> <li>– габарити пластини;</li> <li>– гладкість поверхні;</li> <li>– наявність дефектів на поверхні.</li> </ul>	4
2	Нанесення покриття	<ul style="list-style-type: none"> <li>– об'єм наявної сировини;</li> <li>– товщина покриття;</li> <li>– рівномірність покриття.</li> </ul>	3
3	Фотолітографія	<ul style="list-style-type: none"> <li>– роздільна здатність;</li> <li>– точність позиціонування.</li> </ul>	2

Продовження таблиці 2.1

№	Назва операції	– Параметри моніторингу	Кількість давачів
4	Літографія	<ul style="list-style-type: none"> <li>– рН-рівень розчину;</li> <li>– температура розчину;</li> <li>– наявний об'єм хімічних добавок;</li> <li>– розміри вирізаних структур;</li> <li>– глибина етчінгу.</li> </ul>	5
5	Депонування	<ul style="list-style-type: none"> <li>– об'єм наявної сировини;</li> <li>– товщина шару;</li> <li>– однорідність.</li> </ul>	3
6	Етчінг	<ul style="list-style-type: none"> <li>– рН-рівень розчину;</li> <li>– температура розчину;</li> <li>– наявний об'єм хімічних добавок;</li> <li>– глибина етчінгу;</li> <li>– профіль видалених областей;</li> </ul>	5
7	Літографія 2-го рівня	<ul style="list-style-type: none"> <li>– синхронізація нових масок;</li> <li>– рН-рівень розчину;</li> <li>– температура розчину;</li> <li>– наявний об'єм хімічних добавок;</li> <li>– розміри структур;</li> <li>– глибина етчінгу.</li> <li>– розташування структур.</li> </ul>	7

Кінець таблиці 2.1

№	Назва операції	Параметри моніторингу	Кількість давачів
8	Створення ел. з'єднань	– омічний опір, – якість з'єднань.	2
9	Нанесення захисного покриття	– об'єм наявної сировини; – товщина шару; – Однорідність.	3
10	Контроль якості корпусу	– габарити; – розташування структур.	2
11	Монтаж схеми у корпус	– розташування структур.	1

Дані про якість виконання конкретної операції є важливими для прийняття рішення про продовження обробки даного екземпляру акселерометра, тому в масштабі системи моніторингу всього виробництва їх можна віднести до даних локального значення, тобто їх обробка має бути оперативною в межах технологічної ділянки, а їх візуалізація у глобальній системі моніторингу не є обов'язковою.

Для СМ в цілому буде достатньо статистичних даних, щодо ймовірності виникнення браку на ділянці.

Отже, для моделювання СМ необхідно враховувати структуру ТП, схему якого наведено на рисунок 2.1



Рисунок 2.1 – Структурна схема ТП виробництва МЕМС акселерометрів.

Систему моніторингу можна представити як систему масового обслуговування (СМО), основними об'єктами у якій виступають пакети інформації і вузли їх генерації, передачі та обробки. Дані генеруються і обробляються у системі підпорядковуючись певному алгоритму, який визначається конфігурацією системи і описаними вище вхідними даними.

Отже, функціонування майбутньої моделі СМ відбуватиметься за наступним алгоритмом:

- генерація заявки, яка представлятиме заготівку акселерометра і буде надходити на першу ділянку і послідовно проходитиме всі операції ТП;
- надходження заявки на ділянку – запускатиме генерацію випадкового інтервалу часу в певному діапазоні, який включає в себе виконання ТО та допоміжних переходів. Протягом цього часу заявка буде залишатися на ділянці, а давачі параметрів стану ділянки та обладнання будуть генерувати дані для СМ. Якщо набір згенерованих даних буде містити критичні значення, тоді СМ згенерує повідомлення про несправність або аварійну ситуацію на ділянці;
- надходження заявки на операцію контролю якості – тут так само

відбуватиметься затримка на фіксований час, протягом якої давачі параметрів контролю якості будуть генерувати дані для СМ. Якщо набір згенерованих даних буде містити критичні значення, тоді повідомлення покидає систему і не надходить на наступну ділянку, а СМ згенерує повідомлення про брак.

Для наочності алгоритму та визначення місць логічних елементів представимо СМ у вигляді Q-схеми (на рисунку 2.2).

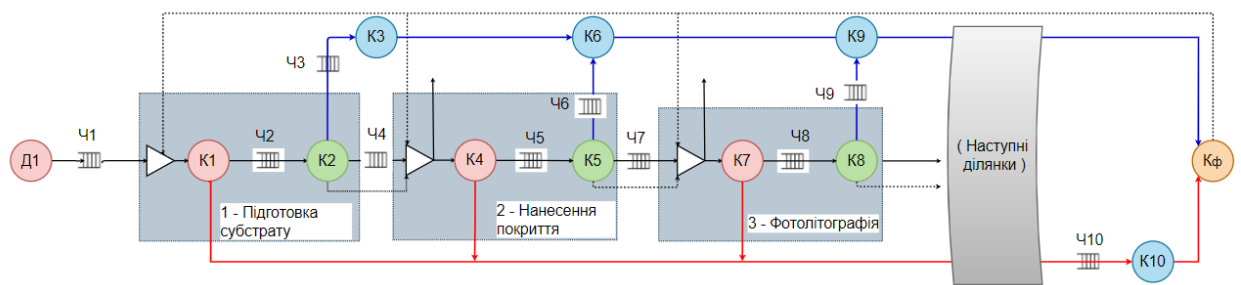


Рисунок 2.2 – Q-схема системи моніторингу

Згідно побудованої схеми, джерело Д1 генерує заявку, яка потрапляє до черги Ч1, де очікує обробки у каналі К1, який імітує проведення технологічної операції (канали виділені червоним) – тут відбувається затримка заявки на певний період, генерується повідомлення про зміну стану ділянки, а також регулярно надсилаються повідомлення про стан обладнання, які потрапляють у чергу Ч10 для передачі через канал зв'язку К10 до фінального Кф – тобто контрольної панелі оператора.

Після обробки у каналі К1, заявка потрапляє у чергу Ч2, для виконання операції контролю якості у каналі К2 – тут знову відбувається затримка, генеруються та обробляються дані про якість виконаної операції та надсилається повідомлення про успішне виконання операції або брак виробу, яке передається до черги Ч3 для передачі через канал зв'язку К3 до фінального Кф. Аналогічні операції проводяться на наступних ділянках виробництва.

Клапани перед каналами технологічної обробки (червоні) потрібні для того, щоб зняти браковану заявку(акселерометр) з виробничої лінії і не

допустити подальшої обробки бракованого виробу. Також через них можливе здійснення керуючого впливу на ділянку з боку оператора.

Об'єми даних у системі вимірюються в умовних одиницях спільних для всіх пристроїв. Масштабування часу в моделі відбувається відносно реального часу з коефіцієнтом 60:1, що означає, що 1 хвилина модельного часу відповідає 1 годині реального часу, відповідно  $1 \text{ с} = 0,017 \text{ с}$ .

Завантаженість кожного каналу зв'язку та обробки даних, розраховується за формулою (2.1):

$$U_{\text{д}} = \frac{T_p}{T}, \quad (2.1)$$

де  $T_p$  – загальний час роботи каналу;

$T$  – час моделювання.

Продуктивність СМ, розраховується за формулою (2.2):

$$P = \frac{N_{\text{гран}}}{T}, \quad (2.2)$$

де  $N_{\text{гран}}$  – об'єм оброблених даних (ум. од.);

$T$  – час моделювання.

Витрати на функціонування технологічних ресурсів визначаються об'ємом електроенергії, яку вони використовуватимуть, розраховуються за формулою (2.3):

$$X = P * x_e, \quad (2.3)$$

де  $P$  – потужність агрегату;

$x_e$  – вартість кВт/год.

Сумарні витрати на забезпечення функціонування АТЛ, розраховуються

за формулою (2.4):

$$X_{\text{сум}} = \sum_{i=0}^n X_i * T_p * m_i \quad , \quad (2.4)$$

де  $X_i$  – вартість години роботи одиниці ресурсу на ділянці  $i$ ;

$m_i$  – кількість ресурсів (агрегатів) на ділянці  $i$ ;

$T_p$  – загальний час роботи ділянки.

## 2.7 Вибір методу вирішення задачі моделювання

У першому розділі, ми з'ясували, що найбільш адекватними є реальні моделі об'єктів. Проте найбільш поширеними методами моделювання залишаються уявні методи, а саме комп'ютерне математичне моделювання. Найбільш наочним і близьким до реального моделювання, з точки зору відтворення об'єкту, є метод імітаційного моделювання.

Цей метод є достатньо універсальним для дослідження як дискретних, так і неперервних процесів стохастичного чи детермінованого характеру.

### 2.7.1 Метод імітаційного моделювання

Розглядання функціонування системи або технічного процесу можна вважати послідовною зміною станів його складових елементів. Для об'єкта з детермінованою природою стан процесу в будь-який момент часу  $t$  може бути однозначно визначений за допомогою математичної моделі та початкового стану  $x(t_0)$ . Це надає можливість розробляти імітаційні моделювальні алгоритми, що базуються на часовому або подійному принципі зміни станів.

Часовий принцип передбачає зміну станів об'єкта в залежності від інтервалів моделювального часу, які можуть бути або дискретними (чітко визначеними), або стохастичними (значення яких визначаються у

допустимому діапазоні за розподілом ймовірностей). Цей принцип є універсальним, але може бути неефективним з точки зору витрат машинного часу на моделювання.

