

Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський Національний Університет
Факультет Комп'ютерних Інформаційних Технологій

Кафедра СКС

Система автоматизованого керування роботом при виготовленні
протезувальних деталей

«АКІТМ-21»

група

Явна Аліна Романівна

прізвище, ім'я та по-батькові

Керівник роботи:

д.т.н., професор, професор кафедри СКС

Возна Н.Я.

/посада/

/підпис/

/П.І.П./

Завідувач кафедри:

к.т.н., доцент, завідувач кафедри СКС

Сегін А.І.

/посада/

/підпис/

/П.І.П./

Тернопіль – 2024

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	8
1.1 Характеристика промислових роботів.....	8
1.2 Різновиди промислових роботів.....	13
1.3 Опис процесу виготовлення протезувальних деталей.....	19
1.4 Технічні характеристики обраного типу промислового робота.....	20
2. АВТОМАТИЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА.....	22
2.1 Опис технологічного процесу керування.....	22
2.2 Вибір технічних засобів автоматизації.....	23
2.3 Створення алгоритму керування роботом.....	27
2.4 Структурна схема системи керування.....	28
2.5 Функціональна схема системи керування.....	30
3. РОЗРАХУНОК МОДЕЛІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	32
3.1 Визначення еквівалентних параметрів.....	32
3.2 Моделювання перехідного процесу.....	34
3.3 Аналіз дискретних цифрових послідовностей.....	38
3.4 Аналіз стійкості та якості системи.....	43
3.4.1 Розрахунок стійкості системи.....	44
3.4.2 Аналіз стійкості системи за допомогою критерію Гурвіца.....	46
3.4.3 Аналіз якості системи.....	47
3.5 Синтез цифрового ПД-регулятора.....	50
ВИСНОВКИ.....	55
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	56

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток та вдосконалення технологій виробництва протезів і протезувальних компонентів набуває особливого значення у зв'язку зі зростанням кількості осіб, які потребують реабілітації після травм, отриманих під час війни. Високоякісні протези сприяють не лише фізичному відновленню пацієнтів, але й їхній соціальній інтеграції, а також суттєво полегшують процес психологічної реабілітації.

Одним із перспективних напрямків розвитку є впровадження автоматизованих систем керування роботами у виробництві. Використання промислових роботів дозволить забезпечити високу точність та максимальну швидкість виготовлення протезувальних деталей, мінімізуючи ризики похибок і знижуючи собівартість продукції.

Роботизовані системи дають можливість стандартизувати процеси виготовлення протезів, що сприяє зменшенню ризику помилок та забезпечує однакову якість кожної деталі. Крім того, автоматизація дозволяє мінімізувати частку ручної праці на виробничій лінії, зменшити ризики травматизму та виконувати складні операції з високою ефективністю.

Мета дослідження. Метою магістерської роботи є вдосконалення виробництва протезувальних деталей за допомогою систем автоматизованого керування роботом.

У межах роботи пропонується розробити та обґрунтувати технічні рішення, що забезпечують оптимальне регулювання параметрів промислового робота, зокрема кута нахилу та повороту шарнірного механізму. Підсумком впровадженої модернізації повинно стати обґрунтування практичних рекомендації щодо впровадження системи автоматизованого керування роботом у виробництві протезів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- спроектувати структурну та функціональну схему цифрової системи управління промисловим роботом;

- провести аналіз стійкості та якості функціонування цифрової системи керування на основі критеріїв стійкості;
- синтезувати математичну модель цифрового ПД-регулятора.

Об'єкт дослідження. Промисловий робот.

Предмет дослідження. Система автоматизованого керування промисловим роботом.

Методи дослідження. У процесі дослідження застосовувались: перетворення Лапласа, Z-перетворення, метод невизначених коефіцієнтів, метод розв'язання кубічного рівняння, аналіз стійкості та синтез ПД-регулятора. Для моделювання результатів використовувалося програмне забезпечення Matlab/Simulink.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна дипломного проєкту полягає у впровадженні автоматизованої системи керування, яка забезпечує оптимізацію процесу виготовлення протезувальних деталей.

Практичне значення одержаних результатів. Створені практичні рекомендації, що пропонуються у дипломній роботі, дозволять зменшити витрати на виробництві, забезпечуючи водночас високу точність і швидкість виготовлення деталей.

