

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)

Розроблення підсистеми підтримки прийняття рішень для технології
проектування роботизованого виробничого процесу
(тема)

Виконав:
Студент II курсу, групи КТРСм-22-1

Готовська А. В.
(прізвище, ініціали)

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

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

Освітня програма Комп'ютеризовані та
робототехнічні системи
(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 студентка ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавала і не одержувала недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«05» січня 2024 р.



Готовська А. В.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет АКТ

Кафедра КІТАР

Рівень вищої освіти Другий (магістерський)

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

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

Освітня програма Комп'ютеризовані та робототехнічні системи
(шифр і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри КІТАР _____

(підпис)

« ____ » _____ 20 24 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Готовській Альоні Віталіївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення підсистеми підтримки прийняття рішень для технології проектування роботизованого виробничого процесу

затверджена наказом по університету від «03» листопада 2023 р. №1288Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії «15» січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи Об'єкт дослідження – роботизований виробничий процес. Предмет дослідження – процес підтримки прийняття рішень при проектуванні роботизованого виробничого процесу. Предмет розробки – підсистема пошуку найкращого за множиною показників варіанту побудови роботизованого виробничого процесу. Функція – вибір найкращого варіанта побудови роботизованого виробничого процесу за множиною показників якості з використанням скалярного оцінювання. Технічне забезпечення: ІВМ-сумісний персональний комп'ютер.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі Вступ. Огляд сучасного стану проблеми підтримки прийняття рішень при проектуванні роботизованих виробничих процесів. Роботизовані виробничі процеси як об'єкти проектування. Технології проектування роботизованих виробничих процесів. Задачі проектування роботизованих виробничих процесів. Математичні моделі та методи підтримки прийняття рішень. Постановка мети і задач дослідження. Розроблення системних рішень. Постановка задачі. Математична модель задачі прийняття рішень. Методи розв'язання задачі. Приклад застосування методів розв'язання задачі. Розроблення програмного забезпечення та експерименти. Розробка діаграми прецедентів. Схема алгоритму підтримки прийняття рішень. Обґрунтування вибору мови програмування та середовища розробки. Обґрунтування вибору середовища програмування для збереження даних програмного засобу. Реалізація підсистеми підтримки прийняття рішень та проведення експерименту. Охорона праці. Висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 12 –15 аркушів формату А4.

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

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання на кваліфікаційну роботу	06.11.2023	Виконано
2	Огляд проблеми проєктування роботизованих виробничих процесів	13.11.2023	Виконано
3	Розробка математичного забезпечення задачі	20.11.2023	Виконано
4	Розробка програмного забезпечення задачі	27.11.2023	Виконано
5	Проведення експериментальних досліджень	30.11.2023	Виконано
6	Підготовка публікацій за результатами дослідження	01.12.2023	Виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	25.12.2023	Виконано
8	Подання закінченої роботи науковому керівникові	28.12.2023	Виконано
9	Усунення зауважень наукового керівника	05.01.2024	Виконано
10	Підготовка презентації	08.01.2024	Виконано
11	Подання роботи на рецензування	10.01.2024	Виконано
12	Попередній захист	12.01.2024	Виконано
13	Подання роботи до екзаменаційної комісії	15.01.2024	Виконано

Дата видачі завдання «06» листопада 2023 р.

Студент

_____ (підпис)

Готовська А.В.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

проф. Безкорвайний В.В.

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 141 с., 12 табл., 26 рис., 3 дод., 36 джерел.

СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЄКТУВАЛЬНИХ РОБІТ, РОБОТИЗОВАНИЙ ВИРОБНИЧИЙ ПРОЦЕС, ОПТИМІЗАЦІЯ, ПІДТРИМКА ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ.

Об'єкт дослідження – роботизований виробничий процес.

Предмет дослідження – процес підтримки прийняття рішень при проєктуванні роботизованого виробничого процесу (РВП).

Мета кваліфікаційної роботи – підвищення ефективності технології проєктування РВП за рахунок розробки підсистеми підтримки прийняття рішень на основі знань особи, що приймає рішення, та можливостей комп'ютера.

Методи дослідження – теорія систем, системний аналіз, теорія корисності, теорія прийняття рішень, методи сучасних інформаційних технологій.

У кваліфікаційній роботі розроблено підсистему підтримки прийняття багатокритеріальних рішень з використанням методів аналізу ієрархії та лінійної згортки. Для цього на основі теорії корисності обрана математична задача прийняття рішень з використанням функції загальної корисності, розроблено програмне забезпечення та проведено контрольні експерименти з ним, що продемонстрували його працездатність.

Галузь застосування розробки – системи автоматизованого проєктування, планування розвитку чи реінжинірингу РВП.

Результати кваліфікаційної роботи апробовано у 2-х статтях [6-7] та на 1-й всеукраїнській науково-практичній конференції [8].

ABSTRACT

Explanatory note: 141 p., 12 tabl., 26 pic., 3 app., 36 sources.

AUTOMATION SYSTEM OF PROJECT WORK, DECISION SUPPORT SYSTEM, OPTIMIZATION, ROBOTIC PRODUCTION PROCESS.

The object of research is a robotic production process.

The subject of the research is the process of supporting decision-making in the designing a robotic production process.

The purpose of the qualification work is to improve the efficiency of the design technology of the robotic production process through the development of a decision support subsystem based on the knowledge of the person making the decision and the capabilities of the computer.

Research methods: systems theory, system analysis, utility theory, decision-making theory, methods of modern information technologies.

In the qualification work, a decision support subsystem for multi-criteria decision-making was developed using the methods of hierarchy analysis and linear convolution. For this purpose, based on the theory of utility, a mathematical problem of decision-making using the general utility function was chosen, software was developed and control experiments were conducted with it, which demonstrated its efficiency

The field of application of the development is systems of automated design, development planning or reengineering of the robotic production process.

The results of the qualification work were tested in 2 articles [6-7] and at the 1st All-Ukrainian Scientific and Practical Conference [8].

ЗМІСТ

Перелік скорочень	9
Вступ	10
1 Огляд сучасного стану проблеми підтримки прийняття рішень при проєктуванні роботизованих виробничих процесів	12
1.1 Роботизовані виробничі процеси як об'єкти проєктування	12
1.2 Технології проєктування роботизованих виробничих процесів	16
1.3 Задачі проєктування роботизованих виробничих процесів	20
1.4 Моделі та методи підтримки прийняття рішень	23
1.5 Постановка мети і задач дослідження.....	34
1.6 Висновки до першого розділу	35
2 Розроблення системних рішень	37
2.1 Постановка задачі.....	37
2.2 Математична модель задачі прийняття рішень	39
2.3 Методи розв'язання задачі.....	41
2.4 Приклад застосування методів розв'язання задачі.....	45
2.5 Висновки до другого розділу.....	56
3 Розроблення програмного забезпечення та експерименти	57
3.1 Розробка діаграми прецедентів	57
3.2 Побудова алгоритму підтримки прийняття рішень.....	60
3.3 Обґрунтування вибору мови програмування та середовища розробки .	62
3.4 Обґрунтування вибору середовища програмування для збереження даних програмного засобу	63
3.5 Реалізація підсистеми підтримки прийняття рішень та проведення експерименту	64
3.6 Висновки до третього розділу	70
4 Охорона праці.....	72
Висновки.....	74
Перелік джерел посилання	76
Додаток А Апробація наукових результатів дослідження.....	81

Додаток Б Лістинг коду програми.....	117
Додаток В Демонстраційний матеріал.....	125

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БД – база даних.

ВП – виробничий процес.

ЗПР – задача прийняття рішення.

ІС – інформаційна система.

МАІ – метод аналізу ієрархії.

МЕМС – мікроелектромеханічна система.

ОПР – особа, що приймає рішення.

ОС – операційна система.

ПЗ – програмне забезпечення.

РВП – роботизований виробний процес.

РТС – робототехнічна система.

САПР – система автоматизованого проектування.

СППР – система підтримки прийняття рішень.

ТЗ – технічне завдання.

ТП – технологічний процес.

ТПР – теорія прийняття рішень.

DSS – Decision Support System.

ВСТУП

Характерною рисою сучасних виробничих технологій є широке впровадження роботизованих систем. Цьому сприяє швидкий розвиток технологій автоматизації та здешевлення електроніки. Застосування робототехніки у виробничих технологічних процесах дозволяє скорочувати час виконання операцій, скорочувати або уникати виникненню браку, спрощує переходи для випуску нових видів продукції.

Ефективність функціонування роботизованих виробничих процесів (РВП) багато у чому визначається рішеннями, що приймаються на етапах їхнього проектування. Процес проектування РВП є ітераційним, складається з множини етапів, що передбачають розв'язання комплексу задач аналізу та синтезу. При цьому, на кожному з етапів виникає необхідність прийняття рішень. Такі рішення передбачають вибір найкращих альтернатив (варіантів побудови РВП) за множинами функціональних і вартісних показників. Це обумовлює актуальність завдань підсистем підтримки прийняття рішень для технологій проектування роботизованих виробничих процесів.

Процес прийняття рішень – це отримання, обробка та перетворення інформації, та пошук оптимального рішення з використанням деяких правил та математичних моделей та методів [1]. Значний внесок у розробку методів автоматизованого проектування технологічних процесів (ТП) і теорії прийняття рішень внесли такі науковці як Глушков В. М., Петренко А. І., Норенков І. П., Тимченко А. А., Невлюдов І. І., Замірець М. В., Парето В. (V. Pareto), Заде Л. (L. Zadeh), Фішберн П. (P. Fishburn), Петров Е. Г., Безкоровайний В. В.

У процесах проектування РВП виникають ситуації вибору найкращих рішень як серед невеликої, так і серед величезної кількості альтернатив. Це потребує комбінації методів підтримки прийняття рішень.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності технології проектування роботизованого виробничого процесу за рахунок розробки

підсистеми підтримки прийняття рішень на основі знань особи, що приймає рішення, та можливостей комп'ютера.

Об'єкт дослідження – роботизований виробничий процес.

Предмет дослідження – процес підтримки прийняття рішень при проектуванні роботизованого виробничого процесу.

Методи дослідження: теорія систем, теорія автоматизованого проектування, системний аналіз, теорія корисності, теорія прийняття рішень, методи сучасних інформаційних технологій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати огляд сучасного стану проблеми підтримки прийняття рішень при проектуванні роботизованих виробничих процесів;
- сформулювати постановку задачі розробки підсистеми прийняття проектних рішень;
- обрати методи для розв'язання задачі;
- розробити алгоритми для розв'язання задачі підтримки прийняття рішень;
- розробити програму підсистеми підтримки прийняття рішень базу даних;
- провести тестування роботи розробленої підсистеми.

Результатом кваліфікаційної роботи є підсистема підтримки прийняття багатокритеріальних рішень на основі комбінації знань особи, що приймає рішення, та методу лінійної згортки, яка дозволить підвищувати ефективність технологій проектування роботизованих виробничих процесів.

Кваліфікаційна робота оформлена відповідно до вимог [2] та згідно стандартів [3-5].

За темою кваліфікаційної роботи опубліковано 2 статті у збірнику студентських наукових статей [6-7] та результати дослідження доповідались на всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених [8] (Додаток А).

1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ ПРОЄКТУВАННІ РОБОТИЗОВАНИХ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

1.1 Роботизовані виробничі процеси як об'єкти проектування

Процеси сучасного виробництва можна розглядати як постійне змінення характеристик засобів виробництва в просторі та в часі для досягнення цілі отримання готового продукту з початкової сировини.

Модель виробничого процесу приведена на рисунку 1.1 [9].

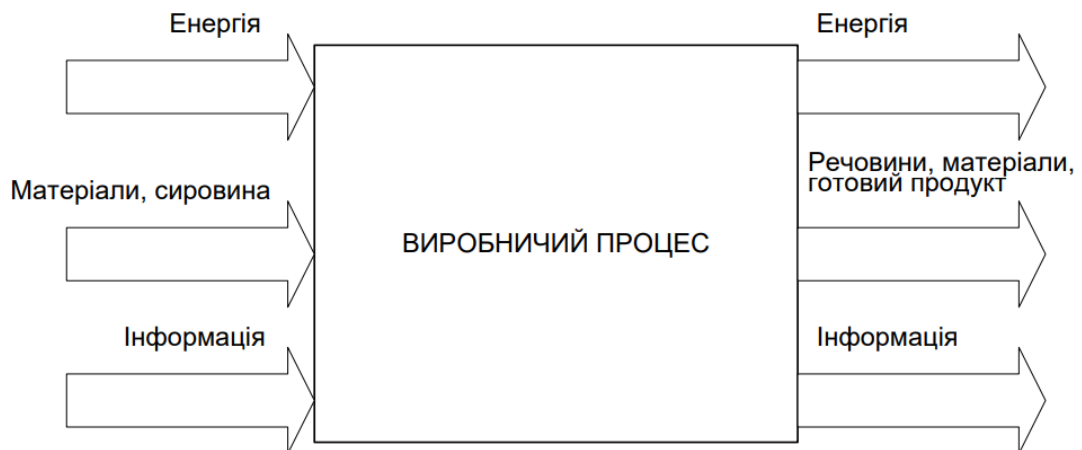


Рисунок 1.1 – Модель виробничого процесу [9]

Автоматизація виробництва – це впровадження певних заходів, автоматизованих систем, тобто роботизованих технологій, які дають можливість здійснювати виробничі процеси на підприємстві без участі людини в цих процесах.

Застосування систем роботизованого інтегрованого виробництва знаменувало початок етапу впровадження інформаційних технологій в автоматизацію виробничих процесів, пов'язаного з інтеграцією автоматизованого гнучкого виробництва [10]. Сучасні роботизовані виробничі системи (РТС) класифікуються за сферою використання,

розвиненістю структури, рівнем автоматизації тощо (рис. 1.2) [10].

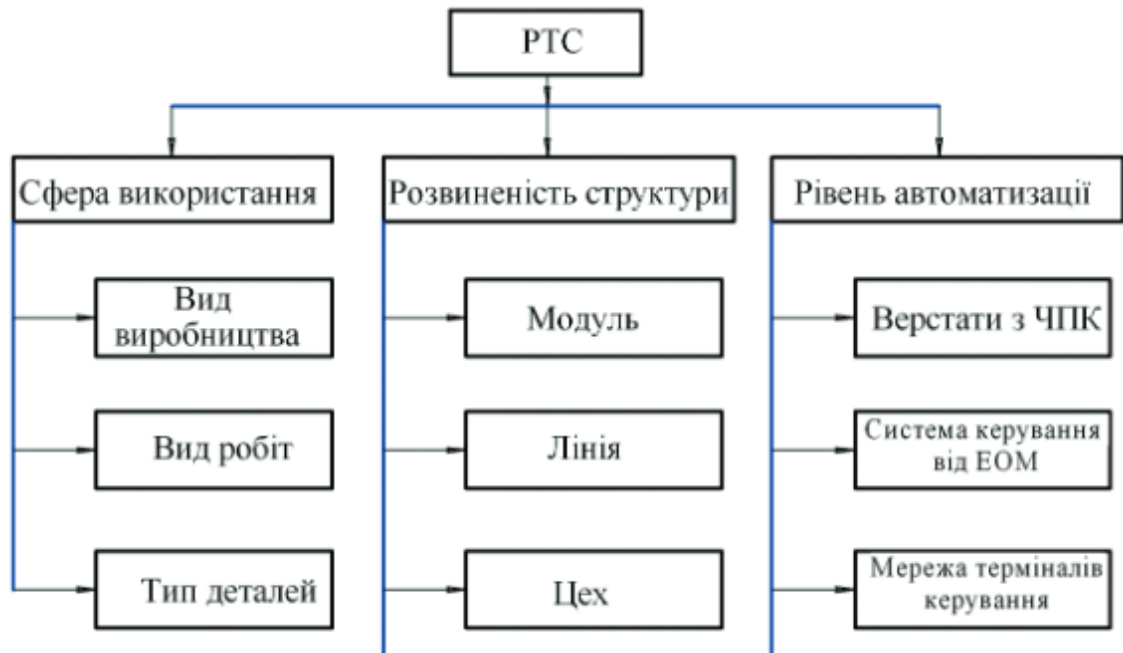


Рисунок 1.2 – Класифікація РТС [7]

У наш час для проектування роботизованих виробничих систем використовуються автоматизовані системи автоматизованого проектування (САПР) [9]. В них використовуються та адаптуються стандартні рішення з автоматизації проектування з налаштуванням під конкретні норми обладнання виробничого процесу із врахуванням всіх його особливостей.

Схема технології проектування виробничого процесу з використанням САПР приведено на рисунку 1.3.

Система автоматизованого проектування – це автоматизована система, яка призначена для автоматизації процесу проектування, вибору кращої моделі для впровадження її на підприємстві, та яка в свою чергу реалізується з використанням математичних методів на базі програмного забезпечення [9].

Роботизований виробничий процес – виробничий процес з інтеграцією гнучкого автоматизованого виробництва і систем управління ними, за допомогою яких здійснюється виробництвом деякої продукції без прямого втручання людини у процес (рис. 1.4) [9].