Подійний принцип (принцип особливих станів) полягає в тому, що при аналізі функціонування більшості об'єктів можна виділити два види станів: особливі, що характеризують процес лише у конкретні моменти часу (із раптовою зміною стану), та неособливі (де стан залишається незмінним). Відстежуючи особливі стани в часі, можна отримати потрібну інформацію про об'єкт моделювання.

Один із варіантів подійного принципу — принцип послідовної обробки заявок, який використовується в статистичному моделюванні систем масового обслуговування. В алгоритмах, заснованих на цьому принципі, здійснюється циклічне послідовне відстеження подій під час проходження кожної заявки через систему обслуговування.

Під час вивчення динаміки складних об'єктів часто застосовується комбінований принцип побудови моделювальних алгоритмів, який поєднує переваги часового і подійного підходів.

Оскільки система моніторингу є інформаційною системою, то для її моделювання немає необхідності у просунутому графічному поданні та інтерфейсі, але при цьому слід побудувати модель таким чином, щоб можливо було виокремити елементи системи, як окремі об'єкти (сутності) у моделі, чітко визначити їх стани та процеси взаємодії між ними, та урахувати різні їх характеристики.

### 2.7.1 Метод об'єктно-орієнтованого моделювання

Об'єктно-орієнтована методологія базується на чотирьох основних поняттях, які взаємопов'язані: абстракція, ієрархія, інкапсуляція і модульність [27].

**Абстракція** – це процес виділення суттєвих характеристик об'єкта, що роблять його унікальним і визначають його концептуальні межі.

**Ієрархія** – це метод упорядкування абстракцій (класів) за рівнями.

**Інкапсуляція** – відокремлення елементів об'єкта, які визначають його структуру, від тих, що визначають його поведінку. Іншими словами, це відокремлення реалізації від інтерфейсу.

**Модульність** – розкладання системи на взаємопов'язані, але відносно незалежні частини (модулі).

Об'єктно-орієнтоване моделювання, проектування та програмування обов'язково використовують ці поняття при описі класів і об'єктів. Кожен клас включає атрибути для опису стану об'єктів цього класу і операції для опису їхньої поведінки. Крім того, розрізняють зовнішній вигляд класу (інтерфейс) і його внутрішню структуру (реалізацію). Інтерфейс включає в себе оголошення операцій, доступних для екземплярів класу, а також інші класи, змінні і виняткові ситуації, які уточнюють абстракцію, яку повинен представляти клас. Реалізація, зазвичай, включає визначення операцій, оголошених в інтерфейсі класу. Нижче наведено опис взаємовідносини між класами.

**Наслідування** – це відношення, при якому один клас повторює структуру та функціональність іншого класу (це може бути однократним або множинним успадкуванням). Це основний спосіб створення ієрархії класів в предметній області. Класи, від яких створюються конкретні об'єкти, називаються конкретними класами, тоді як загальні класи, від яких не створюються об'єкти, називаються абстрактними класами. Самий загальний клас в ієрархії називається базовим класом.

**Асоціація** – це семантичне відношення, яке показує, як класи взаємодіють один з одним. Асоціації можуть бути один-до-одного, один-до-багатьох або багатьох-до-багатьох.

**Агрегація** – це відношення частина-ціле між об'єктами різних класів.

**Використання** – це відношення, коли один клас (клієнт) використовує послуги або ресурси іншого класу (сервера). Це також може розглядатися як

аспект відношення наслідування, де підклас виступає в ролі клієнта для свого суперкласу. Клієнтом класу може бути його об'єкт, який використовує атрибути та операції класу. Операції можуть бути різних видів, такі як модифікатори (зміна стану об'єкта), селектори (зчитування стану без зміни), ітератори (доступ до частин об'єкта в строго визначеній послідовності), конструктори (створення та ініціалізація об'єкта) та деструктори (звільнення стану та/або руйнування об'єкта).

Опис об'єкта включає в себе інформацію про його стан, який описується списком властивостей, що відповідають класу, до якого належить цей об'єкт, а також їх поточними значеннями. Крім того, в описі об'єкта також зазначається його поведінка, яка описується методами, які реалізують операції класу, до якого він належить. Між об'єктами можуть існувати різні відносини, такі як рівноправні або клієнт-серверні взаємовідносини [25].

У контексті цих взаємовідносин об'єкт може виконувати одну з трьох ролей:

- актор: цей об'єкт може впливати на інші об'єкти, але сам не піддається їх впливу (активний об'єкт);
- сервер: цей об'єкт може лише піддаватися впливу з боку інших об'єктів, але сам не виступає як впливаючий об'єкт (пасивний об'єкт) ;
- агент: цей об'єкт може бути як активним, так і пасивним.

Також можуть існувати ієрархічні відносини між об'єктами, де один об'єкт включає в себе інший, що описується терміном агрегація. Більшість сучасних методів об'єктно-орієнтованого аналізу та проектування ґрунтується на використанні стандартизованої візуальної мови моделювання, такої як Unified Modeling Language (UML). UML надає уніфікований спосіб відображення системних структур та поведінки через графічні діаграми, полегшуючи спілкування розробників, підвищуючи якість та продуктивність проектування програмних систем, і дозволяючи створювати чітку документацію.

В контексті вирішення задачі імітаційного моделювання СМ, вибір

об'єктно-орієнтованого підходу є обґрунтованим, оскільки він дозволяє відтворити наближену структуру системи та наочно дослідити процес її функціонування. До того ж, сфера застосування цього методу в області визначеної задачі є доволі не дослідженою, що представляє наукову новизну і потенціальну цінність даної роботи. Реалізація моделі передбачається за допомогою використання існуючих засобів об'єктно-орієнтованого моделювання, отже представлення СМ за допомогою цього підходу здійснюватиметься непрямим способом. Це означає, що основні об'єкти системи будуть представлені шляхом комбінації існуючих стандартних елементів обраного програмного середовища.

## 2.8 Висновки до другого розділу

Аналізуючи задачу моделювання системи моніторингу виробництва у контексті комплексу завдань АСУТП, дійшли висновку, що дана задача може бути вирішена шляхом розробки базової функціональної моделі. З метою конкретизації задачі було обрано ТП виробництва МЕМС акселерометрів, на прикладі якого буде розроблятися програмне рішення. Проведено аналіз ТП, визначено його структуру та основні параметри моніторингу.

У процесі формалізації задачі було визначено основні вимоги до розроблюваної моделі – можливість досліджувати роботу СМ в реальному часі, а також використання розробленої системи як частини АСУТП.

Представлено наочну схему та опис об'єктів СМ у вигляді Q-схеми системи масового обслуговування, а також описано базовий алгоритм функціонування моделі. Для вирішення задачі розробки базової функціональної моделі СМ виробництва МЕМС акселерометрів було обрано метод імітаційного об'єктно-орієнтованого моделювання, реалізацію якого буде здійснено у програмному середовищі Node-Red.

## 3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Перед розробкою об'єктно-орієнтованої моделі СМ виробництва МЕМС акселерометрів, треба визначити основні вимоги до моделі, можливості її застосування, передумови та припущення при створенні моделі, змінні для представлення вхідних і вихідних даних.

### 3.1 Діаграми прецедентів

Одним з найбільш простих і зручних інструментів для аналізу систем, при застосуванні об'єктно-орієнтованого проектування програмного забезпечення, є діаграма прецедентів. Таке представлення надає змогу оцінити можливі функціональності системи з точки зору користувачів, а також оцінити зв'язок з іншими системами.

Діаграма прецедентів має на меті схематичне зображення взаємодії умовних акторів з системою, кожен їх вплив використовую певну функціональність, з мето виконання якоїсь дії (прецеденту). Актори можуть мати обмеження, щодо впливу або використання системи – тоді на діаграмі зображають основні ролі, у яких можуть виступати актори.

В свою чергу прецеденти представляють конкретні дії або функції, які можуть бути пов'язані між собою.

Така схема дозволяє визначити і зрозуміти основні сценарії використання системи в реальному середовищі та встановити вимоги щодо її функцій, а також представити структуру та організацію системи в процесі проектування.

На рисунку 3.1 наведена діаграма прецедентів для розроблюваної моделі.