Напрямки подальшого розвитку. Розроблена модернізація слугуватиме проєктом для вдосконалення систем автоматизованого керування роботом у виробництві протезувальних деталей.

Апробація результатів магістерської роботи:

1. Явна А. Система автоматизованого керування роботом при виготовленні протезувальних деталей / Аліна Явна, Наталія Возна // Інноваційні підходи до розвитку технологій та економіки (IADTE 2024), Свалява, Червень 27, 2024. – 381-384 с.
2. Явна А. Система автоматизованого управління технологічним процесом виготовлення шоколаду / Аліна Явна // Збірник матеріалів проблемно-наукової міжгалузевої конференції «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» (АКІТ – 2023), Тернопіль, 2023. – 8-11 с.

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

1.1 Характеристика промислових роботів

Сучасні промислові роботи активно інтегруються в різноманітні сфери людської діяльності, що забезпечує суттєве підвищення ефективності технологічних процесів.

Системи автоматизованого керування – це комплекс обладнання та програмного забезпечення, що призначений для автоматизації та оптимізації роботи у різних галузях. Основною функцією систем автоматизованого керування роботом є забезпечення стабільної, точної та ефективної роботи технологічних систем у різних галузях. Автоматизоване керування роботами сприяє підвищенню продуктивності виробництва, мінімізації впливу людського фактору та забезпеченню високого рівня безпеки. Такі системи дають можливість виконувати складні операції з високою точністю, що особливо важливо в умовах, де потрібна робота в агресивних середовищах, таких як зони з підвищеною токсичністю, радіоактивністю або екстремальними температурами.

Промисловий робот – це багатофункціональний автоматизований пристрій, що складається з виконавчого механізму, у вигляді маніпулятора з декількома ступенями свободи, та системи програмного управління. Висока гнучкість таких роботів дозволяє адаптувати їх до виконання різноманітних операцій: від простого переміщення об'єктів до виконання складних технологічних завдань, таких як зварювання, монтаж або складання виробів [12]. Такі роботи є широко розповсюдженими засобами автоматизації виробничих процесів, оскільки мають гнучкі технологічні властивості.

Їх класифікують за такими ознаками (рисунк 1.1):

1. За характером виконуваних технологічних операцій:
 - технологічні роботи: які виконують основні операції технологічного процесу (зварювання, ливарні роботи, обробка матеріалів тощо);

- допоміжні роботи: призначені для виконання допоміжних функцій (обслуговування основного технологічного обладнання або підтримка транспортно-складських систем);

- універсальні роботи: вони здатні виконувати різноманітні операції, адаптуючись до різних завдань у межах виробничого процесу.

2. За видом виробництва: ливарні, зварювальні роботи, ковальсько-пресові роботи, фарбувальні роботи, транспортно-складські роботи і т.д.

3. За системою координат руки маніпулятора:

- прямокутна: плоска та просторова конфігурація координат для виконання лінійних рухів;

- полярна і циліндрична: системи координат, які забезпечують полярні або циліндричні рухи маніпулятора;

- сферична: забезпечує рухи в сферичній конфігурації координат;

- кутова: включає плоскі, циліндричні та сферичні рухи, що дозволяють виконувати складні операції з великою точністю.

4. За вантажопідйомністю:

- надлегкі роботи (вантажопідйомність до 1 кг);

- легкі роботи (вантажопідйомність до 10 кг);

- середні роботи (вантажопідйомність до 200 кг);

- важкі роботи (вантажопідйомність до 1000 кг);

- надважкі роботи (вантажопідйомність понад 1000 кг).

5. За типом силового приводу:

- з електромеханічними приводами: використовують електродвигуни для здійснення рухів;

- з пневматичними приводами: Використовують стиснене повітря для виконання операцій;

- з гідравлічними приводами: Використовують рідинні приводи для забезпечення великої сили на виході;

- з комбінованими приводами: Поєднують різні типи приводів для досягнення більшої гнучкості та ефективності.

6. За видом програми:

- жорстко програмовані роботи: виконують завдання згідно з жорстко заданою програмою;
- гнучко програмовані роботи: обладнані системами для швидкої зміни програми, що дозволяє адаптуватися до змін у виробничому процесі;
- адаптивні роботи: здійснюють свої дії на основі інформації, отриманої від зовнішнього середовища;
- інтелектуальні роботи: Здатні самостійно планувати свою поведінку, враховуючи поставлені завдання, критерії якості, власний стан і стан зовнішнього середовища.