Рисунок 1.3 – Схема технології проектування виробничого процесу з використанням САПР [10]

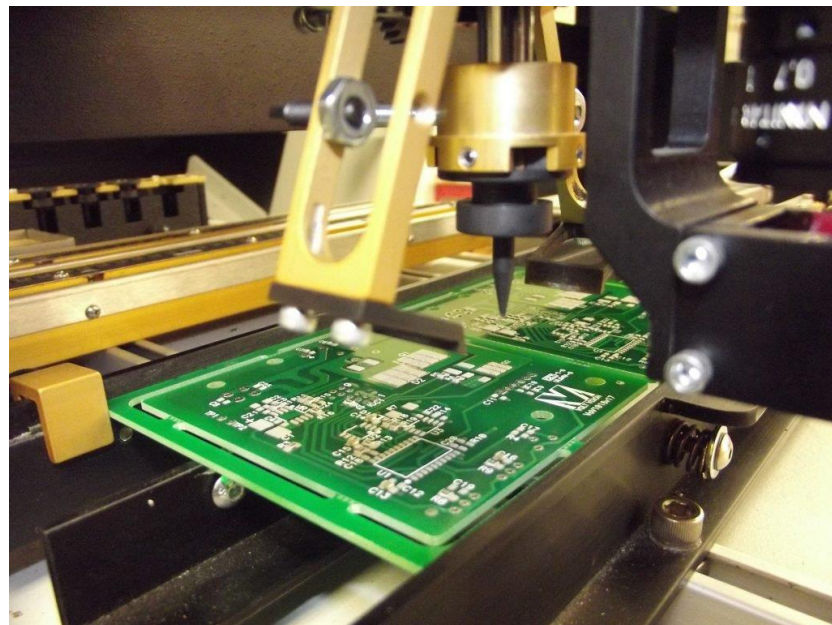


Рисунок 1.4 – Фрагмент роботизованого виробничого процесу [10]

Автоматизація виробничих процесів здійснюється за допомогою впровадження комп'ютерної- та робототехніки, які оснащені датчиками та іншими технічними приладами. Інтегрування комп'ютерів та роботів у виробничий процесі дозволяє знизити виникнення помилок та прискорити виробничі процеси. Для управління такими ВП найчастіше використовують

автоматизовані системи багаторівневого управління.

У наш час комп'ютеризовані та роботизовані використовується не тільки на виробництві, але й в багатьох інших сферах людської діяльності, наприклад, таких як: транспорт, авіаційна та космічна сфери, телекомунікації, військова, медицина тощо.

Сучасне виробництво являє собою складний комплекс цілеспрямовано злагоджених технологічних процесів, що забезпечують переробку сировини в готову продукцію [10].

В технологіях системного проєктування виробничих систем розглядаються процеси виробництва, споживання, збуту, аналізується вплив навколишнього середовища на об'єкт проєктування та навпаки. Системне проєктування РВП передбачає не тільки розроблення креслень, а й наукові дослідження, моделювання, розробку технологій виробництва, визначення схем постачання сировини, збуту продукції й утилізації відходів.

Завданням проєктування РВП є визначення методів реалізації виробництва, визначення властивостей та характеристик об'єкта проєктування і оптимізація проєктних рішень щодо нього.

Процеси з отримання готової продукції формують виробничий процес, який в свою чергу в процесі проєктування поділяються на основні та допоміжні процеси. Для ефективної роботи технологічного комплексу виробничого процесу та керуванням ним впроваджують технічні засоби автоматизації. Для визначення принципів побудови комп'ютеризованої системи виробництва проводять інженерний аналіз. Також цей аналіз проводять з метою знаходження структур і технічних засобів, що задовольняють технічному завданню.

Роботизовані системи у безперервному виробництві (безперервне перетворення сировини в готовий продукт) виконують завдання стабілізації, оптимізації при постійному визначенні оптимальних умов роботи виробництва. Складними операціями є запуск та зупинка або окремих процесів, або всієї системи, це зумовлено тим, що у цих процесах

відбувається відносно швидка зміна стану системи. Тому при проектуванні роботизованих систем найбільше уваги приділяється цим процесам.

1.2 Технології проектування роботизованих виробничих процесів

На етапі проектування РВП передбачається виконання значного обсягу теоретичних, імітаційних та експериментальних досліджень для обґрунтування його оптимальної апаратно-програмної структури на основі результатів цих досліджень.

На етапі проектування РВП йде розробка, обчислення, оцінка розрахунків для схем апаратних модулів, а також підсистем, змісту та структури для програмного забезпечення, технічної документації [11]. Після впровадження РВП проводяться роботи з підготовки та тестування виробництва. З метою досягнення кращих результатів при оцінці варіантів побудови РВП використовується множина різноманітних функціональних і вартісних критеріїв. Для загальної оцінки результатів проведених досліджень та впливу цього всього на роботу окремих модулів, підсистем і системи в цілому використовують комплексні критерії [12].

В табл. 1.1 наведені основні результати досліджень, які можна отримати на етапі проектування [12].

Автоматизація проектування має прямий вплив на рівень працездатності роботизованого ВП. Використання САПР дозволяє вирішити такі завдання [13]:

- істотно знизити кількість проектних помилок;
- підвищити якість конструкторської і технологічної документації;
- створити умови для багатоваріантного проектування та вибору оптимального варіанту;
- зменшити час на проектування та отримання технічних рішень;
- узгодження параметрів всіх модулів та підсистем виробничого процесу під час проведення тестувань.

Таблиця 1.1 – Основні результати досліджень, які можна отримати на етапі проектування [12]

Напрями та їх методи	Обґрунтування, обчислення, оцінювання результатів досліджень
Застосування функціонального аналізу, математичних методів обчислення, теорії ймовірностей	Отримаємо моделі сигналів та їх характеристики, розробляються алгоритми оцінювання сигналів за характеристиками, отримаємо результати комп'ютерних експериментів, результати функціонування різних варіантів систем.
Застосування теорії сигналів і систем	Отримаємо оптимізовану структуру системи для аналізу перетворень сигналів та опрацювання даних вимірювань, знаходження методів випробувань роботи модулів, підсистем і систем в цілому та аналіз відповідності технічному завданню, забезпечення надійності систем.
Використання теорії вимірювань	Отримаємо оцінки результатів вимірювання та похибки вимірювань.
Використання теорії інформації та методів захисту інформації	Розробляються апаратно-програмні засоби захисту інформації.
Використання методів математичної статистики	Отримаємо алгоритми перевірки моделей та оцінки результату і невизначеності вимірювань.

Типова структура САПР приведена на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 – Типова структура САПР [13]

Для покращення таких параметрів системи, як надійність та якість необхідно провести ряд моделювань виробничого процесу та тестувань програмного забезпечення, також необхідно постійно проводити системні випробування.

Розглянемо проєктування технологічного процесу (ТП) на прикладі виготовлення мікроелектромеханічних (МЕМС) акселерометрів.

При виготовленні акселерометрів виникає задача проєктування, оптимізації та синтезу технологічного процесу. Рішення цієї задачі відбувається в декілька етапів.

У якості прикладу розглянемо узагальнений метод автоматизованого проєктування технологічного процесу виготовлення МЕМС-акселерометрів. За основу цього методу було взято два інші методи. Це метод вибору типового технологічного процесу та метод пошуку аналогів підсистем та всіх елементів для виготовлення акселерометра.

Структурна модель методу показана на рис. 1.6.

Мікроелектромеханічний акселерометр як прилад, який виготовляється з використанням РВП, повинен мати функціонально-конструктивні параметри, що вказуються в технічному завданні. Це технічне завдання являє собою вхідні дані для автоматизації проєктування виробничого процесу виготовлення акселерометрів.

Модель, за допомогою якої відбувається структурно-параметричний синтез технологічного процесу для виготовлення МЕМС-акселерометру, передбачає вибір з існуючих альтернатив по таким критеріям як вартість та час виготовлення [14].

На основі вибору типу МЕМС-акселерометра відповідно до заданих параметрів робиться вибір всього акселерометра та (або) його конструктивних елементів.

На наступному етапі відбувається перевірка за допомогою імітаційного моделювання отриманого варіанту побудови ТП.

Якщо перевірка показала незадовільні результати, то слід повернутися до етапу зміни структури ТП і так до тих пір, поки не будуть отримані задовільні результати.

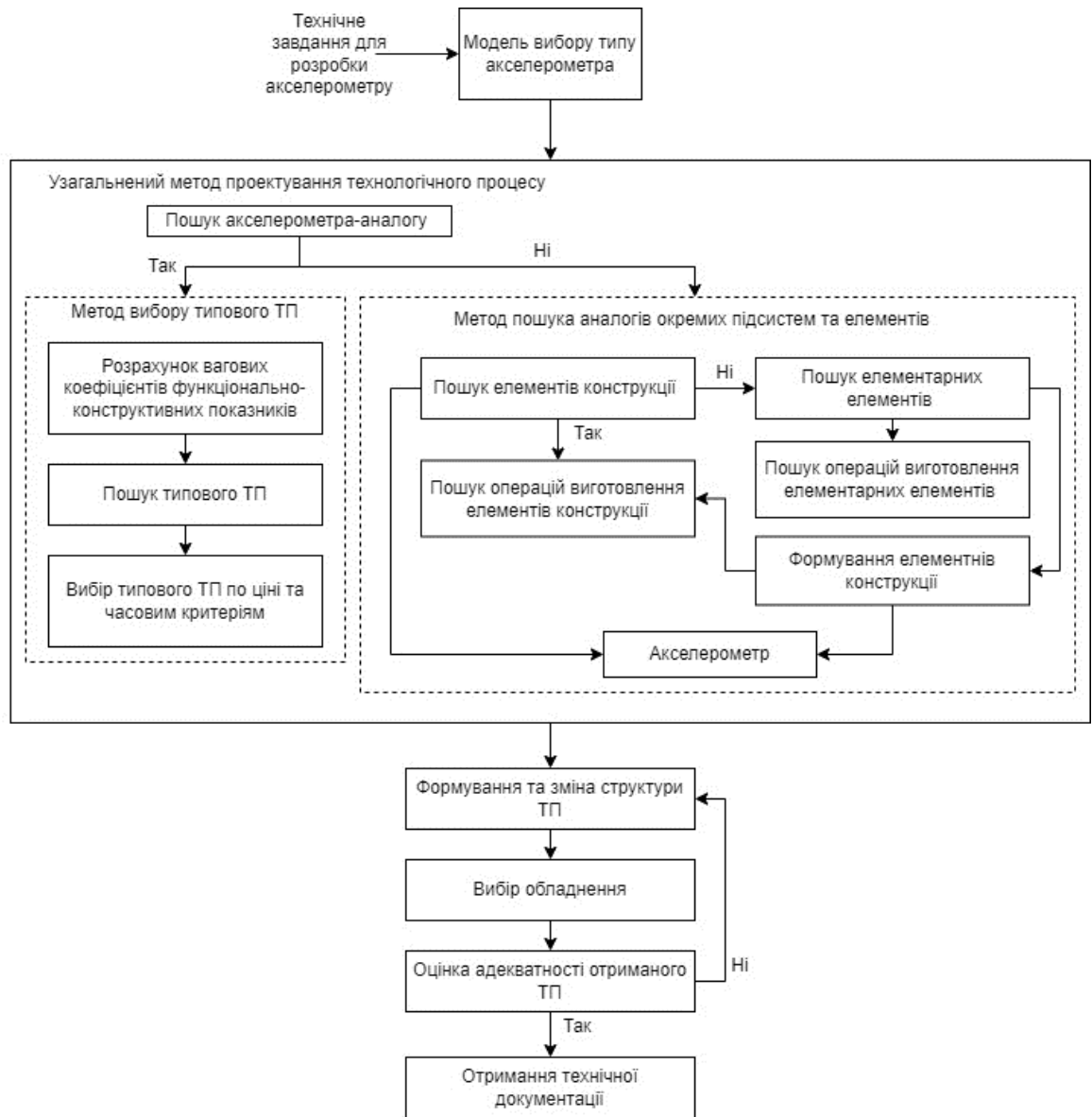


Рисунок 1.6 – Структурна модель узагальненого методу автоматизованого проектування технологічного процесу виготовлення акселерометра [14]

Після отримання моделі найкращого варіанту побудови РВП виготовлення MEMS-акселерометра здійснюється формування технічної документації.

1.3 Задачі проектування роботизованих виробничих процесів

При проектуванні роботизованих систем та роботизованих виробничих процесів за основні данні приймається технічне завдання. Завданням

проектування є вирішення задач аналізу, синтезу та оптимізації.

Задача синтезу може зводитись як до визначення структури РВП як об'єкта проектування так, і до визначення його внутрішніх параметрів. РВП як об'єкт проектування може бути дискретним або безперервним.

Задачі аналізу у процесі проектування РВП діляться на задачі одноваріантного та багатоваріантного аналізу.

Типовими задачами одноваріантного аналізу є задачі [15]:

- аналіз статичного режиму;
- аналіз перехідних процесів;
- аналіз стійкості;
- аналіз стаціонарних режимів.

До типових задач багатоваріантного аналізу відносяться задачі:

- статистичний аналіз;
- аналіз чутливості до змін параметрів компонентів;
- параметрична оптимізація.

При вирішенні задач одноваріантного аналізу отримують відповіді на питання, чи виконуються умови придатності до роботи, коли значення внутрішніх параметрів є номінальним.

При вирішенні задач статистичного аналізу отримують оцінки вірогідності виконання умов придатності до роботи, оскільки існують похибки параметрів та компонентів технічного обладнання [15].

Задачею роботизованих систем є злагоджене функціонування всіх їх складових, що є, так названою, сукупністю автоматичних дій, при виконанні яких досягається очікуваний результат [9].

Однією з головних задач моделювання та проектування роботизованих виробничих процесів є задача реалізації отримання у реальному часі актуальних значень технологічних параметрів при їх обробці із застосуванням сучасних комп'ютерних систем. Проблема в досягненні рішення цієї задачі полягає у виборі та впровадженні комп'ютерно-

інтелектуальних систем, під час використання яких імовірність похибки вимірювання параметрів системи наближалась би до мінімуму.

Проектування роботизованих виробничих процесів приладобудування з погляду автоматизації залишається складною задачею через велику кількість можливих варіантів побудови цього процесу (рисунок 1.7) [15].



Рисунок 1.7 – Узагальнена структура роботизованого ВП [7]

В процесі функціонування роботизованих виробничих процесів необхідно забезпечити оптимальний режим роботи, коли функціонування системи, передача інформації прямо залежить від часу та коректності обчислень. Важливо враховувати, що для неперервної інформації необхідно задавати ступінь точності і таку точність забезпечують використанням відповідних методів апроксимації [16].

У загальному випадку задані у технічному завданні характеристики РВП могут бути реалізовані великою кількістю варіантів його побудови.

Кожен з таких варіантів оцінюється множиною функціональних і витратних характеристик (продуктивність, якість, енергоємність, наведені витрати тощо). При виборі найкращого з допустимих варіантів побудови РВП за множиною показників використовуються математичні моделі та методи підтримки прийняття рішень.

1.4 Моделі та методи підтримки прийняття рішень

Задачі прийняття рішень на виробництві поділяються на задачі планування на виробництві, визначення оптимальних умов та організації роботи підсистем, задачі розподілу навантаження, мінімізації навантаження та витрат тощо.

Усі ці задачі мають спільний характер, а саме прийняття рішень здійснюється вибором однієї з існуючих альтернатив, які в свою чергу можуть бути варіантами, стратегіями, планами, на основі певного принципу (критерію) оптимальності.

Вибір здійснює деяка особа, що має право на це й несе відповідальність за наслідки. Ця особа, яка приймає рішення (ОПР) може бути експертом, керівником виробництва, директором тощо.

Процес прийняття рішень відбувається за наявності таких елементів: особа, що приймає рішення, множина альтернатив серед яких робиться вибір, множина значень залежних від прийнятого рішення (результати), вплив зовнішнього середовища, на яке ОПР не може впливати, час, за який приймається рішення, математичні моделі задач прийняття рішень, вимоги до вихідного результату, цільові функції та критерій оптимальності.

Для аналізу процесу прийняття рішення доцільно використати поняття «Цільова діяльність». Структура абстрактної системи S включає в себе множину елементів M , підпорядкованої деякому відношенню R . Виходячи з цього, структуру системи, яка являє собою множину структур, можна подати як:

$$C = \langle M \times R \rangle.$$

Кожна структура являє собою деяку множину властивостей P :

$$P = F(C) = F(M \times R).$$

Виходячи з цього будь-яка діяльність з прийняття рішень являє собою вибір з множини M конкретного набору елементів $m \in M$ з підмножиною $r \in R$. Тому підмножина з конкретними властивостями має вигляд:

$$q = F \langle m \times r \rangle.$$

З цього можна зробити висновок, що будь-яка цілеспрямована діяльність полягає у синтезі варіантів побудови РВП як систем, які формують множину альтернатив:

$$X = \langle m, r, q \rangle.$$

Кожне альтернативне рішення позначають як x . Тоді X визначає множину можливих рішень $X^B = \{x\}$. Але у реальних умовах не всі альтернативи є допустимі через різні причини впливу зовнішнього середовища і інших факторів, тому задача прийняття рішень полягає у виборі з множини допустимих значень альтернатив X такого рішення $x^0 \in X$ [16].

У процесі прийняття рішень виникають ситуації, які мають той чи інший ступінь невизначеності, наприклад, неповнота інформації, вплив зовнішнього середовища, велика кількість критеріїв, які не завжди погоджені між собою, а тому якість рішення залежить від повноти врахування всіх чинників, що впливають на його наслідки. Ці чинники можуть стосуватися як особи, що приймає рішення, так і самого процесу прийняття рішень [17].

Для забезпечення врахування такої невизначеності в таких ситуаціях

застосовують спеціальний математичний апарат. Це в свою чергу можуть бути методи теорії ймовірностей, теорії ігор, статистичних рішень, нечітких множин або якісні методи системного аналізу [17]. Для зменшення виникнення помилок є доцільним використання систем підтримки прийняття рішень (СППР).

Системи підтримки прийняття рішень дозволяють вирішити або пришвидшити процес вирішення великої кількості задач.

Система підтримки прийняття рішень (Decision Support System) являє собою автоматизовану комп'ютерну систему, що дає можливість її користувачам приймати складні рішення при умовах невизначеності та багатокритеріальності [18].

Розрізняють такі класи невизначеності:

- невідомість;
- неповнота;
- недостатність;
- неадекватність;
- недовизначеність.

Схематично співвідношення між цими типами зображено на рисунку 1.8.

Якщо в процесі прийняття рішення виникає необхідність враховувати декілька властивостей альтернати, то виникає проблема багатокритеріального вибору [17].

