Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

Імітаційне моделювання технологічного процесу складання приладів з модульною конструкцією
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи КТРСм-22-1
Федосєєв Є. Г.
(прізвище, ініціали)
Спеціальності 151 Автоматизація та комп`ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма Комп`ютеризовані та робототехнічні системи
(повна назва освітньої програми)
Керівник проф. Андрусевич А. О.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР _____ Невлюдов І. Ш.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2024р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри КІТАР _____
(підпис)
«____»_____20____р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Студентові Федосєєву Євгену Геннадійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Імітаційне моделювання технологічного процесу складання приладів з модульною конструкцією
затверджена наказом по університету від "03"листопада 2023р. № 1288 Ст.
2. Термін подання студентом роботи "24" січня 2024р.
3. Вихідні дані до роботи 3.1 Радіоелектронні прилади з модульною конструкцією;
3.2 Технологічний процес складання радіоелектронних приладів;
3.3 Імітаційна модель загального процесу;
3.4 Моделювання роботи маніпулятора;
3.5 Оформлення текстової документації згідно ДСТУ 3008-2015.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 4.1 Вступ;
4.2 Аналіз імітаційного моделювання технологічного процесу складання;
4.3 Розробка структурної та функціональної схем технологічного процесу складання;
4.4 Розробка математичної моделі технологічного процесу складання;
4.5 Розробка системи імітаційного моделювання технологічного процесу складання;
4.6 Моделювання роботи маніпулятору;
4.7 Забезпечення безпечних умов праці при проведенні досліджень;
4.8 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 11 с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз імітаційного моделювання технологічного процесу складання	06.11 – 09.11.23	виконано
2	Розробка структурної та функціональної схем технологічного процесу складання	10.11 – 26.11.23	виконано
3	Розробка математичної моделі технологічного процесу складання	27.11 – 10.12.23	виконано
4	Розробка системи імітаційного моделювання технологічного процесу складання	11.12 – 30.12.23	виконано
5	Моделювання роботи маніпулятору	01.01 – 10.01.24	виконано
6	Забезпечення безпечних умов праці при проведенні досліджень	11.01 – 12.01.24	виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	13.01 – 15.01.24	виконано
8	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом Unicheck	16.01 – 18.01.24	виконано
9	Подання роботи на рецензію	19.01 – 21.01.24	виконано
10	Подання роботи на підпис зав. кафедри	22.01 – 23.01.24	виконано
11	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	24.01.24	виконано

Дата видачі завдання 06 листопада 2023р.

Студент _____ Федосєєв Є. Г.
(підпис)

Керівник роботи_____ проф. Андрусевич А. О.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 78 с., 26 рис., 2 дод., 14 джерел.

РАДІОЕЛЕКТРОННІ ПРИЛАДИ, МОДУЛЬНА КОНСТРУКЦІЯ, ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕС СКЛАДАННЯ, ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ, ПРОМИСЛОВИЙ МАНІПУЛЯТОР, РОБОТИЗОВАНЕ ВИРОБНИЦТВО.

Об'єкт досліджень – технологічний процес складання радіоелектронних приладів з модульною конструкцією у роботизованому виробництві.

Предмет дослідження – радіоелектронні прилади з модульною конструкцією.

Мета роботи – розробка та дослідження імітаційної моделі технологічного процесу складання радіоелектронних приладів з модульною конструкцією у роботизованому виробництві.

Проаналізовано конструкція модульних приладів та технологічний процес їх складання, методи імітаційного моделювання. Розроблено структурну та функціональні схеми зазначеного процесу, математичні моделі процесу та його основних структурних елементів.

На основі розроблених схем та моделей розроблено імітаційну модель технологічного процесу складання у середовищі Plant Simulation а також виконано дослідження її роботи. У середовищі Matlab із застосуванням додатка Robot Toolbox про імітована робот промислового маніпулятора, як одного з елементів технічного забезпечення технологічного процесу складання приладів з модульною конструкцією.

ABSTRACT

Explanatory note: 78 pp., 26 fig., 2 appendices, 14 sources.

RADIO ELECTRONIC DEVICES, MODULAR CONSTRUCTION, TECHNOLOGICAL ASSEMBLY PROCESS, SIMULATION MODEL, INDUSTRIAL MANIPULATOR, ROBOTIC PRODUCTION.

The object of research is the technological process of assembling radio-electronic devices with a modular design in robotic production.

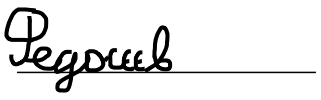
The subject of research is radio-electronic devices with a modular design.

The purpose of the work is to build and study a simulation model of the technological process of assembling radio-electronic devices with a modular design in robotic production.

The design of modular devices and the technological process of their assembly, simulation modeling methods are analyzed. Structural and functional schemes of the specified process, mathematical models of the process and its main structural elements have been developed.

On the basis of the developed schemes and models, a simulation model of the assembly technological process was developed in the Plant Simulation environment, as well as a study of its operation was carried out. In the Matlab environment using the Robot Toolbox application about a simulated industrial manipulator robot, as one of the elements of technical support for the technological process of assembling devices with a modular design.

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

«22» січня 2024 р.  Федосєєв Є. Г.

ЗМІСТ

Перелік скорочень 9
Вступ 10
1 Аналіз імітаційного моделювання технологічного процесу складання приладів з модульною конструкцією ……..... 12
1.1 Аналіз конструкції радіоелектронних приладів з модульною структурою 12
1.2 Аналіз технологічного процесу складання приладів з модульною конструкцією 17
1.3 Аналіз методів імітаційного моделювання технологічних процесів складання ……. 22
1.4 Постановка завдання на дослідження 25
2 Розробка структурної та функціональної схем технологічного процесу складання приладів з модульною конструкцією 27
2.1 Розробка структурної схеми технологічного процесу складання приладів з модульною конструкцією 27
2.2 Розробка функціональної схеми технологічного процесу складання приладів з модульною конструкцією 28
3 Розробка математичної моделі технологічного процесу складання приладів з модульною конструкцією 34
3.1 Розробка узагальненої математичної моделі технологічного процесу складання приладів з модульною конструкцією 34
3.2 Розробка параметричних моделей технологічного процесу складання та його елементів 35
3.3 Розробка математичної моделі системи керування технологічним процесом 38
3.4 Математична модель промислового маніпулятора, як об’єкту керування 40

4 Імітаційне моделювання технологічного процесу складання приладів з модульною конструкцією ..……..……. 47

4.1 Обґрунтування вибору середовища імітаційного моделювання … 47

4.2 Імітаційне моделювання технологічного процесу складання приладів з модульною конструкцією у середовищі Plant Simulation..... 51

4.3 Моделювання роботи маніпулятору у системі MatLab..... 61

4.4 Забезпечення безпечних умов праці у лабораторій при проведенні досліджень 71

Висновки 74

Перелік джерел посилання 76

Додаток А Апробація результатів досліджень …… 79

Додаток Б Код програми 86

Додаток В Демонстраційний матеріал..... 89

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АТНС – автоматична транспортно-накопичувальна система;

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;

ІМ – імітаційна модель;

КПО – коефіцієнт природної освітленості;

ПР – промисловий робот;

РП – радіоелектронний прилад;

СТЗ – система технічного зору;

ТО – технологічна операція;

ТП – технологічний процес;

ТПС – технологічний процес складання.

ВСТУП

В умовах сучасного виробництва радіоелектронних приладів (РП) різного призначення та різноманітних рішень їхньої технічної реалізації, що обумовлена величезним вибором пропозицій складальних елементів від провідних виробників, модульний підхід до реалізації їхньої конструкції та складальних процесів стає все більш актуальним. Такий підхід дозволяє досягати найбільшого рівня уніфікації, а також гнучкості виробництв.

Конструкція приладів зі структурою модульного (агрегатно-модульного) типу полягає у розподілі загальної цілісної системи приладів на функціональні підсистеми, які можна представляти складальними модулями (вузлами), кожен з яких може виступати як окремою складальною одиницею, так і по-різному технічно реалізовуватися.

Для застосування зазначених процесів, здебільшого, використовують універсальне обладнання (маніпулятори, конвеєри тощо), що сприяє їхньому автоматизуванню в умовах гнучких виробництв, проте розробка таких технологічних процесів (ТП) достатньо складна та витратна, з урахуванням відладки обладнання та корегуванням самого процесу в реальних умовах.

Побудова імітаційних моделей (ІМ) зазначених процесів дозволяє моделювати їхнє виконання в часі зі схематичним завданням структурних елементів процесу, а також візуалізацією елементів відповідної виробничої ділянки, до того ж, отримувати результати моделювання в графічному вигляді. Це дає можливість наочно уявити отримане рішення щодо організації зазначених процесів та оцінити їхню ефективність, при цьому мінімілізувавши витрати коштів та часу для їхньої реалізації.

Об'єкт досліджень – технологічний процес складання радіоелектронних приладів з модульною конструкцією у роботизованому виробництві.

Предмет дослідження – радіоелектронні прилади з модульною конструкцією.

Мета роботи – розробка та дослідження імітаційної моделі технологічного процесу складання радіоелектронних приладів з модульною конструкцією у роботизованому виробництві.

Для досягнення поставленої мети було сформовано такі задачі:

– проаналізувати конструкції РП з модульною структурою;

– проаналізувати технологічний процес складання (ТПС) приладів із модульною конструкцією;

– провести аналіз методів імітаційного моделювання ТПС, а також визначити найбільш прийнятний для нашого випадку;

– розробити структурну та функціональну схеми зазначеного ТП в рамках автоматизованої виробничої дільниці;

– опрацювати математичну модель ТПС приладів з модульною конструкцією;

– розробити відповідну ІМ;

– провести експериментальні дослідження за допомогою ІМ та оцінити отримані результати.

Работа виконується згідно з [1-4], як складова наукових досліджень, які здійснюються на кафедрі КІТАР Харківського національного університету радіоелектроніки, результати дослідження опубліковані у [5].

1 АНАЛІЗ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СКЛАДАННЯ ПРИЛАДІВ З МОДУЛЬНОЮ КОНСТРУКЦІЄЮ

1.1 Аналіз конструкції радіоелектронних приладів з модульною структурою

РП називають виріб і/або його складові частини, за основу функціонування яких взято принципи радіотехніки та електроніки.

РП можна класифікувати за такими ознаками:

– функціональна складність;

– конструктивна складність;

– тип;

– природа використаних хвильових процесів;

– характер розв’язуваних завдань;

– умови розміщення.

За ступенем функціональної складності визначають такі рівні розукрупнення РП: радіоелектронні системи та комплекси, пристрої, вузли.

Класифікацію за конструктивною складністю РП диференціюють на засоби в модульному або немодульному виконанні. Рівні розукрупнення РП у немодульному виконанні за конструктивною складністю містять: шафу, блок та осередок. Рівні розукрупнення радіоелектронних засобів у модульному виконанні за конструктивною складністю містять: електронний модуль; уніфікований електронний модуль; стандартний електронний модуль; спеціалізований стандартний електронний модуль, а також модулі 3, 2, 1-го та нульового рівня.

Виокремлюють три основні типи РП: аналогові, цифрові та аналого-цифрові. До аналогових належать пристрої, інформацію про роботу яких

закладено до різних характеристик сигналу – форми, спектра тощо (підсилювачі, генератори, аналогові фільтри, перетворювачі форми і параметрів сигналу тощо).

До цифрових належать пристрої, робочі сигнали яких закодовані як числа, як правило, подаються в бінарному коді у вигляді чисел 0 і 1 (тригери, лічильники, регістри тощо).

На сьогодні, з розвитком цифрових методів обробки аналогової інформації, особливої актуальності набуває клас аналого-цифрових пристроїв, в яких відбуваються перетворення різного роду аналог-код, код-аналог.

У залежності від природи хвильових процесів, які використовуються, РП можуть бути як радіотехнічними, оптичними, так й акустичними та комбінованими.

У залежності від характеру розв’язуваних завдань виділяють інформаційні та енергетичні радіоелектронні комплекси, системи та пристрої.

Умови розміщення апаратури істотно позначаються на зовнішньому вигляді та функціонуванні приладів. За характером розміщення виокремлюють однопозиційні та багатопозиційні РП.

За місцем розміщення апаратури виділяють наземні та надводні, повітряні та космічні, підводні та підземні, а також комбіновані РП.

За ступенем транспортабельності РП поділяються на переносні (портативні), переносні (лабораторні, побутові тощо), а також стаціонарні. Прилади, що встановлюються на мобільних об'єктах, і стаціонарні.

До того ж, РП класифікують за умовами використання чи конструктивними ознаками, іншими словами, стійкістю до широкого діапазону перепадів температур, до вібрації тощо. Зі свого боку, це може бути окремою важливою вимогою [1-3].

Конструкція приладів, які мають структуру модульного (вузлового) типу розподіляється загальною цілісною системою приладів на

функціональні підсистеми, що, так само, можуть бути представлені складальними модулями (вузлами), кожен з яких може виступати окремою складальною одиницею та мати різну технічну реалізацію.

Отже, відповідно до функціонального призначення виокремимо такі узагальнені структурні підсистеми, що можуть входити до конструкції РП різноманітного призначення з модульною структурою, та містити функціонально-відповідні групи модулів, які можуть різнитись в залежності від конкретного приладу:

– корпусна підсистема;

– інформаційно-керувальна підсистема;

– виконавча підсистема;

– підсистема переміщення;

– підсистема з’єднань [5].

Корпусна підсистема містить модулі, що можна представити як джерела енергії різного типу, ємності для зберігання об'єктів, які накопичуються в процесі робіт, і, безпосередньо, самим корпусом приладу. На рисунку 1.1 наведено приклади елементів корпусної підсистеми.

а б

а – акумулятор; б – корпус

Рисунок 1.1 – Приклади елементів корпусної підсистеми

Інформаційно-керувальну підсистему можна представити такими структурними модулями, як власне плата керування, сенсорні модулі, що

дозволяють отримувати інформацію з навколишнього середовища тощо. До сенсорних модулів належать засоби технічного зору, визначення температури та вологості тощо, за основу яких взято датчики різного типу. На рисунку 1.2. наведено приклад елементів зазначеної підсистеми.

а

б

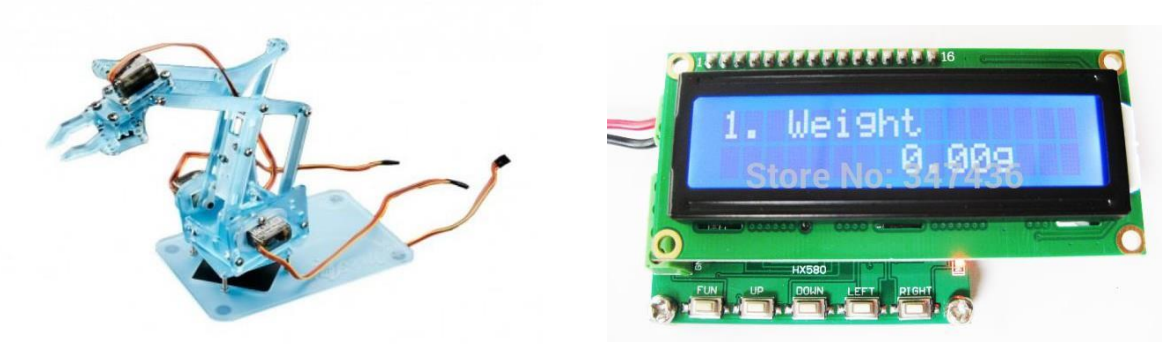
а – камера; б – плата Arduino

Рисунок 1.2 – Приклади елементів інформаційно-керувальної підсистеми

Виконавча підсистема залежить як від особливостей, так і функціонального призначення приладу, до того ж, може бути представлена найбільш різноманітним діапазоном технічного забезпечення.

Так, деякі типи роботів, які теж можна вважати РП, можна представити через маніпуляційний модуль, для зразків побутових приладів – акустичним модулем, або модулем відображення інформації (дисплеєм), для вимірювальних приладів – чуттєвими елементами, а також відповідними шкалами відображення тощо.

Крім того, до неї належать такі виконавчі елементи, як двигуни, за рахунок їх наявності у приладі. На рисунку 1.3. наведено деякі приклади елементів виконавчої підсистеми.



а б

а – маніпулятор для робота; б – дисплей

Рисунок 1.3 – Приклади елементів виконавчої підсистеми

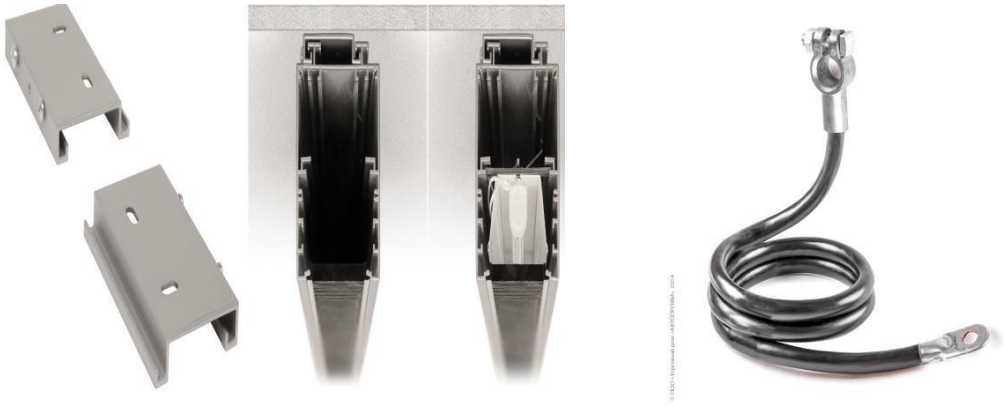
Підсистема переміщення міститься тільки у приладах мобільного типу та може визначатися колесами, гусеницями, крокуючими системами пересування гуманоїдного типу, адсорбційними (вакуумними) апаратами, гвинтами (квадрокоптери) тощо. На рисунку 1.4 наведено деякі приклади елементів підсистеми переміщення.