7. За характером керування:

- позиційні: виконують рухи по заздалегідь визначеним точкам;
- контурні: здійснюють безперервний рух уздовж заданого контуру;
- комбіновані: поєднують позиційне та контурне керування для забезпечення складних технологічних операцій.

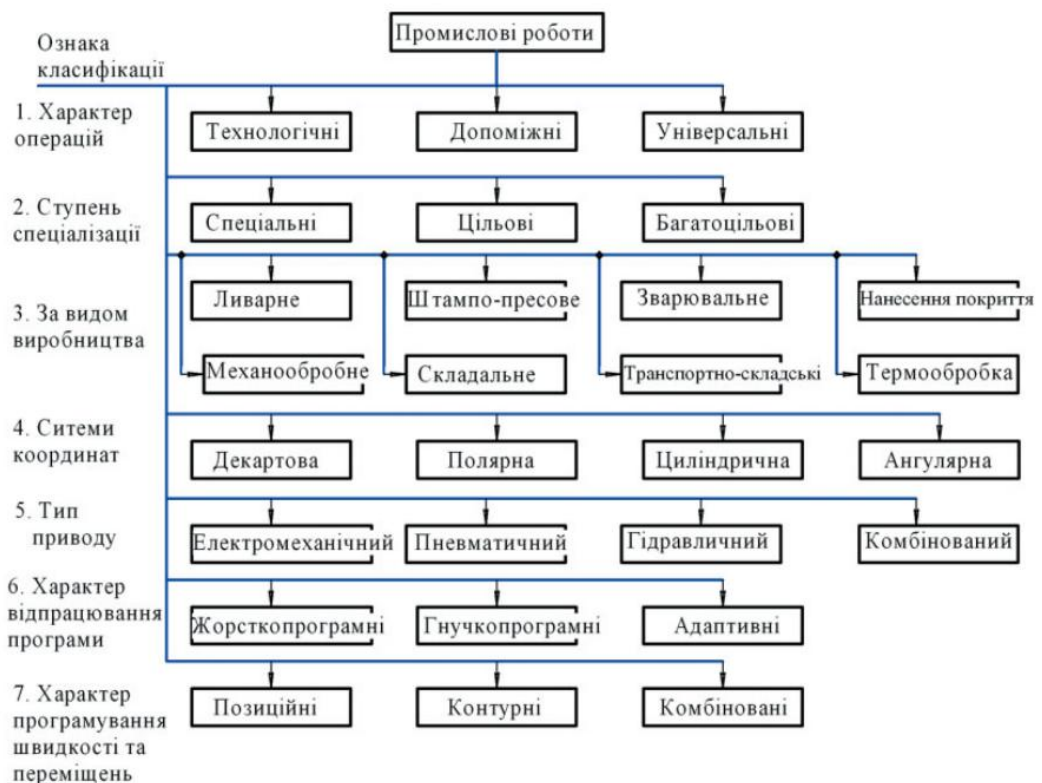


Рисунок 1.1 - Класифікація промислових роботів[10]

До основних технічних показників промислових роботів відносяться:

- номінальна вантажопідйомність — максимальна маса, яку може підняти та перемістити робот без втрати стабільності та точності виконання операцій;
- робочий простір — це тривимірний об'єм, в якому може діяти виконавчий механізм робота під час виконання операцій;
- зона обслуговування — частина робочого простору, в якій робот здатен виконувати завдання;
- швидкість переміщення — це швидкість, з якою робот переміщує свій робочий орган від однієї точки до іншої;
- похибка позиціювання — відхилення фактичного положення робочого органу від заданого програмою (цей показник є критично важливим для точних операцій, таких як зварювання, різання або монтаж);
- похибка траєкторії — це відхилення реальної траєкторії руху робочого органу від заданої програмою;
- число ступенів рухомості — кількість незалежних напрямків, у яких може переміщатися робочий орган робота. Цей показник залежить від конструкції маніпулятора і може варіюватися від одного до шести ступенів свободи або більше, що забезпечує гнучкість і точність у виконанні складних операцій.

Маніпулятор промислового робота — це механічний компонент робота, оснащений робочим органом, що є прототипом людської руки, який призначений для виконання рухів і маніпуляцій з об'єктами у виробничому середовищі[6]. Він зазвичай складається з кількох з'єднаних ланок (сегментів), що забезпечують свободу рухів у кількох ступенях. Маніпулятор може бути оснащений захватними пристроями, інструментами або датчиками для виконання різних технологічних операцій, таких як зварювання, складання, транспортування або обробка матеріалів.