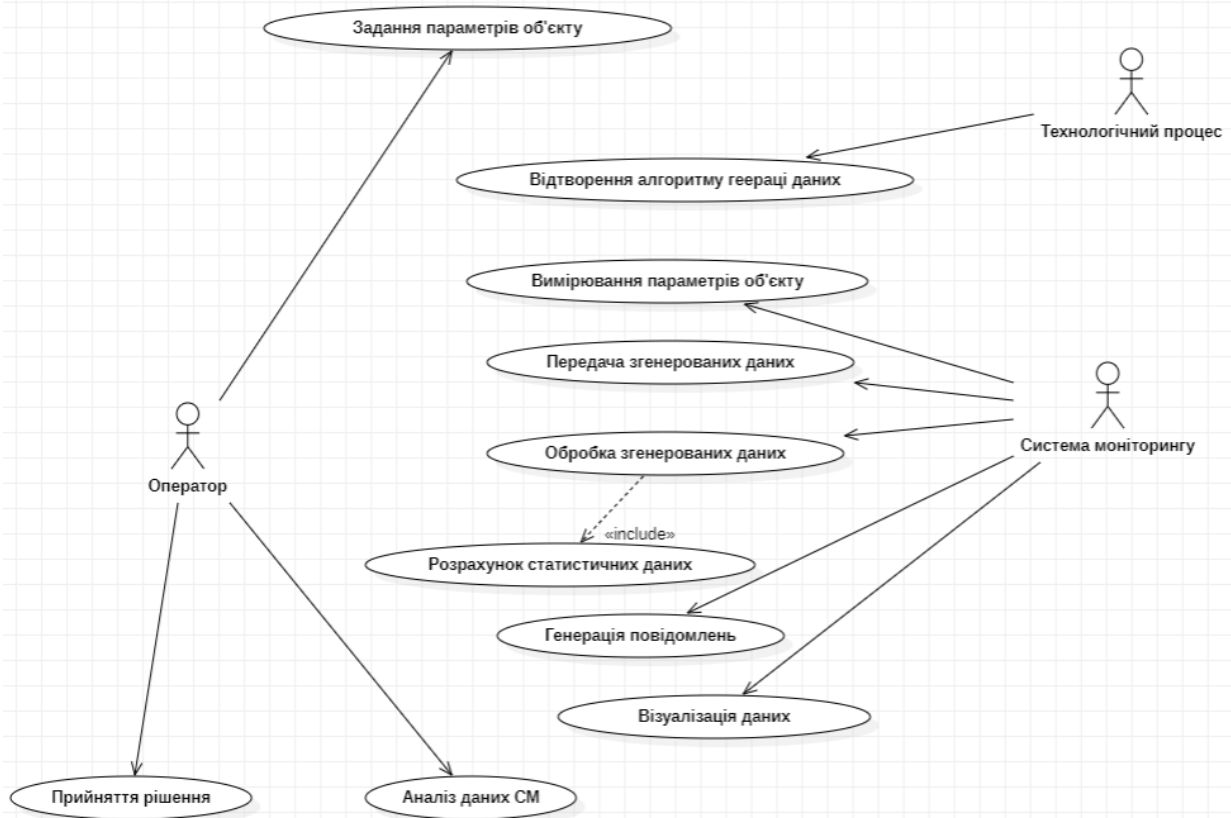


Рисунок 3.1 – Діаграма прецедентів розроблювальної моделі.

### 3.2 Визначення передумов розробки моделі

При побудові об'єктно-орієнтованої моделі у середовищі Node-Red було зроблено припущення, наведені нижче.

Одна сутність(заявка) уявляє собою заготівку MEMS акселерометра, вона матиме поля для всіх описаних параметрів якості кожної операції, які будуть заповнюватися згенерованими даними і передаватися СМ. Заявка генерується з фіксованим інтервалом часу, який дорівнює нижній границі інтервалу можливих значень часу виконання першої операції ТП та допоміжних переходів.

На першому етапі заявка потрапляє у чергу до каналу технологічної обробки – коли заявка займає канал, то його статус змінюється і ця інформація

виводиться оператору. Опитування давачів параметрів обладнання на кожній ділянці відбувається незалежно.

На другому етапі СМ здійснює контроль якості – заявка потрапляє у чергу на другий канал, де генеруються дані про параметри якості. Оскільки дані параметри можуть відрізнятися або передаватися у різній формі, в тому числі такій, яку проблематично імітувати в умовах моделювання, то прийнято рішення подавати дані про параметри якості виконаної операції у вигляді умовного пакету даних певного об'єму. Це дозволить достатньо детально відтворити алгоритм роботи системи та оцінити, за потреби, ефективність заданої конфігурації моделі та каналів зв'язку.

Для оцінки даних та прийняття рішення щодо подальшої обробки заявки або її відбракування умовний пакет міститиме випадково згенероване значення у діапазоні від 0,00 до 100,00, належність якого до діапазону критичних означатиме брак.

Оскільки об'єктом моделювання є СМ, то здійснення керуючих впливів на систему виробництва не враховується – за замовченням, коли якісь з параметрів ділянки досягнуть критичних значень, то функціонування ділянки припинятиметься.

Головна задача СМ в даному випадку коректно оцінювати параметри та вчасно генерувати попередження.

Відтворити роботу СМ моніторингу можливо окремо від логіки виконання ТП, однак, для оцінки моделі все одно необхідно реалізувати механізм генерації даних.

Отже, для досягнення цієї мети, прийнято рішення частково реалізувати базову імітаційну модель ТП виробництва МЕМС акселерометрів. Це також дасть можливість полегшити задачу оптимізації керування виробництвом, за рахунок наявності базової імітаційної моделі ТП, яка дозволяє дослідити різні конфігурації і режими роботи самого ТП.

Для визначення структури та потоків даних у моделі, при застосуванні об'єктно-орієнтованого методу використовують діаграми класів.

### 3.2.1 Діаграма класів

Ця схема структуру програмної системи через об'єкти (або класи) та зв'язки між ними, що надає змогу оцінювати систему з точки зору її елементів та описувати їх основні характеристики.

Кожен клас – це абстракція, що представляє певну частину системи та визначає змінні (атрибути) та методи (функції) цих об'єктів. Змінні зберігають та переносять інформацію по стан класу, а методи визначають дії які можна виконати над ним.

Зв'язки між класами показують, яким чином об'єкти цих класів можуть взаємодіяти між собою. Діаграма класів – це потужний інструмент для аналізу та проектування систем, оскільки надає змогу визначити структуру системи, ідентифікувати її основні елементи та методи їх взаємодії, а також створити основу для подальшої розробки програмного забезпечення.

На рисунку 3.2 наведена діаграма класів розроблювального додатку.

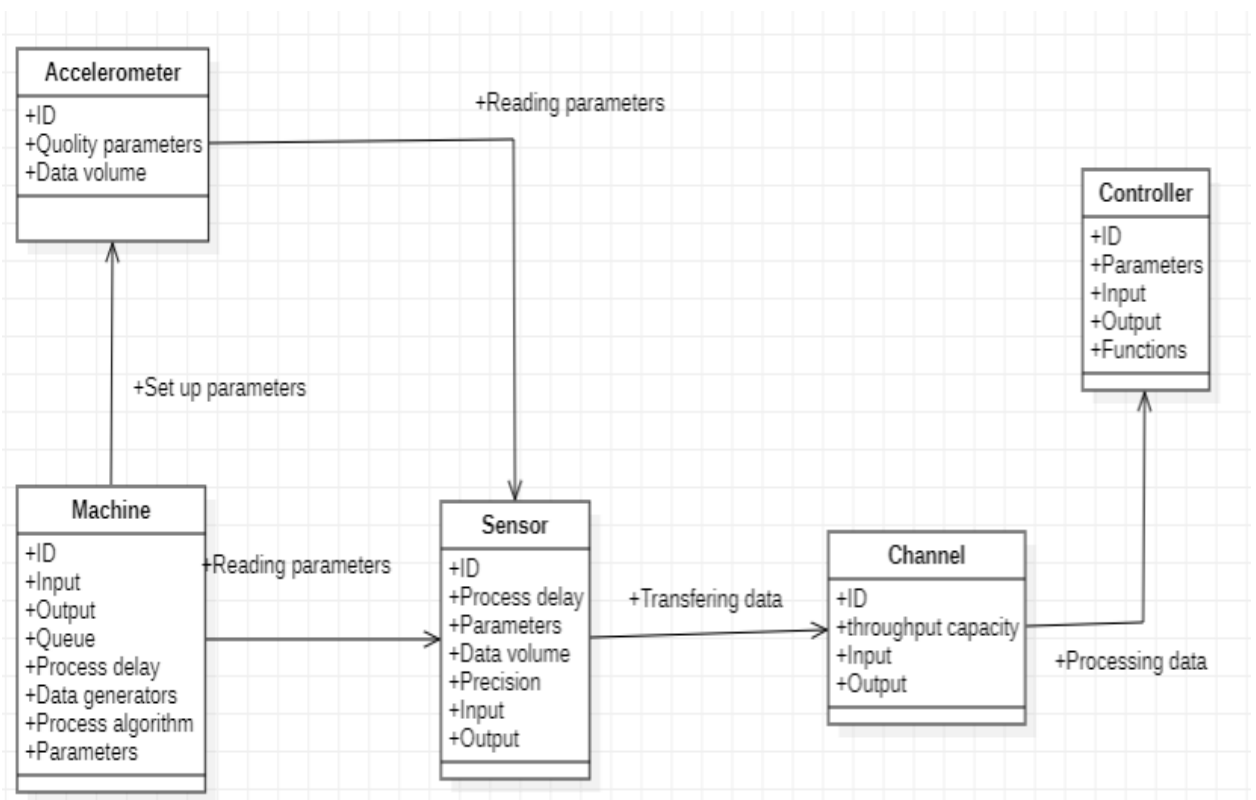


Рисунок 3.2 – Діаграма класів розроблювальної моделі

Можна виділити такі основні класи:

- Controller – цей клас представляє один з трьох основних компонентів СМ, він отримує дані та виконує їх обробку;
- Channel – це вузол передачі даних між елементами системи, основною характеристикою є пропускна здатність;
- Sensor – клас, який забезпечує генерацію даних для СМ, до основних параметрів відносяться точність, діапазон значень, час генерації даних та їх об'єм;
- Machine – у цьому класі реалізований алгоритм взаємодії між всіма іншими класами;
- Accelerometer – основний носій даних у системі та актор.

### 3.2.2 Програмне середовище Node-Red

Серед наведених у першому розділі засобів об'єктно-орієнтованого моделювання найбільше підходить середовище Node-Red, оскільки дозволяє реалізувати модель СМ на рівні окремих пристроїв і використовувати її як програмну частину у процесі моніторингу.

Також середовище має зручний інтерфейс та гнучкий функціонал для забезпечення більш детального програмування системи та забезпечення її інтеграції з різними платформами.