а б

а – колеса; б – гвинт для квадрокоптера

Рисунок 1.4 – Приклади елементів підсистеми переміщення

Підсистема з’єднань дозволяє під’єднувати структурні модулі до цілісних конструкцій приладу. Вона репрезентована різноманітними типами роз’ємів та з’єднувачів, як механічного, так і електричного типу. На рисунку 1.5 наведено приклад елементів цієї підсистеми.



а б

а – кріплення типу паз; б – з’єднувальний дріт для акумуляторів

Рисунок 1.5 – Приклади елементів підсистеми з’єднань

1.2 Аналіз технологічного процесу складання приладів з модульною конструкцією

Складанням називається процес утворення роз’ємних або нероз'ємних з'єднань складових частин приладів. Складання – це частина виробничого процесу, що полягає в з'єднанні готових деталей, вузлів й агрегатів за певною послідовністю, в результаті чого отримують готовий РП, який повністю відповідає встановленим технічним вимогам [5].

Хід складання приладів, які наділені модульною конструкцією, можливо віднести до загального складання, тобто процесу складання, об'єктом якого є виріб в цілому.

Враховуючи послідовності складання, можна виділити три види: послідовне; паралельне та паралельно-послідовне (змішане) складання. [5].

Послідовне складання засновано на складанні виробу відповідно до якого передбачені складальні операції, що виконуються одна за одною.

Паралельне складання полягає у складанні виробу, відповідно до якого декілька складальних операцій виконуються одночасно.

У разі змішаного складання частина складальних операцій виконується одночасно, а решта-послідовно [6].

ТП складання приладів з модульною конструкцією характеризується сукупністю дій, які пов'язані зі з'єднанням у певних технічних та економічних доцільних послідовностях модулів у готовий прилад, який повністю відповідає вимогам креслення, а також технічним. ТПС пов'язаний із утворенням роз'ємних та нероз'ємних з'єднань складових частин виробів.

Виокремлюють три типи технологічних процесів: одиничний, типовий та груповий.

Одиничний технологічний процес – це технологічний процес з виготовлення або ремонту приладів одного найменування, типорозміру, що виконується незалежно від типу виробництва.

Типовий ТП – це процес виготовлення групи виробів, які характеризуються загальними конструктивними та технологічними ознаками.

Груповий ТП – це технологічний процес виготовлення групи виробів з різними конструктивними, але при цьому зі спільними технологічними ознаками [6,7].

Технологічним режимом називають сукупність значень параметрів технологічного процесу в певному інтервалі часу.

ТПС збірки розподіляють на операції, що є закінченими частинами технологічного процесу.

Складальна операція у наведених вище умовах – це технологічна операція щодо встановлення модулю до цілісної конструкції виробу, яка є закінченою частиною ТПС й виконується на одному робочому місці одним

або декількома робітниками. Операція складання охоплює всі дії обладнання, а також робочих над одним або кількома об'єктами виробництва, що потребують збирання.

Операція – це частина ТПС. Встановлення змісту, а також послідовності виконання операцій входить до завдання розробки ТПС. Аналізуючи складальні операції, визначають трудомісткість процесу складання, кількість слюсарів-складальників та матеріально-технічне забезпечення ТПС (складальне обладнання, оснащення, інструмент).

ТПС приладів, в основному, складається з таких операцій:

– слюсарні;

– складальні;

– контрольні.

ТО складання містять окремі елементи, зокрема, як технологічні, так і допоміжні переходи, робочі й допоміжні ходи, прийоми, а також позиції.

Технологічний перехід – це закінчена частина операції складання, що характеризується постійністю використаного інструмента та поверхонь (роз’ємів), які з'єднуються шляхом складання в умовах незмінного режиму.

Допоміжний перехід – це закінчена частина технологічної операції, обґрунтована діями слюсаря-збирача й обладнання, що не супроводжуються зміною форми, розмірів та якості поверхні, але є необхідними для виконання технологічного переходу.

Переходи, як і операції, відповідно, можуть виконуватися послідовно, паралельно та паралельно-послідовно.

Установка – це частина технологічної операції зборки, що виконується при незмінному закріпленні приладу, над яким проводиться процес збирання.

Під час зміни положення приладу в процесі виконання операції складання остання може залучати кілька позицій або складатися з декількох установок.

Позиція – це частина операції, що виконується за умови незмінного положення складального обладнання. У позиції прилад міцно закріплюється по відношенню до нерухомої частини обладнання для виконання певної складальної роботи. Якщо положення виробу щодо обладнання змінюється, то виріб в даному разі займає різні позиції.

Робочий хід – це закінчена частина технологічного переходу, що характеризується одноразовим переміщенням інструмента відносно виробу, що збирається, та безпосередньо пов'язаного з виконанням встановленого завдання.

Допоміжний хід визначається одноразовим переміщенням складального інструмента щодо виробу, не супроводжуваного змінами, що були перераховані раніше, але необхідного для реалізації робочого ходу.

У залежності від ступеня механізації й автоматизації виробництва, його типу застосовують такі види складання: ручне, механізоване, автоматизоване й автоматичне [5-8].

Ручне складання полягає у складанні приладів або їхніх складових частин, тобто за допомогою ручного методу виконання технологічного процесу. Частка ручного складання може досягати 80% від усього обсягу складальних робіт. В якійсь мірі це пов'язано з нетехнологічними конструкціями виробів, незначним масштабом випуску (серійність) багатьох виробів тощо.

Механізоване складання – це складання приладів, яке здійснюється із залученням механізованого методу виконання технологічного процесу. Механізація є першим кроком, а також необхідним ступенем автоматизації процесу складання. Механізоване складання реалізується шляхом створення засобів механізації, застосування транспортних систем безперервної або періодичної дії тощо.

Автоматизоване складання – це складання приладів, яке базується на автоматизованому методі виконання технологічного процесу. Автоматизоване складання є ефективним лише під час випуску, що

дозволяє повністю завантажити автоматичне обладнання. На сьогодні розроблено наукові основи автоматизації складальних робіт, проте застосування засобів автоматизації складання необхідно економічно обґрунтувати в умовах заданого обсягу випуску, а також конкретного складального виробництва.

Автоматичне складання – це складання приладу, що реалізується через автоматичний метод виконання технологічного процесу [5-8].

На рисунку 1.6 наведено приклад організації автоматизованої складальної лінії.

Рисунок 1.6 – Приклад організації автоматизованої складальної лінії

У сучасних умовах виробництв приладів, зокрема, з модульною конструкцією багатосерійного та масового типу доцільно використовувати саме автоматизоване та автоматичне складання, що реалізується шляхом застосування конвеєрних ліній зі встановленими накопичувачами, промислових роботів (ПР) та допоміжних транспортно-складських систем.

У деяких випадках навіть за умови автоматизації виробництва під час виконання процесів складання комбінують частково шляхом автоматизації, частково (здебільшого саме складальні операції) – вручну.

Даний підхід дозволяє досягти достатньої гнучкості в умовах як одиничних, так і дрібносерійних виробництв.

1.3 Аналіз методів імітаційного моделювання технологічних процесів складання

Імітаційне моделювання (ситуаційне моделювання) – це метод дослідження, в якому система, що опрацьовується, замінюється моделлю, що з достатньою точністю описує реальну систему (побудована модель описує процеси так, як вони проходили б насправді), де проводяться експерименти, з метою отримання інформації про цю систему. Таку модель можна застосовувати в часі для одного, а також багатьох випробувань. До того ж, результати визначатимуться випадковим характером процесів. Використовуючи такі дані, можна отримати достатньо стійку статистику. Експериментування з моделлю називається імітація, тобто збагнення суті явища, не вдаючись до експериментів над реальним об'єктом.

ІМ вважається окремим випадком математичного моделювання. Існує клас об'єктів, для яких з різних причин не було розроблено аналітичних моделей, або не розроблено методів рішення отриманої моделі. У даному разі аналітична модель замінюється імітатором або ІМ.

ІМ деколи називають отримання приватних чисельних рішень сформульованої задачі, заснованих на аналітичних рішеннях або за допомогою чисельних методів [9,10].

Імітаційна модель – це логіко-математичний опис об'єкта, що можна використовувати для експериментування на комп'ютері з метою проєктування, аналізу та оцінки функціонування об'єкта, яким, у даному прикладі, виступає технологічний процес складання приладів з модульною конструкцією.

Використання ІМ доречно у таких випадках:

– коли занадто дорого або неможливо здійснювати експерименти на реальному об'єкті;

– коли неможливо побудувати аналітичну модель: у системі є час, причинні зв'язки, наслідок, нелінійності, стохастичні (випадкові) змінні;

– потрібно зімітувати поведінку системи в часі.

Метою ІМ є відтворення поведінки досліджуваної системи, що базується на результатах аналізу найбільш суттєвих взаємозв'язків між її елементами або, інакше кажучи, – розробці симулятора досліджуваної предметної області для проведення різних експериментів [9].

Розрізняють декілька видів імітаційного моделювання:

– дискретно-подієве моделювання – це такий підхід до моделювання, що пропонує абстрагуватися від безперервного потоку подій, а розглядати тільки основні події, що моделюються, на кшталт, «очікування», «обробка замовлення», «рух з вантажем», «розвантаження» тощо. Дискретно-подієве моделювання найбільш розвинене, а, отже, має величезну сферу додатків: від логістики та систем масового обслуговування до виробничих та транспортних систем. Даний вид моделювання заснований Джеффрі Гордоном у 1960-х роках та найбільше підходить для моделювання виробничих процесів;

– системна динаміка – це парадигма моделювання, в якій для досліджуваної системи будують графічні діаграми причинних зв'язків, а також глобальних впливів одних параметрів на інші в часі. Після чого модель, створена на основі цих діаграм, імітується на комп'ютері. По суті, такий вид моделювання більше за інші парадигми допомагає зрозуміти суть того, що відбувається, виявити причинно-наслідкові зв'язки між об'єктами й явищами. Метод системної динаміки заснований Джеєм Форрестером у 1950 роках. За його допомогою будують моделі бізнес-процесів, виробництва, моделі розвитку міста, динаміки популяції, екології та розвитку епідемії;

– агентне моделювання є відносно новим (1990-ті-2000-ті рр.). Це напрямок в ІМ, що використовується для дослідження децентралізованих систем. Їхня динаміка функціонування визначається не глобальними правилами та законами (як в інших парадигмах моделювання), а навпаки, коли ці глобальні правила та закони – це результат індивідуальної активності членів групи. Мета агентних моделей полягає в отриманні уявлення про ці глобальні правила, загалом поведінку системи, виходячи з припущень про індивідуальну, приватну поведінку її окремих активних об'єктів, а також взаємодії цих об'єктів у системі. Агент – це якась сутність, яка володіє активністю, автономною поведінкою, може приймати рішення відповідно до деяких наборів правил, взаємодіяти з оточенням, а також самостійно змінюватися [5-8].

Основними методами імітаційного моделювання є: аналітичний, метод статичного моделювання та комбінований (аналітико-статистичний).

Аналітичний метод використовують для імітації процесів в основному для малих і простих систем, де чинник випадковості відсутній. Наприклад, коли процес їхнього функціонування описаний диференціальними або інтегродиференціальним рівняннями. Метод названо умовно, оскільки він об'єднує можливості імітації процесу, модель якого подана у вигляді аналітично замкнутого рішення, або рішення, отриманого методами обчислювальної математики.

Метод статистичного моделювання спочатку розвивався як метод статистичних випробувань (Монте-Карло). Він є чисельним методом, який полягає в отриманні оцінок імовірнісних характеристик, які збігаються з розв'язанням аналітичних задач (наприклад, із розв'язанням рівнянь й обчисленням певного інтеграла). Надалі цей метод застосовували для імітації процесів, які відбуваються в системах, всередині яких наявне джерело випадковості або що схильні до випадкових впливів, в результаті чого отримав назву методу статистичного моделювання.

Комбінований метод (аналітико-статистичний) дозволяє об'єднувати переваги аналітичного та статистичного методів моделювання. Його використовують під час розробки моделі, що складається з різних модулів, які представляють набір як статистичних, так і аналітичних моделей, та взаємодіють як єдине ціле. До того ж, до набору модулів можуть входити не тільки модулі, що відповідні динамічним моделям, але і модулі, що відповідні статичним математичним моделям [8].

Імітаційне моделювання реалізується декількома етапами:

– формулюванням мети моделювання;

– побудовою концептуальної моделі (математичної моделі);

– вибором апарату моделювання (система, мова програмування тощо);

– плануванням експерименту;

– виконанням експерименту;

– обробкою, аналізом й інтерпретацією даних експерименту [8].

Розробка ІМ надає можливості щодо візуалізації процесу роботи системи в часі, схематичного завдання її структури та отриманні результатів у графічному вигляді. Це дозволяє уявити наочно отримане рішення й оцінити його ефективність, мінімізувавши витрати коштів та часу для його реалізації.

1.4 Постановка завдання на дослідження

Проведений аналіз модульної структури приладів та ТП їхнього складання виявив, що реалізація та організація зазначеного процесу в умовах сучасних автоматизованих виробництв потребує значних витрат та зусиль. Отримання попереднього прогнозування роботи обраного рішення щодо реалізації зазначених технологічних процесів дозволить мінімізувати витрати часу та коштів шляхом видалення більшості можливих похибок.

Отримання попереднього прогнозу стає можливим завдяки моделюванню технологічних процесів складання. Це можливо досягнути шляхом побудови ІМ процесу та його складових, що також дозволить підвищити загальну ефективність обраного рішення його реалізацій та провести моделювання процесу з урахуванням різноманітних можливих умов його протікання. Це і є метою даної магістерської роботи. Для досягнення мети необхідно побудувати математичні моделі ТПС приладів з модульною конструкцією, вибрати середовище моделювання та побудувати у ньому на основі розроблених моделей ІМ реалізації процесу: ІМ автоматизованої складальної ділянки виробництва, проведення експерименту й оцінка його результатів.

2 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ ТА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СКЛАДАННЯ ПРИЛАДІВ З МОДУЛЬНОЮ КОНСТРУКЦІЄЮ

2.1 Розробка структурної схеми технологічного процесу складання приладів з модульною конструкцією

ТП складання РП з модульною конструкцією, як частина виробничого процесу, є пов’язаним безпосередньо із взаємною орієнтацією, послідовним з’єднанням та фіксацією складальних одиниць з метою отримання готового приладу, що задовольняє технічним вимогам. Крім того, він має ієрархічну структуру, складається з основних та допоміжних технологічних операцій (ТО), технологічних та допоміжних переходів, робочих та допоміжних ходів.

Роботи, що виконуються в рамках ТП, можна поділити на попередні, підготовчі, власне складальні, допоміжні та післяскладальні.

До попередніх операцій належать операції, що пов’язані з дестелажуванням модулів, їхнім розпакуванням (за необхідності), транспортуванням тощо.

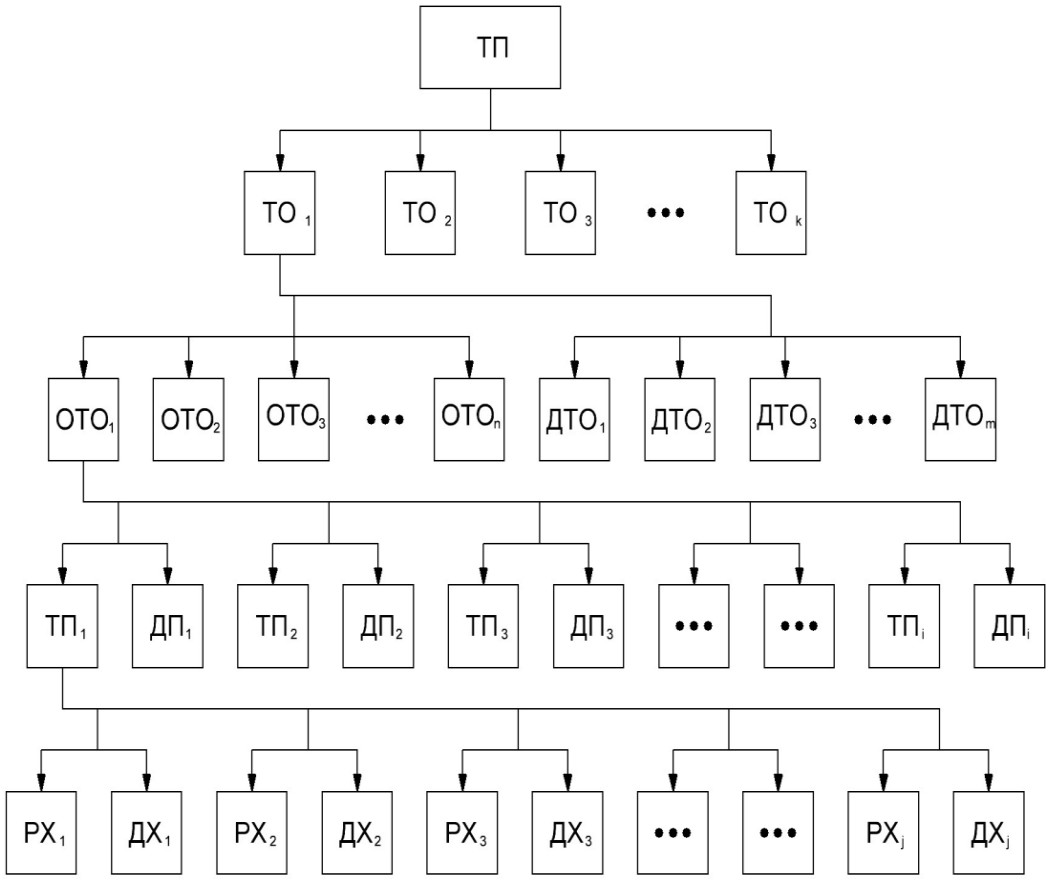
До підготовчих – додаткова обробка (за необхідністю), сортування, комплектування, вхідний контроль, укладка до тар (накопичувачів) тощо.