Позначимо властивості альтернативи $k_1, k_2 \dots k_m$. Припустимо, що усі властивості є критеріями. Для кожного критерію k_j ставимо у відповідність j -ту вісь простору R_m ($j = 1, \dots, m$) і відображаємо множину S в цьому просторі, взявши у відповідність для кожної альтернативи $x \in S$ точку $\varphi(x) = \varphi_1(x), \dots, \varphi_m(x)$ простору R_m , де φ_j – оцінка альтернативи за критерієм k_j ($j = 1, \dots, m$).

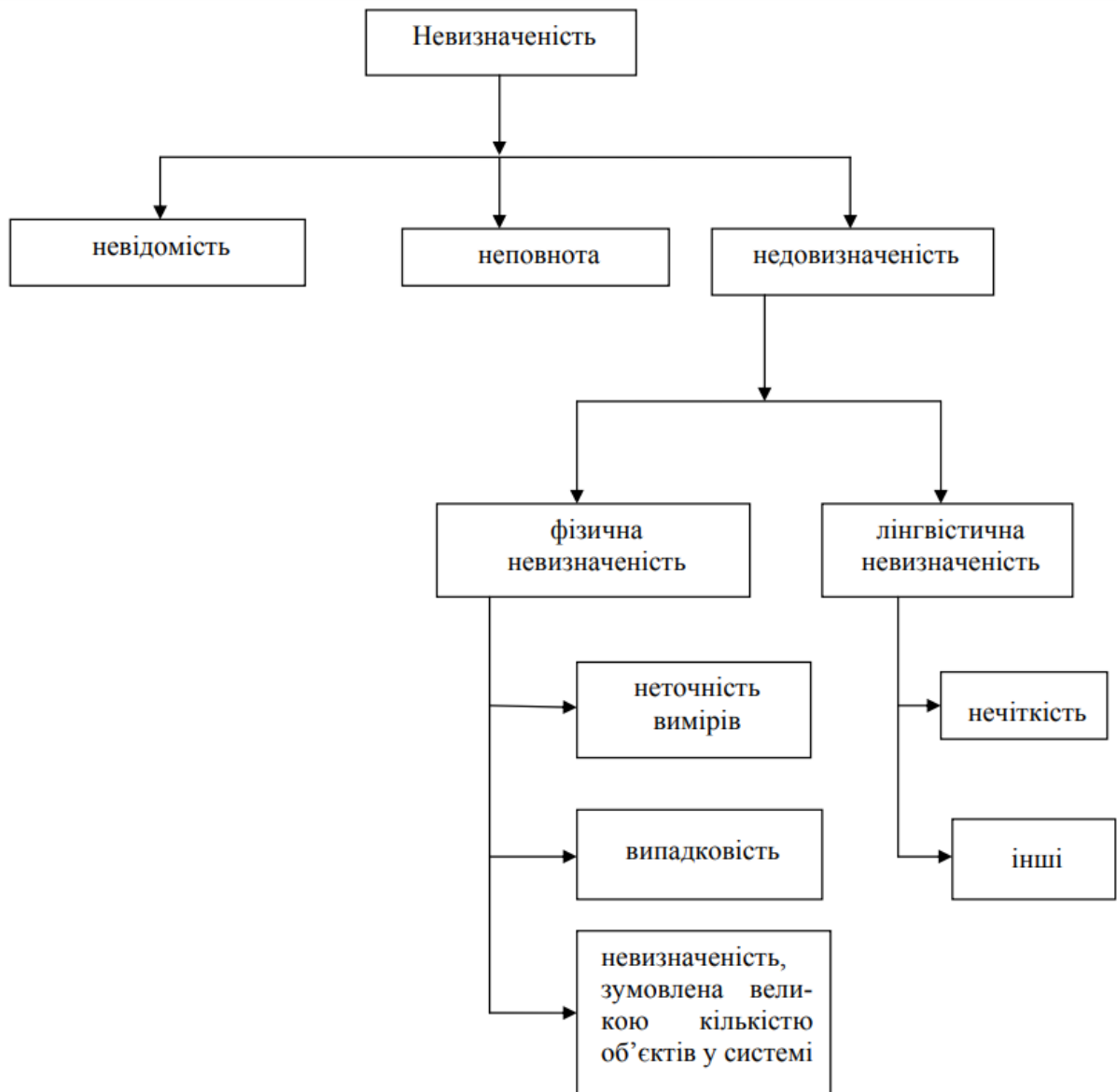


Рисунок 1.8 – Співвідношення між типами невизначеності [17]

Для врахування великої кількості критеріїв використовують багатокритеріальну оптимізацію.

Підходи та методи для розв'язання задач прийняття рішення обирають в залежності від класу задачі. Розрізняють статистичні, аналітичні методи, методи оптимізації (лінійного, нелінійного програмування тощо).

Розглянемо найбільш популярні методи для розв'язання задач прийняття рішень в умовах багатокритеріальності та невизначеності.

Метод головного критерію. Модель задачі багатокритеріальної оптимізації, в якій критерії розставлені у порядку за важливістю і

мінімізуються, подається у такому вигляді:

$$f_i(x) \rightarrow \min, \quad i \in I, \quad x \in X,$$

$$f_1(x) \geq f_2(x) \geq \dots \geq f_M(x).$$

Основна думка цього методу полягає у заміні багатокритеріальної задачі на однокритеріальну із додатковими обмеженнями, які дозволяють врахувати всі вимоги, які вимагають інші критерії, тобто послідовність методу така [18].

1. Робимо вибір одного критерію $f_1(x)$, за яким проведемо оптимізацію.

2. Для менш важливих критеріїв $f_2(x) \geq \dots \geq f_M(x)$ необхідно обчислити допустимі значення $\bar{f}_2 \dots \bar{f}_M$.

3. Проводимо заміну критеріїв $f_2(x) \dots f_M(x)$ на їх обмеження виду

$$f_i \leq \bar{f}_i, \quad \text{де } i \in I.$$

4. Далі розглядаємо таку задачу:

$$f_1(x) \rightarrow \min,$$

$$f_i \leq \bar{f}_i, \quad i \in I, \quad x \in X.$$

Перевагою такого методу є те, що під час його реалізації не потрібна оцінка пріоритетів критеріїв. А недоліком є те, що встановлення рівнів обмежень значення є складним і у більшості випадків відбувається суб'єктивно [18].

Експертний метод оцінки вагових у вигляді конкретних оцінок за деякою бальною шкалою. Експертам дається деяка кількісна бальна шкала B_Σ . Експерт повинен сформулювати оцінки для кожного критерію $B_i(k_i)$. При

цьому виконується умова

$$\sum_{i=1}^N B_i(k_i) = B_{\Sigma}. \quad (1.1)$$

Експерт оцінює кожний критерій k_i за деякою шкалою з фіксованим інтервалом без врахування інших оцінок.

При формуванні відносної важливості критеріїв a_i , повинна виконуватись умова

$$0 \leq a_i < 1, \sum_{i=1}^N a_i = 1.$$

Вводимо нормувальну формулу

$$a_i = \frac{B_i}{\sum_{i=1}^n B_i},$$

при цьому виконується умова (1.1).

У результаті отримаємо експертні оцінки важливості критеріїв.

Нехай було опитано експертів $j, j = \overline{1, m}$ і оцінки є $k_i(x), i = \overline{1, n}$.

Кожних експерт формує кортеж оцінок

$$A_j = \langle a_{ji} \rangle, j = \overline{1, m}, i = \overline{1, n}.$$

Це може бути представлено графічно, як показано на рисунку 1.9.

З рисунку 1.9 видно, що кожному ваговому коефіцієнту відповідає набір точок на числовій осі. Кожна точка представляє собою оцінку одного експерта. Коли оцінки декількох експертів однакові, то точки на осі збігаються. Тому при кількості експертів m кількість точок повинна не перевищувати m [9].

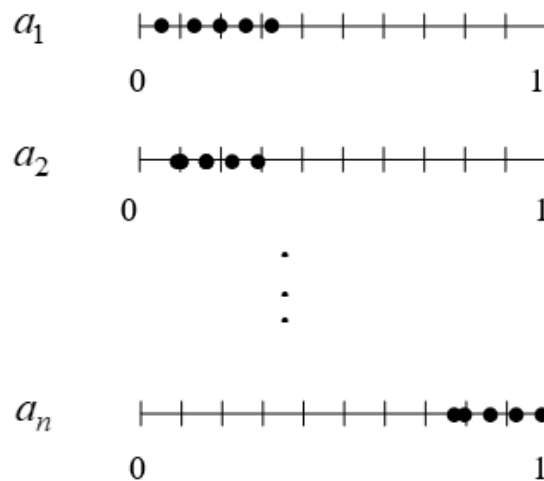


Рисунок 1.9 – Вихідна інформація сформована експертами у вигляді точкових оцінок [9]

Метод лінійної згортки. Цей метод іноді називають мультиплікативною лінійною згорткою. Завдяки цьому методу можна структурувати множину альтернатив з використанням їх критеріїв [19].

Припустимо, що множина допустимих альтернатив $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, які оцінюються за k критеріями, визначено для кожної альтернативи $a_i \in A$ у відповідності до k числових показників $x_{i1} = X_1(a_i), \dots, x_{ik} = X_k(a_i)$, де $X_j(a_i)$ – функція перетворення значення оцінки a_i альтернативи за j -м критерієм у межах деякої обраної шкали в числовий показник x_{ij} .

Завданням є обрання альтернативи $a_i \in A$, щоб максимізувати функцію цінності v_i , виконання основної властивості цієї функції залежить від підходів в отриманні аналітичних значень $X_j(a_i)$ для кожного з критеріїв [16], тобто:

$$v_i = \sum_{j=1}^k \omega_j x_{ij},$$

де ω_j – ваговий коефіцієнт важливості критеріїв.

$$\sum_{j=1}^k \omega_j = 1,$$

$$i = 1 \dots n, 0 < \omega_j.$$

В процесі прийняття рішень є важливим обрати шкалу оцінки критеріїв для порівняння їх з одиницями вимірювання.

Метод аналізу ієрархії. Метод аналізу ієрархії (МАІ) є ефективним методом для розв'язання багатокритеріальних задач в яких є ієрархічні структури з явними і неявними факторами [20].

Необхідно такі умови для розв'язання задач за методом МАІ:

- мета задачі;
- альтернативи;
- критерії, за якими будуть оцінюватись альтернативи.

Основна ідея методу – визначення матриць попарних порівнянь альтернатив.

Реалізація методу має таку структуру:

- потрібно подати задачу у вигляді ієрархії з декількома рівнями: цілі – критерії – альтернативи;
- формування матриці попарних порівнянь та обчислення оціночних коефіцієнтів для елементів кожного рівня;
- рахується кількісне значення для кожної з альтернатив та за цим значенням альтернативи упорядковуються і визначається найкраща альтернатива.

Матриця порівняння формується шляхом порівняння об'єкта, що розташований у рядку, відносно об'єкта, що розташований у стовпці [16].

Метод VIKOR-ядро. Необхідні такі умови для розв'язання задач за методом VIKOR-ядро:

- альтернативи;
- критерії, за якими будуть оцінюватись альтернативи;
- множина вагових коефіцієнтів для кожного за критеріїв.

За цими даними будемо пріоритетний ряд з альтернатив відповідно до оцінок.

Вихідні дані для цього методу задаються вектором вагових коефіцієнтів $w_j, j = 1, \dots, n$ де n – кількість показників та матрицею їх значень $[E_{ij}], i = 1, \dots, k$, де k – кількість варіантів побудови РВП як системи.

Реалізація методу передбачає виконання семи етапів, які наведенні нижче.

1. Для матриці $[E_{ij}]$ необхідно визначити найкраще і найгірше значення.

2. Далі для кожної альтернативи визначають значення деякого показника s , який показує її наближеність до найкращої точки:

$$s_i = \sum_{j=1}^k \left| \frac{w_j(e_j^+ - E_{ij})}{e_j^+ - e_j^-} \right|.$$

3. Розраховуємо максимальну віддаленість від найкращої точки:

$$k_i = \max \left| \frac{w_j(e_j^+ - E_{ij})}{e_j^+ - e_j^-} \right|.$$

4. Визначаємо границі показників $s_{max}, s_{min}, k_{max}, k_{min}$.

5. Розраховуємо значення узагальненого показника переваги Q_i :

$$Q_i = v \frac{s_i - s_{min}}{s_{max} - s_{min}} - (1 - v) \frac{k_i - k_{min}}{k_{max} - k_{min}},$$

де ν – коефіцієнт збалансованості.

6. Упорядковуємо альтернативи за збільшенням показника Q_i .

7. Проводимо перевірку наявності переваги між альтернативами:

$$Q(A^1) - Q(A^2) \geq dQ,$$

$$s^1 < s^2 \text{ та } k^1 < k^2,$$

де s^1, k^1 та s^2, k^2 відповідні значення часткових показників s та k для першої та другої альтернатив відповідно.

Такий метод дозволяє більш повно оцінити переваги та недоліки альтернатив та обрати найкращу.

Метод послідовних поступок. Цей метод використовується тоді, коли критерії впорядковані за важливістю, але невідомі кількісні оцінки їх пріоритетів. Отже рішення такої задачі зводиться до:

$$f_i(x) \rightarrow \min, i \in I, x \in X,$$

$$f_1(x) \geq f_2(x) \geq \dots \geq f_M(x).$$

Суть методу полягає в тому, що за допомогою введення додаткових обмежень на кожному етапі, багатокритеріальна задача замінюється послідовністю однокритеріальних. Для кожної наступної задачі вводиться поступка, яка залежить від вимог задач оптимального розв'язку за важливим критерієм [21].

Для реалізації методу необхідним є реалізація наведених нижче етапів.

1. Обирається найважливіший критерій та на всій множині допустимих альтернатив X та за цим критерієм розв'язується скалярна задача оптимізації для отримання оптимального значення критерію $f_1: f_1^{\min}$:

$$f_1(x) \rightarrow \min, x \in X.$$

2. Враховуємо додаткове обмеження: $f_1(x) \leq f_1^{min} + \Delta_1$, де Δ_1 – допустима поступка за першим критерієм, розв’язуємо задачу оптимізації для отримання оптимального значення критерію: $f_2: f_2^{min}$, яка має вигляд:

$$\begin{aligned} f_2(x) &\rightarrow \min, \\ f_1(x) &\leq f_1^{min} + \Delta_1, \\ x &\in X. \end{aligned}$$

Після проходження деякої кількості кроків n отримаємо оптимальне значення для кожного критерію: $f_1^{min}, f_1^{min}, \dots, f_n^{min}$. Тоді на $(n+1)$ -му кроці буде обчислюватись оптимальне значення критерію f_{n+1}^{min} та розв’язуватись така задача:

$$\begin{aligned} f_{n+1}(x) &\rightarrow \min, \\ f_1(x) &\leq f_1^{min} + \Delta_1, \\ f_2(x) &\leq f_2^{min} + \Delta_2, \\ &\dots \\ f_n(x) &\leq f_n^{min} + \Delta_n, \\ x &\in X. \end{aligned}$$

Після розгляду всіх критеріїв задачу буде розв’язано. Оптимальним розв’язком багатокритеріальної задачі буде розв’язок останньої скалярної задачі [22]. Початкову задачу було перетворено та зведено до деякої послідовності розв’язання однокритеріальних задач, кількість яких дорівнює кількості критеріїв.

Завдяки такому методу ми можемо врахувати пріоритети критеріїв уникнувши їх збільшення або зменшення деякого допустимого рівня. Складність цього методу у суб’єктивності визначення допустимих рівнів.

1.5 Постановка мети і задач дослідження

За результатами аналізу сучасного стану проблеми встановлено, що ефективність процесу проєктування роботизованих виробничих процесів визначається швидкістю та правильністю прийнятих рішень, що виникають на всіх етапах цього процесу.

В основі проєктуванні РТП лежить три основні моделі:

- створення повного ланцюга виробництва;
- розподіл функцій та завдань між обладнанням;
- удосконалення сегментів виробництва.

При проєктуванні виробничого процесу постійно доводиться знаходити деяке оптимальне рішення з великої кількості існуючих альтернатив з урахуванням багатьох факторів впливу на виробничий процес та обладнання. Тому є доцільним використання системи підтримки прийняття рішень, яка дозволить швидко обробляти інформацію про всі альтернативи та враховувати велику кількість критеріїв оцінки альтернатив та критеріїв впливу зовнішнього середовища.

Для розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації існує велика кількість методів, що дозволяють оптимізувати та прискорити процес прийняття рішення. Для об'єднання достоїнств існуючих методів доцільним є поєднання їх у системі підтримки прийняття проєктних рішень щодо варіантів побудови сучасних роботизованих виробничих процесів.

Об'єктом дослідження визначено роботизований виробничий процес.

Предмет дослідження – процес підтримки прийняття рішень при проєктуванні роботизованого виробничого процесу.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності технології проєктування роботизованого виробничого процесу за рахунок розробки підсистеми підтримки прийняття рішень на основі знань особи, що приймає рішення, та можливостей комп'ютера.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- сформулювати постановку задачі розробки підсистеми прийняття проєктних рішень;
- обрати методи для розв’язання задачі;
- розробити алгоритми для розв’язання задачі підтримки прийняття рішень;
- розробити програму підсистеми підтримки прийняття рішень базу даних;
- провести тестування роботи розробленої підсистеми.

1.6 Висновки до першого розділу

У цьому розділі було проведено огляд сучасного стану проблеми підтримки прийняття рішень при проєктуванні роботизованих виробничих процесів, проаналізовано роботизовані виробничі процеси як об’єкти проєктування, розглянуто особливості технологій та основні задачі їх проєктування.

Виходячи з того, що більшість задач проєктування є багатокритеріальними, проаналізовано математичні моделі та методи підтримки прийняття багатокритеріальних рішень.