У середовищі моделювання Node-Red модель будується за допомогою стандартних структурних блоків(вузлів), які піддаються тонкому налаштуванню. Інформаційна система може бути описана загальними блоками, назва і функціонал яких описано нижче [29-31].

Inject – джерело, яке створює сутності, тобто об'єкти (далі транзакти), які представляють предмети праці виробництва та якими оперує модель, , для якого можна задати закон та інтервал появи об'єктів.

Timestamp – додає часові мітки для симуляції вимірювань у часі.

Random – генерує випадкові значення для імітації даних від MEMS

акселерометрів.

Function – вузол JavaScript для реалізації логіки обробки даних, наприклад, створення аномалій чи визначення величини впливу.

Switch – розділяє потік даних на різні гілки залежно від умови.

Delay – дозволяє робити затримку заявки у системі.

Smooth – вузол, який згладжує дані для моделювання реальних вимірювань.

Chart – вузол для візуалізації даних у вигляді графіків.

Debug – виводить дані у консоль для налагодження та перевірки результатів імітації.

File – читання та запис файлів для імітації роботи зі збереженими даними.

Також у середовищі існують вузли для забезпечення зв'язку з пристроями через різні протоколи (HTTP, TCP, MQTT тощо). Є можливість визначати маршрути та характеристики об'єктів для моделювання, візуалізувати дані та результати досліджень за межами чисел. У даному пакеті реалізована підтримка імпорту та експорту даних через сторонні файли широко застосовуваних форматів .csv, .json, .xml. тощо.

У ході виконання даної роботи використовували безкоштовний пакет офіційного програмного забезпечення Node-Red.

### 3.3 Опис розробленої моделі

Модель була розроблена у програмному середовищі Node-Red v3.1.3, за допомогою мови програмування JSON та JavaScript, які використовуються для опису логіки та взаємодії вузлів в потоці даних. JavaScript є потужною мовою програмування, яка надає гнучкість у реалізації різноманітних функцій та обробки подій. Розроблена модель складається з модулів, які представляють собою умовну ділянку ТП. Кожен модуль можна розділити на три кластери, які імітують операції з виконання ТП та його моніторингу (рисунок 3.3).

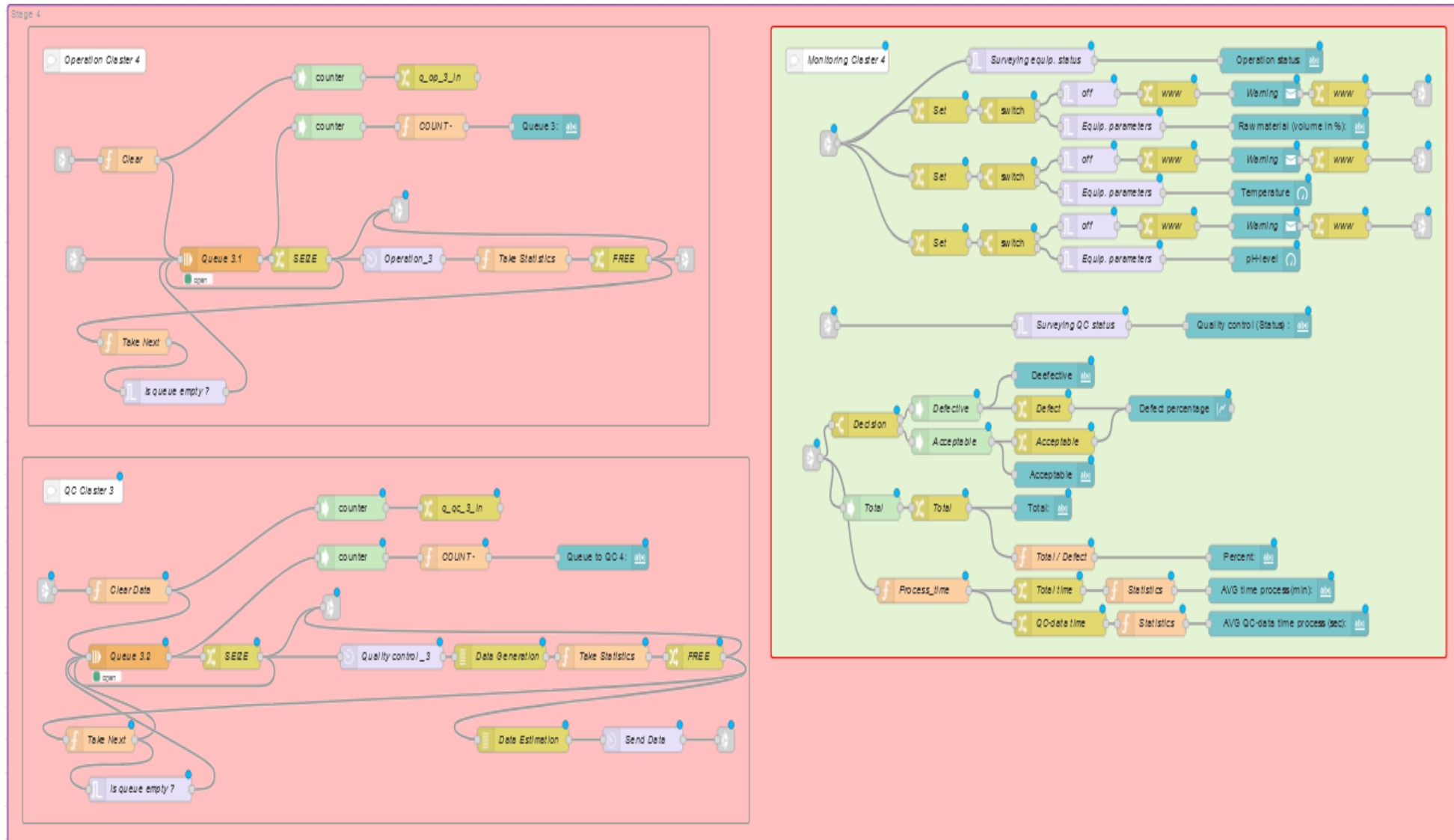


Рисунок 3.3 – Модуль технологічної ділянки

У склад моделі входять користувацькі ноди, розроблені спільнотою, перелік та опис нодів наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Перелік користувацьких нодів

Назва пакету	Опис
node-red-dashboard	Пакет функціональних блоків для реалізації вводу\виводу даних через користувацький інтерфейс
ttb-node-red-counter	Каунтер для реєстрації кількості повідомлень
node-red-node-random	Блок генерації і присвоєння випадкових значень за заданими умовами
node-red-contrib-queue-gate	Блок для реалізації послідовної обробки заявок у різних режимах

Головною частиною моделі є кластер моніторингу, наведений на рисунку.

Ця частина моделі представляє собою незалежний блок обробки і візуалізації даних. На вхід цього блоку надходить інформація від імітаційної моделі ТП.

Тут проходить її фрагментація, розрахунки статистичних даних та вивід на екран оператора. Також у цьому блоці здійснюється опитування обладнання, генерація та передача повідомлень оператору або системі керування.

Програмне середовище дозволяє подавати на вхід цього блоку інформацію від пристроїв, через мережу, за допомогою найбільш поширених протоколів tcp, udp, mqtt, http, modbus та ін.

Кластер моніторингу, повідомлення про критичний стан ділянки та інформаційна панель наведені на рисунках 3.4-3.6.