Маніпулятори класифікуються за різними критеріями, що відображають їх функціональні можливості та методи керування. За характером виконуваних робіт їх поділяють на:

- універсальні маніпулятори: Використовуються для широкого спектру підйомно-транспортних операцій у машинобудуванні. Вони також забезпечують механізацію процесів обслуговування технологічного обладнання, таких як встановлення та зняття деталей на металорізальних верстатах, виконання зварювальних і свердлильних робіт.
- спеціальні маніпулятори: Призначені для виконання конкретних завдань у спеціалізованих умовах. Їхнє застосування є критичним у ковальсько-пресових цехах і ливарному виробництві, де потрібна підвищена точність і надійність роботи у важких умовах.

За способом керування:

- з ручним управлінням. Такі системи керуються безпосередньо оператором, який контролює рухи та операції. Вони застосовуються в умовах, де важлива гнучкість і миттєва адаптація до змінних виробничих умов;
- з автоматичним управлінням (програмовані). Їх робота базується на попередньо встановлених програмах, які, як правило, керуються електронно-обчислювальними машинами. Такі маніпулятори оптимальні для високопродуктивного автоматизованого виробництва, де потрібна стабільність і повторюваність операцій.

Працездатність маніпуляторів визначається рядом критичних технічних показників, таких як: робочий об'єм, маневреність, кут сервісу, коефіцієнт сервісу, вантажопідйомність, швидкість руху, енергетичні показники і т.д. Усі ці параметри визначають ефективність, надійність та придатність маніпулятора для виконання певних завдань у виробничих процесах.

1.2 Різновиди промислових роботів

Промислові роботи поділяють за їх призначенням, розмірами та формами.

Існують такі різновиди промислових роботів:

- шарнірні;
- декартові;
- порталні;
- дельта-роботи;
- SCARA-роботи.

Шарнірний промисловий робот — це тип робота, у якого рухомі частини з'єднані між собою за допомогою шарнірних з'єднань, що забезпечують йому високу гнучкість і маневреність. Основною перевагою шарнірних роботів є їх здатність працювати у складних тривимірних середовищах, виконуючи операції, які потребують високої точності та адаптивності. Ці роботи зазвичай мають від 4 до 6 ступенів свободи, що дозволяє їм переміщати свої маніпулятори у різних напрямках і виконувати широкий спектр завдань.

Fanuc M-20iA(рисунок 1.2) є однією з найпопулярніших моделей шарнірного типу роботів. Цей робот вирізняється своєю універсальністю та високою продуктивністю, завдяки чому широко використовується в різних галузях промисловості.



Рисунок 1.2 – Робот Fanuc M-20iA

Основні характеристики Fanuc M-20iA[15]:

1. Кількість ступенів свободи: 6. Це дозволяє цій моделі виконувати складні маніпуляції з об'єктами;
2. Вантажопідйомність: 20 кг. Завдяки цьому він часто використовується для обробки деталей середньої маси;
3. Робочий простір: радіус дії до 1,8 метра. Це дозволяє працювати роботу з об'єктами на великих відстанях, завдяки чому часто використовується для роботи в агресивних умовах;
4. Точність: похибка позиціонування робочого органу становить $\pm 0,08$ мм;
5. Швидкість переміщення: висока швидкість руху цього маніпулятора забезпечує швидке виконання операцій, що сприяє підвищенню загальної продуктивності виробництва.

Fanuc M-20iA оснащений передовою системою керування, яка дозволяє інтегрувати його в складні автоматизовані системи виробництва. Завдяки своїй надійності та простоті в обслуговуванні, ця модель стала однією з найпопулярніших серед підприємств, які прагнуть автоматизувати свої виробничі процеси.

Декартовий промисловий робот – це тип робота, яка рухається вздовж осей у прямокутній(декартовій) системі координат (X, Y, Z). Цей тип робота відрізняється простотою конструкції, високою точністю і стабільністю рухів, що робить його ідеальним для виконання завдань, де потрібне точне переміщення по прямолінійних траєкторіях.

Серед декартових промислових роботів популярною є модель: Yamaha XY-X Series (рисунок 1.3). Ця серія роботів забезпечує високу точність і надійність при виконанні завдань, де необхідне точне позиціонування та стабільне переміщення.