За результатами виконаного аналізу зроблено такі висновки:

- оптимізація процесу проєктування роботизованих ВП полягає у виборі найкращого варіанта з множини, які були отримані в процесі моделювання ВП та які задовольняють усім функціональним і вартісним обмеженням для обладнання;
- щоб прискорити процес прийняття рішень доцільним є використання систем підтримки прийняття багатокритеріальних рішень, розроблених на основі знань особи, що приймає рішення, та можливостей сучасних комп’ютерів.

Для підвищення ефективності технологій проєктування роботизованих виробничих процесів у підсистемі підтримки прийняття рішень

запропоновано використати комбінацію методу аналізу ієрархії та методу лінійної згортки.

2 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМНИХ РІШЕНЬ

2.1 Постановка задачі

Виконаний у першому розділі огляд і аналіз сучасного стану проблеми проєктування роботизованих виробничих процесів дозволив обґрунтувати актуальність завдань розробки засобів підтримки прийняття рішень при розв'язанні задач синтезу (оптимізації).

Оптимізація варіантів побудови РВП передбачає розв'язання комплексу задач:

- визначення принципів побудови РВП;
- вибір структури (кількості і схеми сполучення обладнання);
- визначення місць розміщення роботизованого обладнання;
- вибір алгоритмів функціонування обладнання;
- визначення параметрів обладнання;
- оцінка ефективності та вибір найкращого варіанту побудови РВП.

На кожному етапі проєктування РВП вирішується задача прийняття рішень. При цьому, задача оцінки ефективності та вибору найкращого варіанту побудови РВП є складною та неповністю формалізованою.

У загальному випадку в процесі автоматизованого проєктування РВП генерується і моделюється з метою оцінки функціональних і вартісних показників потужна множина варіантів його побудови. Виникає задача обґрунтованого вибору найкращого варіанта x^0 з множини допустимих $x \in X$, які задовольняють усім умовам функціонування цього процесу.

Задача вибору найкращого рішення побудови РВП також складається з комплексу задач:

- формалізація мети проєктування РВП;
- формування універсальної множини проєктних рішень X^U ;
- виділення множини допустимих рішень $x \subseteq X^U$;
- виділення підмножини ефективних рішень $X^E \subset X \subset X^U$;

- ранжування рішень $x \in X^E$;
- вибір найкращого варіанту побудови роботизованого ВП $x^0 \in X^E$.

При виборі найкращого варіанту $x^0 \in X^E$ необхідно враховувати множину локальних критеріїв, наприклад, таких, як вартість, час виготовлення виробу, якість, надійність тощо. Так, як ОПР не може раціонально аналізувати велику кількість альтернатив і врахувати всі локальні критерії є ймовірність прийняття неефективного рішення. Щоб уникнути цього та прискорити процес прийняття рішень є сенс в розробці та застосуванні підсистеми підтримки прийняття багатокритеріальних проєктних рішень [23].

Процес підтримки прийняття рішень передбачає вирішення таких задач:

- визначення проблеми та цілі;
- визначення основних критеріїв для оцінки варіантів;
- визначення вагових коефіцієнтів для варіантів побудови ВП.

Розробка підсистеми підтримки прийняття рішень передбачає розробку таких основних компонентів:

- бази даних, де зберігатимуться характеристики всіх альтернативних варіантів побудови РВП;
- програмний засіб, який базуватиметься на сучасних методах теорії прийняття рішень в умовах багатокритеріальності. Він призначений для аналізу проміжних результатів проєктування (альтернативи, критерії та оцінки альтернатив за кожним з критеріїв), виконання розрахунків на основі запрограмованих методів і визначення оптимальної альтернативи (варіанту побудови РВП) $x^0 \in X^E$.

Завдяки використанню цієї підсистеми в технології автоматизованого проєктування РВП буде спрощено процес прийняття рішень, а за рахунок обґрунтованого вибору найкращого варіанту – підвищиться її ефективність.

2.2 Математична модель задачі прийняття рішень

Прийняття рішень при оптимізації роботизованого виробничого процесу здійснюється з врахуванням великої кількості різних показників та обмежень. Рішення яке приймається має бути об'єктивним та має враховувати всі альтернативи та критерії. Знаходження оптимального рішення при наявності суперечливих показників, навіть для чітко визначених цілей, є складною для вирішення задачею [24].

Основним завданням при розв'язанні цієї задачі є синтез адекватної математичної моделі для формування багатофакторної оцінки ефективності прийняття рішень із множини допустимих $x \in X$ [25]. Задача є складною тому, що для того щоб оцінити варіанти проектування РВП $k_i(x), i = \overline{1, n}$ використовують часткові критерії, кожен критерій має власну розмірність, власний інтервал зміни та функціональний зміст.

Обраний підхід для вирішення задачі зумовлює формування узагальненого критерію ефективності $P(x)$. Завдяки цьому критерію можна здійснити вибір кращого варіанту:

$$x^0 = \arg \max_{x \in X} P(x).$$

Процес проектування передбачає генерацію великого набору альтернативних рішень, більшість з яких можуть бути неефективними. Експертні оцінки, які дає ОПР для важливості критеріїв можуть дуже різнитися, а самі критерію $k_i(x), i = \overline{1, n}$ можуть бути задані нечіткими множинами.

Формалізація задачі прийняття рішень подається у такому вигляді [25]:

$$\Phi: X \times Y \rightarrow Z,$$

де X – множина допустимих альтернатив;

Y – множина станів, та факторів впливу зовнішнього середовища;

Z – множина наслідків.

Ефективність вирішення задачі $x \in X$ визначається ступенем відповідності оптимального результату $z \in Z$ поставленим завданням, які були оцінені за обраними критеріями $k_i(x)$, $i = \overline{1, n}$ з урахуванням значень вагових коефіцієнтів часткових критеріїв $\lambda = [\lambda_i]$, $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$, $\lambda_i \geq 0$.

Кількісною характеристикою ефективності для кожної альтернативи є функція загальної корисності $P(x)$ [25].

Для оцінки загальної корисності варіантів використаємо адитивну функцію виду:

$$P(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \xi_i(x),$$

де $\xi_i(x)$ – значення функції корисності часткових критеріїв $k_i(x)$ для рішення x , $0 \leq \xi_i(x) \leq 1$, $i = \overline{1, n}$.

При прийнятті рішень у процесі проектування роботизованого ВП будемо враховувати такі критерії як фінансові чи матеріальні витрати $k_1(x) \rightarrow \min_{x \in X}$, час на виготовлення виробу $k_2(x) \rightarrow \min_{x \in X}$, якість та надійність виробничого процесу $k_3(x) \rightarrow \max_{x \in X}$ та $k_4(x) \rightarrow \max_{x \in X}$.

Мінімальна кількість операцій для обчислення значень функції корисності часткових критеріїв зі значенням параметру $\alpha_i = 1$:

$$\xi_i(x) = \{[k_i(x) - k_i^-] / [k_i^+ - k_i^-]\}^{\alpha_i}, i = \overline{1, n},$$

де $k_i(x)$, k_i^+ , k_i^- – значення i -го часткового критерію, його найкраще і найгірше значення.

Функція корисності часткових критеріїв являється монотонною і має інтервал зміни від 0 до 1. Для більш точної апроксимації оцінок часткових критеріїв пропонується використовувати універсальні функцію виду [25]:

$$\xi(x) = \begin{cases} \bar{a}(b_1 + 1)(1 - (b_1/(b_1 + \frac{\bar{k}(x)}{\bar{k}_a}))), & 0 \leq \bar{k}(x) \leq \bar{k}_a; \\ \bar{a} + (1 - \bar{a})(b_2 + 1) \times (1 - (b_2/(b_2 + \frac{\bar{k}(x) - \bar{k}_a}{1 - \bar{k}_a}))), & \bar{k}_a < \bar{k}(x) \leq 1, \end{cases}$$

де $\bar{k}(x)$ – значення часткової критеріальної функції корисності для $\alpha_i = 1$;

\bar{k}_a, \bar{a} – значення координат точки склеювання функції, $0 \leq \bar{k}_a \leq 1$, $0 \leq \bar{a} \leq 1$;

b_1, b_2 – параметри, що визначають вид залежності початкового та кінцевого сегментів функції.

В умовах неповної визначеності вимог до РВП для оцінки кількісної оцінки варіантів побудови роботизованого виробничого процесу пропонується використовувати адитивно-мультиплікативну функцію, що базується на поліномі Колмогорова-Габора [26]:

$$P(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \xi_i(x) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} \xi_i(x) \xi_j(x) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{l=1}^n \lambda_{ijl} \xi_i(x) \xi_j(x) \xi_l(x) + \dots,$$

де $\lambda_i, \lambda_{ij}, \lambda_{ijl}$ – коефіцієнти важливості критеріїв $k_i(x), i = \overline{1, n}$.

2.3 Методи розв'язання задачі

Для розв'язання задачі прийняття рішень при оптимізації роботизованого виробничого процесу пропонується використати два методи: метод аналізу ієрархії та метод лінійної згортки.

Метод МАІ дозволяє структурувати складну задачу знаходження кращої серед відносно невеликої кількості альтернатив. Цей метод спрямований на реалізацію таких етапів [27]:

- визначення цілі для прийняття рішення;
- визначення важливих критеріїв для оцінки альтернатив;
- побудова ієрархічного дерева (починаючи від цілі через критерії до можливих варіантів). Приклад побудови дерева представлено на рисунку 2.1;
- побудова матриць попарних порівнянь для критеріїв та для альтернатив;
- виставлення оцінок попарних порівнянь по деякій заданій бальній шкалі;
- проведення аналізу отриманих матриць;
- визначення вагових коефіцієнтів для кожного з варіантів та їх впорядкування.

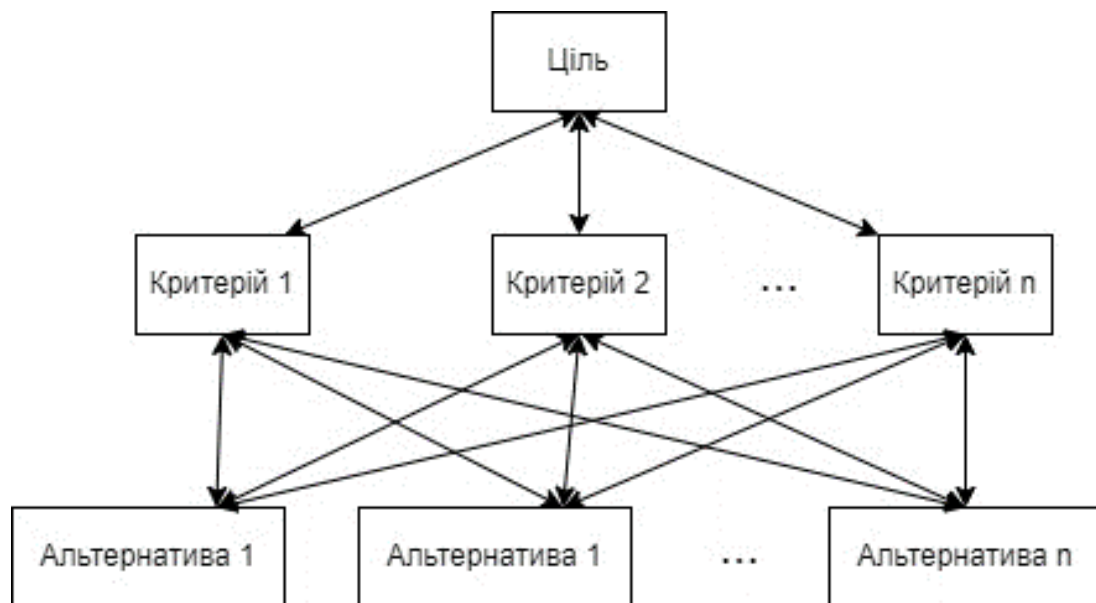


Рисунок 2.1 – Схема дерева ієрархії починаючи від цілі через критерії до існуючих варіантів [27]

Щоб побудувати матриці попарних порівнянь використовуємо співвідношення:

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}, \quad (2.1)$$

де a_{ij} – відношення критерію або варіанту i до критерію або варіанту j відповідно, a_{ii} , $i = \overline{1, n}$.

Далі необхідно виконати нормування матриць. Для цього треба визначити суму всіх елементів по кожному стовпцю матриці за формулою:

$$A_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}. \quad (2.2)$$

Для нормування матриць скористаємось формулою:

$$A_{ij} = \frac{a_{ij}}{A_j}, \quad (2.3)$$

$$i, j = \overline{1, n}.$$

Для матриць попарного порівняння варіантів по кожному з критеріїв та для матриць попарного порівняння по критеріям виконуємо цю операцію нормування матриць.

Щоб отримати вагові коефіцієнти для кожного варіанту з множини X^E необхідно провести операцію множення вектору ваги критеріїв та матриці попарного порівняння варіантів по кожному з критеріїв [27].

Метод лінійної згортки передбачає знаходження двох згорток [28]:

– перша – прибирає із множини альтернатив ті, які є домінованими за всіма критеріями;

– друга – відкидає інші доміновані альтернативи за рахунок врахування всіх вагових коефіцієнтів важливості для кожного з критеріїв $W_j \geq 0$, їх сума:

$$\sum_j W_j = 1.$$

Алгоритм знаходження кращої альтернативи за методом лінійної згортки:

- для кожного критерію знаходимо відношення їх переваг R_i ;
- знаходження функцій приналежності:

$$\mu_{R_i}(x_i, x_j) = \begin{bmatrix} x_{1,1} & x_{1,2} & x_{1,3} \\ x_{2,1} & x_{2,2} & x_{2,3} \\ x_{3,1} & x_{3,2} & x_{3,3} \end{bmatrix}; \quad (2.4)$$

- за всіма функціями визначення мінімуму приналежності, тобто знаходження першої згортки:

$$\mu_{Q_1}(x_i, x_j) = \begin{bmatrix} x'_{1,1} & x'_{1,2} & x'_{1,3} \\ x'_{2,1} & x'_{2,2} & x'_{2,3} \\ x'_{3,1} & x'_{3,2} & x'_{3,3} \end{bmatrix}; \quad (2.5)$$

- визначення ступеню переваг альтернативи x_i відносно альтернативи x_j : $x_{ij}^S = \max\{0; x'_{ij} - x'_{ji}\}$, в результаті отримаємо матрицю взаємних переваг альтернатив:

$$\mu_{Q_1^S}(x_i, x_j) = \begin{bmatrix} x_{1,1}^S & x_{1,2}^S & x_{1,3}^S \\ x_{2,1}^S & x_{2,2}^S & x_{2,3}^S \\ x_{3,1}^S & x_{3,2}^S & x_{3,3}^S \end{bmatrix}; \quad (2.6)$$

- визначення ступеня для альтернативи x_j при якому немає домінантних альтернатив над альтернативою x_j : $x_{ij}^{HD} = 1 - \max\{x_{ij}^S\}$, в результаті отримаємо вектор:

$$\mu_{Q_1^{HD}}(x_i, x_j) = [x_1^{HD} \ x_2^{HD} \ \dots \ x_n^{HD}]; \quad (2.7)$$

- виконання дії поелементного додавання матриць функції приналежності, які були отримані:

$$\mu_{Q_2}(x_i, x_j) = \begin{bmatrix} x''_{1,1} & x''_{1,2} & x''_{1,3} \\ x''_{2,1} & x''_{2,2} & x''_{2,3} \\ x''_{3,1} & x''_{3,2} & x''_{3,3} \end{bmatrix}; \quad (2.8)$$

- по аналогії з першою згорткою (2.6) знаходимо матрицю $\mu_{Q_2^s}(x_i, x_j)$;
- отримання вектору $\mu_{Q_2^{нд}}(x_i, x_j)$ за рахунок знаходження ступеня при якому альтернатива x_j не домінується з іншими альтернативами;
- визначаєм максимальну оцінку для двох знайдених згорток та проводимо їх аналіз:

$$\mu_Q(x_0) = \max \mu_{Q_1^{нд}}(x), \quad (2.9)$$

$$\mu_Q(x_0) = \max \mu_{Q_2^{нд}}(x), \quad (2.10)$$

де x являє собою найкращу альтернативу.

При прийнятті рішень для проектування роботизованого ВП необхідно враховувати такі критерії як фінансові чи матеріальні витрати $k_1(x) \rightarrow \min_{x \in X}$, час на виготовлення приладу $k_2(x) \rightarrow \min_{x \in X}$, якість, яка визначається надійністю виробничого процесу, тобто імовірність безвідмовної роботи $k_3(x) \rightarrow \max_{x \in X}$.

2.4 Приклад застосування методів розв'язання задачі

Розглянемо детально приклад застосування методів розв'язання задачі за двома методами (метод МАІ та метод лінійної згортки) для знаходження кращої альтернативи виробничого процесу для виготовлення МЕМС-акселерометрів.

Для більш ефективного та менш затратної реалізації процесу виготовлення MEMS акселерометрів необхідно прийняти рішення на етапі проєктування для обрання з запропонованих варіантів ВП кращого.

Структура виробничого процесу виготовлення MEMS акселерометрів приведена на рисунку 2.2.

Схема створення виробничого процесу має три основні етапи [29]:

- на першому етапі враховуються зовнішні фактори впливу на процес та формується технічне завдання;
- на другому етапі відбувається проєктування ВП;
- третій етап – впровадження ТП у виробництво.