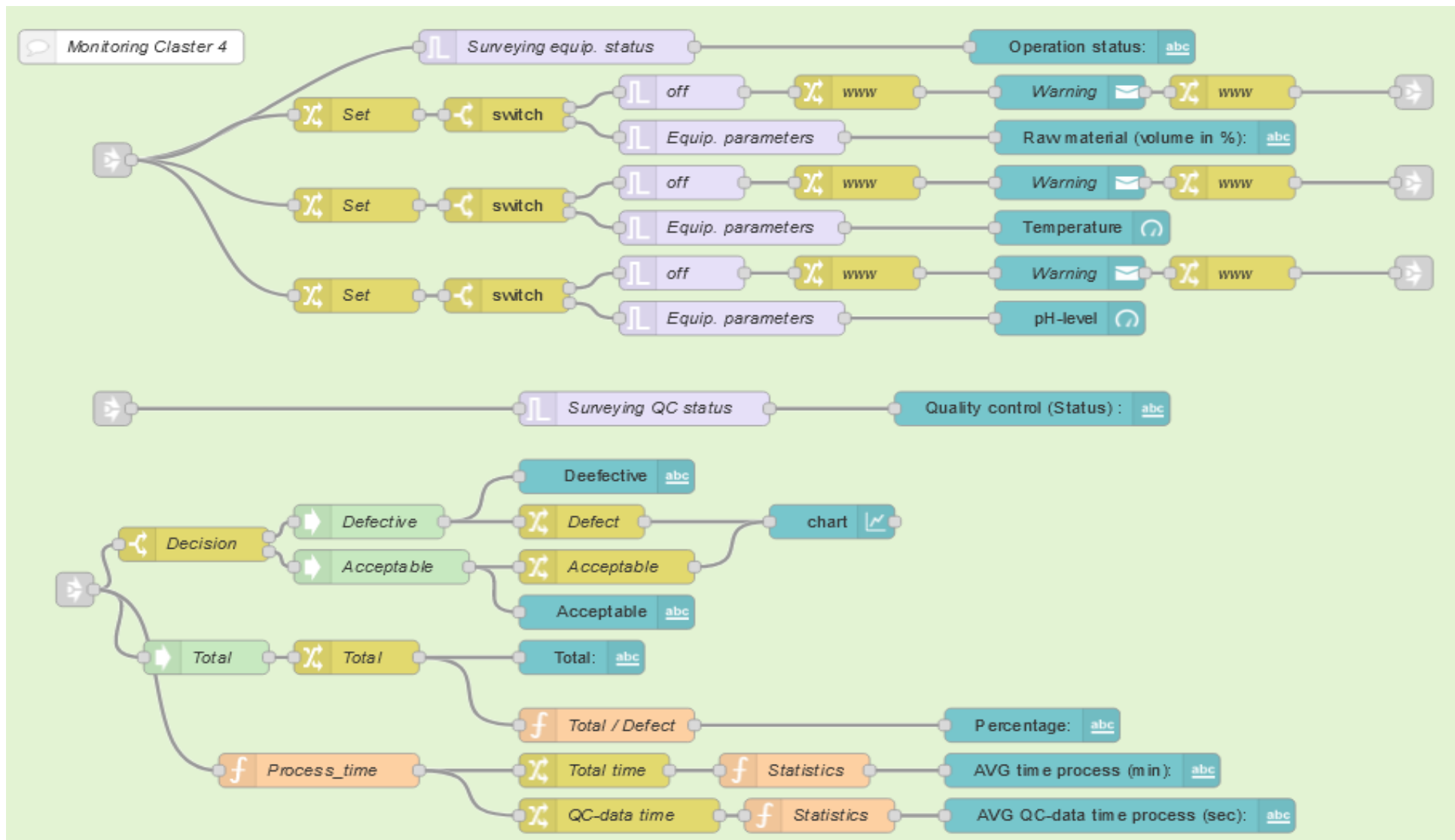


Рисунок 3.4 – Кластер моніторингу

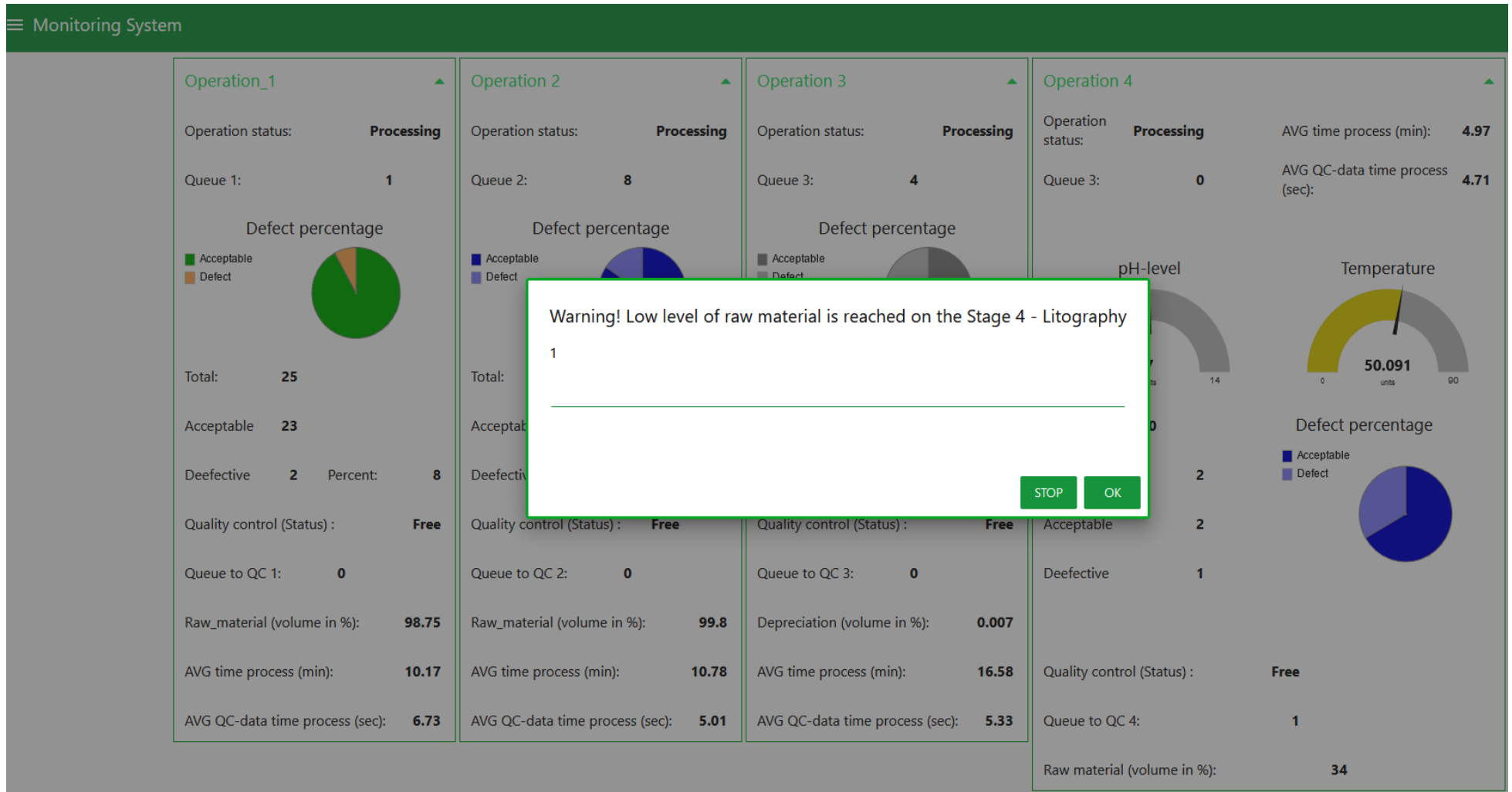


Рисунок 3.5 – Повідомлення про критичний стан ділянки

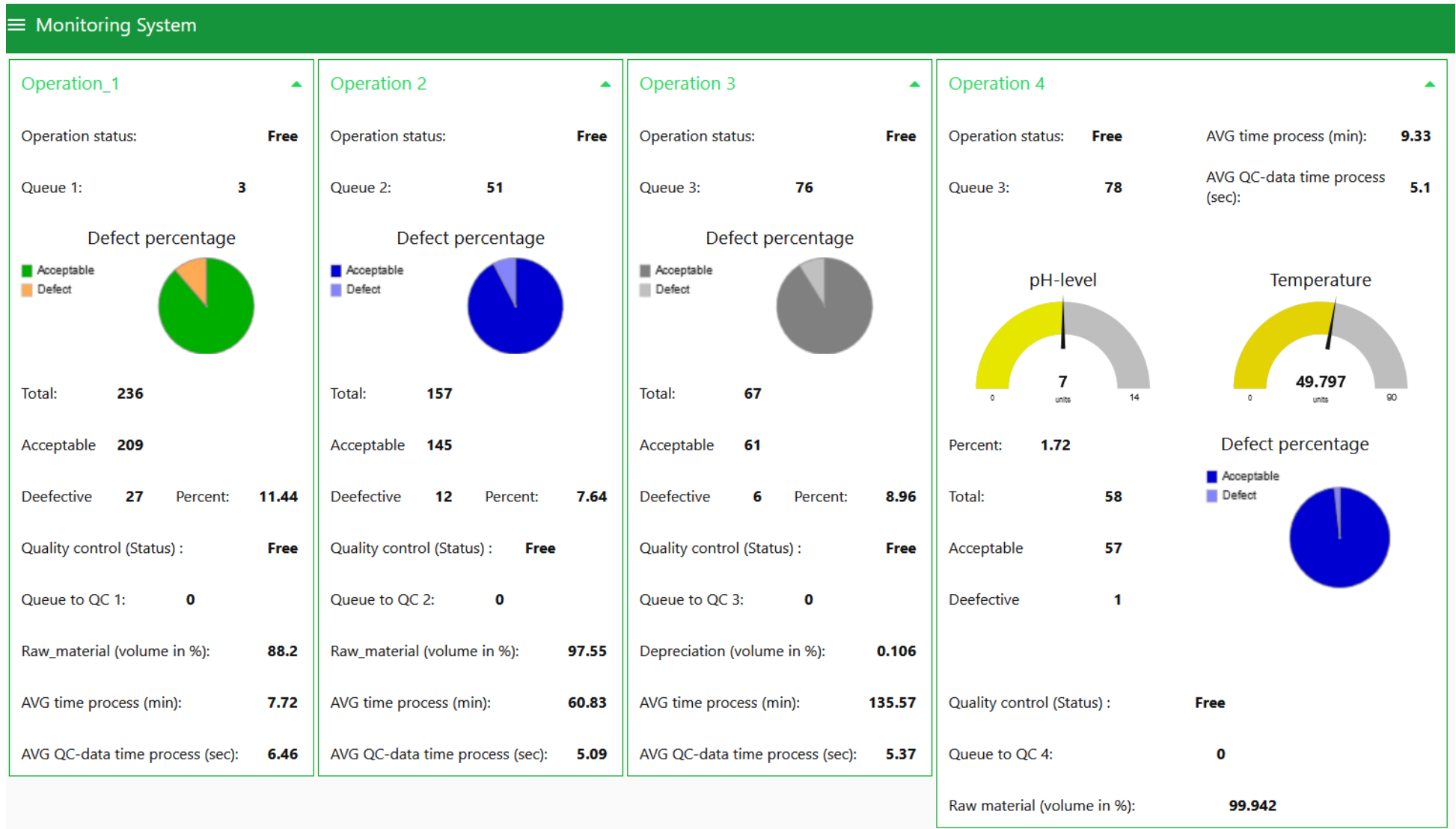


Рисунок 3.6 – Інформаційна панель системи моніторингу

На інформаційній панелі блоку моніторингу в реальному часі відображаються дані, отримані від імітаційної моделі ТП, перелік статистичних даних наведений у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Перелік вихідних даних

Параметр	Опис
Operation \ Quality control status	Статус каналу обробки\контролю якості
Queue 'n'	Довжина черги на обробку у каналі
Percent	Відсоток бракованих виробів
Total	Кількість виробів які пройшли обробку на даній ділянці
Acceptable	Кількість виробів відповідної якості
Defective	Кількість бракованих виробів
Raw_material	Запаси сировини на ділянці (у %)
AVG time process	Середній час знаходження заявки на ділянці (у хв)
AVG QC-data time process	Середній час передачі даних від блоку контролю якості (у сек)

Ця панель також може використовуватись, як контрольна панель, для реалізації керуючого впливу на програмний блок. Також, завдяки можливості підключення до мережі та широким можливостям з форматування та конвертації даних, імпорту та експорту файлів різних типів існує можливість підключення сервісів бази даних та хмарного обчислення.