Рисунок 1.3. – Декартовий робот Yamaha XY-X Series

Основні характеристики Yamaha XY-X Series[23]:

1. Робочий простір: залежно від моделі, робочий простір може бути налаштований відповідно до вимог виробництва, що дозволяє адаптувати робота до різних завдань;
2. Точність: похибка позиціювання робочого органу становить $\pm 0,01$ мм;
3. Вантажопідйомність: до 20 кг. Дана модель придатна для транспортування деталей середньої ваги;
4. Швидкість переміщення: до 1500 мм/с, що сприяє підвищенню продуктивності на виробничій лінії.

Yamaha XY-X Series широко застосовується в таких галузях, як електроніка, виробництво медичних пристроїв, монтажні лінії та інші сфери, де потрібна точна автоматизація. Завдяки модульній конструкції, ці роботи легко інтегруються в існуючі виробничі системи.

Портальний промисловий робот — це тип робота, який функціонує на основі мостової конструкції, та пересувається вздовж осей X, Y і Z. Зазвичай, для пересування, він використовує напрямні або рейки, що дозволяє охопити великий робочий простір. Завдяки своїй конструкції, цей тип роботів застосовують для виконання важких підйомно-транспортних операцій, складання, обробки великих деталей, а також автоматизації на великих виробничих майданчиках.

Модель KUKA KR 1000 titan (рисунок 1.4) є однією з найвідоміших моделей серед порталних роботів. Цей робот став одним із флагманських рішень для важкої промисловості завдяки своїм унікальним технічним характеристикам і здатності працювати з надважкими вантажами.



Рисунок 1.4 – Портальний робот KUKA KR 1000 titan

Основні характеристики KUKA KR 1000 titan[19]:

1. Вантажопідйомність: до 1000 кг. Завдяки цьому, ця модель ідеально підходить для роботи з важкими матеріалами та компонентами у великих промислових масштабах;
2. Робочий простір: радіус дії до 3,2 метра;
3. Точність: похибка позиціонування — до $\pm 0,15$ мм;
4. Програмованість: оснащений передовими програмними рішеннями, що дозволяють легко інтегрувати його в автоматизовані виробничі системи та керувати складними робочими циклами.

KUKA KR 1000 titan широко використовується в автомобільній промисловості для роботи з кузовами автомобілів, у важкому машинобудуванні для переміщення великих деталей, а також у будівництві та інших галузях, де потрібна потужність та надійність.

Промисловий дельта-робот — це високошвидкісний роботизований механізм, який використовує паралельну кінематику для виконання точних і швидких маніпуляцій. Особливість дельта-роботів полягає в тому, що рухомі

частини робота знаходяться у верхній частині конструкції, що дозволяє значно зменшити інерційність системи та підвищити швидкість виконання операцій.

Однією з найпопулярніших моделей дельта-роботів є ABB FlexPicker IRB360 (рисунок 1.5). Цей робот відомий своєю швидкістю та точністю, і широко використовується там, де потрібна висока продуктивність і мінімальний час циклу.



Рисунок 1.5 – Дельта-робот ABB FlexPicker IRB 360

Основні характеристики ABB FlexPicker IRB 360[18]:

1. Вантажопідйомність: до 8 кг;
2. Робочий простір: радіус дії до 1,6 метра з робочою висотою до 0,5 метра;
3. Точність: точність позиціонування досягає $\pm 0,1$ мм. Завдяки цьому широко застосовується для задач, де необхідна точна обробка або сортування;
4. Швидкість: є однією з найшвидших моделей у своєму класі.

ABB FlexPicker IRB 360 широко застосовується для сортування продуктів харчування, упаковки товарів, роботи з фармацевтичними препаратами та інших високоточних виробничих процесів. Завдяки модульній системі управління і можливості легкої інтеграції у виробничі лінії, ця модель є популярною серед підприємств, які прагнуть досягти високої продуктивності, швидкості та ефективності.

SCARA-робот — це тип промислового робота з паралельною структурою. Його основна конструкційна особливість полягає в тому, що він має два обертові шарніри, які забезпечують рух у горизонтальній площині, та один або два лінійних приводи для вертикальних переміщень. Такі роботи добре підходять для таких операцій, як монтаж, збирання деталей, нанесення клеїв та інших, які потребують повторюваних рухів із високою точністю.