Складальні операції реалізують відтворення міжмодульних (за необхідністю внутрішньомодульних) з’єднань та закріплення модулів у загальній конструкції приладу.

До допоміжних – загрузка складових модулів та обладнання, їхня відносна орієнтація, контроль, міжопераційне транспортування.

До післяскладальних належать кінцевий контроль, регулювання, пакування, облік тощо.

Розроблену структурну схему ТП складання приладів з модульною конструкцією наведено на рисунку 2.1.



ТО – технологічна операція; ОТО – основна ТО; ДТО – допоміжна ТО; ТП – технологічний перехід; ДП – допоміжний перехід; РХ – робочий хід; ДХ – допоміжний хід

Рисунок 2.1 – Структурна схема технологічного процесу складання

Загальні ТО можливо розглядати як такі, що забезпечують установку відповідного модуля до загальної конструкції виробу. Такі основні ТО забезпечують втілення одного міжмодульного з’єднання. Допоміжні, здебільшого, забезпечують переміщення модулів, необхідний контроль тощо. Технологічні та допоміжні переходи, робочий та допоміжний хід функціонують як окремі закінчені частини ТО та переходи відповідно [8].

2.2 Розробка функціональної схеми технологічного процесу складання приладів з модульною конструкцією

2.2.1 Розробка узагальненої функціональної схеми технологічного процесу складання приладів з модульною конструкцією

ТП складання приладів з модульною конструкцією з точки зору його функціональних елементів – це складна система, що містить наступні основні елементи:

– об’єкт складання;

– виконавче обладнання;

– засоби спостереження;

– систему керування.

Під об’єктом складання мається на увазі сам прилад у його поточних станах, які змінюються з часом протягом виконання процесу.

Основне виконавче обладнання, що використовують для реалізації вказаних процесів, – це автоматичні конвеєри, здебільшого стручкові, а також промислові роботи-маніпулятори (якщо власне складальні роботи теж є автоматизованими).

До допоміжного обладнання на сучасних підприємствах належать автоматичні транспортно-накопичувальні системи (АТНС), тобто сукупність автоматичних транспортних систем та складів. У накопичувачах, які розташовані біля головного конвеєра у зоні доступу промислового робота (чи робітника), розміщено складові модулі, саме з яких і збирається готовий прилад. Завантаження модулів реалізується за допомогою технічних засобів АНТС, що обладнані допоміжними конвеєрами та ПР, транспортними роботами, пристроями пневмо- і гідротранспорту, поворотно-координатними столами, підйомниками, вібробункерами, перевантажувальними візками, автоматичними складами тощо [6]. На рисунку 2.2 наведено приклади деякого виконавчого обладнання.

а б

в

а – підйомно-транспортний робот; б – ПР; в – передаточний візок

Рисунок 2.2 – Приклади технічних засобів АНТС

Вантажопотоки подачі модулів до накопичувачів поділяються на безперервні та дискретні. Вони, крім того, можуть бути відгалуженими та прямоструминними, а також зворотними чи володіють тими й іншими ознаками, що залежать від конкретних особливостей підприємства та складальної ділянки [8].

До засобів спостереження належать системи технічного зору (СТЗ), за допомогою яких, здебільшого, здійснюють адаптивне керування обладнанням у заданих умовах, та різноманітні датчики та засоби, що дозволяють відстежувати стан протікання процесу протягом часу, контроль за якістю модулів, які надходять до накопичувачів, їхню кількість та контроль готових приладів.

Система керування технологічним процесом реалізується через функцію обробки даних від засобів спостереження та керування

виконавчим обладнанням. Крім того, вона має враховувати залишки на складі, надходження бракованих модулів та виробів тощо. З огляду на технічну реалізацію зазвичай це виконує ЕОМ чи програмовано-логічний контролер.

Відповідно до зазначеного вище розроблена узагальнена функціональна схема технологічного процесу має такий вигляд (рисунок 2.3).

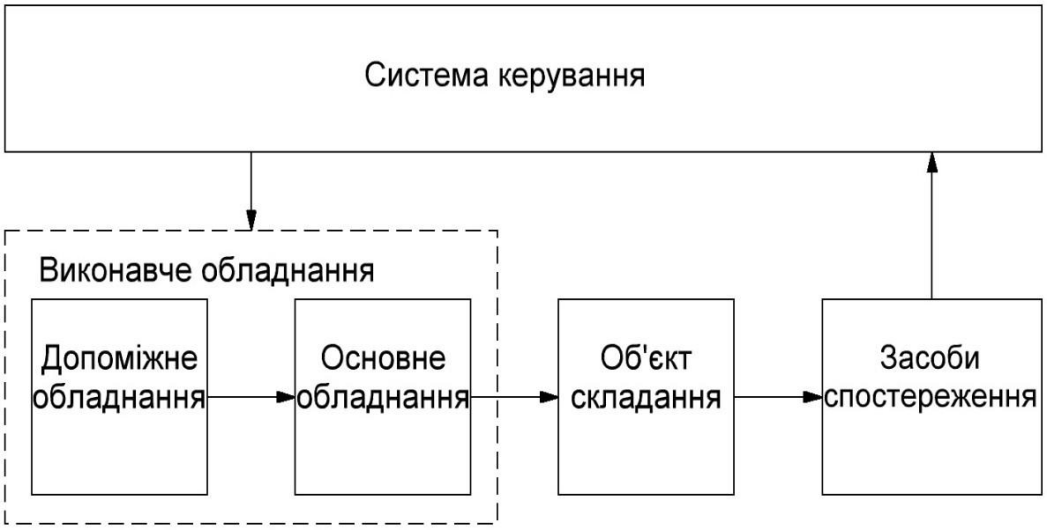


Рисунок 2.3 – Узагальнена функціональна схема технологічного процесу складання приладів з модульною конструкцією

2.2.2 Розробка функціональної схеми технологічного процесу складання приладів з модульною конструкцією в умовах автоматизованої виробничої дільниці

На основі розробленої узагальненої функціональної схеми ТП складання приладів з модульною конструкцією із зазначенням принципів організації вказаних процесів та можливої технічної реалізації його складових було розроблено функціональну схему (рисунок 2.4), яка дозволяє більш детально відобразити зв’язки між елементами процесу в цілісній системі автоматизованого виробництва, зокрема, на конкретній автоматизованій виробничій дільниці. Реалізований підхід до розробки

схеми дозволяє застосувати її як під час повної автоматизації процесу, так і часткової (складальні операції виконуються за допомогою залучення людини).

За умови повної автоматизації процесу згідно з розробленою функціональною схемою в зоні виконання складальних операцій розташовано основний конвеєр із накопичувачами, ПР, а також засоби спостереження. Цей блок є центральним у функціональній системі реалізації ТП в межах виробничої дільниці. У разі часткової автоматизації робота ПР виконується людиною. З цього блоку, після етапу візуального контролю, що реалізується за рахунок СТЗ, до складу готових приладів надходить продукція вже у розсортованому вигляді (брак / не брак).

Зі складу модулів до блоку «складання» надходять модулі та сортуються за аналогією до готових виробів, а саме шляхом візуального контролю. Це дає можливість відсіювати пошкоджені під час транспортування до накопичувачів модулі (основний вхідний контроль вони проходять на інших ділянках перед потраплянням на склад). Браковані модулі повертаються зворотно до складу та замінюються на якісні додатковим потоком.

Система керування аналізує поточний стан об’єкта складання та наповненість накопичувачів шляхом отримання інформації через засоби спостереження. До того ж, вона обробляє інформацію, що надходить зі складу, зокрема, інформацію про кількість модулів, які залишились, чи повернулись з блоку складання, кількість готових приладів (бракованих та якісних), а також відповідність отриманої інформації до виробничого замовлення, яке надходить на складальну дільницю [8].

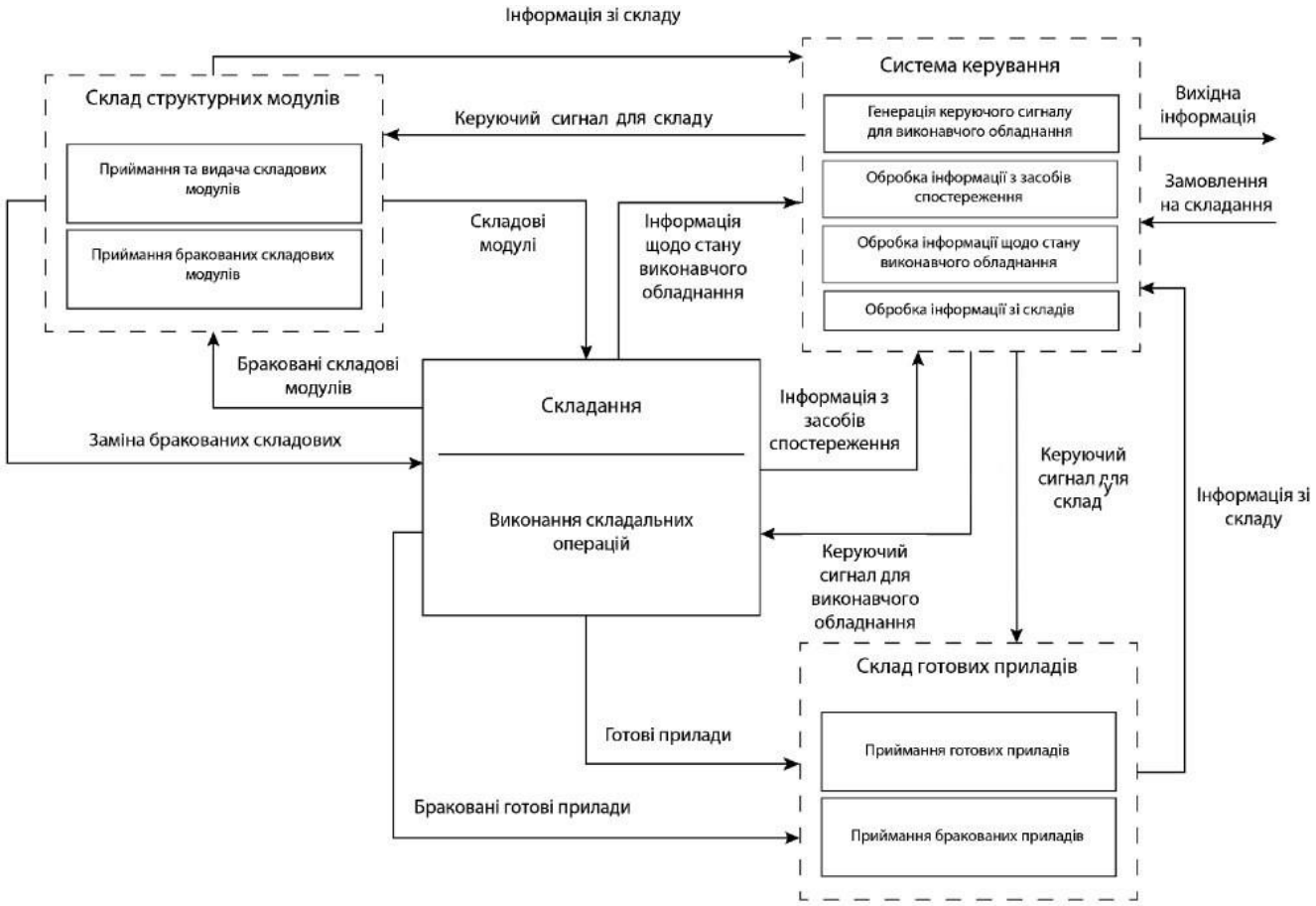


Рисунок 2.4 – Функціональна схема технологічного процесу складання приладів з модульною конструкцією в межах автоматизованої виробничої дільниці

Крім того, система аналізує поточний стан виконавчого обладнання та може попередити його збої, а також визначити втрату працездатності дільниці.

Аналізуючи отриману інформацію, система генерує сигнал керування для обладнання, а також може надавати інформацію щодо протікання технологічного процесу, виконання норм, загальну продуктивність дільниці, іншим підрозділам виробництва тощо. Переміщення складових модулів та готових виробів здійснюється засобами АТНС.

3 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СКЛАДАННЯ ПРИЛАДІВ З МОДУЛЬНОЮ КОНСТРУКЦІЄЮ

3.1 Розробка математичної моделі технологічного процесу складання приладів з модульною конструкцією

Математична модель будь-якого процесу чи явища повинна бути адекватною, володіти всіма властивостями реального об’єкта чи процесу. З точки зору математичного моделювання технологічних процесів складання, згідно з розробленими структурною та функціональною схемами, модель має бути наділеною властивостями власне об’єкта складання, засобами спостереження, виконавчим обладнанням, а також деякими елементами системи керування.

В узагальненому вигляді модель ТП складання відповідає поточній зміні стану об’єкта складання (конструкції приладу) від залучення першого модулю до кінцевого завершення складання конструкції приладу завдяки реалізації між модульних з’єднань:

$$S_0 \xrightarrow{W_1} S_1 \xrightarrow{W_2} \dots \xrightarrow{W_{n-1}} S_{n-1} \xrightarrow{W_n} S_G, \qquad (3.1)$$

де S_0 – початковий стан виробничої ділянки, що відповідає готовності загального обладнання до початку реалізації процесу;

$S_1 \dots S_{n-1}$ – поточні стани об’єкту складання, що забезпечуються відповідними загальним ТО;

S_G – кінцевий стан об’єкту складання, що відповідає технічному завданні на виріб;

$W_1 \dots W_n$ – шляхи досягнення відповідного стану об’єкт складання.

Початковий S_0 стан автоматизованої виробничої ділянки характеризується поточним станом обладнання, наповненістю накопичувачів та інше, що відповідає необхідним вимогам для виконання складальних операцій зазначеної конструкції.

Поточні стани об'єкту складання $S_1 \dots S_{n-1}$ характеризуються параметрами, приналежними відповідним складовим модулям, які є встановленими у загальній конструкції приладу, та можуть бути записані у вигляді параметричної моделі, відповідної зазначеному стану конструкції.

Кінцевий стан об'єкту складання S_G характеризується відповідністю параметрів об'єкту складання до параметрів конструкції, які обмежені технічним завданням на виріб.

Шляхи досягнення відповідного стану об'єкту складання $W_1 \dots W_n$ характеризуються параметрами стану обладнання та його переміщення протягом часу, що відповідають реалізації зазначеної ТО.

Всі елементи розробленої моделі технологічного процесу залежать від часу, відповідають параметрам його елементів та можуть бути виражені з допомогою відповідних параметричних моделей.

3.2 Розробка параметричних моделей технологічного процесу складання та його елементів

Параметрична модель технологічного процесу змінюється в кожен момент часу володіє визначеними параметрами кожного з його елементів. В узагальненому вигляді вона може бути описана, як сукупність параметрів, притаманних кожній з його функціональних підсистем:

$$M_{ТП} = \left\{ P_{OC}, P_{BO}, P_k \right. \quad , \tag{3.2}$$

де P_{OC} – параметри об'єкту складання;

P_{BO} – параметри виконавчого обладнання;

P_k – параметри керування, що включають до себе параметри засобів спостереження $P_{ЗС}$ та параметри самої системи керування $P_{СК}$:

$$P_k = \{P_{ЗС}, P_{СК}\}. \quad (3.3)$$

Параметри засобів спостереження можуть бути описані типами самих засобів та їх характеристиками.

Параметрична модель об'єкту складання в свою чергу може бути описана як сукупність параметричних описів, притаманних кожній з підсистем конструкції, що реалізуються відповідними складовими модулями:

$$P_{OC} = \{K, IK, V, T, Z\}, \quad (3.4)$$

де K – параметри, що притаманні модулям корпусної підсистеми;

IK – параметри, що притаманні модулям інформаційно-керуючої підсистеми;

V – параметри, що притаманні модулям виконавчої підсистеми;

T – параметри, що притаманні модулям підсистеми переміщення;

Z – параметри, що притаманні модулям підсистеми з'єднань.

До параметрів, що притаманні модулям підсистем можливо віднести параметри їх розміру, ваги, умови експлуатації, параметри живлення, функціональні параметри тощо.

Параметрична модель виконавчого обладнання також може бути описана параметрами, притаманними одиницям обладнання, що задіяні у виконанні ТП складання:

$$P_{BO} = \{Konv, Pr, ATNS\}, \quad (3.5)$$

де $Konv$ – параметри конвеєра;

Pr – параметри ПР (у випадку часткової автоматизації не входять до складу моделі);

$ATNS$ – параметри АТНС.

Параметри АТНС можуть враховувати кількість задіяних візків n_v, їх вантажопідйомність G_v та швидкість переміщення v_v, параметри автоматичних складів – кількість функціональних комірок n_k та їх об'єм V_k, вантажопідйомність G_k та тип переміщувача T_p, кількість n_{nk} та об'єм накопичувачів V_{nk}, їх ємність e_{nk}:

$$ATNS = \left\{n_v, G_v, v_v, n_k, V_k, G_k, T_p, n_{nk}, V_{nk}, e_{nk}\right\}. \quad (3.6)$$

Наявність АТНС залежить від загального рівня автоматизації виробництва та оснащення відповідної ділянки.

В деяких випадках більшість елементів АТНС можуть взагалі бути відсутні, а подача модулів до накопичувачів реалізуватись навіть ручним шляхом, чи із застосуванням додаткових конвеєрів.