На рисунку 3.7 зображено кластер імітації технологічної обробки – ця частина моделі дозволяє імітувати процес функціонування технологічної лінії. Тут реалізований алгоритм проходження об'єктом основної обробки, йому присвоюються основні параметри, знімаються статистичні дані з ділянки.

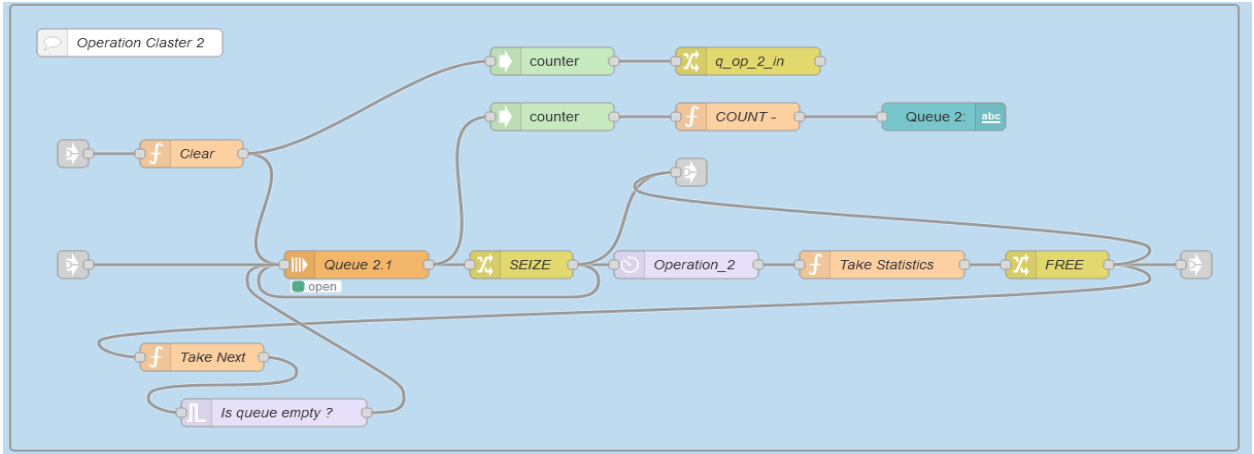


Рисунок 3.7 – Кластер імітації технологічної обробки

Інший кластер призначений для імітації операцій з контролю якості. В ньому реалізований алгоритм генерації та передачі даних до системи моніторингу (рисунок 3.8).

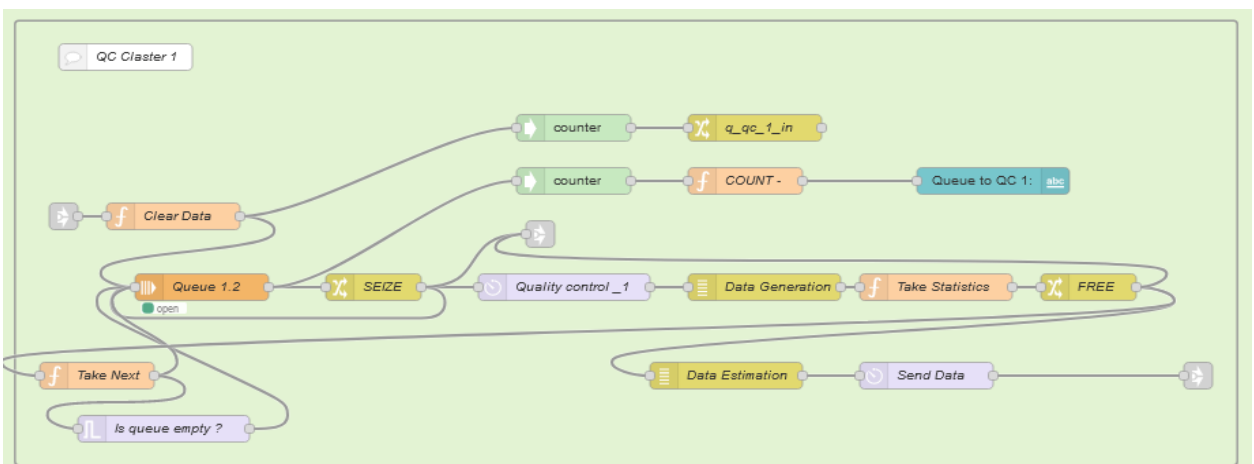


Рисунок 3.8 – Кластер імітації операцій з контролю якості

Оскільки контрольний модуль системи моніторингу може знаходитися на значній відстані, то передача даних з технологічної ділянки може

здійснюватись по бездротовим каналам – в такому та подібних випадках, щоб оцінити можливі ризики, пов’язані з перериванням зв’язку, втратою пакетів даних або обмежено пропускною здатністю каналу, можна налаштувати цей модуль, щоб більш детально відтворити та дослідити цей процес.

У розробленій моделі вхідні дані, які визначають параметри ділянок та діапазони значень для генерації даних задаються безпосередньо у функціональних блоках програми. Носієм інформації у системі є об’єкт `msg.`, який надходить у систему через вузол `Inject`. Основні атрибути об’єкта, необхідні для зберігання даних можуть задаватися при його генерації або у вузлах обробки даних, таких як `Function`, `Change` тощо (рисунок 3.9-3.10). В даній моделі, при генерації об’єкт `msg.` задаються тільки атрибути, які будуть зберігати і передавати інформацію про об’єкт тільки в межах кластеру технологічної обробки або контролю якості, оскільки принцип функціонування моделі вимагає частого перезаписування і надлишковість даних призводить до збільшення часу прогону моделі. Перелік атрибутів об’єкта `msg.` наведений у таблиці 3.3.