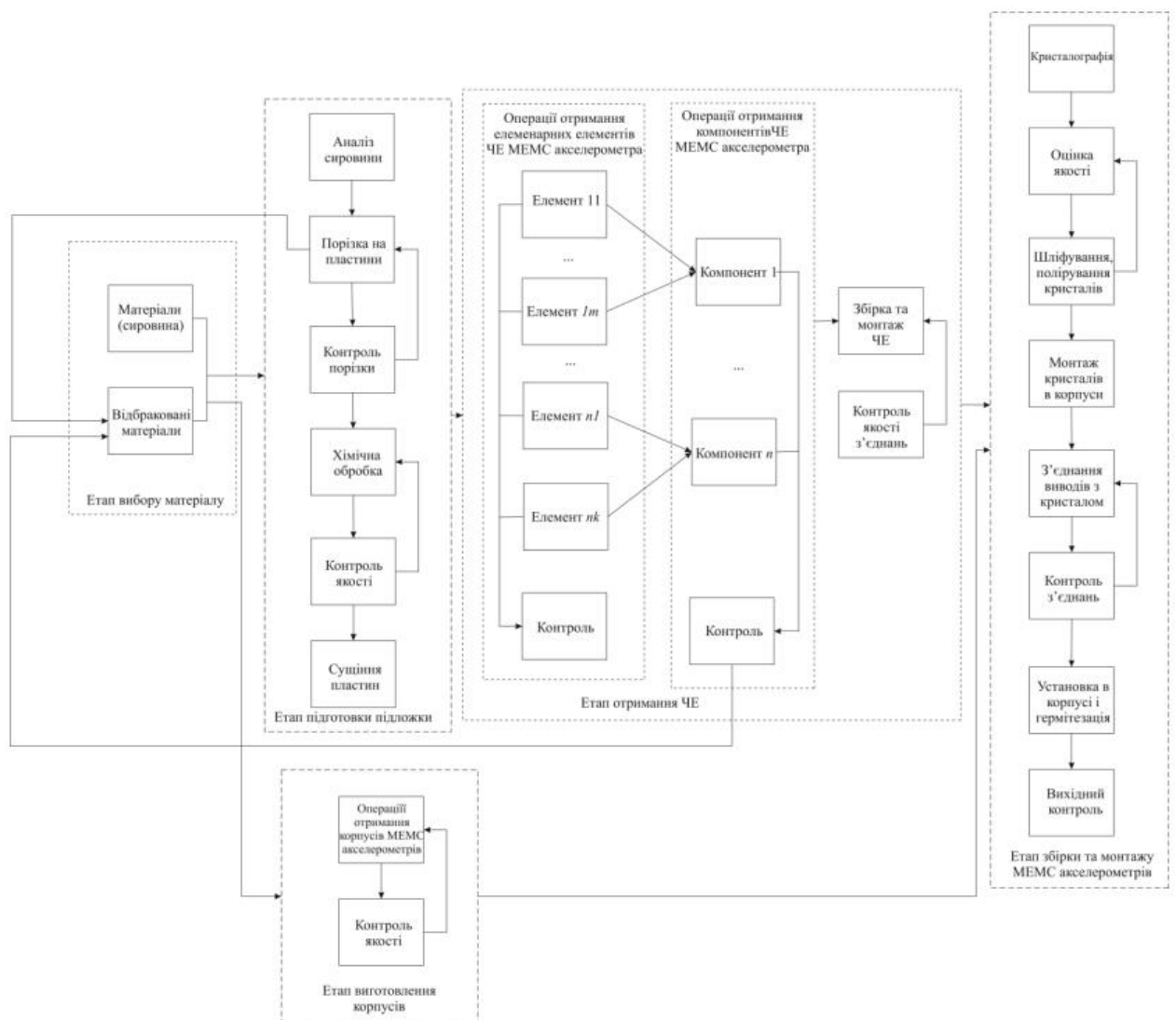


Рисунок 2.2. – Структура ВП для виготовлення акселерометрів [29]

Під час проєктування необхідно проводити моделювання ВП, щоб впевнитись, що немає розбіжності у виконання кожного завдання та отримати загальний час та вартість всієї системи для виготовлення акселерометру.

За допомогою Q -схеми можна побудувати структури виробничого процесу [30]. В цій схемі наявні такі елементи: D_1 та D_2 – джерела, з яких надходить сировина з деякою інтенсивністю i , H – накопичувачі, K – комп'ютери робототехніка які оброблюють інформацію та обслуговують окремі виробничі процеси.

На рисунку 2.3 приведено Q -схему.

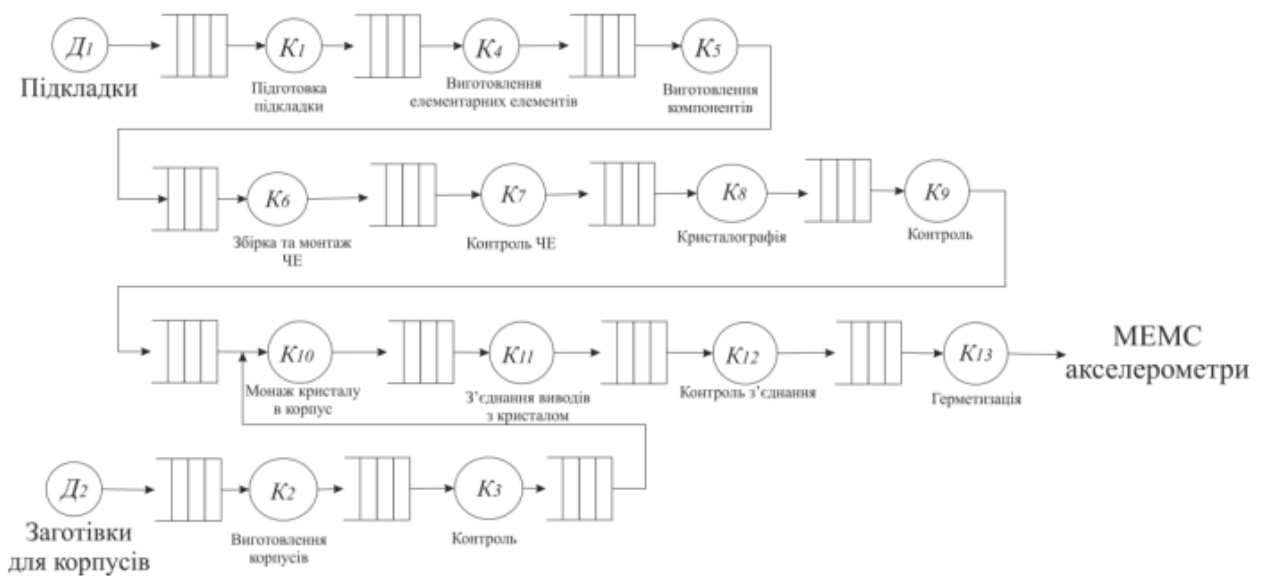


Рисунок 2.3 – Узагальнена Q -схема виробничого процесу виготовлення MEMS акселерометру [30]

Під час проєктування РВП на основі інформації щодо роботизованого обладнання проводиться моделювання варіантів допустимих побудови процесу. За результатами моделювання здійснюється прийняття рішення для обрання кращого варіанту.

Оцінка варіантів побудови ВП, тобто знаходження кращої альтернативи з множини отриманих під час процесу проектування $x_1, x_2 \dots x_n$, проводиться за деякими критеріями, такими як вартість, час виготовлення приладу, надійність, тобто імовірність безвідмовної роботи, яка приймає значення від 0 до 1:

$$P(t) = 1 - Q(t),$$

де $Q(t)$ – ймовірність відмови (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Значення основних критеріїв виробничого процесу для прийняття рішень

Назва	Вартість, у. о.	Час виготовлення t, c	Надійність $Q(t)$
x_1	98000	3780	0,9641
x_2	91500	3300	0,9199
x_3	103000	4080	0,9815
x_4	89700	3240	0,8953
x_5	92800	3300	0,9274
x_6	95300	3420	0,9487
x_7	101200	3660	0,9798
x_8	90800	3180	0,9112
x_9	93400	3360	0,9286

Приклад застосування методу МАІ.

Першим кроком експерту необхідно дати оцінку критеріям (отримання матриці попарних порівнянь) по такій шкалі:

- рівність значущості =1;
- трохи краще (гірше) =3 (1/3);

- краще (гірше) =5(1/5);
- значно краще (гірше) =7(1/7);
- найкраще (найгірше) =9(1/9).

Скориставшись формулою (2.1) отримаємо матриці попарних порівнянь по критеріям та альтернатив по кожному критерію.

Дані оцінки альтернатив та часткових критеріїв занесені в таблиці 2.2–2.5.

Таблиця 2.2 – Матриця попарних порівнянь по критеріям

	Вартість	Час виготовлення	Надійність
Вартість	1	3	1/7
Час виготовлення	1/3	1	1/5
Надійність	7	5	1

Таблиця 2.3 – Матриця попарних порівнянь альтернатив за вартістю

Вартість	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
x_1	1	1/7	5	1/7	1/5	1/3	3	1/7	1/5
x_2	7	1	9	1/3	1	3	7	1	3
x_3	1/5	1/9	1	1/9	1/7	1/5	1	1/9	1/7
x_4	7	3	9	1	3	5	9	3	5
x_5	5	1	7	1/3	1	3	7	1/3	1
x_6	3	1/3	5	1/5	1/3	1	5	1/5	1/3
x_7	1/3	1/7	1	1/9	1/7	1/5	1	7	5
x_8	7	1	9	1/3	3	5	1/7	1	3
x_9	5	1/3	7	1/5	1	3	1/5	1/3	1

Таблиця 2.4 – Матриця попарних порівнянь альтернатив за часом виготовлення акселерометру

Час виготовлення	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
x_1	1	1/7	5	1/7	1/7	1/5	1/3	1/7	1/5
x_2	7	1	9	1	1	3	7	1/3	1
x_3	1/5	1/9	1	1/9	1/9	1/7	1/5	1/9	1/7
x_4	7	1	9	1	1	3	5	1	3
x_5	7	1	9	1	1	3	7	1/3	1
x_6	5	1/3	7	1/3	1/3	1	5	1/5	1
x_7	3	1/7	5	1/5	1/7	1/5	1	1/7	1/7
x_8	7	3	9	1	3	5	7	1	5
x_9	5	1	7	3	1	1	7	1/5	1

Таблиця 2.5 – Матриця попарних порівнянь альтернатив за надійністю

Надійність	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9
x_1	1	5	1/3	9	5	3	1/3	7	7
x_2	1/5	1	1/7	3	1/3	1/5	1/7	1	1/3
x_3	3	7	1	9	7	5	3	9	7
x_4	1/9	1/3	1/9	1	1/3	1/5	1/9	1/3	1/5
x_5	1/5	3	1/7	3	1	1/3	1/7	3	1
x_6	1/3	5	1/5	5	3	1	1/5	1/3	3
x_7	3	7	1/3	9	7	5	1	7	7
x_8	1/7	1	1/9	3	1/3	3	1/7	1	1/3
x_9	1/7	3	1/7	5	1	1/3	1/7	3	1

Скориставшись формулою (2.2) для знаходження суми елементів у кожному стовпці та формулою (2.3), знайшовши середнє значення отримуємо вагу критеріїв та альтернатив по критеріям

Дані розрахунку значення ваги критеріїв та альтернатив внесені у таблиці 2.6–2.9.

Таблиця 2.6 – Вага критеріїв

Показник	Вага
Вартість	0,19
Час виготовлення	0,10
Надійність	0,71

Таблиця 2.7 – Вага альтернатив за критерієм вартості

Вартість	Вага
x_1	0,04
x_2	0,15
x_3	0,02
x_4	0,27
x_5	0,12
x_6	0,06
x_7	0,10
x_8	0,16
x_9	0,08

Таблиця 2.8 – Вага альтернатив за критерієм часу виготовлення акселерометру

Час виготовлення приладу	Вага
1	2
x_1	0,03
x_2	0,14
x_3	0,01
x_4	0,17

Продовження табл. 2.8

1	2
x_5	0,14
x_6	0,08
x_7	0,03
x_8	0,27
x_9	0,14

Таблиця 2.9 – Вага альтернатив за критерієм надійності

Надійність	Вага
x_1	0,17
x_2	0,03
x_3	0,32
x_4	0,02
x_5	0,05
x_6	0,08
x_7	0,24
x_8	0,05
x_9	0,05

Розрахунок коефіцієнта ваги для кожного варіанту проводиться множенням матриці ваг альтернатив по всім критеріям на матрицю ваги коефіцієнтів (дані розрахунку занесені до таблиці 2.10):

$$\begin{pmatrix} 0,04 & 0,03 & 0,17 \\ 0,15 & 0,14 & 0,03 \\ 0,02 & 0,01 & 0,32 \\ 0,27 & 0,17 & 0,02 \\ 0,12 & 0,14 & 0,05 \\ 0,06 & 0,08 & 0,08 \\ 0,10 & 0,03 & 0,24 \\ 0,16 & 0,27 & 0,05 \\ 0,08 & 0,14 & 0,05 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 0,19 \\ 0,10 \\ 0,71 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,1313 \\ 0,0638 \\ 0,232 \\ 0,0825 \\ 0,0723 \\ 0,0762 \\ 0,1924 \\ 0,0929 \\ 0,0647 \end{pmatrix}.$$

Таблиця 2.10 – Вагові коефіцієнти значущості альтернатив

Варіант побудови ВП	Ваговий коефіцієнт
x_1	0,1313
x_2	0,0638
x_3	0,1912
x_4	0,0825
x_5	0,0723
x_6	0,0762
x_7	0,1924
x_8	0,0929
x_9	0,0647

За отриманими даними в таблиці 2.10 можемо зробити висновок, що варіант побудови РВП x_7 є найкращим варіантом, отриманим при проектуванні РВП.

Визначимо найкращий варіант побудови РВП за методом лінійної згортки.

Задамо вагові коефіцієнти для критеріїв оцінки варіантів $W_j \geq 0$, сума яких $\sum_j W_j = 1$. Нехай припустимо, що $k_1 = 0,3$ – критерій вартості, $k_2 = 0,2$ – критерій часу виготовлення приладу, $k_3 = 0,5$ – критерій надійності системи.

Для кожного варіанту введемо позначення M_n .

Знаходимо відношення переваг по кожному з критеріїв:

– за вартістю: $k_1: M_4 > M_8 > M_2 > M_5 > M_9 > M_6 > M_1 > M_7 > M_3$;

– за часом виготовлення приладу: $k_2: M_8 > M_4 > M_2 = M_5 > M_9 > M_6 > M_7 > M_1 > M_3$;

– за надійністю системи: $k_3: M_3 > M_7 > M_1 > M_6 > M_9 > M_5 > M_2 > M_8 > M_4$.

За формулою (2.4) формуємо матриці приналежності для кожного з критеріїв:

$$\mu_{k_1}(M_i, M_j) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mu_{k_2}(M_i, M_j) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mu_{k_3}(M_i, M_j) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

За формулою (2.5) та (2.6) визначаємо першу згортку:

$$\mu_{Q_1}(M_i, M_j) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Застосувавши формулу (2.7) отримаємо вектор:

$$\mu_{Q_1^{HD}}(M_i, M_j) = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0].$$

Знаходимо другу згортку домноживши матриці приналежності на вагові коефіцієнти:

$$\mu_{k_1}(M_i, M_j) = \begin{bmatrix} 0,3 & 0,3 & 0 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0 & 0,3 & 0,3 \\ 0 & 0,3 & 0 & 0,3 & 0 & 0 & 0 & 0,3 & 0 \\ 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 \\ 0 & 0 & 0 & 0,3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,3 & 0 & 0,3 & 0,3 & 0 & 0 & 0,3 & 0 \\ 0 & 0,3 & 0 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0 & 0,3 & 0,3 \\ 0,3 & 0,3 & 0 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 \\ 0 & 0 & 0 & 0,3 & 0 & 0 & 0 & 0,3 & 0 \\ 0 & 0,3 & 0 & 0,3 & 0,3 & 0 & 0 & 0,3 & 0,3 \end{bmatrix},$$

$$\mu_{k_2}(M_i, M_j) = \begin{bmatrix} 0,2 & 0,2 & 0 & 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ 0 & 0,2 & 0 & 0,2 & 0,2 & 0 & 0 & 0,2 & 0 \\ 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ 0 & 0 & 0 & 0,2 & 0 & 0 & 0 & 0,2 & 0 \\ 0 & 0,2 & 0 & 0,2 & 0,2 & 0 & 0 & 0,2 & 0 \\ 0 & 0,2 & 0 & 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0 & 0,2 & 0,2 \\ 0 & 0,2 & 0 & 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,2 & 0 \\ 0 & 0,2 & 0 & 0,2 & 0,2 & 0 & 0 & 0,2 & 0,2 \end{bmatrix},$$

$$\mu_{k_3}(M_i, M_j) = \begin{bmatrix} 0,5 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0 & 0,5 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0 & 0,5 & 0 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0 & 0,5 \\ 0,5 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0,5 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & 0 & 0 \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0 & 0,5 & 0 & 0 & 0,5 & 0,5 & 0 & 0,5 \end{bmatrix}.$$

Скориставшись (2.8) отримаємо другу згортку:

$$\mu_{Q_2}(M_i, M_j) = \begin{bmatrix} 1 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,7 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 1 & 0,5 & 0,5 & 0,7 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 & 1 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 & 1 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 1 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 1 & 0,5 & 0,5 & 0,5 \\ 0,3 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 1 & 0,5 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 1 & 0,5 \\ 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 0,5 & 1 \end{bmatrix}.$$

Аналогічно до (2.6) та (2.7) отримаємо вектор:

$$\mu_{Q_2}^{\text{нд}}(M_i, M_j) = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0,6 \ 1 \ 1].$$

Згідно з (2.9) та (2.10) при проектуванні кращим варіантом є x_7 .

2.5 Висновки до другого розділу

В рамках сформульованої мети дослідження кваліфікаційної роботи розроблена постановка задачі створення підсистеми підтримки прийняття багатокритеріальних рішень для технології автоматизованого проектування роботизованих виробничих процесів. Для неї на основі теорії корисності обрана математична задачі прийняття рішень щодо вибору найкращого варіанту побудови РВП з використанням функції загальної корисності.