Основними параметрами, що характеризує стан конвеєра є його швидкість v_{konv}, його висота h, довжин стрічки l та її ширина b:

$$Konv = \left\{v_{konv}, h, l, b\right\}. \quad (3.7)$$

ПР може виконувати роль переміщення модулів (готових приладів) між декількома конвеєрами, чи виконувати самі складальні операції в умовах повної автоматизації процесу.

Параметрична модель ПР має наступний вигляд:

$$\mathrm{Pr} = \left\{H, z\right\}, \quad (3.8)$$

де H – множина параметрів, що описує загальні характеристики роботу:

$$H = \{G_{pr}, Zo, Pz, Nsr, v_{pr}, \varphi_{ro}, \varphi_t, z\}, \quad (3.9)$$

де G_{pr} – вантажопідйомність;

Zo – зона обслуговування;

Pz – робоча зона;

Nsr – число ступенів рухливості;

V – швидкість переміщення по мірі рухливості;

φ_{ro} – похибка позиціонування робочого органу;

φ_t – похибка відпрацювання траєкторії робочого органу;

z – параметри типу захвату.

Параметри типу захвату є специфічними параметрами промислового робота та характеризуються завданням, яке він виконує.

3.3 Розробка математичної моделі системи керування технологічним процесом

Система керування ТП складання в зазначених умовах реалізовується через достатньо складні алгоритми, принцип дії яких може різнитись з огляду на умови самого виробництва, рівня його автоматизації, особливостей технологічного устаткування та об’єкта складання. До загальних процесів керування в умовах автоматизованих виробництв також належать потоки даних, які надходять з різноманітних датчиків та СТЗ, що дозволяють регулювати впливи керування, що мають генеруватись з урахування параметрів збурень.

Для моделювання складних систем керування, що розглядаються як цілісні системи, доцільно застосовувати моделі типу «чорної скрині». Вони дозволяють аналізувати систему взагалі, без урахування її елементів, та

визначати її реакції на умови, що змінюються, з урахуванням її обмежень [9].

На рисунку 3.1 наведено розроблену модель системи керування ТПС приладів з модульною конструкцією.

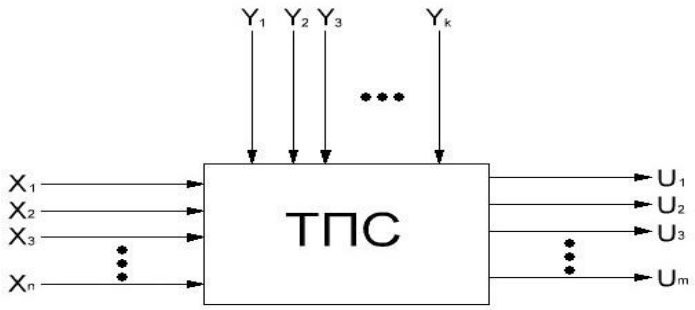


Рисунок 3.1 – Модель системи керування ТПС приладів з модульною конструкцією типу «темна скриня»

Складовими математичного опису моделі є опис границь, які встановлюються можливостями системи, її програмного та технічного забезпечення. Крім того:

– опис вхідних сигналів *X*, які можна задавати програмно та розглядати як задані впливами керування та сигналами з датчиків;

– випадкові зовнішні збурення *U*, одним з яких може виступати людський чинник (особливо в умовах часткової автоматизації), збої обладнання та різноманітні погрішності роботи обладнання та засобів спостереження;

– висхідні сигнали керування *Y*, що надходять до виконавчого обладнання.

Математичний опис моделі ТПС приладів з модульною конструкцією типу «темна скриня» має такий вигляд:

$$M_{ТПС} = \begin{cases} X = \{X_1, X_2, X_3, \ldots, X_n\} \\ U = \{U_1, U_2, U_3, \ldots, U_m\} \\ Y = \{Y_1, Y_2, Y_3, \ldots, Y_k\} \end{cases}, \qquad (3.10)$$

де n – кількість вхідних сигналів X;

m – кількість вислідних сигналів керування U;

k – кількість випадкових збурень Y.

З огляду на конкретні значення наведених параметрів будуються відповідні алгоритми керування елементами процесу. Варіюються значення від конкретного типу обладнання, засобів

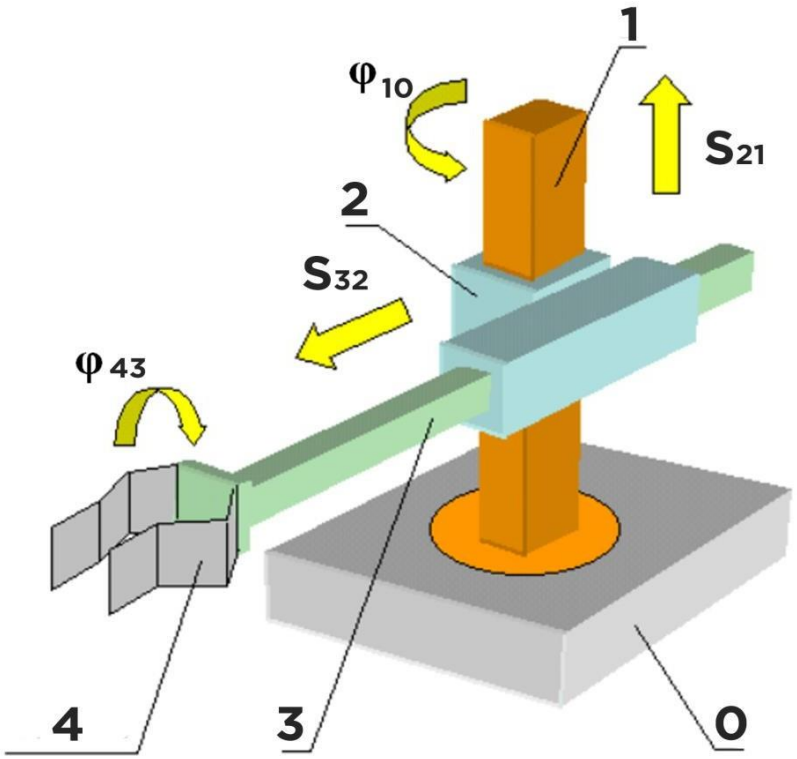
3.4 Математична модель промислового маніпулятора як об’єкта керування

Промислові роботи-маніпулятори належать до універсального обладнання та використовуються для організації ТП різноманітних галузей, в тому числі і для реалізації ТПС приладів з модульною конструкцією. Як було зазначено вище, вони можуть використовуватись як елементи АТНС, так і обладнання для реалізації складальних операцій.

Маніпулятор ПР за своїм функціональним призначенням повинен забезпечувати як рух вихідного з'єднання, так і закріпленого у ньому об'єкта маніпулювання, яким може бути складальний модуль приладу чи елемент з’єднання, в просторі за заданою траєкторією та заданою орієнтацією. Щоб виконання цієї вимоги було повним, основний ручний механізм маніпулятора повинен мати не менше шести рухомостей, причому рух за кожною з них повинен бути керований. Промисловий робот із шістьма ступенями рухливості – це складна автоматична система як у виробництві, так і в експлуатації. З огляду на це в реальних конструкціях промислових роботів часто використовуються механізми з числом рухомостей меншим шести. Найпростіші маніпулятори мають три

рухомості. Такі маніпулятори значно дешевші у виробництві та експлуатації, але мають специфічні вимоги щодо організації робочого середовища. Такі вимоги пов'язані з заданою орієнтацією об'єктів маніпуляції щодо механізму роботи. Тому обладнання може розташовуватися з такою роботою з необхідною орієнтацією.

Саме такий промисловий маніпулятор (аналог ПР РМ-202, що знаходиться на кафедрі КІТАР) було обрано для подальшого імітаційного моделювання. Структурну схему обраного ПР наведено на рисунку 3.2 [9]. Цей робот має 1 руку та обладнаний 3-ма рухомими ланками. Функціонує він у циліндричній системі координат та має 4 ступені рухливості.



0-4 – структурні елементи маніпулятора

Рисунок 3.2 – Структурна схема ПР

Наведений приклад робота відповідно до структурної схеми складається з таких основних елементів:

– 0 – нерухома тумба маніпулятора;

– 1 – плече – це рухома ланка маніпулятора, що може обертатись щодо нерухомої тумби 0 (характеризується кутовим переміщенням φ_{10});

– 2 – передпліччя – це рухома ланка маніпулятора, що переміщується по вертикалі відносно ланки 1 (характеризується лінійним переміщенням S_{21});

– 3 – кисть – це рухома ланка маніпулятора, що переміщується по горизонталі щодо ланки 2 (характеризується лінійним переміщенням S_{32});

– 4 – схват маніпулятора, що може обертатись відносно ланки 3 (характеризується кутовим переміщенням φ_{43}).

Ланки основного важеля механізму маніпулятора між утворюють собою чотири однорухомі кінематичні пари: дві обертальні, що виражені кутовими переміщеннями φ_{10} і φ_{43}, та дві поступальні, що виражені лінійними переміщеннями S_{21} і S_{32}. Саме вони можуть забезпечити переміщення об'єкта в просторі без керування його орієнтацією.

Таким чином, математичну модель розглянутого маніпулятора можна представити у вигляді:

$$M_M = \{A, B, C, D\}, \tag{3.11}$$

де A – обертальна однорухома кінематична пара, виражена кутовим переміщеннями φ_{10};

B – обертальна однорухома кінематична пара, виражена лінійними переміщеннями S_{21};

C – обертальна однорухома кінематична пара, виражена лінійними переміщеннями S_{32};

D – обертальна однорухома кінематична пара, виражена кутовим переміщеннями φ_{43}.

Для реалізації кожного з трьох відносних рухів маніпулятор необхідно обладнати приводами, що складаються з двигунів із редуктором та системи датчиків зворотного зв'язку. Оскільки рух об'єкта реалізується за заданим законом руху, то в системі мають бути пристрої, що зберігають і задають програму руху. Перетворення заданої програми руху на сигнали керування двигунами виконується системою керування, що відповідно до заданої програми, формує і видає на виконавчі пристрої приводів (двигунів *D1 – D4*), впливи керування U_i. За необхідності вона коригує ці дії за сигналами ΔX_i, які надходять до неї з датчиків зворотного зв'язку. Розроблену функціональну схему промислового робота, як об’єкта керування, наведено на рисунку 3.3 [7].

Відповідно до розробленої функціональної схеми математична модель керування наведеного ПР без урахування випадкових збурень має такий вигляд:

$$M_{MK} = \begin{cases} \Delta X = \{\Delta X_1, \Delta X_2, \Delta X_3, \Delta X_4\} \\ U = \{U_1, U_2, U_3, U_4\} \end{cases}. \qquad (3.12)$$

Кожен сигнал ΔX_i, який надходить до системи керування від засобів відчуття, якими наділено маніпулятор, тобто сукупність окремих сигналів від кожного зі встановлених датчиків зворотного зв’язку (датчики тиску, дальноміри тощо):

$$\Delta X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \ldots, X_{ij}\}, \qquad (3.13)$$

де *j* – кількість датчиків, за сигналами з яких виконується коригування керівної дії для *i*-го двигуна.

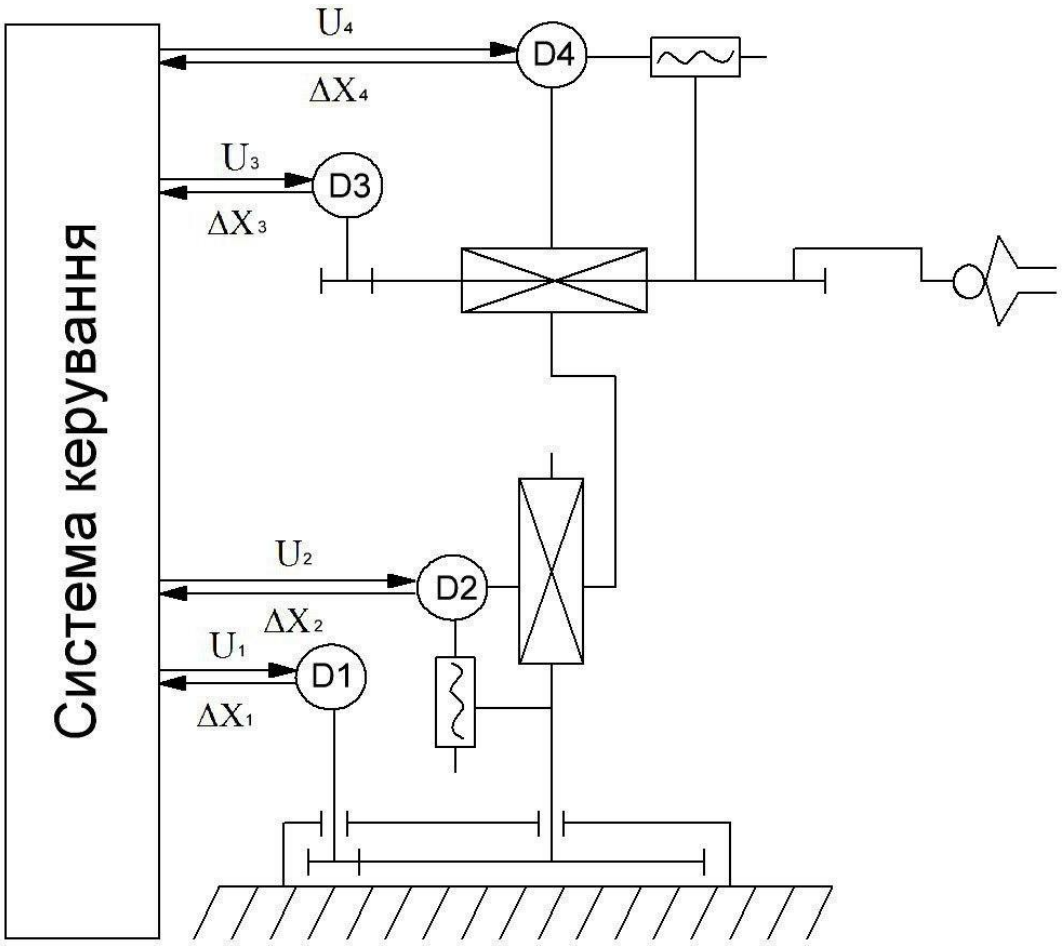


Рисунок 3.3 – Функціональна схема маніпулятора,
як об’єкта керування

Таке математичне представлення є вірним у разі застосування алгоритмів адаптивного керування. У випадках «жорсткого» програмного керування відсутнє коригування впливів керування U_i за сигналами ΔX_i.

Керувальна дія, що поступає на приводи маніпулятора, забезпечує переміщення відповідних ланок для виконання необхідної дії. Такі переміщення можуть відображатися за допомогою побудови рівнянь динаміки для кожної складової ланки ПР.

Рівняння динаміки маніпулятора, що складається з *j*-кількості ланок, базується на перетворенні Лапласа та можна представити як систему рівнянь для кожної *i*-тої ланки [9]:

$$M_{MD} = \begin{cases} \left(a_{ii}p^2 + f_i p + c_{ii}\right)\alpha_i = -a_{i+1}p^2\alpha_{i+1} - \ldots - a_{ij}p^2\alpha_j - \\ -c_{i+1}\alpha_{i+1} - \ldots - c_{ij}\alpha_{ij} + U_i + M_i; \\ \ldots \\ \left(a_{jj}p^2 + f_j p + c_{jj}\right)\alpha_j = -a_{j+1}p^2\alpha_{j+1} - \ldots - a_{jj}p^2\alpha_j - \\ -c_{j+1}\alpha_{j+1} - \ldots - c_{jj}\alpha_{jj} + U_j + M_j. \end{cases}, \quad (3.14)$$

де $\alpha_i, \ldots, \alpha_j$ – це вихідні координати кожної з рухомостей, які відповідають кутам поворотів ланок;

$M_i, \ldots, M_j$ – це механічні моменти опору двигунів ступенів рухомості, що відповідають впливам керування;

$U_i, \ldots, U_j$ – це вхідні сигнали, що визначають впливи керування;

$a_{ii}, \ldots, a_{jj}, c_{ii}, \ldots, c_{jj}$ – це деякі постійні коефіцієнти, що визначаються через центри мас та геометричні розміри ланок маніпуляторів;

$f_i, \ldots, f_j$ – величини, що відповідають коефіцієнтам тертя та гнучкої деформації ланок.

Такі рівняння будуються у відповідності до динамічних схем маніпуляторів. Не зважаючи на те, що ПР, який розглядається для подальшого моделювання, має 3 ланки, двигун, який встановлено на схваті, що надає йому можливість обертатись щодо ланки 3 та характеризується кутовим переміщенням φ_{43}, потребує відображення схату як ще однієї ланки на динамічній схемі. На рисунку 3.4 наведено розроблену динамічну схему маніпулятора приведена.

Відповідно до структурної схеми (рисунок 3.2) кут повороту першої ланки щодо нерухомої тумби φ_{10} – 360°. Кут повороту другої ланки до першої φ_{21} є незмінним і складає 90°, адже ця кінематична пара *B* характеризується лінійним переміщенням S_{21}.

За аналогією кут повороту третьої ланки до другої φ_{32} також має постійне значення 90° за рахунок лінійності переміщення зазначених ланок

одна відносно іншої S_{32}. Оскільки обертальна однорухома кінематична пара D виражена кутовим переміщенням, то кут повороту схвату відносно 3 ланкиφ_{43} відповідно до конструкції маніпулятора також приймає значення у 360°.