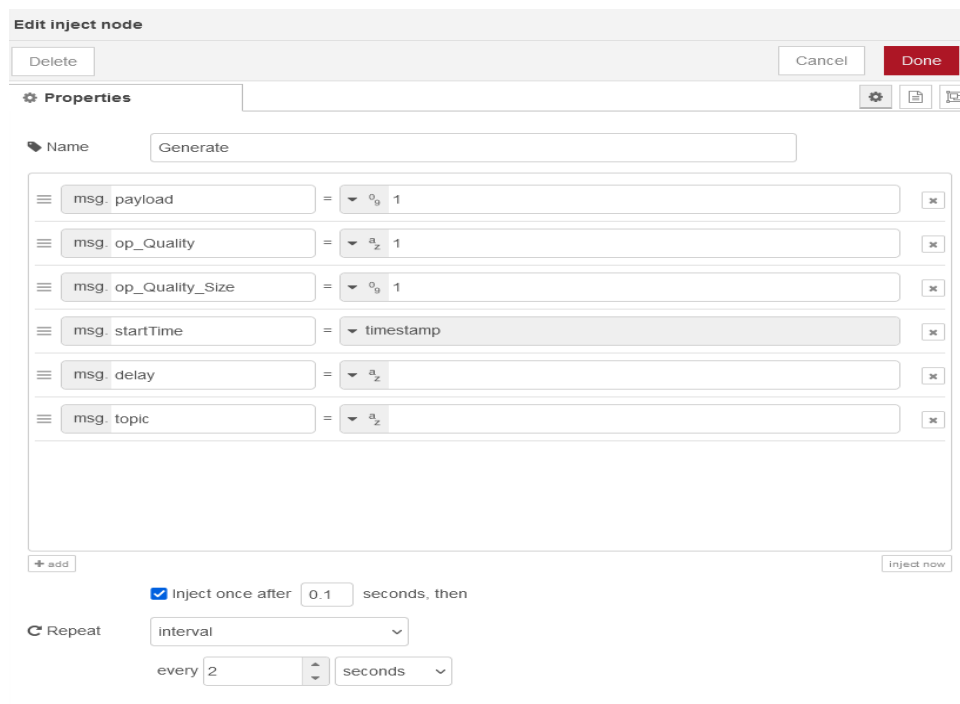


Рисунок 3.9 – Задання атрибутів і режиму генерації об’єктів у блоці `Inject`

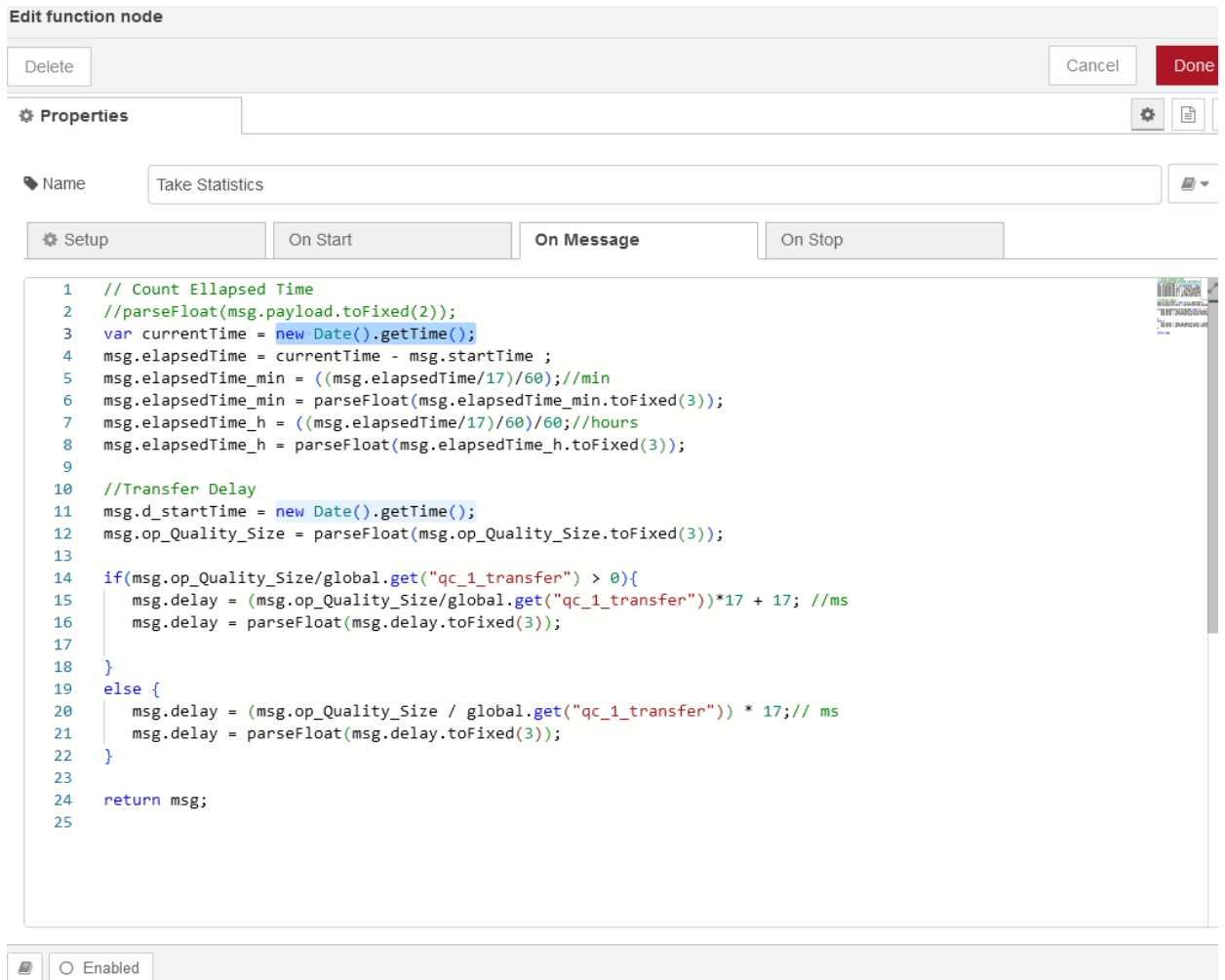


Рисунок 3.10 – Задання і обчислення атрибутів у блоці Function

Таблиця 3.2 – Перелік вихідних даних

Параметр	Опис
Payload	Корисне навантаження – ініціює обмін даними, також використовується для керування іншими вузлами
Op_Quality	Оцінка якості виконаної операції
Op_Quality_Size	Об'єм пакету даних для передачі по каналу зв'язку

Кінець таблиці 3.2

Параметр	Опис
StartTime	Час початку моделювання
Delay	Атрибут який дозволяє динамічно задавати інтервал затримки об'єкту у каналі.
Topic	Дозволяє змінювати тип об'єкту та режим його обробки, наприклад msg. де Topic = control керують станом блоку черги.

#### 3.4 Висновки, рекомендації та пропозиції щодо застосування та подальшого розвитку об'єкта дослідження

Основними об'єктами дослідження в даній роботі є система моніторингу виробництва та сфера застосування об'єктно-орієнтованого підходу для розробки та досліджень імітаційних моделей.

Отже, в результаті виконаної роботи, була розроблена базова функціональна модель системи моніторингу ТП. Дана модель має широкі можливості, щодо налаштування параметрів її компонентів і режиму функціонування, а також визначення і обчислення необхідних даних про технологічний процес та обладнання. Вона дозволяє досліджувати та імітувати процес функціонування технологічної лінії та її ділянок, а також відтворювати процес моніторингу в реальному часі. Модель може бути підключена до пристроїв і баз даних і може використовуватись, як програмна частина системи моніторингу виробництва.

Розроблена модель у перспективі може використовуватись як основа, для розробки функціональної моделі автоматизованої системи керування ТП

або для проведення імітаційного моделювання ТП виробництва МЕМС акселерометрів або процесу моніторингу виробництва.

У результаті розробки моделі з'ясували, що застосування методів та засобів об'єктно-орієнтованого моделювання для розробки та досліджень імітаційних моделей систем та технологічних процесів суттєво розширює можливості їх налаштування і дослідження, і відповідно, перспективи застосування таких моделей на практиці.

В той же час, у процесі розробки моделі з'ясували, що середовище Node-Red має обмеження, щодо масштабування часу – мінімальна операційна величина для моделі вимірюється у мілісекундах. Це означає що модель доцільно використовувати для дослідження поведінки у реальному часі, проте проведення статистичного моделювання, з метою дослідження режиму роботи моделі протягом тривалого часу є ускладненим.

Також, на час прогону моделі у даному середовищі суттєво впливають зовнішні фактори (фонові процеси, швидкість та стабільність мережі, обсяг доступних ресурсів на сервері, де запущений Node-Red і т.п.) та внутрішні властивості моделі – наприклад складність конфігурації вузлів або великий об'єм даних можуть суттєво збільшити фактичний час перебування заявки у системі і відповідно час погону моделі, навіть при масштабуванні часу.

Дослідження цього та інших інструментів об'єктно-орієнтованого моделювання для вирішення таких задач і їх обмежень також є актуальним і перспективним напрямком.

## 4 ЗАХОДИ З ОХОРОНИ ПРАЦІ

Сучасний прогрес у технологічному розвитку інфраструктури підприємств сприяє наростанню автоматизації та оптимізації виробничих процесів. Це особливо відноситься до використання комп'ютерів, що передбачає дотримання проектної документації для будівель та забезпечення відповідності стандартам санітарного освітлення, мікроклімату, вібрації, шуму, вогнестійкості, а також контролю електромагнітного, ультрафіолетового та інфрачервоного випромінювання [32]. У цій роботі розглядається працівник підприємства, який використовує розроблену модель для моделювання технологічних процесів або системи моніторингу, виступаючи як програмна складова системи моніторингу виробництва. Оскільки моделювання здійснюється за допомогою особистого комп'ютера, під час виконання посадових обов'язків працівника можуть впливати шкідливі та небезпечні виробничі фактори, що призводять до серйозних проблем фізичного та психологічного характеру.

### 4.1 Вимоги до приміщення

Дотримання вимог до приміщення є невід'ємним аспектом забезпечення безпеки та здоров'я працівників в рамках охорони праці. Важливо, щоб робоче місце було достатньо просторим, забезпечуючи не лише місце для виконання трудових завдань, а й вільний доступ до евакуаційних шляхів та необхідних ресурсів. Просторість також сприяє кращому розподілу робочих зон, що важливо для підтримки порядку та ефективності.

Освітлення робочого середовища користувачів комп'ютерів вимагає особливої уваги до зорового комфорту. Правильне освітлення, згідно з Правилами охорони праці під час експлуатації електронно-обчислюваних машин, включає комбінацію природного та штучного світла. У випадках, коли

природного світла не достатньо, особливо у лабораторіях, штучне освітлення стає важливим для забезпечення необхідного рівня освітленості.

Згідно з Державними будівельними нормами, рівень освітлення на робочому місці інженера-дослідника повинен бути у межах 300–750 Лк. Для роботи з ПК, яка вимагає середньої точності, рекомендується рівень освітлення не менше 400 Лк. У цьому контексті, LED-лампи є оптимальним вибором, оскільки вони забезпечують високий рівень світловіддачі.

Температурний режим та рівень вологості також мають велике значення, оскільки вони можуть впливати на продуктивність та здоров'я працівників. Регулювання температури та вологості повинно бути адаптоване до специфіки роботи та індивідуальних потреб працівників.

Ергономічні робочі місця спрямовані на мінімізацію фізичного та психологічного стресу. Меблі, обладнання та розташування робочих зон повинні враховувати фізіологічні та психологічні потреби працівників.

Захист від шуму є важливим у виробничих умовах. Застосування звукоізоляційних матеріалів, регулярне обслуговування обладнання та забезпечення працівників засобами індивідуального захисту сприяє зниженню рівня шуму та запобігає втраті слуху.

Забезпечення відповідності цим вимогам, постійний моніторинг їхнього виконання та адаптація до змінюваних умов та потреб працівників є ключовими для створення безпечного, здорового та продуктивного робочого середовища.