Виходячи з результатів аналізу існуючих методів багатокритеріального вибору для практичної реалізації обрано комбінацію методів аналізу ієрархії та методу лінійної згортки. Використання методу аналізу ієрархії дозволяє достатньо повно враховувати знання та досвід ОПР, а методу лінійної згортки – використати можливості сучасних комп'ютерів для аналізу потужних множин допустимих варіантів.

Можливість та результати застосування обраних методів продемонстрована на контрольному прикладі.

Розробка підсистеми підтримки прийняття дозволить скоротити час на процес прийняття рішень та мінімізувати виникнення похибок та помилок при проектуванні роботизованого ВП.

3 РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТИ

3.1 Розробка діаграми прецедентів

Діаграма прецедентів дає можливість показати всі ролі і їх взаємодії із системою та показує вимоги користувача до системи.

Діаграми прецедентів призначені для погодження технічного завдання, зображення умов та вимог до системи, що моделюється.

Ці діаграми мають такі об'єкти: актор, прецедент, система, зв'язок [31].

Актор – це об'єкт, що може взаємодіяти з системою, але сам лежить за межами цієї системи [31].

Прецедент – показує та описує поведінку системи під час взаємодії актора з нею [31].

Система – об'єкт, що моделюється [31].

Зв'язок (залежність) – те, що пов'язує актора з прецедентом. Бувають 4 типи: асоціація, включення, розширення, генералізація [31].

Для подання умов та обмежень використовують коментарі [31].

В таблиці 3.1 приведені актори та прецеденти які, включає модель підсистеми прийняття рішень для технології проектування роботизованого виробничого процесу.

Таблиця 3.1 – Опис елементів, що включає діаграма для підсистеми прийняття рішень

Актор	Прецедент
Розробник	Розробка програмного забезпечення. Внесення змін до підсистеми прийняття рішень. Реєстрація користувачів.

Продовження таблиці 3.1

Актор	Прецедент
Розробник	Додання варіантів виробничого процесу. Видалення даних. Перегляд варіантів ВП.
Конструктор	Зміна особистих даних. Додання варіантів ВП. Перегляд варіантів ВП. Встановлення критеріїв оцінки варіантів. Виставлення коефіцієнтів важливості критеріїв. Перегляд отриманих рішень. Затвердження отриманих рішень.
Диспетчер управління виробничим процесом (ВП)	Зміна особистих даних. Перегляд варіантів ВП. Перегляд отриманих рішень. Затвердження отриманих рішень. Надання конструктору параметрів обладнання виробничого процесу.

Розгорнутий опис головних прецедентів наведено нижче.

1. Надання конструктору параметрів обладнання ВП.

Основним виконавцем цього завдання виступає диспетчер управління ВП.

Сценарій успішного виконання цього процесу:

– виконання всіх необхідних дій для визначення параметрів обладнання;

– заповнення документації для ТЗ;

– передача документації конструктору для подальшого проєктування роботизованого ВП.

2. Додання нових варіантів виробничого процесу до СППР.

Основним виконавцем цього завдання виступає конструктор, який проєктує ВП.

Сценарій успішного виконання цього процесу:

– проводиться декілька разів процес проєктування ВП із змінами параметрів ВП;

– отримано значення параметрів варіантів ВП;

– отримані параметри заносяться до бази даних СППР.

3. Затвердження отриманих рішень.

Основним виконавцем цього завдання виступає конструктор.

Сценарій успішного виконання цього процесу:

– використання СППР для знаходження кращого варіанту побудови роботизованого ВП;

– аналіз отриманих рішень;

– заповнення документації для затвердження варіанту для проєктування та побудови ВП.

4. Реєстрація користувачів в СППР.

Основним виконавцем цього завдання виступає розробник системи підтримки прийняття рішень.

Сценарій успішного виконання цього процесу:

– розробка програмного забезпечення СППР;

– реєстрація конструктора, що проєктує ВП та диспетчера, що виконує завдання з управління ВП;

– користувачі мають можливість входу та внесення змін своїх даних у систему, а також мають можливість занесення та перегляд даних варіантів ВП і перегляд отриманих результатів після проведення процесу знаходження кращої альтернативи.

Діаграма прецедентів показана на рисунку 3.1.

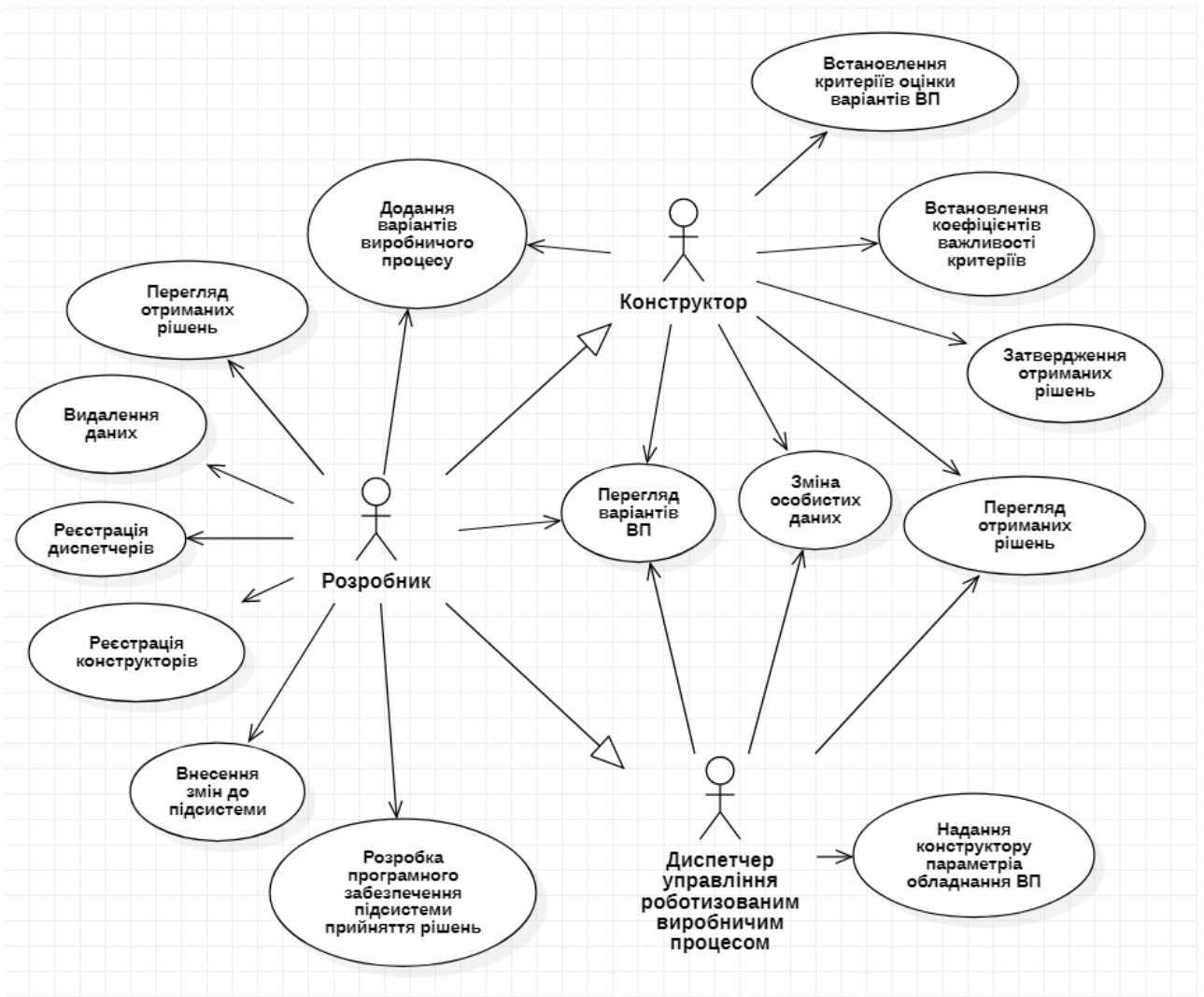


Рисунок 3.1 – Діаграма прецедентів для моделювання підсистеми прийняття рішень для проектування роботизованого виробничого процесу

3.2 Побудова алгоритму підтримки прийняття рішень

Розробка алгоритму є важливим етапом для розробки програмного засобу. Це дає можливість створити структуру програми та впорядкувати етапи розробки.

Алгоритм вирішення поставленої у роботі задачі складається з 5 етапів (рисунок 3.2):

- заповнення бази даних параметрами нових варіантів ВП;
- задання критеріїв оцінки варіантів ВП;
- встановлення вагових коефіцієнтів для критеріїв;

- застосування методу лінійної згортки для отримання результату (пошук кращого варіанту);
- прийняття рішення користувачем на основі отриманого результату.

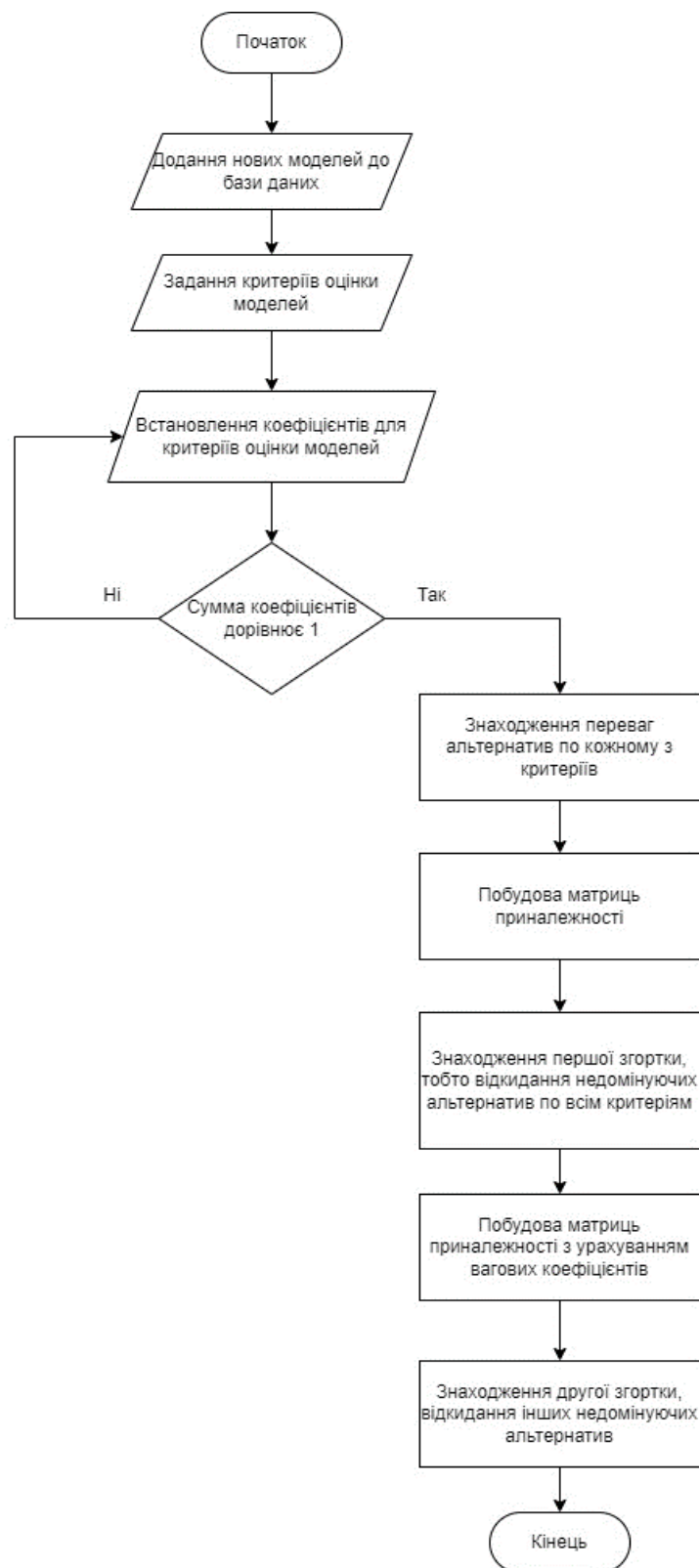


Рисунок 3.2 – Схема алгоритму підтримки прийняття рішень

3.3 Обґрунтування вибору мови програмування та середовища розробки

Проектування програмного продукту орієнтується на операційну систему Microsoft Windows з підтримуваною нею системою розробки програм Visual Studio [32].

Для розробки програмного засобу підсистеми прийняття рішень було обрано мову програмування C# тому, що це сучасна об'єктно-орієнтована та компонентно-орієнтована мова програмування, яка дає можливість розробляти різні типи програм для різних операційних систем. Ця мова підтримує успадкування, навантаження операторів, функцій та підтримує поліморфізм, а також забезпечує сумісність додатків. Також C# дає можливість працювати з .NET [33].

Об'єктно-орієнтовний підхід дозволяє ефективно розв'язувати завдання з побудови гнучких та масштабних додатків. Мова C# постійно оновлюється за рахунок додання нового функціоналу [33].

За допомогою .NET видається можливість створюються програми різних типів та застосовувати їх на різних платформах.

.NET дозволяє розробляти десктопі та мобільні додатки, веб-сайти і створювати ігри. Розроблені додатки працюють на широкому спектрі операційних систем [33].

Існує багато інформації, яка викладена у зрозумілому форматі про платформу .NET та мову C#, за допомогою якої можна легко та швидко вдосконалити свої навички в розробці програмних додатків та засобів.

Для реалізації підсистеми застосовуються сучасні бібліотеки середовища розробки Visual Studio.

Visual Studio – це багате середовище для програмування, тобто інструмент для розробки програмних продуктів, який надає можливість провести весь цикл програмування, розгортання додатків, компіляцію та налагодження в одному середовищі. Окрім редагування та налагодження

коду в Visual Studio наявні інструменти для закінчення коду, підказки написання коду, компілятор, відбувається контроль нових версій, а також розширення та покращення етапів створення програмних засобів. Також Visual Studio підтримує широкий спектр мов програмування, різні функції та крос-платформну розробку [32].

3.4 Обґрунтування вибору середовища програмування для збереження даних програмного засобу

Для підсистеми прийняття рішень була створена база даних для зберігання даних про спроектовані варіанти роботизованого виробничого процесу, критерії оцінки варіантів ВП та результати пошуку кращого рішення. Структурна схема програмного засобу представлена на рисунку 3.3.

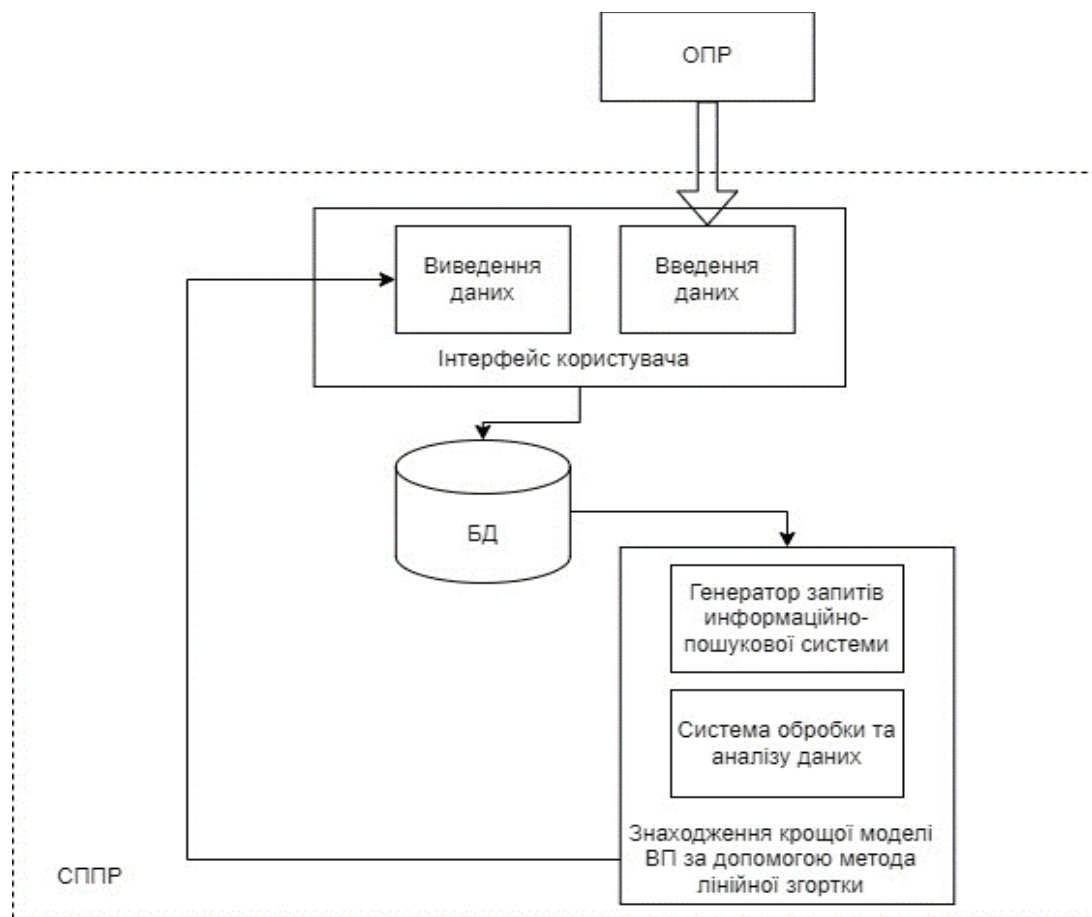


Рисунок 3.3 – Структурна схема програмного засобу

База даних (БД) – організована колекція для зберігання даних. Також базою даних в цілому називають дані, які зберігаються та систему управління БД [34].

SQL – мова програмування, що має широке використання, застосовується для запитів, обробки, визначення та контролю доступу до даних і використовується в реляційних БД [34].

За допомогою Visual Studio створюються програмні засоби, що можуть підключати будь-якої форми дані з сервісів баз даних, незалежно від місця знаходження цього сервісу чи з мережі, чи з локального комп'ютера, чи з будь-якого хмарного сховища [32].