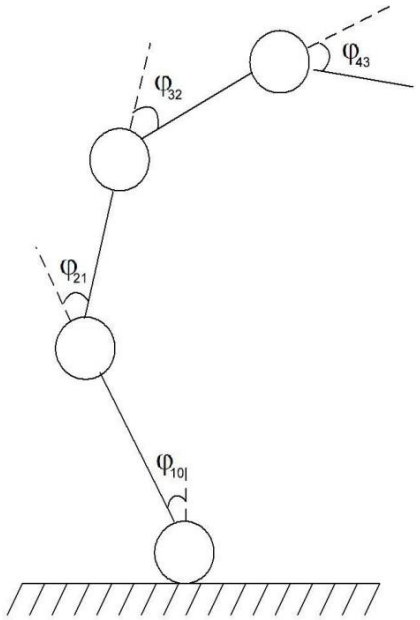


Рисунок 3.4 – Динамічна схема маніпулятора

Відповідно до виразу (3.12) та побудованої динамічної схеми рівняння динаміки маніпулятора набуває такий вигляд:

$$\begin{cases} \left(a_{11}p^2 + f_1 p + c_{11}\right)\left[0...360^0\right] = -a_{12}p^2 90^0 - a_{13}p^2 90^0 - \\ - a_{14}p^2\left[0...360^0\right] - c_{12}90^0 - c_{13}90^0 - c_{14}\left[0...360^0\right] + U_1 + M_1; \\ \left(a_{22}p^2 + f_2 p + c_{22}\right)90^0 = a_{21}p^2\left[0...360^0\right] - a_{23}p^2 90^0 - \\ - a_{24}p^2\left[0...360^0\right] - c_{21}\left[0...360^0\right] - c_{23}90^0 - c_{24}\left[0...360^0\right] + U_2 + M_2; \\ \left(a_{33}p^2 + f_3 p + c_{33}\right)90^0 = a_{31}p^2\left[0...360^0\right] - a_{32}p^2 90^0 - \\ - a_{34}p^2\left[0...360^0\right] - c_{31}\left[0...360^0\right] - c_{32}90^0 - c_{34}\left[0...360^0\right] + U_3 + M_3; \\ \left(a_{44}p^2 + f_4 p + c_{44}\right)\left[0...360^0\right] = a_{41}p^2\left[0...360^0\right] - a_{42}p^2 90^0 - \\ - a_{43}p^2 90^0 - c_{41}\left[0...360^0\right] - c_{42}90^0 - c_{43}90^0 + U_4 + M_4. \end{cases}, \quad (3.15)$$

4 ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СКЛАДАННЯ ПРИЛАДІВ ІЗ МОДУЛЬНОЮ КОНСТРУКЦІЄЮ

4.1 Обґрунтування вибору середовища імітаційного моделювання

Імітаційне моделювання – це метод дослідження, в якому досліджувана система замінюється моделлю, що з достатньою точністю описує реальну систему, а потім над нею проводяться експерименти задля отримання інформації про цю систему.

Як вид імітаційного моделювання обрано саме дискретно-подієве моделювання завдяки його можливості розглядати тільки основні події, що моделюється, наприклад, «очікування», «обробка замовлення», «рух з вантажем», «розвантаження» тощо.

Найбільш поширеними системами, що надають можливості побудови ІМ є:

– Siemens Plant Simulation – моделювання технологічного процесу складання;

– MatLab – моделювання поведінки роботів.

Plant Simulation – це система імітаційного моделювання, що дозволяє створювати цифрові моделі систем та процесів для визначення їхніх характеристик, а також продуктивності й оптимізації. Іншими словами, це інструмент імітаційного моделювання, що дозволяє створювати цифрові моделі логічних систем (наприклад, виробництва) для визначення характеристик системи та оптимізації її продуктивності (рисунок 4.1) [11].

Plant Simulation використовує можливості моделювання та відтворювання виробничих систем і їхніх технологічних процесів.

Області застосування Plant Simulation полягають в:

– оцінці й оптимізації проєктованих або модернізованих систем;

– плануванні прийому та прогнозуванні виконання замовлень;

– оперативному керуванні системою, графіками виробництва;

– навчанні співробітників, відпрацюванні поведінки на ІМ;

– наочній демонстрації роботи системи.

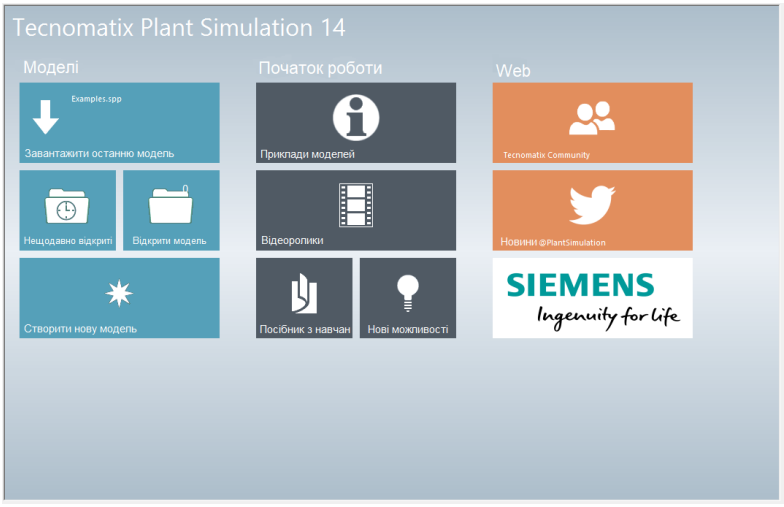


Рисунок 4.1 – Головне вікно програми Plant Simulation

Розроблені цифрові моделі дозволяють експериментувати й опрацьовувати різні сценарії без втручання в роботу існуючих виробничих систем або задовго до впровадження реальних систем. Широкий набір аналітичних інструментів (аналіз особливостей, статистичні дані та графіки) допомагає в оцінці різних сценаріїв виробництва. Розглянувши кілька варіантів, їх можна порівняти за вартістю, ефективністю роботи та обґрунтовано запропонувати оптимальне проектне рішення.

Plant Simulation дозволяє виконувати моделювання та відтворювати виробничі системи з їхніми технологічними процесами. До того ж, забезпечується спроможність оптимізації матеріальних потоків, використання ресурсів і логістики на всіх рівнях планування виробництва, від глобальних виробничих об'єктів до регіональних заводів, а також окремих виробничих ліній.

Як об'єкти моделювання можуть виступати промислові, логістичні, транспортні та інші системи.

Основні переваги Plant Simulation полягають в:

– економії 3 – 6 % на початкових інвестиціях;

– підвищенні продуктивності існуючих систем на 15 – 20 %;

– зниженні вартості нової системи на 5 – 20 %;

– оптимізації споживання та повторному використанні ресурсів;

– зниженні товарно-матеріальних запасів на 20 – 60 %;

– зниженні тривалості виробничого циклу на 20 – 60 %;

– оптимізації систем щодо скорочення споживання енергії [12].

За допомогою середовища імітаційного моделювання Plant Simulation було прийнято рішення щодо проведення моделювання ТПС приладів з модульною конструкцією в умовах часткової автоматизації процесу.

Моделювання роботи ПР, який можна задіяти як для переміщення модулів (готових приладів) між декількома конвеєрними стрічками, так і для забезпечення складальних робіт, у даному випадку, доцільно провести у MATLAB, а саме використовуючи додаток The Robot Toolbox for Matlab.

MATLAB – це пакет прикладних програм для вирішення завдань технічної обробки даних, а також однойменна мова програмування, що застосовується в цьому пакеті. MATLAB працює на більшості сучасних операційних систем, зокрема, Linux, Mac OS, Solaris (починаючи з версії R2010b підтримка Solaris припинена) і Microsoft Windows.

Мова MATLAB – це високорівнева інтерпретована мова програмування, що базується на заснованих на матрицях структурах даних, широкому спектрі функцій, інтегрованому середовищі розробки, об'єктно-орієнтованих можливостях та інтерфейсах для програм, написаних на інших мовах програмування.

MatLab інтегрується з Microsoft Word і Excel без проблем. Зв'язок MatLab та Word забезпечує можливість написання в редакторі Word інтерактивних документів, так званих М-книг, які засновані на спеціальному шаблоні. Користувач, який працює з М-книгою, може запускати блоки команд MatLab безпосередньо з документа Word, до того

ж, результат виконання команд відображається в М-книзі. Даний застосунок чудово підходить для створення звітів і навчальних посібників, тому що дозволяє доповнити документ прикладами та результатами розрахунків (рисунок 4.2) [11].

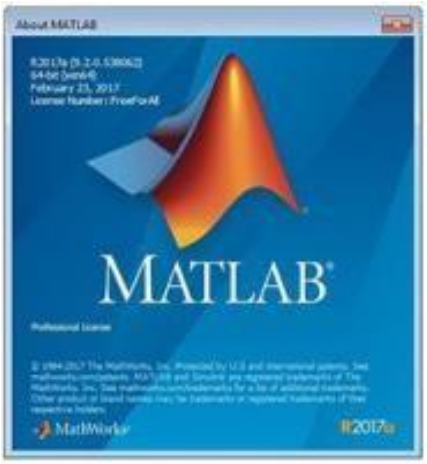


Рисунок 4.2 – Головне вікно MatLab

The Robot Toolbox for Matlab – це застосунок до основного середовища Matlab. Набір інструментів цього застосунка можна застосовувати для реалістичної візуалізації руху ПР, які необхідні для досліджень, дидактичного процесу або під час проєктування виробничої ділянки. Доступні функції дозволяють легко показати реалістичну модель механізму на основі параметрів DH (Denavit-Hartenberg), які пов’язані між собою кінематикою маніпулятора робота. У пакеті також наявний набір інструментів для створення будь-яких багатогранників і функцій для керування ними в 3D-просторі. Застосовуючи ці об’єкти, можна створювати власний зовнішній вигляд маніпулятора та його робочий простір. Функції, що реалізують класичні методи планування траєкторії в просторі конфігурації, дозволяють обчислювати траєкторію маніпулятора, яку можна реалізувати як анімацію [12].

4.2 Імітаційне моделювання технологічного процесу складання приладів із модульною конструкцією у середовищі Plant Simulation

4.2.1 Основні елементи, що використовуються

Для того, щоб створити нову модель, необхідно визначити основні елементи системи (рисунок 4.3).

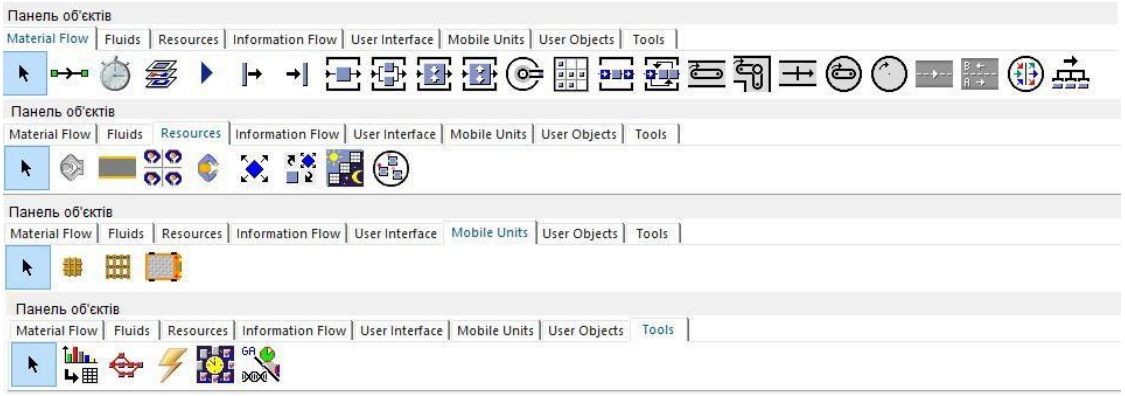


Рисунок 4.3 – Основні елементи Plant Simulation для створення ІМ

Розділ Material Flow є корисним для створення моделі як цілісної структури: Connector, EventController, Frame, Interface.

Статичні об'єкти (блоки), що призначені для обробки рухомих об'єктів: Source, Drain, SingleProc, DismantleStation, Store ParallelProc, Assembly, FlowControl, Buffer, Sorter, Line, Track, Exporter, Broker.

Рухомі об'єкти: Entity, Container, Transporter.

Розділ Resources застосовують для додавання до моделі різного типу ресурсів, зокрема ті, що представляють робітників і людей, пов'язані з ними станції.

Об'єкти: Broker, Exporter, ShiftCalendar Worker, FootPath, LockoutZone, WorkPlace, WorkerPool.

Розділ Mobile Units наділяє ці об'єкти мобільністю під час моделювання потоку матеріалів за допомогою ІМ.

На відміну від об'єктів матеріального потоку, мобільні об'єкти не є прив'язаними до фіксованого розташування. Спочатку джерело створює

MU з класу MU в бібліотеці класів. Потім він переміщається різними станціями моделі уздовж з'єднань потоку матеріалу. Станції обробляють MU. MU залишається на кінцевій станції свого руху доти, поки його не буде видалено з заводу, зазвичай за допомогою зливу.

Розділ Tools надає низку інструментів:

– штучну нейронну мережу для аналізу імітаційних досліджень та прогнозування;

– bottleneckAnalyzer і SankeyDiagram для аналізу та відображення потоку деталей через установку;

– crossSlidingCar для моделювання транспортних систем;

– energyAnalyzer для аналізу споживання енергії виконавчого обладнання;

– experimentManager для запуску експериментів з IM;

– послідовний пробовідбірник для розпочинання симуляційних досліджень, який аналізує одне цільове значення;

– transferStation для завантаження, чи розвантаження, або перезавантаження модулів;

– variantsGenerator для створення частотних таблиць для варіантів атрибутів, для об'єктів типу Source з параметром Attributes> MU selection> Random use;

– WorkerChart для відображення значень статистики для всіх працівників в одному WorkerPool.

4.2.2 Створення імітаційної моделі

Для створення моделі виробничої ділянки для початку необхідно створити новий фрейм – робочій простір, де буде проектуватися модель. Для цього натискаємо правою кнопкою миші у Бібліотеці класів на вкладці Models та обираємо «Створити» – «Фрейм» після чого змінюємо його назву на Assembling.

Наступний крок полягає у додаванні двох джерел (Source) до моделі. Перше називаємо «Модульна конструкція», а друге – «Друкована плата». Вони відповідають за елементи, що подаються на вхід нашої моделі.

Потім до моделі додаємо елементи «процес» (SingleProc) та «буфер» (Buffer). Елемент процес назвемо «Пакування», він буде відповідати за дію, що відповідатиме назві. Буфер використовують у разі виникнення обмеження у виробництві. Тоді буферні обмеження та буфер відвантаження застосовуються для захисту виходу продукції з системи.

Наступним кроком необхідно додати виробничу лінію (конвеєр), якою пересуватимуться модулі. Застосуємо об’єкт Line.

Далі додаємо ще один процес, який назвемо «Ітерація».

Для зв’язування об’єктів застосуємо елемент Connector.

Після чого додаємо об’єкт TransferStation, який буде використано як накопичувач.

На наступному етапі перетягуємо об’єкт «буфер» на об’єкт TransferStation методом drag-and-drop та налаштовуємо:

– тип станції – завантаження;

– джерело деталі.

Після чого методом drag-and-drop перетягуємо об’єкт «конвеєр» (Line) на об’єкт TransferStation та переходимо до налаштування:

– тип станції – завантаження;

– мета деталі;

– положення сенсора – 2 метри.

Для налаштувань блоку TransferStation потрібно 2 рази натиснути на ньому та встановити такі параметри, як атрибути та додаткові атрибути.

У вкладці «Атрибути» встановити, що тип станції – це завантаження модулів з буфера на конвеєр.

У вкладці «Додаткові атрибути» обираємо завжди зупиняти контейнер.

Наступник кроком додаємо елемент «фільтр» (Drain) та елемент «події» (EventController) з метою фільтрування елементів складання та виконання різного роду подій відповідно.

Елемент «подія» має такий вигляд. Він відповідає за виконання транзакцій за певний час, який задає користувач. Крім того, існує можливість налаштування швидкості проходження транзакцій.

Елемент «Модульна конструкція» повинен створювати контейнери для друкованих плат, тому треба перетягнути з MUs бібліотеки на цей елемент Container, а на елемент «Друкована плата» – сутність, тому відповідно Entity.

Встановлюємо налаштування елемента «Модульна конструкція» – інтервал у 5 хв. та елемента «Друкована плата» – 3 хв.

Після запуску елемента «подія» розпочинається процес моделювання (рисунок 4.4).

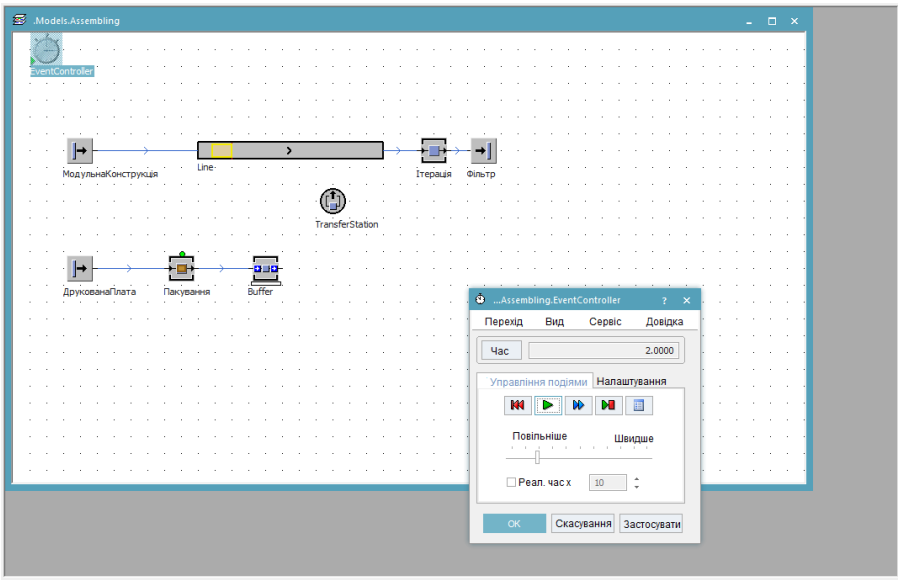


Рисунок 4.4 – Проміжне моделювання системи

Під час попадання модульної конструкції на сенсор, який розташовано на конвеєрі, він підсвічується жовтим кольором, а на елементі «Пакування» виконуються дії, про що свідчить зелений прапорець над елементом.