#### 4.2 Заходи пожежної безпеки

Заходи пожежної безпеки необхідні для забезпечення безпеки на робочих місцях та в офісах, як невід'ємна частина загальних заходів з охорони праці. Основна мета цих заходів – запобігання пожежам, мінімізація можливих наслідків і підвищення готовності до дій у разі виникнення пожежі. Першочергове завдання – визначення потенційних джерел загорання та

впровадження заходів для їх усунення чи зменшення ризику виникнення. Контроль за електропроводкою, обладнанням та безпечним утриманням легкозаймистих матеріалів, а також регулярні перевірки технічних засобів є частиною цього процесу.

Дотримання технологічних процесів, правил експлуатації обладнання та використання сертифікованих матеріалів – це обов'язкові умови для запобігання пожеж. Облаштування робочих місць системами пожежогасіння та сигналізації, встановлення датчиків диму та вогнегасників, а також чітке облаштування шляхів евакуації необхідні елементи забезпечення пожежної безпеки.

Проведення навчань та інструктажів для працівників щодо правил поведінки у випадку пожежі, методів пожежогасіння та процедур евакуації є критично важливим. Регулярні перевірки та аудит стану пожежної безпеки, оновлення планів евакуації з урахуванням змін у виробничих процесах необхідні для забезпечення належного рівня захисту від пожеж.

Заходи пожежної безпеки повинні входити в комплексний підхід до забезпечення безпеки працівників і виконуватися на постійній основі. Це охоплює технічні та організаційні заходи, а також формування відповідального ставлення до питань безпеки серед всіх працівників.

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи зроблено внесок у підвищення ефективності проектування та роботи автоматизованої системи управління технологічними процесами, за рахунок розробки базової функціональної об'єктно-орієнтованої моделі системи моніторингу типового технологічного процесу виробництва MEMS акселерометрів з урахуванням алгоритму його роботи та ключових параметрів.

У процесі формалізації задачі моделювання системи моніторингу технологічного процесу було прийняте рішення розглядати її як інформаційну систему масового обслуговування (СМО) у контексті комплексу завдань автоматизованого керування виробництвом. Для конкретизації задачі та побудування наочної моделі було вирішено вести розробку на основі типового технологічного процесу виробництва MEMS акселерометрів. З метою розширення перспектив застосування розроблюваної моделі було прийняте рішення про розробку базової функціональної моделі.

Проведено аналіз існуючих методів і засобів вирішення задачі імітаційного моделювання інформаційних систем, за результатами якого обрано інноваційний для вирішення даного класу задач метод об'єктно-орієнтованого моделювання.

Для реалізації функціональної моделі було вирішено використовувати програмне середовище з відкритим кодом Node-Red та мови програмування JavaScript та JSON.

У результаті, розроблена модель системи моніторингу технологічного процесу (ТП) володіє розширеними можливостями для налаштування параметрів компонентів та режимів функціонування, а також для визначення та обчислення необхідних даних про технологічний процес та обладнання. Модель дозволяє проводити дослідження та імітацію функціонування технологічної лінії та її ділянок, а також відтворювати процес моніторингу в

реальному часі. Її можна інтегрувати з пристроями та базами даних і використовувати як складову програмного забезпечення для системи моніторингу виробництва.

При перспективному використанні розроблена модель може слугувати основою для створення функціональної моделі автоматизованої системи управління технологічним процесом або для проведення імітаційного моделювання типових ТП.

В процесі розробки моделі виявлено обмеження середовища Node-Red щодо масштабування часу та вразливість до зовнішніх факторів та внутрішні властивості моделі суттєво впливають на час виконання моделі в середовищі Node-Red. Дослідження цих та інших інструментів об'єктно-орієнтованого моделювання для вирішення таких завдань та їх обмежень є актуальним напрямком і має перспективи.

У процесі дослідження опубліковано статтю у збірнику студентських наукових статей [6] та підготовлено тези доповіді на міжнародний молодіжний форум [7].

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Кравченко С. В. Аналіз автоматизованих систем керування технологічними процесами сучасного підприємства //Автоматизація та Приладобудування (Automation and Development of Electronic Devices ADED-2023) [Електронний ресурс] : збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. Харків : ХНУРЕ, 2023. Вип. 1. С. 36-41
2. Industry 5.0: the new revolution. NexusIntegra. URL: <https://nexusintegra.io/industry-5-0-the-new-revolution> (дата звернення 28.09.2023).
3. Система моніторингу технологічних процесів Розумного підприємства. / І. Г. Цмоць, А. Є. Батюк, А. В. Яворський, Т. В. Теслюк. URL: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2019/jan/15441/10-17.pdf> (дата звернення 28.09.2023).
4. 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. Филипченко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2021. 55 с.
5. ДСТУ 3008: 2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. К.: ДП "УкрНДНЦ". 2016. 30 с.
6. Шахрай Р. Р. Системологічний аналіз синтезу систем моніторингу виробничих технологічних процесів. // Всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві», м. Харків, ХНАДУ, 2023. Вип. 2. С. 26-29.

7. Шахрай Р. Р. Аналіз проблеми моніторингу виробничих технологічних процесів. Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті: Матеріали 27-го міжнар. молодіж. форуму. Харків: ХНУРЕ, 10 трав. 2023 р. С. 43–44.
8. Кафедра комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки. URL: <https://tapr.nure.ua/> (дата звернення: 15.10.2023).
9. Леві Л. І., Зима О. Є. Сучасні інтелектуальні методи моделювання складних технологічних об'єктів // Системи управління, навігації та зв'язку. 2021, Вип. 1. С. 49-53.
10. Островська Г. Й., Островський О. Т. Застосування інтелектуальних інформаційних систем в контексті управління промисловими підприємствами. Маркетинг і цифрові технології. 2023. С. 69-81.
11. Бобух А.О. Автоматизовані системи керування технологічними процесами: Навч. посібник. Харків: ХНАМГ, 2006. С. 185.
12. Борук С. Д., Федоров В. М. Моніторинг виробничих процесів: Навчальний посібник. 2022. С. 127.
13. Cyber-Physical Systems . URL: <https://ptolemy.berkeley.edu/projects/cps> (дата звернення: 20.10.2023).
14. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні // Український міжвідомчий науково-технічний збірник. 2016. Вип. 3. С. 140.
15. Дудко П. Д. Системи технологій: навч. посібник для студ. вищ. навч. закладів. Харків. 2003. С. 336.
16. Маслак О. О., Жежуха В. Й. Оцінювання інноваційності технологічних процесів машинобудівних підприємств та визначення їх економічної ефективності // Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України. 2008. Вип. 18 (5). С. 266–270.
17. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування: навчальний посібник / [Барало О. В. та ін.]. 2010. С. 557–558.
18. Безкоровайний В. В. Конспект лекцій дисципліни Математичне моделювання для студентів спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-

інтегровані технології Харків: ХНУРЕ, 2018. 120 с.

19. Стеценко І. В. Моделювання систем: навч. посіб.; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. Черкаси: ЧДТУ, 2010. 399 с.

20. Радаєв А. Е., Кобзєв В. В. Імітаційне моделювання виробничих систем: навч. посібник. 2011. С. 155 – 156.

21. Програмні пакети для імітаційного моделювання. URL:[https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/2kvetnyj\\_komp'yuterne\\_modelyuvannya\\_system\\_procesiv/t1/172..htm](https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/2kvetnyj_komp'yuterne_modelyuvannya_system_procesiv/t1/172..htm) (дата звернення: 10.09.2023).

22. Горшеньова К. Ю., Фісун М. Т. Моделювання динамічних процесів вітрової електричної станції в середовищі GPSS // Прикладні Інформаційні технології. 2015. С. 218 – 219.

23. Томашевський В. М., Нехай В. В. Засоби імітаційного моделювання для навчання, які ґрунтуються на мові GPSS // Технічні науки та технології. 2015. 2. С. 101-105.

24. ARIS Toolset/БРwin: вибор за аналитиком. URL:<https://compress.ru/article.aspx?id=9480> (дата звернення 26.10.2023).

25. Система моделювання бізнес процесів ARIS. URL:<http://bourabai.kz/cm/aris.htm> (дата звернення 27.10.2023).

26. Дмитрієв О. М., Келлер І. К. Аналіз об'єктно-орієнтованого підходу. TECHNICAL SCIENCES: THE ANALYSIS OF TRENDS AND DEVELOPMENT PROSPECTS. 2021. URL: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-109-1-31> (дата звернення: 10.01.2024).

27. Порівняльна характеристика пакетів імітаційного моделювання. URL: <https://docplayer.ru/35168870-Sravnitelnaya-harakteristika-paketov-imitacionnogo-modelirovaniya.html> (дата звернення: 29.10.2023).

28. Кишенько В. Д. Задачі технологічного моніторингу в системах керування виробничими процесами технологічних комплексів // Автоматизація виробничих процесів. 2006. № 2 С. 23.

29. Hagino T., O'Leary N. Practical Node-RED Programming: Learn Powerful Visual Programming Techniques and Best Practices for the Web and IoT.

Packt Publishing, Limited, 2021. 326 p.

30. Node-RED. URL: <https://nodered.org/docs> (дата звернення: 15.12.2023).

31. Невлюдов І Ш., Пономарьова Г. В., Бортнікова В. О. Імітаційна модель технологічного процесу виготовлення мікроелектромеханічних акселерометрів / Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки, №1, т. 29, ч. 1. 2018. С. 210-216.

32. Інструкція з охорони праці при роботі з комп'ютером, принтером, ксероксом та іншою оргтехнікою. 2018. URL: <https://osvita-docs.com/node/41> (дата звернення: 15.12.2023)