Для .NET додатків Visual Studio дає можливість застосовувати інструменти, за допомогою яких зв'язують дані з бази даних з користувацьким інтерфейсом.

Visual Studio Connecting Services забезпечує підключення баз даних до проєкту.

SQL Server Connecting Services підтримує створення локальної бази даних та підключення до неї у самому Visual Studio [34].

3.5 Реалізація підсистеми підтримки прийняття рішень та проведення експерименту

У розробленому програмному засобі інтерфейс користувача зроблений максимально простим для розуміння та зручним у використанні.

Інтерфейс користувача – це сукупність деяких програмних та апаратних засобів, які забезпечують взаємодію користувачів з пристроєм [33].

Інтерфейс користувача розробленої підсистеми має поле «Меню» де знаходяться три вкладки: «Альтернативи», «Пошук», «Фільтр», детальний опис яких наведено нижче.

У вікні «Альтернативи» реалізовано додавання до бази даних нових альтернатив та задання критеріїв їх оцінки, також реалізовано можливість редагування та видалення вже існуючих альтернатив (рисунки 3.4–3.5).

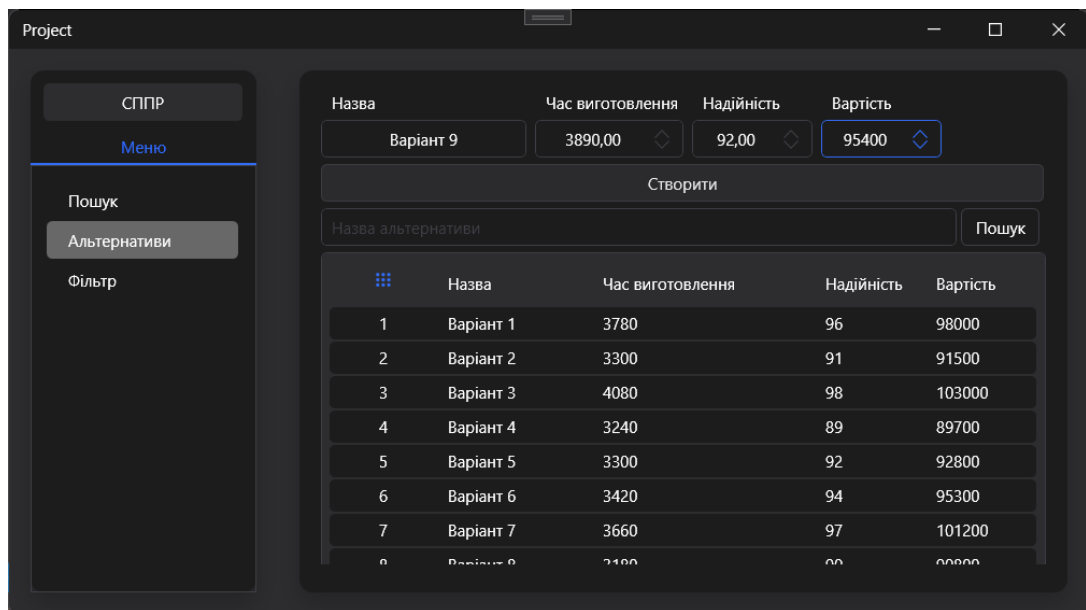


Рисунок 3.4 – Вигляд вікна «Альтернативи»: додання нової альтернативи

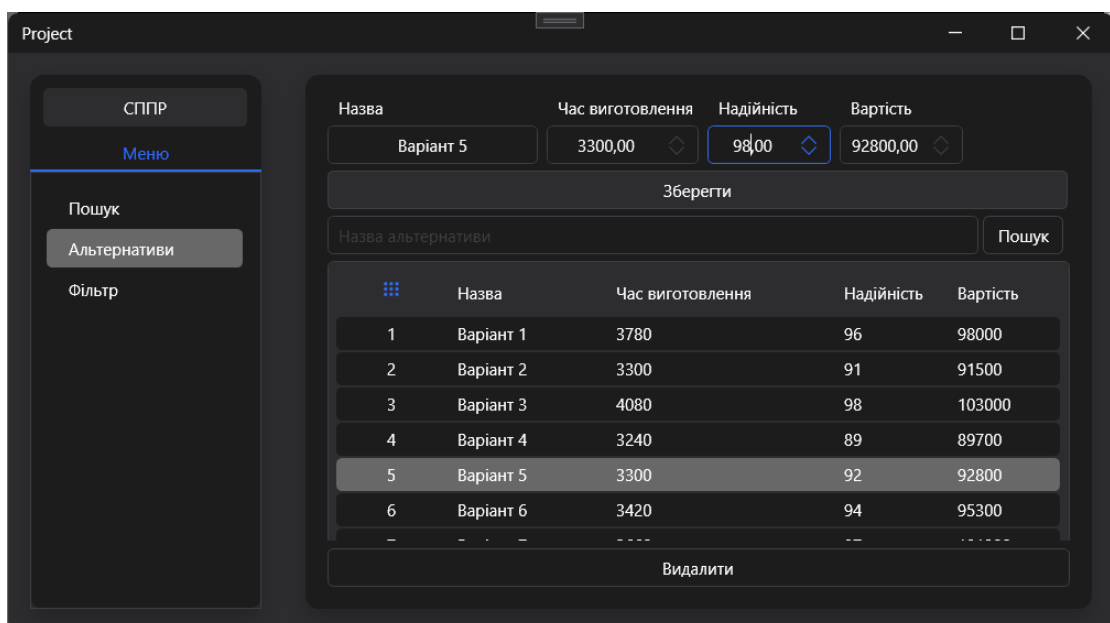


Рисунок 3.5 – Вигляд вікна «Альтернативи»: зміна параметрів альтернативи

У цій вкладці також реалізована можливість пошуку альтернатив за назвою (рисунок 3.6).

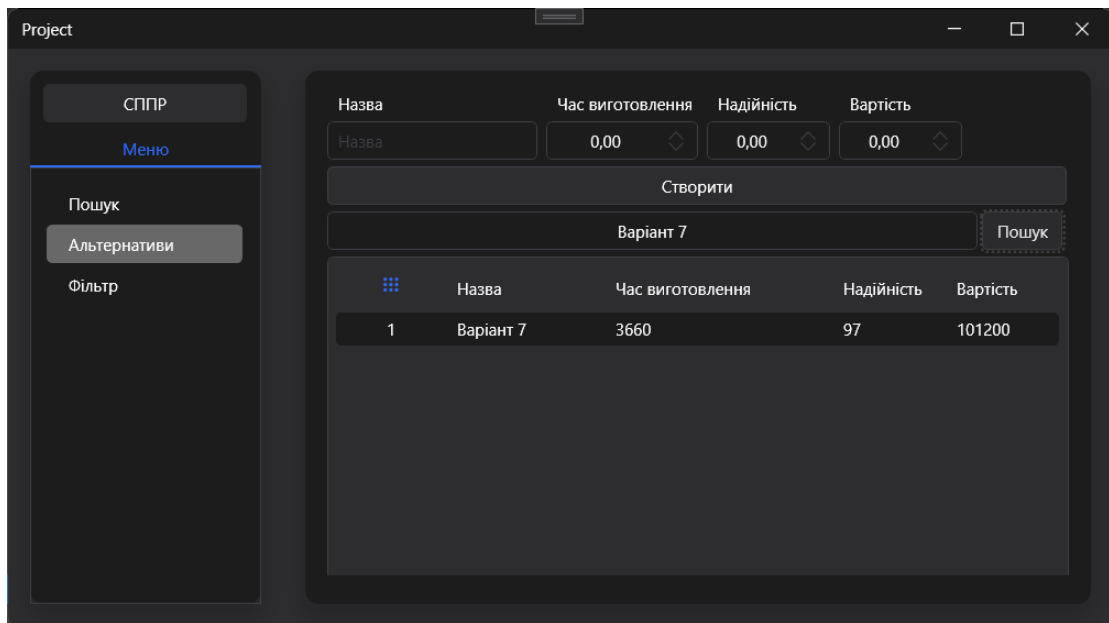


Рисунок 3.6 – Вигляд вікна «Альтернативи»: пошуку альтернатив за назвою

У вікні «Фільтр» реалізовано фільтрування. Вигляд цього вікна показано на рисунку 3.7.

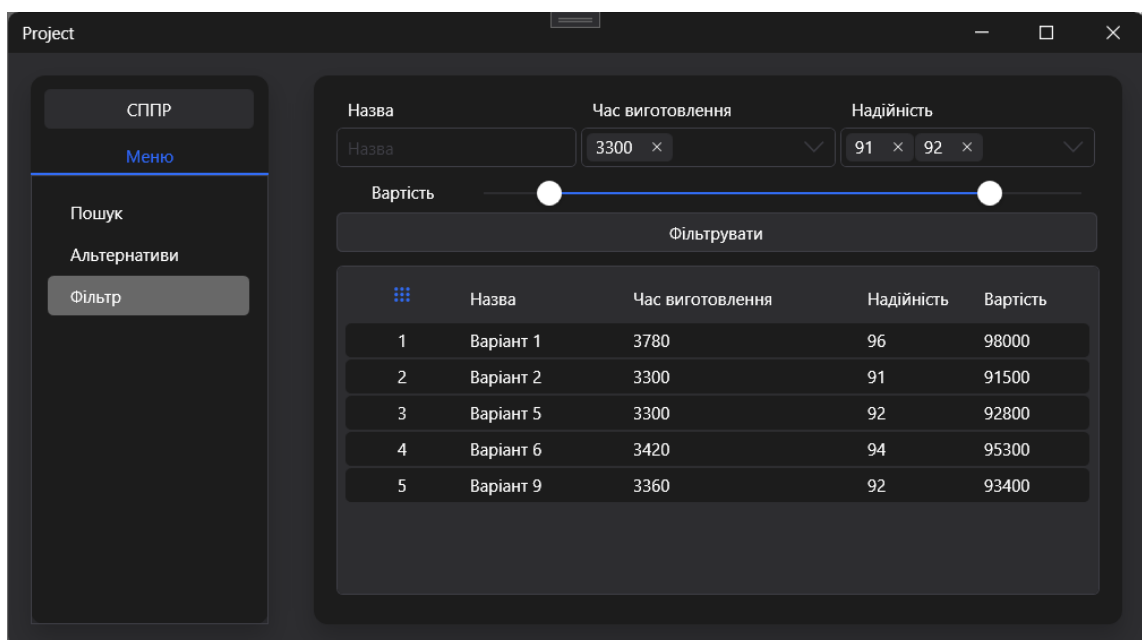


Рисунок 3.7 – Вигляд вікна «Фільтр»

Фільтрування можливо здійснювати за всіма критеріями. Пошук необхідних альтернатив відбувається по заданим параметрам критеріїв або назві альтернатив (рисунок 3.8–3.9).

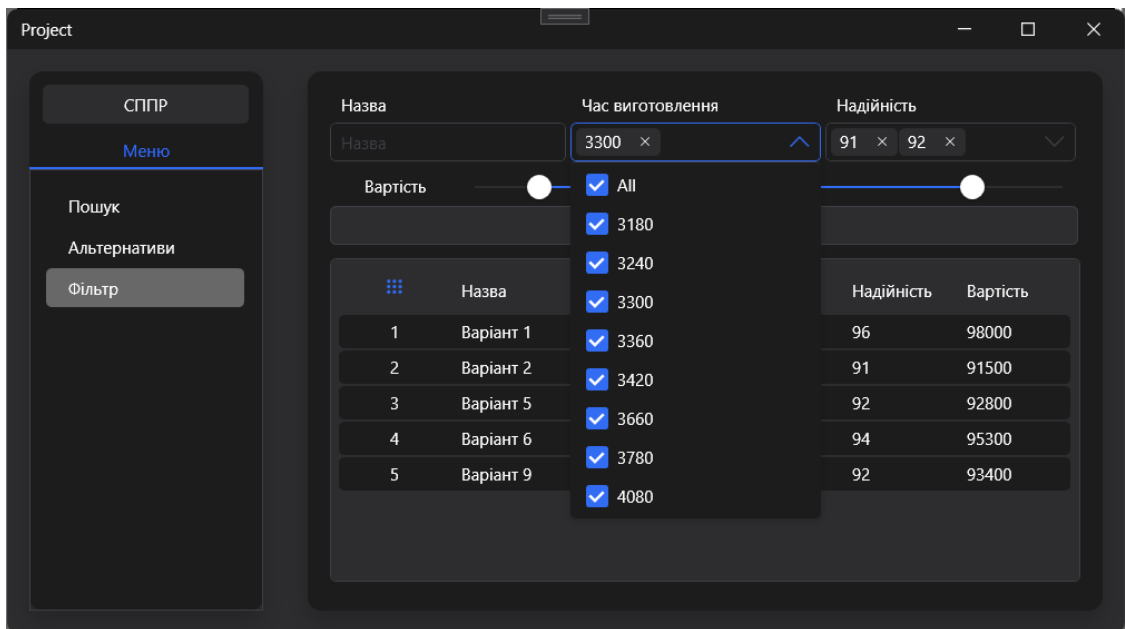


Рисунок 3.8 – Вигляд вікна «Фільтр»: пошук альтернатив за критерієм часу виготовлення акселерометра

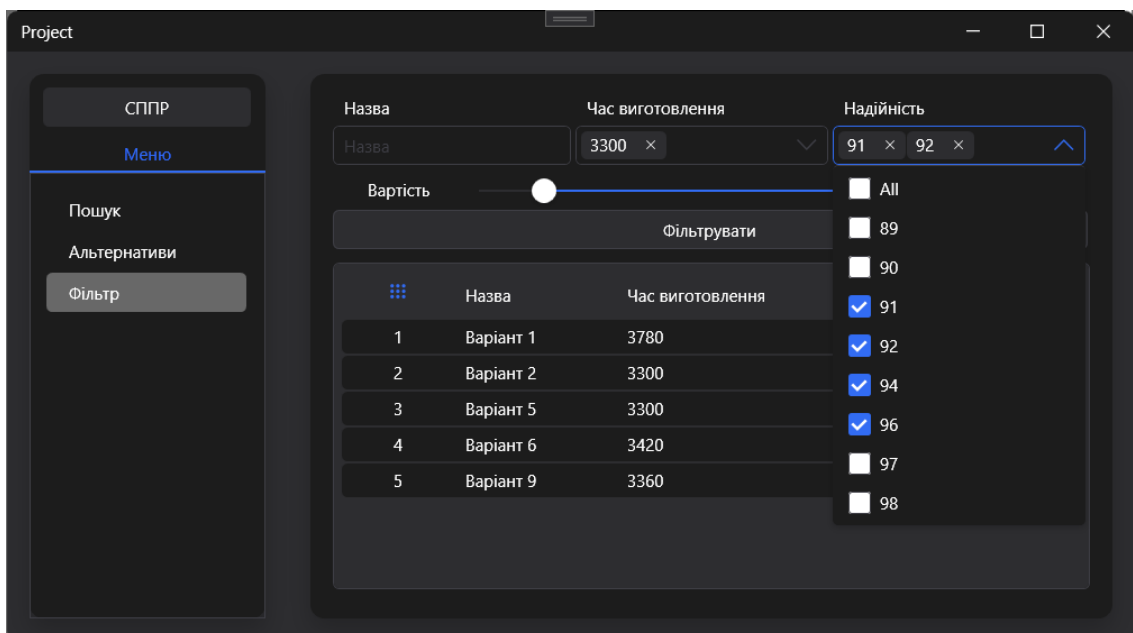


Рисунок 3.9 – Вигляд вікна «Фільтр»: пошук альтернатив за критерієм надійності

У вікні «Пошук» реалізовано встановлення вагових коефіцієнтів для критеріїв оцінки альтернатив та виведення результатів проведення розрахунків за вдосконаленим методом лінійної згортки.

Спочатку відбувається перевірка умови, що сума встановлених користувачем коефіцієнтів дорівнює 1. Якщо умова не виконана виводиться повідомлення (рисунок 3.10).

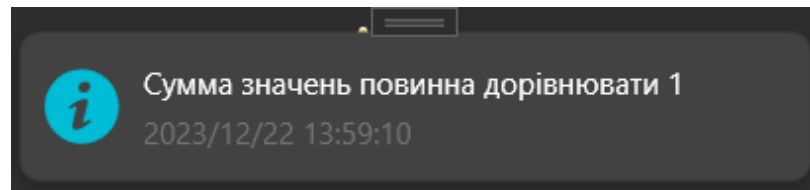


Рисунок 3.10 – Повідомлення про неповідність введених значень коефіцієнтів

Результат пошуку кращого варіанта ВП представляється у вигляді відсортованого списку.

Альтернатива з найвищим коефіцієнтом вважається кращою і пропонується для подальшого процесу проектування роботизованого виробничого процесу (рисунок 3.11).