Наступним кроком потрібно додати транспортувальну систему з розташованими на ній роботами.

Трек для транспортної системи створюється за допомогою елемента Track (рисунок 4.5) та складатиметься з двох частин, які з’єднані за допомогою елемента Connector.

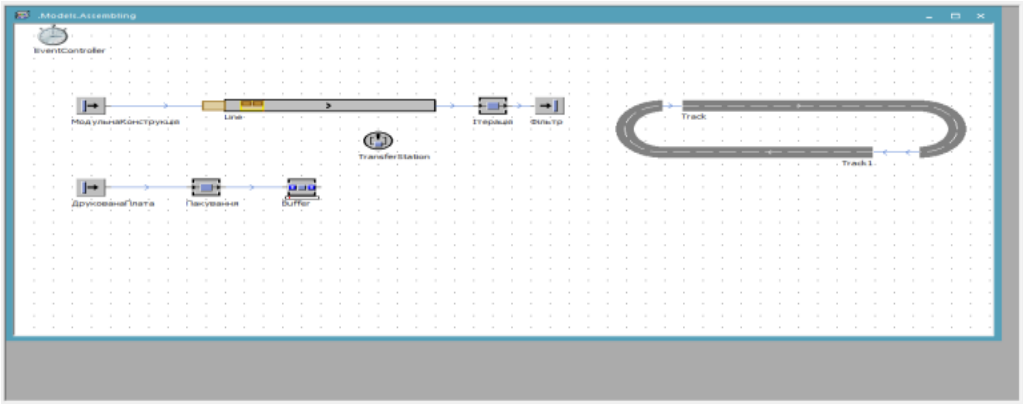


Рисунок 4.5 – Транспортна система імітаційного моделювання

Також додаємо ще одне джерело, що буде надсилати складені одиниці до транспортувальної системи, а методом drag-and-drop перетягуємо на нього мобільний блок (MUs) Transporter – для транспортувальної системи.

Потім створюємо ще один елемент SingleProc, який відповідатиме за розвантаження та елемент Drain – за клієнта, якому йде замовлення.

Для з’єднання Конвеєра та Транспортувальної системи потрібно створити ще один елемент TransferStation, після чого методом drag-and-drop перетягуємо елемент «Ітерація» на нього з налаштуваннями.

На наступному етапі потрібно перетягнути елемент Track на новий елемент TransferStation та виставити налаштування.

Потім додаємо ще один елемент TransferStation та перетягуємо на нього елемент Track1 з налаштуваннями для розвантаження.

Крім того, перетягуємо елемент «Розвантаження» на TransferStation2 із налаштуваннями розвантаження.

В елементі «Джерело» змінюємо налаштування таким чином, а в елементі TransferStation1 – іншим.

Після виконання всіх дій можна розпочинати процес імітаційного моделювання.

На вхід подаються модульні конструкції, що йдуть по конвеєру, а друковані плати упаковуються до корпуса.

Потім через елемент «ітерація» виконується складання конструкцій.

За допомогою блоків TransferStation конструкції передаються до транспортувальної системи, де робокари завантажуються та відвозять модульні конструкції на розвантаження. Потім вони надаються клієнту. На рисунку 4.6 представлено моделювання цієї системи.

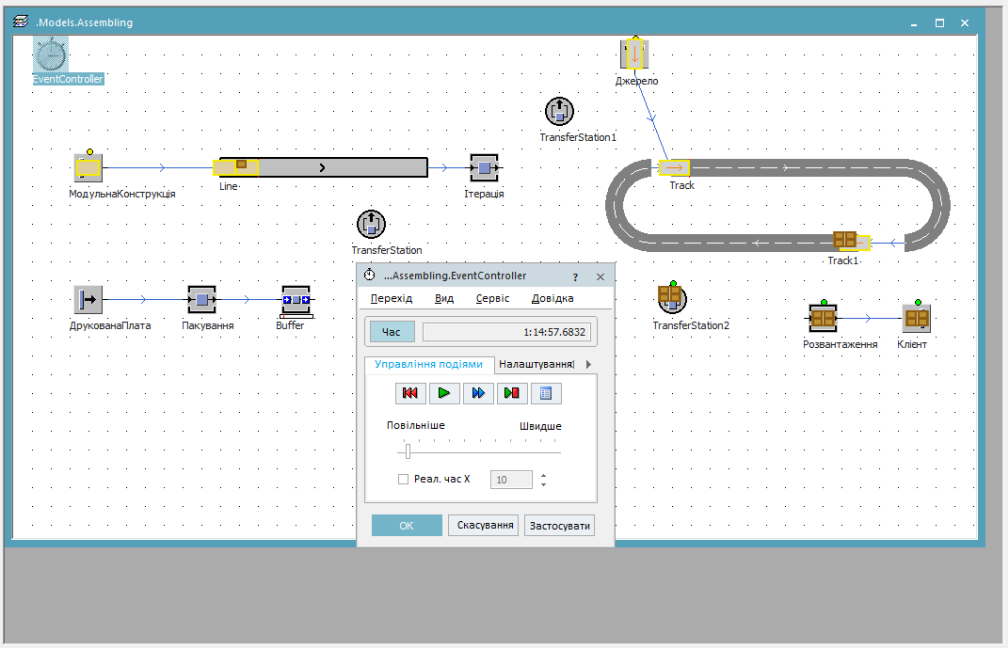


Рисунок 4.6 – Імітаційне моделювання роботи технологічного процесу складання приладів з модульною конструкцією

З метою оцінювання результатів моделювання додано елемент «Діаграма» (Chart). За допомогою методу drag-and-drop перетягуємо елементи «Пакування, Ітерація та Розвантаження» на елемент «Діаграма» та дозволяємо моніторити ресурси.

На рисунках 4.7 – 4.9 зображено діаграми завантаження цих елементів системи імітаційного моделювання.

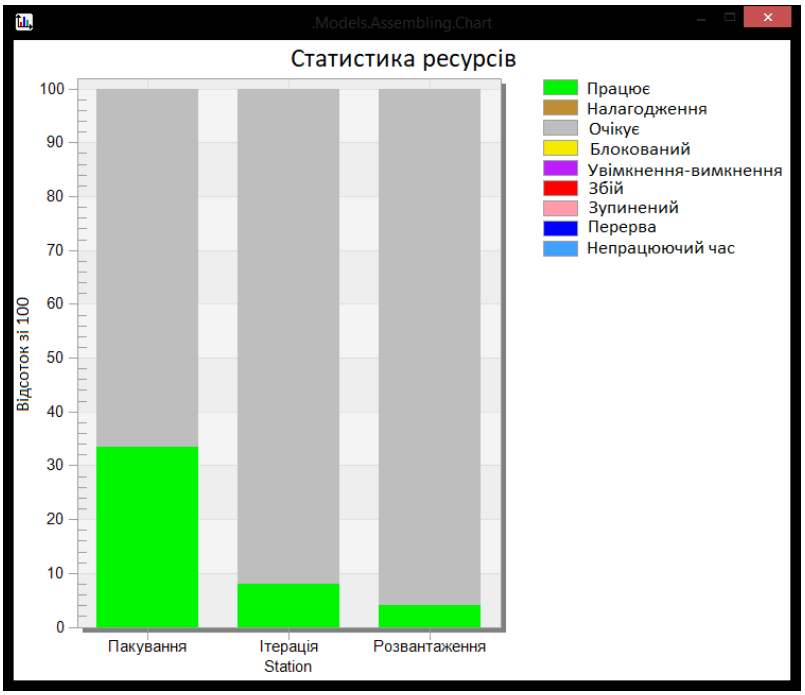


Рисунок 4.7 – Діаграма завантаження у перший проміжок часу

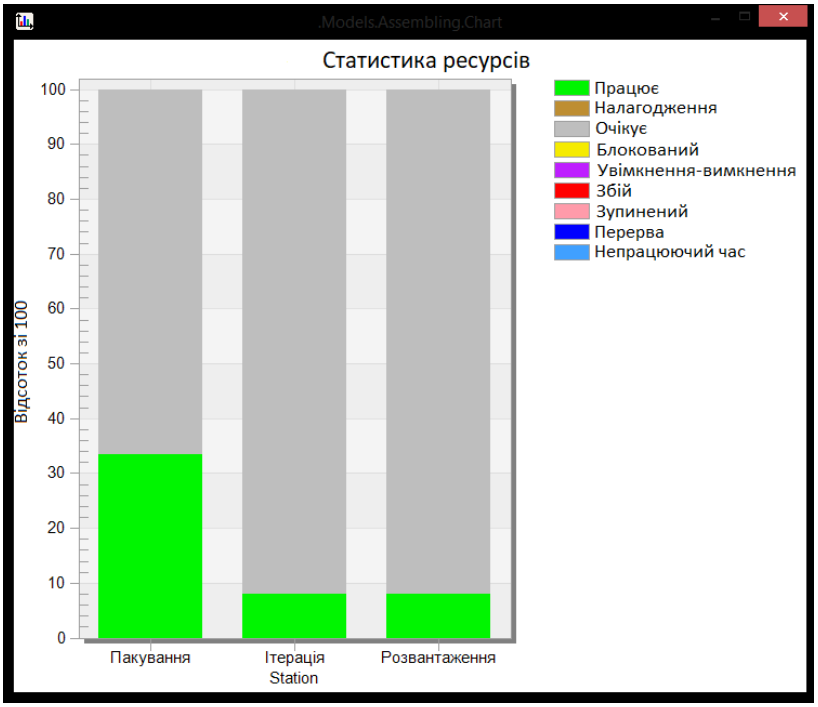


Рисунок 4.8 – Діаграма завантаження у другий проміжок часу

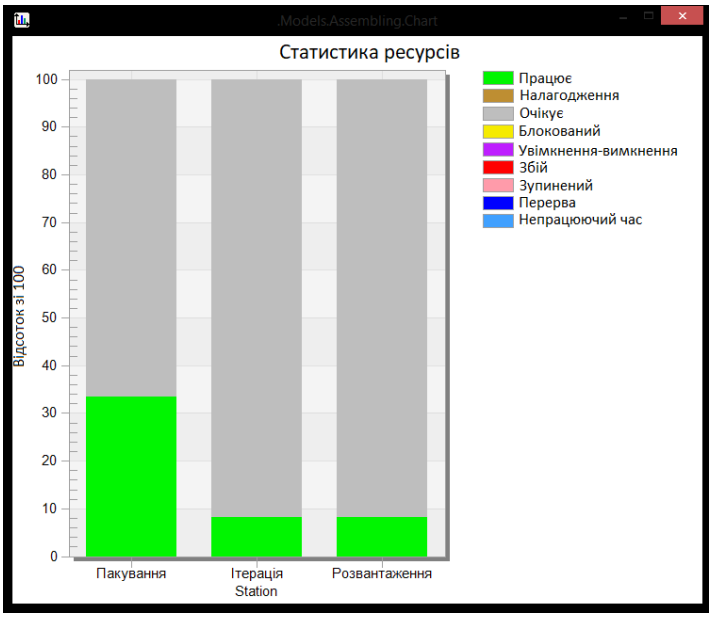


Рисунок 4.9 – Діаграма завантаження у третій проміжок часу

За цими діаграмами можна зробити висновок, що пакування займає 34 % від можливостей автоматизованої системи, інші 66 % – чекає. На проміжному етапі «Ітерація» завантаженість складає приблизно 10 %, а розвантаження – від 3 % до 10 %.

Також є можливість додавання різного виду відмов виробництва. Для цього, наприклад, у елементі додамо Відмови у 7 хв.

Далі діаграма ресурсів прийме такий вид (рисунок 4.10).

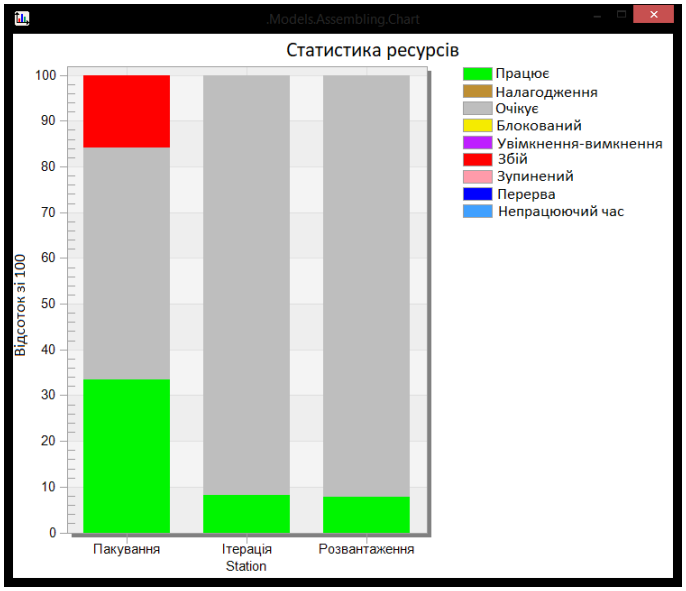


Рисунок 4.10 – Діаграма з відмовами

За аналогією встановлюємо відмови і в інших елементах. На рисунку 4.11 наведено результати.

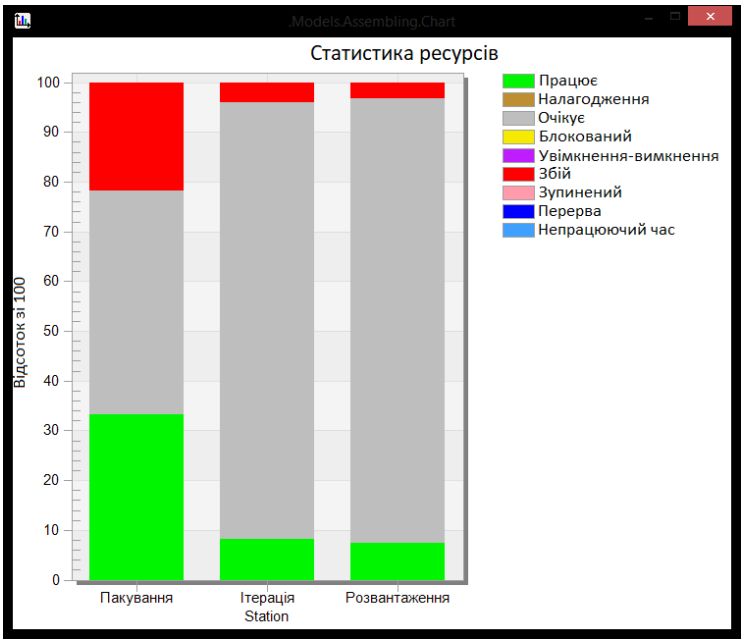


Рисунок 4.11 – Діаграма з відмовами у всіх елементах

Для одночастного аналізу всіх елементів системи застосовуємо елемент BottleneckAnalyzer, який модернізує нашу систему до наступної (рисунок 4.12).

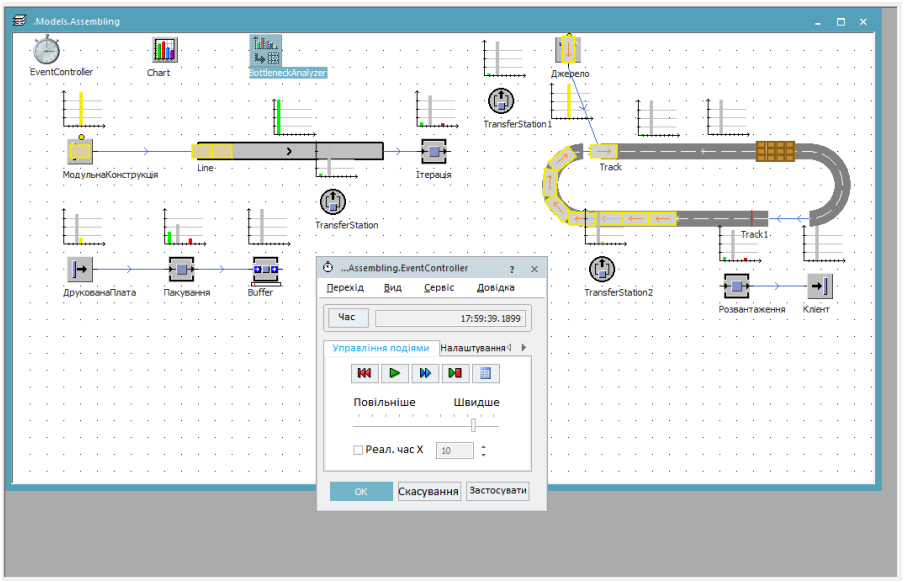


Рисунок 4.12 – Аналіз усіх елементів системи

Крім того, для більш наглядного моделювання є можливість перетворити 2D модель на 3D. Для цього потрібно натиснути потрібну нам кнопку "Відкрити" 2D – 3D (рисунки 4.13 – 4.14).

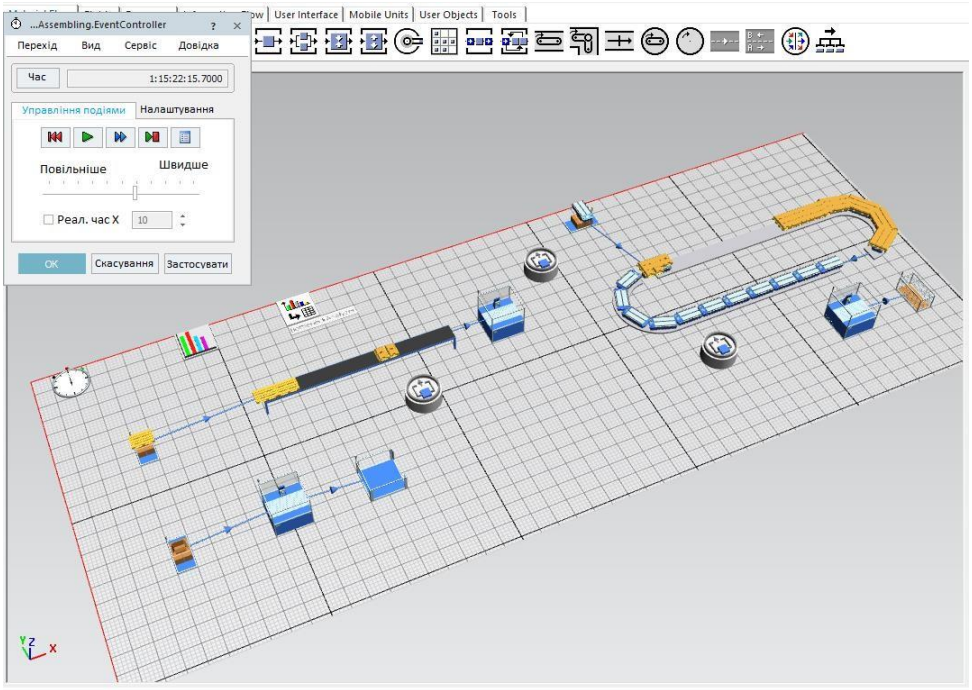


Рисунок 4.13 – 3D модель системи у перший проміжок часу

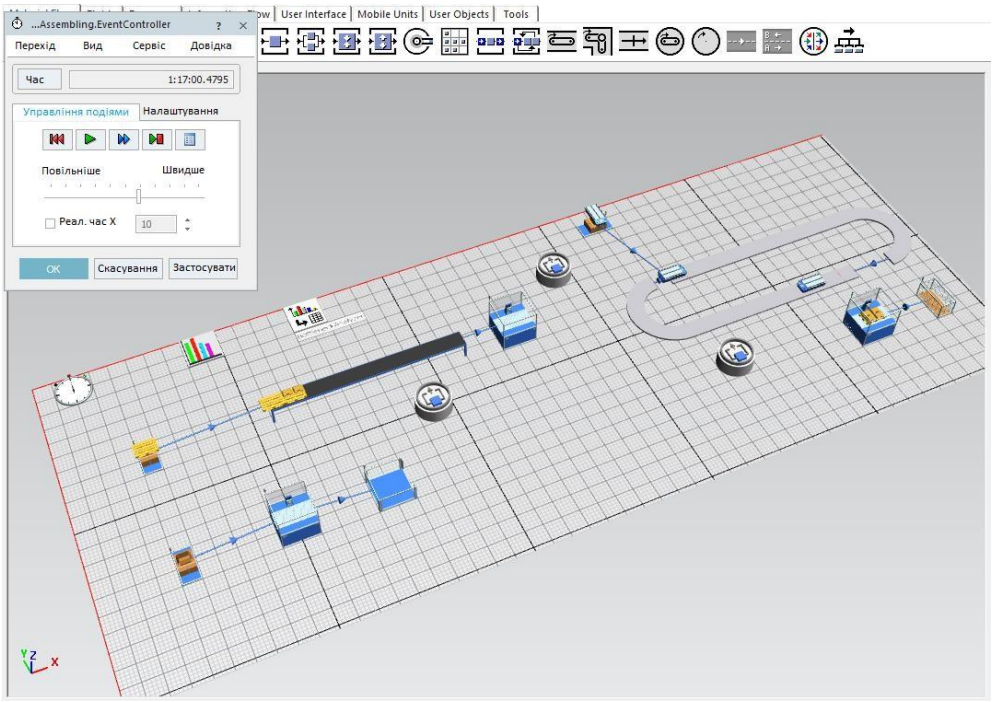


Рисунок 4.14 – 3D модель системи у другий проміжок часу

4.3 Моделювання роботи маніпулятора у системі MatLab

4.3.1 Опис The Robot Toolbox

Для моделювання роботи маніпулятора обрано бібліотеку The Robot Toolbox for Matlab v.1.0.

Набір функцій, які визначають та працюють на об'єктах маніпулятора, має вирішальне значення для інструментарію. Основна функція, що дає можливість визначити маніпулятор:

r = робот (dh, суглоби, «PropName», PropValue, ...),

де r – структура, що представляє маніпулятор;

dh – матриця, до складу якої належать параметри DH;

суглоби – масив символів, який містить типи суглобів, одне з'єднання можна визначити як обертання («r») або призматичне («p» чи «d» в залежності від типу посилання);

PropName, PropValue – необов'язкові параметри, властивості, що відповідають за зовнішній вигляд маніпулятора.

Для об'єктів такого типу особлива важливість полягає в додаткових властивостях, які задаються під час їхнього визначення та визначають спосіб побудови об'єкта маніпулятора в вікні фігури Matlab. Основними з них є:

– RobotBase – матриця перетворення, що визначає орієнтацію й положення бази роботів;

– RobotGrasper – матриця перетворення, що визначає орієнтацію й положення системи координат захоплення;

– RobotRange – матриця, до якої належать діапазони руху в окремих суглобах;

– RobotModel – метод побудови маніпулятора в 3D-поданні за замовчуванням, наявні чотири допустимі значення: «config», «configex», «range», «rangeex».

Кожен об'єкт маніпулятора з певною функцією робота можна побудувати в вікні фігури Matlab за допомогою функції:

r = robot_plot (r, view),

де r – структура, що представляє маніпулятор;

view – метод побудови об'єкта маніпулятора. Якщо view одна «лінія», кожна ненульова довжина та зміщення маніпулятора зображується у вигляді рядка. Якщо ж вид дорівнює «сітці», тоді маніпулятор задано як тривимірний об'єкт каркасного виду. Якщо view одне surf, то маніпулятор задано як набір патчів.

4.3.2 Моделювання маніпулятора

Для моделювання робочого простору маніпулятора (координатної системи) застосовують такі функції.

Axis – для формування координатних осей (наприклад, axis ([-4 6 -6 4 -2 6])).

Команда csys_plot – графік системи координат з таким синтаксисом:

[CS] = csys_plot (CS);,

де CS – система координат зі структурою для будування системи координат.

Комадна csys визначає нову матрицю. В даному прикладі вона задається командою eye(4), тобто матицею 4×4 та параметром CSysAxisLength – масивом, до якого завантажуються осі координат.

Команда b = block_plot(b, 'surf'); визначає блок (об’єкт), який потрібно перенести. Вона має два параметри: перший з яких відповідає за сам об’єкт:

cuboid(0.5,0.5,2,'BlockColor','y','BlockEdgeColor',[0.75,0.75,0]);.

Тобто об’єкт представлено у вигляді куба (cuboid) з геометричними параметрами (0.5,0.5,2), жовтим кольором блоку ('BlockColor') та кольором по краях ('BlockEdgeColor') – (0.75,0.75,0).

Для переміщення блока з маніпулятором використовуємо функцію b = block_move(b, rp2t(eye(3),[5.125;0;1])).

Комада rp2t створює матрицю перетворення з застосуванням матриці повороту та вектора зсуву. Перший параметр – це матриця обертання (eye(3), а другий – це вектор трансляції (переміщення).

Другий параметр команди block_plot відповідає за тип виведення інформації. У даному прикладі це surf – тобто об’єкт буде текстурованим, ще він може бути line – каркасним.

Після чого слід побудувати робота за допомогою r = robot_plot(r, 'surf');.

Команда robot_plot має два параметри. Перший параметр відповідає за створення робота на осях, другий – за аналогією, як і у команді block_plot, за текстури об’єкта.

Більш детально розглянемо перший параметр.

Для початку задамо вектори поворотів маніпулятора:

– q1 = [-pi / 2; 1; pi / 2]; – початкове налаштування кутів повороту;

– q2 = [-pi / 2; 3; pi / 2]; – проміжна конфігурація, в якій маніпулятор ловить блок;

– q3 = [-pi; 3; 0]; – остаточна конфігурація, де маніпулятор відкидає блок;

– q4 = [-pi; 2.25; 0]; – проміжна конфігурація, в які маніпулятор повертається до вихідної конфігурації, уникаючи блоку.

Потім реалізується процес побудови самого робота, результат створення якого зберігатиметься у змінній r:

```
r = robot([dh(0,0,2,q1(1)); dh(-pi/2,0,q1(2),0); dh(0,0,1,q1(3))], ['r', 'p', 'r'],...
        'RobotGrasper', rp2t(roty(-pi/2),[0;0;0.5]),...
        'RobotGrasperSize', 1,...
        'RobotRange', [-pi, pi; 0, 4; -pi, pi],...
        'RobotCylinderRadius', 0.25,...
        'RobotCylinderApprox', 16,...
        'RobotColor', [0,0.25,0.65],...
        'RobotGrasperColor', [0,0.5,1],...
        'RobotExColor', 'g',...
        'RobotEdgeColor', 'none',...
        'RobotModel', 'rangeex');.
```

Функція robot будує нового робота, що визначається параметрами DH та типами суглобів:

```
[R] = robot (dh, суглоби);
[R] = robot (dh, суглоби, «PropertyName», PropertyValue, ...);,
```

де dh – 4xn матриця з параметрами DH;

n – кількість суглобів;

суглоби – масиви символів n-element, які містять типи суглобів.

Допустимі значення суглобів:

– 'r' – револьверне з'єднання;

– 'p' – призматичне з'єднання типу I;

– 'd' – призматичне з'єднання типу II.

Список властивостей, які використовувались:

– RobotGrasper – матриця перетворення 4x4 або вектор 3x1, орієнтація та положення системи координат;

– RobotGrasperSize – 2 елементи вектора або числа, розмір захвату робота в xy-площині;

– RobotRange – 2 матриці стовпців, діапазон з'єднань робота, де *i*-й рядок містить нижні та верхні межі на i-й узагальненій координаті;

– RobotCylinderRadius – радіус циліндра, що представляє руку робота в 3D-виді;

– RobotCylinderApprox – апроксимація циліндра, що представляє руку робота в 3D-режимі;

– RobotColor – 4 осередки масиву елементів або одне значення, колір робота визначається за кольором Matlab;

– RobotGrasperColor – колір об'єктів захвату, що застосовуватиметься;

– RobotExColor – колір об'єктів, які становлять додаткові елементи;

– RobotEdgeColor – 4 елементи масиву осередків або одне значення, колір країв визначається за кольором Matlab;

– RobotModel – рядок, метод побудови робота в 3D-режимі за замовчуванням, «rangeex» – кожне з'єднання між суміжними руками відзначаються додатковим елементом.

Завдання щодо переміщення складатиметься з трьох частин.

Перша частина завдання – маніпулятор ловить блок з використанням таких команд:

```
[Q, v, t] = trajectory (0: 0.025: 2, q1, q2, 'poly3');
r = robot_motion (r, q);
r = robot_catch (r, b);.
```

Тут застосовують такі функції.

Trajectory – траєкторія робота з початкової конфігурації до остаточної конфігурації згідно із зазначеним методом. Вона має такий синтаксис:

[Q, V, A, T, c] = trajectory(T, Q0, Qt)

[Q, V, A, T, c] = trajectory(T, Q0, Qt, method, parameter).

На вхід надходять наступні параметри:

а) T – число або вектор. Якщо T – функція числа, що обчислює траєкторія від 0 до T, якщо T – векторна траєкторія, що розрахована для кожного моменту часу від T;

б) Q0 – вектор, початкова конфігурація робота;

в) Qt – вектор, остаточна конфігурація робота;

г) method – метод генерації траєкторії з допустимими значеннями:

1) 'Line' - лінійний сегмент з параболічними сумішами;

2) 'Poly3' - кубічний поліном;

3) 'Poly5' - поліном 5-го порядку;

д) parameter – список додаткових параметрів, які залежать від методу виводу:

1) Q – матриця рядків, де і-й рядок містить траєкторію для і-го з'єднання;

2) V – матриця рядків, де і-й рядок містить миттєві швидкості і-го з'єднання;

3) A – матриця рядків, де і-й рядок містить миттєві прискорення і-го з'єднання;

е) T – вектор рядків тимчасових точок;

ж) c – матриця стовпців, де *i*-й стовпець містить коефіцієнти поліномів, який описує траєкторію для *i*-го суглоба.

Наступна команда – команда robot_motion, яка показує рух маніпулятора відповідно до заданої траєкторії й містить синтаксис:

[R] = robot_motion (R, q);

[R] = robot_motion (R, q, delay);

[R] = robot_motion (R, q, delay, trace).

На вхід подаються такі параметри:

– R – структура, що представляє робота;

– q – матриця з числом рядків дорівнює числу змінних конфігурації, кожен зі стовпців відповідає одній конфігурації;

– delay – пауза між кроками анімації (в секундах), за замовчуванням 0;

– trace – визначає спосіб побудови графіка руху (0 – в кожен момент часу видно тільки одну конфігурацію, 1 – всі конфігурації, задані у «q»).

На виході маємо параметр R, який виражає структуру робота.

Остання команда – robot_catch – захоплення блоку, іншими словами, з'єднання блока з роботом. Команду представлено таким синтаксисом:

[R] = robot_catch (R, B);.

Функція поміщає блок до системи координат, а рух робота викликатиме зміщення блоку.

На вхід подаються такі параметри:

– R – структура, що представляє робот;

– B – блок для дії "зловити".

На виході один параметр – R, який виражає структуру робота з захопленим блоком.

За аналогією виконується й друга частина завдання – маніпулятор переміщує блок та залишає його в кінцевій позиції.

```
[Q, v, t] = trajectory (0: 0,025: 3, q2, q3, 'poly3');
r = robot_motion (r, q);
r = robot_drop (r);.
```

Різниця полягає лише у команді robot_drop, яка залишає блок, захоплений «robot_catch», інакше кажучи, від'єднує блок від робота. Вона має такий синтаксис:

```
[R] = robot_drop (R).
```

На вхід подається R – це структура, що представляє собою робота, утримючого блок.

На виході – R – це структура, що представляє собою робота без блоку.

У третій частині завдання маніпулятор повертається до вихідного положення, уникаючи блоку:

```
[Q, v, t] = trajectory (0: 0.025: 1.5, q3, q4, 'poly3');
r = robot_motion (r, q);
[Q, v, t] = trajectory (0: 0.025: 1.5, q4, q1, 'poly3');
r = robot_motion (r, q);.
```

На рисунку 4.15 представлено початковий стан робота. На рисунку 4.16 – становище робота з блоком у захваті, а на рисунку 4.17 зображено перенесення блоку. Кінцеве положення – на рисунку 4.18.