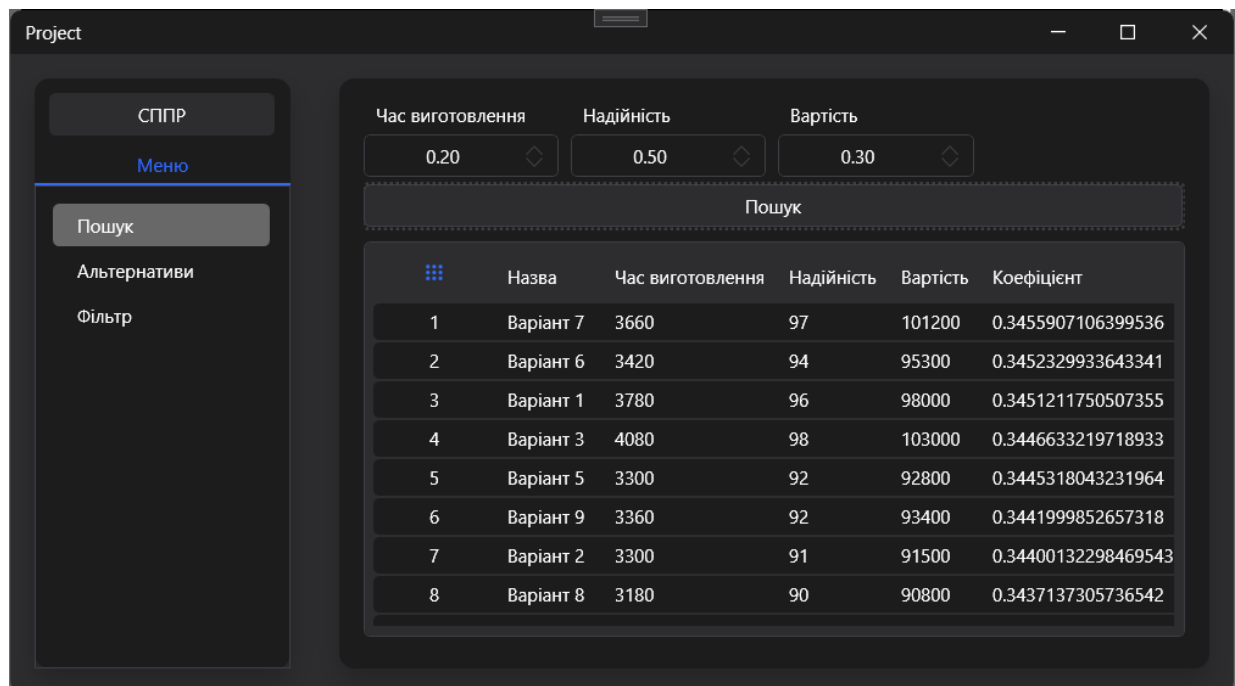


Рисунок 3.11 – Вигляд вікна «Пошук»: виведення результатів пошуку кращого варіанту ВП

З результатів виведених розробленим додатком видно, що варіант x_7 для побудови роботизованого ВП є найкращою альтернативою.

Метод лінійної згортки є недосконалим для прийняття рішень, він не враховує максимізацію або мінімізацію критеріїв оцінки, тому для врахування цього реалізовано в програмі запропоновано покращити метод. Реалізація цього в коді приведено на рисунок 3.12.

```

connection.Open();
var command = connection.CreateCommand();
command.Connection = connection;
command.CommandText =
    $"SELECT id, name, price, time, reliability, " +
    $"((1 - (time / SUM(time) OVER ())) * {time.ToString("0.00")}) + " +
    $"((reliability / SUM(reliability) OVER ())) * {reliability.ToString("0.00")}) + " +
    $"((1 - (price / SUM(price) OVER ())) * {price.ToString("0.00")}) AS vikor " +
    $"FROM alternatives " +
    $"ORDER BY vikor DESC";
using (var reader = command.ExecuteReader())
{
    if (reader.HasRows())
    {
        while (reader.Read())
        {
            Console.WriteLine($"ID: {reader.GetInt32(0)} Name: {reader.GetString(1)} Price: {reader.GetDouble(2)} Time: {reader.GetDouble(3)} Reliability: {reader.GetDouble(4)} Vikor: {reader.GetDouble(5)}");
        }
    }
}

```

Рисунок 3.12 – Запропонований варіант вдосконалення методу лінійної згортки

У програмному засобі реалізована база даних, створення якої відбувається за запитом, який приведено на рисунку 3.13.

```

using (var connection = new SqliteConnection($"Data Source=data.db;"))
{
    await connection.OpenAsync();

    var command = connection.CreateCommand();
    command.Connection = connection;

    command.CommandText =
        $"UPDATE alternatives " +
        $"SET name='{data.Name}', time={data.Time}, reliability={data.Reliability}, price={data.Price} " +
        $"WHERE id={data.Id}";
    command.ExecuteNonQuery();
    connection.Close();
}

```

Рисунок 3.13 – Реалізація бази даних

Програмний код для реалізації таблиці, в яку заносяться параметри варіантів роботизованого виробничого процесу, приведено на рисунок 3.14.

```

var command = connection.CreateCommand();
command.CommandText = @"CREATE TABLE IF NOT EXISTS ""alternatives"" (
    ""id"" INTEGER NOT NULL UNIQUE,
    ""name"" TEXT,
    ""time"" REAL,
    ""reliability"" REAL,
    ""price"" REAL,
    PRIMARY KEY(""id"" AUTOINCREMENT)
)";

```

Рисунок 3.14 – Реалізація таблиці критеріїв оцінки варіантів ВП

Розроблений програмний засіб дає можливість прискорити процес пошуку кращого варіанту для проектування ВП, оскільки може проводити розрахунки з великою кількістю альтернатив наявних в базі даних.

Лістинг коду програми приведено в додатку Б.

3.6 Висновки до третього розділу

У третьому розділі було розроблено програмне забезпечення для підсистеми підтримки прийняття рішень та проведено контрольні експерименти з ним, що продемонстрували його працездатність.

Для створення валідного й ефективного програмного забезпечення було розроблено діаграми прецедентів та побудовано алгоритм виконання обчислень для підтримки прийняття рішень. Для його реалізації здійснено обґрунтований вибір мови програмування, середовища розробки та зберігання даних. Це дозволило скоротити час створення програмного забезпечення та забезпечило його мобільність.

Програма розроблена на основі вдосконаленого методу лінійної згортки. Так як базовий метод не враховує напрям покращення часткових критеріїв (мінімум чи максимум), було запропоновано варіант для покращення методу знаходження оптимального рішення.

Працездатність і коректність розробленого програмного забезпечення підтверджена результатами проведених експериментів, які повністю співпали з розв'язанням контрольної задачі, наведеним в розділі 2.

Розроблений застосунок дає можливість прискорити процес прийняття рішень при проектуванні роботизованих виробничих процесів та, відповідно зменшити час на сам процес проектування, обирати найкращий ефективний варіант за множиною показників якості з урахуванням переваг між ними.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці включає в себе важливу інформацію яку зобов'язаний знати кожен робітник на підприємстві. Яка включає принципи уникнення, передбачення небезпечних ситуацій та уміння робити правильні рішення та діяти в цих ситуаціях [35].

Охорона праці являє собою велику систему знань про заходи захисту життя та діяльність особи на виробничому підприємстві від загрозливих життю та здоров'ю факторів. Головною задачею якої є збереження здоров'я працівників на підприємстві [35].

Щоб запобігти травм на робочому місці необхідно забезпечити безпечні та належні умови праці. Сфери охорони праці регулюються згідно з нормативно-правовими актами. Роботодавці несуть відповідальність за забезпечення та організацію охорони праці на виробничих ділянках. Також роботодавець має забезпечувати дотримання прав працівників згідно з нормативно-правовими актами охорони праці.

Відповідно до статті 18 Закону «Про охорону праці» люди які працюють на робочих місцях з підвищеною небезпекою, сюди відносять і роботизовані виробництва, мають проходити щорічне навчання на підприємстві [36].

Відповідно до статті 164 Кодексу законів про працю, працівники, які працюють у небезпечних умовах, повинні бути забезпечені спецодягом та засобами індивідуального захисту [36].

Великий вплив на здоров'я працівників на виробництві мають технологічні фактори, такі як температура повітря, де працюють люди, шум, випромінення електромагнітне та інфрачервоне та інші. Тому умови праці для робітників повинні бути забезпечені роботодавцем

Також важливою є охорона праці та безпека працівників під час роботи з комп'ютерною та робототехнікою. Приймаються заходи для усунення ризику ураження струмом, розташування обладнання, заходи пожежної

безпеки. Для цього необхідно робити якісні проекти виробничих процесів з урахуванням навантаження на мережі, надійності та якості кабелів та розеток, проводити перевірку обладнання на наявність ушкоджень, дотримуватись правил пожежної безпеки, обладнання робочих місць вогнегасниками. При проектуванні та побудові виробництва необхідно враховувати всі зазначені у технічних інструкціях умови експлуатації та умови роботи електрообладнання.

Отже, для забезпечення безпечних умов праці необхідно дотримуватись правил зазначених законах «Про охорону праці», проводити інструктажі та навчання з правил безпеки на виробництвах.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи було отримано рішення актуальної науково-прикладної задачі підвищення ефективності технології проектування роботизованого виробничого процесу за рахунок розробки підсистеми підтримки прийняття рішень на основі знань особи, що приймає рішення, та можливостей комп'ютера.

Було проведено аналіз предметної області, виконаний огляд сучасного стану проблеми впровадження РВП, розглянуто проблему їх проектування та обґрунтовано актуальність розробки і застосування підсистеми підтримки прийняття рішень для процесів їх автоматизованого проектування. На основі розглянутого теоретичного матеріалу було сформовано мету та задачі кваліфікаційної роботи.

Для порівняння методів прийняття рішень та вибору більш ефективного було проведено розрахунки для знаходження кращого варіанту виробничого процесу виробництва МЕМС-акселерометрів. Виходячи з результатів аналізу існуючих методів багатокритеріального вибору для практичної реалізації обрано комбінацію методів аналізу ієрархії та методу лінійної згортки. Використання методу аналізу ієрархії дозволить дозволяє достатньо повно враховувати знання та досвід ОПР, а методу лінійної згортки – використати можливості сучасних комп'ютерів для аналізу потужних множин допустимих варіантів.

Для створення валідного й ефективного програмного забезпечення було розроблено діаграми прецедентів та побудовано алгоритм виконання обчислень для підтримки прийняття рішень. Для його реалізації здійснено обґрунтований вибір мови програмування, середовища розробки та зберігання даних. Це дозволило скоротити час створення програмного забезпечення та забезпечило його мобільність.

Програма розроблена на основі вдосконаленого методу лінійної згортки. Так як базовий метод не враховує напрям покращення часткових

критеріїв (мінімум чи максимум), було запропоновано варіант для покращення методу знаходження оптимального рішення.

Працездатність і коректність розробленого програмного забезпечення підтверджена результатами проведених експериментів, які повністю співпали з розв'язанням контрольної задачі, наведеним в розділі 2.

Розроблений застосунок дає можливість прискорити процес прийняття рішень при проєктуванні роботизованих виробничих процесів та, відповідно зменшити час на сам процес проєктування, обирати найкращий ефективний варіант за множиною показників якості з урахуванням переваг між ними.

Напрямок подальших досліджень і розробок може бути створення технології взаємодії розробленої підсистеми з іншими підсистемами системи автоматизації проєктування РТП.

За темою кваліфікаційної роботи опубліковано 2 статті у збірнику студентських наукових статей [6-7] та результати дослідження доповідались на всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених [8].

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Колесник Л. В., Меркулов Р. П. Проблема прийняття рішень в умовах нечіткої інформації // Інформаційні системи та технології ІСТ-2020: матеріали 9-тої Міжнародної науково-технічної конференції, 17-20 листопада 2020 р. Харків, 2020. С. 95–98.
2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. Невлюдов І. Ш., Артюх Р. В., Безкоровайний В. В., Демська Н. П., Євсєєв В. В., Филипенко О. І., Цимбал О. М. Харків: ХНУРЕ, 2021. 55 с.
3. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлення. Введ. 22.06.2015. К. Держстандарт України, 2016. 30 с.
4. Стандарт вищої освіти магістра за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування» затверджено і введено в дію Наказом Міністерства освіти і науки України від 10.08.2020 р. № 1022.
5. Положення про організацію освітнього процесу у ХНУРЕ [електронний ресурс]: Наказ ХНУРЕ від 27 листопада 2020 р. № 400. URL: https://nure.ua/wp-content/uploads/Main_Docs_NURE/polozhennja-pro-organizaciju-osvitnogo-procesu-v-hnure.pdf (дата звернення: 12.09.2023).
6. Готовська А. В., Буць Д. Є. Система підтримки прийняття рішень для управління виробничим процесом // «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2022: Collection of Students' Scientific Paper. Kharkiv: Kind of Kharkiv National University of Radio Electronics, 2022. Part2. P. 130–132.

7. Готовська А. В. Підтримка прийняття рішень в технології проектування роботизованого виробничого процесу // «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2023: Collection of Students' Scientific Paper. Kharkiv: Kind of Kharkiv National University of Radio Electronics, 2023. Part2. P. 213–218.

8. Готовська А. В., Безкорвайний В. В. Декомпозиція процедури підтримки прийняття рішень в технології проектування роботизованого виробничого процесу // Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві. Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених. Харків: ХНАДУ, 2023. С. 285–289.

9. Пушкар М. С., Проценко С. М. Проектування систем автоматизації: навч. посіб. Дніпро: Національний гірничий університет, 2013. 268 с.

10. Пістун Є. П., Стасюк І. Д. Основи автоматики та автоматизації: навч. посіб. Львів: Нац. ун-т «Львів. політехніка», 2014. 333 с.

11. Іванов А. О. Теорія автоматичного керування: підручник. Дніпро: Національний гірничий університет, 2013. 250 с.

12. Поліщук М. М., Ткач М. М. Робототехнічні системи: проектування і моделювання: навч. посіб. для студ. спеціальності 126 «Інформаційні системи та технології». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 112 с.

13. Проектування комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних систем: конспект лекцій / В. Г. Здоренко та ін. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 262 с.

14. Nevliudov I. Sh., Khrustalev K. L., Bortnikova V.O. Generalized method of computer-aided design of technological processes for MEMS accelerometers manufacturing // Doklady BGUIR. 2018, Vol. 113, No. 3. P. 94–99. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obobschennyu-metod-avtomatizirovannogo-proektirovaniya-tehnologicheskikh-protsesov-izgotovleniya-mikroelektromehanicheskikh/viewer> (дата звернення 24.10.2023).

15. Основи побудови автоматизованих систем управління: навч. посіб. /

Пількевич І. А., Молодецька К. В., Сугоняк І. І., Лобанчикова Н. М. Житомир: ЖДУ ім. І. Франка, 2014. 178 с.

16. Окуненко В. Проблеми проектування комп'ютерних інформаційних систем в управлінні неперервними технологічними агрегатами // Інтелектуальні інформаційні технології: збірник тез повідомлень. Вінниця, 2014. С. 6–7.

17. Коряшкіна Л. С. Моделі й методи прийняття рішень: навч. посіб. Дніпро: ДНГУ, 2014. 300 с.

18. Daniel J. Power, Decision Support Systems. 2022. 251 p.

19. Коверга С. В. Моделі та методи прийняття рішень у сфері управління збалансованим розвитком промислових підприємств // Проблеми управління інноваційним розвитком. 2016. №1. С. 144–156.

20. Мічківський С. М, Прігунов О. В., Римар П. В. Системи та методи прийняття рішень: методичні вказівки. Вінниця: ДонНУ, 2019. 76 с.

21. Романченко І. С., Потьомкін М. М. Метод VIKOR-ядро та його використання для багатокритеріального порівняння альтернатив // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2015. № 3. С. 103–107.

22. Методи та моделі прийняття рішень в умовах багатокритеріальності та невизначеності: монографія / Петров Э. Г., Бринза Н. А., Колесник Л. В., Писклакова О. А. Харків: ХНУРЕ, 2013. 167 с.

23. Ладієва Л. Р. Оптимізація технологічних процесів: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 160 с.

24. Fakhrehosseini S. F. Selecting the optimal industrial investment by multi-criteria decision-making methods with emphasis on TOPSIS, VIKOR and COPRAS (Case Study of Guilan Province) // International Journal of Research in Industrial Engineering. 2020 Vol. 8(4), P. 312–324. URL: <https://doi.org/10.22105/riej.2020.216548.1117> (дата звернення 28.11.2023).

25. Beskorovainyi V., Kolesnyk L., Russkin V. Decision making support under conditions of incomplete consistency of expert advantages // Innovative integrated computer systems in strategic project management": Collective

monograph edited by I. Linde. European University Press. Riga: ISMA, 2022. P. 16–26. URL: <https://mmp-conf.org/documents/archive/monography2022.pdf> (дата звернення 18.11.2023 р.).

26. Beskorovainyi V. Combined method of ranking options in project decision support systems // *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2020 Vol. 4(14), P. 13–20.

27. Решетило В. П., Федотова Ю. В. Невизначеність та ризик: співвідношення понять та специфіка прийняття рішень. *Економіка та управління підприємствами*. 2020. Випуск №3 (77). С. 149–154.

28. Павлишенко, Б. М. Методи інтелектуального аналізу консолідованих даних для підтримки прийняття рішень. Львів: нац. ун-т ім. І. Франка, Харків: нац. ун-т радіоелектроніки, 2021. 407 с.

29. Nevludov I., Ponomaryova G., Miliutina S., Bortnikova V. MEMS accelerometers classification using machine-learning methods // XII International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, 20-23 April 2017, Lviv-Polyana, Ukraine. PP. 51–55.

30. Невлюдов И. Ш., Бортникова В. О. Визначення вагових коефіцієнтів параметрів МЭМС акселерометра // *Всеукраїнська науково-практична конференція молодих вчених «ТАК: телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології»*, 29-30 листопада 2017 р., Покровськ, 2017. С. 222–224.

31. Імангулова З. А. Об'єктно-орієнтоване моделювання складних систем: навч. посіб. Харків: ХНУРЕ, 2017. 28 с.

32. Цимбал О.М. Технології програмування: Visual C++. Харків: ХНУРЕ, 2016. 336 с.

33. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни "Технології програмування комп'ютерних систем" підготовки бакалавра, спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / ХНУРЕ; розроб. Цимбал О. М. Харків, 2017. 181 с. URL: <https://catalogue.nure.ua/document=219611> (дата звернення 12.12.2023).

34. Конспект лекцій з дисципліни «Бази даних» / Упоряд.: Мазурова О. О., Широкопетлева М. С. Харків: ХНУРЕ, 2017. 4 с.
35. Яскілка В. Я., Олійник М. З. Конспект лекцій з курсу «Охорона праці» / Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2016. 56 с.
36. Бадищук В. І., Чихіра І. В. Охорона праці. Конспект лекцій / Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя. Тернопіль. 2016. 103 с.