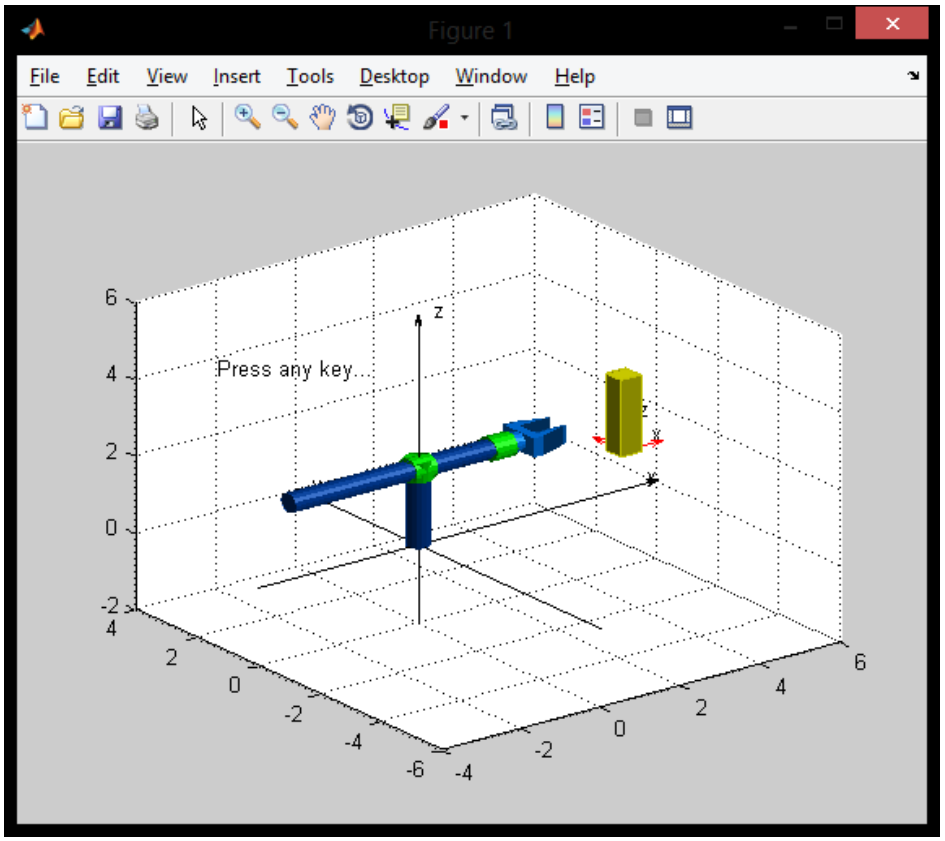


Рисунок 4.15 – Початковий стан робота

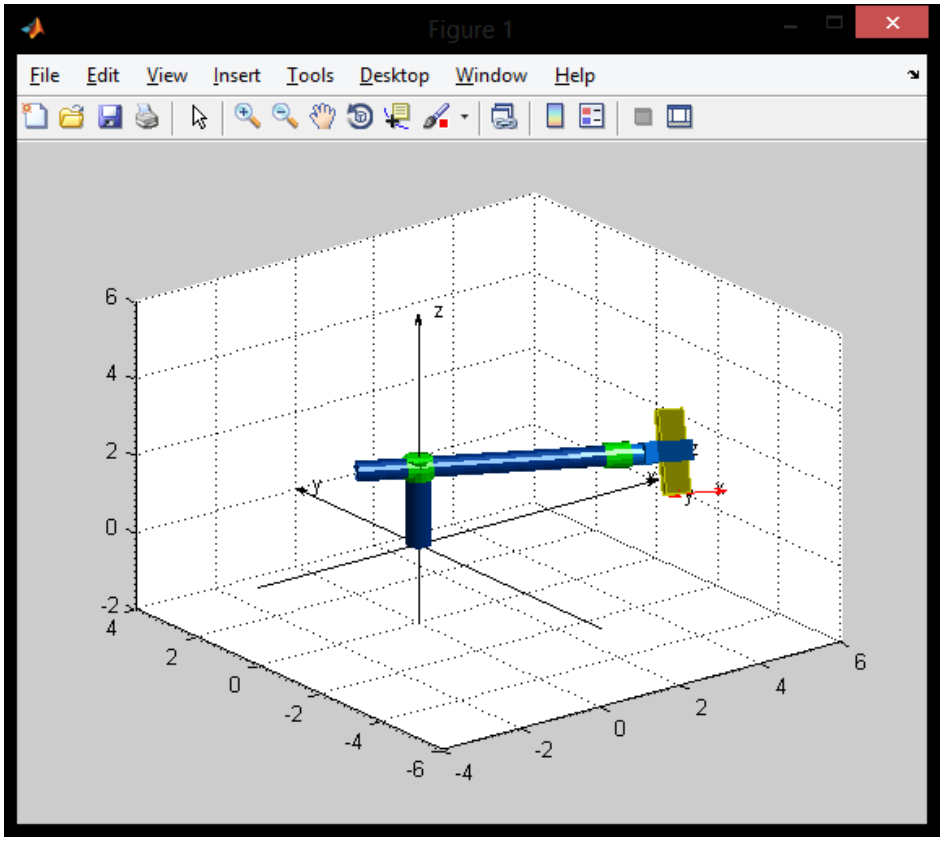


Рисунок 4.16 – Робот з блоком у схваті

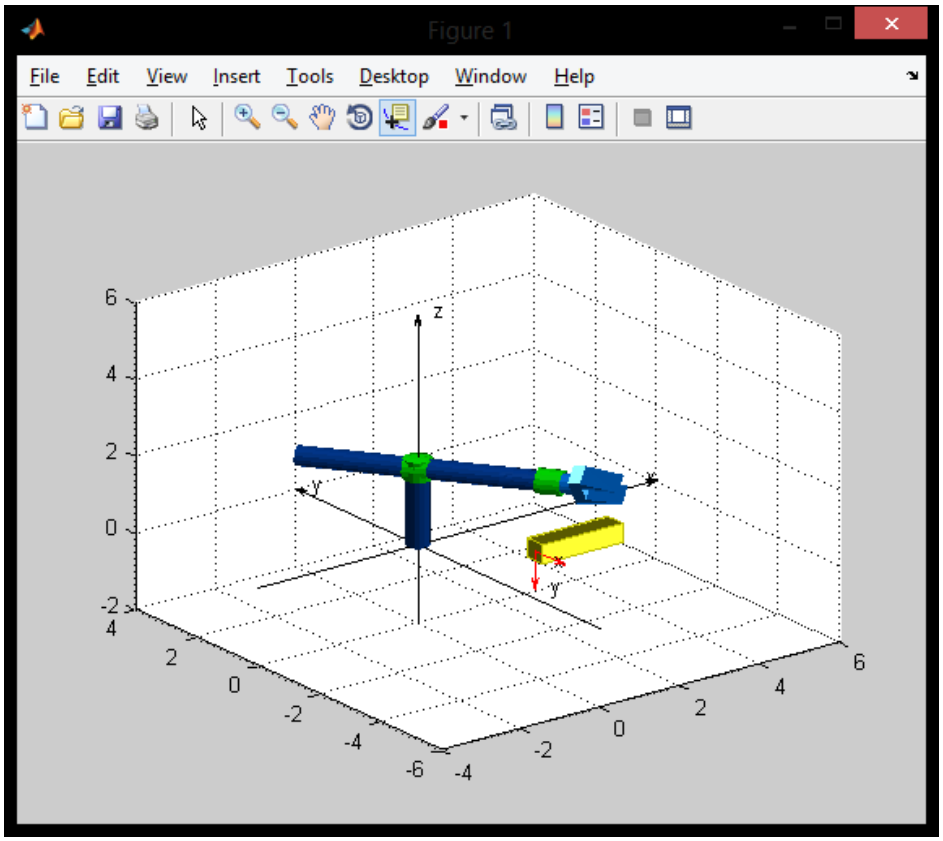


Рисунок 4.17 – Робот переніс блок

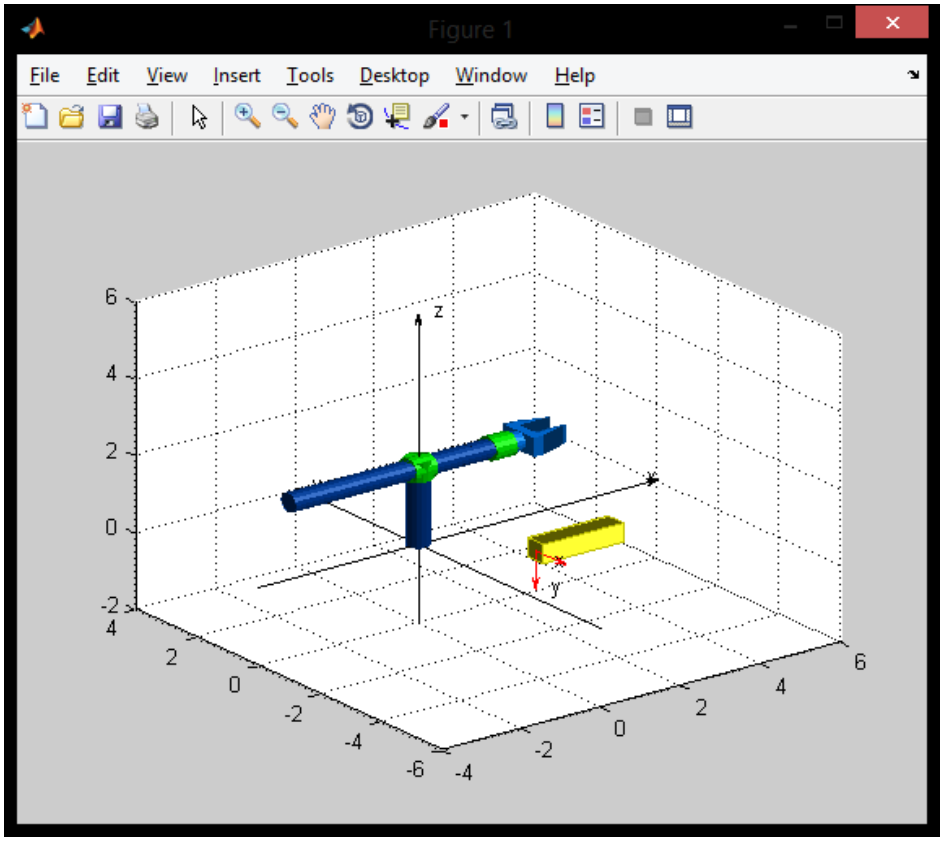


Рисунок 4.18 – Кінцеве положення робота

Повний текст програми наведено у додатку А.

Таким чином, за допомогою The Robot Toolbox у середовищі MatLab існує спроможність моделювання будь-якого робота чи маніпулятора з точним зазначенням кутів поворотів та розмірів. Така можливість значно спростить проєктування системи.

4.4 Забезпечення безпечних умов праці у лабораторій при проведенні досліджень

Розміри лабораторії, в якій виконувалася робота, складають 5 м × 6 м. Робоче місце складається зі стола, стільця і персонального комп'ютера. У приміщенні працює 4 людини. Площа приміщення 30 м^2, об`єм – 90 м$^3$. Згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 площа на одне робоче місце має становити не менше 6 м$^2$, а об`єм – 20 м^3. Для даного приміщення робоча площа і об'єм на одну людину відповідає нормам, так як в нашому випадку площа на одне робоче місце становить 10 м^2, а об`єм – 30 м^3.

Живлення комп'ютерів здійснюється від трифазної чотирипровідної електричної мережі змінного струму з глухо-заземленою нейтраллю і напругою 220 В, частотою 50 Гц.

Згідно НПАОП 40.1-1.21-98 лабораторію можна віднести до категорії без підвищеної небезпеки, так як в приміщенні відсутні чинники, які викликають підвищену або особливу небезпеку.

Для створення безпечних умов праці необхідно провести ряд організаційних і технічних заходів. Згідно НПАОП 40.1-1.32-01 для запобігання ураження людини електричним струмом в приміщенні застосовується система занулення.

Згідно вимог НПАОП 0.00-4.12-05 необхідно провести увідний, первинний на робочому місці, повторний, цільовий та позаплановий інструктажі. Зміст інструктажу відповідає вимогам НПАОП 0.00-4.12-05.

Інструктаж відзначається в відповідних журналах з підписами інструктованих і інструктора.

Робота в лабораторії проводиться сидячи і не вимагає фізичного напруження. Тому вона відноситься до категорії Іа (легкі фізичні роботи, енергозатрати до 120 ккал/год). З метою забезпечити комфортні умови для працівників та згідно з ДСН 3.3.6.042-99 в приміщенні встановлені наступні метеорологічні параметри:

а) для холодного періоду:

1) температура повітря від 22 °С до 24 °С;

2) вологість повітря від 40 % до 60 %;

3) швидкість руху повітря оптимальна до 0,1 м/с;

б) для теплого періоду року:

1) температура повітря від 23 °С до 25 °С;

2) вологість повітря від 40 % до 60 %;

3) швидкість руху повітря оптимальна до 0,1 м/с.

Для освітлення робочих місць і приміщення в цілому застосовується як природне бічне освітлення, так і штучне освітлення.

Приміщення з ЕОМ повинні мати природне і штучне освітлення відповідно до ДБН В.25-28-2006 «Природне і штучне освітлення». Природне світло повинно проникати через бічні світлові прорізи, зорієнтовані, як правило, на північ або північний схід, і забезпечувати коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5 %:

$$e^{IV} = 1.35,$$

де $e^{IV}_{норм}$ – нормоване значення КПО для 4-го поясу світлового клімату.

Згідно ДСН 3.3.6.037-99 рівень шуму в лабораторії не перевищує 50 дБ.

Загальний рівень штучного освітлення приміщення можна перевірити за допомогою методу питомої потужності.

Розрахункова формула методу [14]:

$$W = \frac{W_{\sum}}{S}, \tag{4.1}$$

де W – питома потужність, Вт/м^2;

S – площа приміщення, м^2;

$W_{\sum}$ – загальна потужність освітлювальної установки, Вт.

Загальна потужність освітлювальної установки розраховується за формулою

$$W_{\sum} = W_{св} \cdot n_{св}, \tag{4.2}$$

де $W_{св}$ – потужність одного світильника, $W_{св}$ = 80 Вт;

$n_{св}$ – кількість світильників в приміщенні, $n_{св}$ = 4 шт.

Розглянуте приміщення має площу 30 м^2, в якому розташовано шість світильників потужністю 80 Вт

$$W_{\sum} = 4 \cdot 80 = 320 \text{ Вт},$$

$$W = \frac{320}{30} = 11 \text{ Вт/м}^2.$$

Табличне значення для отриманого результат освітленість складе 200 лк, коли згідно стандарту ДБН В.2.5-28-2006. в лабораторії освітленість повинна бути 300-500 лк. Для отримання освітленості в 400 лк необхідна питома потужність 21 Вт/м^2.

Для поліпшення умов роботи в лабораторії необхідно в денний час застосовувати додаткове освітлення.

ВИСНОВКИ

Під час виконання магістерської кваліфікаційної роботи опрацьовано відповідну літературу та інформаційні джерела за темою досліджень. Проаналізовано конструкції радіоелектронних приладів з модульною структурою, а також виявлено її основні функціональні підсистеми, що можна представити як окремі модулі. Розглянуто технологічний процес складання зазначених приладів, а також його структури та можливі види організації.

Крім того, проаналізовано види та методи імітаційного моделювання, під час якого було визначено переваги та недоліки кожного. До того ж, для подальшого виконання роботи було обрано дискретно-подієве моделювання завдяки його можливості розглядати тільки основні події, при цьому охоплюючи всі етапи процесу.

За результатами, отриманими під час аналізу, було розроблено структурну схему технологічного процесу складання модульних приладів, а також відповідну узагальнену функціональну схему та функціональну схему в межах автоматизованої виробничої дільниці. Відповідно до реалізованих схем було розроблено математичну модель зазначеного процесу, а також параметричні моделі його основних елементів.

Для подальшої розробки імітаційної моделі було обрано середовище Plant Simulation. У ньому виконуються процеси моделювання та відтворення виробничих систем та їхніх технологічних процесів із забезпеченням можливості оптимізації матеріальних потоків, використовуються ресурси та логістика на всіх рівнях планування виробництва. У зазначеному вище середовищі відповідно до розроблених схем та моделей було виконано імітаційне моделювання технологічного процесу складання та його дослідження протягом трьох різних проміжків часу.

За допомогою середовища MatLab, зокрема додатка Robot Toolbox for Matlab v.1.0 було проведено моделювання роботи промислового робота-маніпулятора з трьома ступенями свободи, що в межаж зазначеної функціональної схеми може бути використаним як елемент АТНС для переміщення модулів та готових виробів між її елементами. Крім того, для реалізації власне складальних операцій.

Побудовані імітаційні моделі дозволяють моделювати технологічний процес складання приладів з модульною конструкцією із використанням різноманітних вхідних значень у часі зі схематичним завданням структурних елементів процесу та візуалізацією елементів відповідної виробничої ділянки. До того ж, отримувати результати моделювання в графічному вигляді. Це дозволяє наочно уявити отримане рішення щодо організації зазначених процесів, а також оцінити їхню ефективність, при цьому мінімізувавши витрати коштів та часу на їхню реалізацію. Моделювання роботи маніпулятора також дозволяє спростити розрахунок траєкторії його руху, що автоматично виконується на базі зазначеного програмного забезпечення.

Проведено забезпечення безпечних умов праці в лабораторії, де проводились дослідження. В результаті чого були запропоновані шляхи покращення умов праці та подолання впливу шкідливих чинників на працеспроможність та результативність роботи працівників в лабораторії, що безпосередньо впливає на кінцевий результат роботи та забезпечує безпеку життєдіяльності.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методичні вказівки з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І.Ш. Невлюдов, Р.В. Артюх, Н.П. Демська, В.В. Євсєєв, О.І. Филипенко, О.М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 50 с.

2. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» : навч. посіб. / за ред. І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарєва, Г.В. Пономарьова. Київ, 2016. 320 с.

3. ДСТУ 3008:2015 Інформація та документація «Звіти у сфері науки і техніки». Структура та правила офомрлювання. / В. Земцева; Ю. Поліщук, канд. фіз.-мат. наук; Р. Санченко, канд. техн. наук; Л. Шрамко; А. Ямчук (науковий керівник) ДП «УкрНДНЦ» від 22 червня 2015р. № 61 з 2017-07-01.

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

5. Федосєєв Є.Г. Аналіз методів імітаційного моделювання технологічних процесів складання / «AUTOMATION AND DEVELOPMENT OF ELECTRONIC DEVICES» ADED-2023 Part 2. Харків, ХНУРЕ.: 2023. С. 401-403

6. Невлюдов І.Ш. Основи виробництва електронних апаратів / І.Ш. Невлюдов. – Харків: Компанія СМІТ, 2005. – 592 с.

7. Кравченко Л.С. Розробка технологічного процесу складання: Навч. посібник для студентів машинобудівних спеціальностей. – Харків: НТУ«ХПІ», 2004 р. – 146 с.

8. Невлюдов І. Ш. Виробничі процеси та обладнання об’єктів автоматизації: Підручник для студентів вищих навчальних закладів / І. Ш. Невлюдов. – Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2017р. – 444 с.

9. Невлюдов І.Ш. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.І. Филипенко, Н.П. Демська, С.П. Новоселов. – Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2019. – 366 с.

9. Невлюдов І.Ш. Людино-машинний інтерфейс в технічних засобах автоматизації: Навчальний посібник / І.Ш. Невлюдов, О.І. Филипенко, Б.О. Шостак. – Харків : «ХТМТ», 2019. – 244 с.

10. Невлюдов І.Ш. Основи наукових досліджень / І.Ш. Невлюдов, Ю.М. Олександров, А.О. Андрусевич, О.О. Чала. – Кривий Ріг : КК НАУ, 2017. – 344 с.

11. Діагностика та контроль робочих процесів: навч. посібник для студентів спеціальності «Прикладна механіка» денної та дистанційної форм навчання / В. М. Доля – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – 129 с.

12. Siemens Tecnomatix Plant Simulation 15.2.0. https://en.taiwebs.com/windows/download-siemens-tecnomatix-plant-simulation-2384.html

13. Забара С.С., Гагарін А.А., Кузьменко І.М., Щербашин Ю.Д. Моделювання систем в середовищі MATLAB. – К.: Видавництво Університету “Україна”, 2021. – 136 с.

14. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни "Організація керування умовами праці" підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету

[Електронний ресурс] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стиценко, Г. В. Пронюк, Н. М. Сердюк. – Харків, 2017. – 108 с.