Epson G6 (рисунок 1.6) – модель SCARA-роботів, яка відома високою швидкістю, точністю, а також здатністю працювати в обмеженому просторі.



Рисунок 1.6 – SCARA-робот Epson G6

Основні характеристики Epson G6[20]:

1. Вантажопідйомність: до 6 кг;
2. Робочий простір: радіус дії до 650 мм з робочою висотою до 310 мм;
3. Точність: точність позиціювання складає $\pm 0,01$ мм, що забезпечує стабільність і високу якість при виконанні завдань;
4. Швидкість: здатний виконувати до 120 циклів на хвилину. Часто використовується для швидких операцій, наприклад: складання або переміщення деталей.

Epson G6 широко використовується в таких процесах, як складання електронних компонентів, пайка, нанесення клеїв, упаковка та переміщення малих деталей.

1.3 Опис процесу виготовлення протезувальних деталей

Виготовлення протезів — це високотехнологічний процес, що потребує точності, біосумісності матеріалів та індивідуального підходу до кожного пацієнта. Технологічний процес виготовлення протезувальних деталей здійснюється в декілька етапів, що поєднують інженерні, медичні та виробничі підходи. Етапи виготовлення можна об'єднати в наступні групи:

- збір даних та підготовка до проєктування;
- вибір матеріалів;
- Виробництво протезувальних деталей;
- Фінальна обробка;
- Збірка та тестування;
- Примірка та налаштування;
- Фінальна адаптація та навчання пацієнта.

Процес виготовлення протезувальних деталей починається зі зняття мірок у пацієнта. Зазвичай використовується 3D-сканування кінцівки або частини тіла, що потребує протезування. Це дозволяє отримати точну цифрову модель для подальшого проєктування. Далі, на основі зібраних даних інженери розробляють цифровий дизайн протезувальної деталі, що дозволяє створити модель, яка буде максимально відповідати анатомічним особливостям пацієнта.

Після цього, обираються матеріали для виготовлення протезів. Вибір матеріалів є важливим етапом, оскільки протез повинен бути не лише міцним, але й легким і біосумісним. Зазвичай, для цього використовують: титанові або алюмінієві сплави, нержавіючу сталь, полімери (наприклад, поліетилен, поліуретан) та композитні матеріали. Важливо, щоб матеріали не викликали алергічних реакцій та не взаємодіяли негативно з тканинами організму.

Наступним, є етап виготовлення деталей. Основні форми створюються на верстатах, на яких заготовка набуває необхідних розмірів та форм. Для полімерних деталей може застосовуватись лиття під тиском або формування під впливом високих температур. Це дозволяє створювати міцні та легкі

протезувальні елементи. Після первинного формування деталі піддаються механічній обробці. Якщо протез виготовляється з металу, часто використовуються методи механічної обробки, такі як фрезерування, токарна обробка, шліфування. Ці процеси дозволяють досягти високої точності та гладкості поверхні деталей. Також, на етапі виготовлення часто застосовують роботизовані системи для свердління та вирізання отворів.

Коли усі компоненти протезу готові, їх збирають у кінцевий виріб. Цей етап включає встановлення рухомих частин, механізмів кріплення та інших функціональних елементів. Готовий протез піддається тестуванню для перевірки його функціональності, міцності та зручності для пацієнта.

Після виготовлення протез приміряється на пацієнта. У разі необхідності, протез налаштовується під конкретні анатомічні особливості пацієнта. Після установки протезу пацієнту проводять навчання з використання пристрою, а також надаються рекомендації щодо обслуговування протезу та догляду за ним.

Цей комплексний процес вимагає координації між різними фахівцями для забезпечення якості та функціональності готового виробу. Цей традиційний підхід у поєднанні з сучасними технологіями, такими як промислові роботи, дозволяє створювати високоякісні протезувальні деталі, що відповідають індивідуальним потребам пацієнтів.

1.4 Технічні характеристики обраного типу промислового робота

Для виробництва протезувальних деталей найкраще підходить промисловий робот шарнірного типу, оскільки у даного робота є можливість робити отвори під різними кутами. Представники типів SCARA-роботів та дельта-роботів не підходять під задачу свердління деталі, так як більше підходять для сортування або збірки.

Провівши аналіз існуючих моделей роботів шарнірного типу, для дипломного проекту було обрано робот Universal UR10.

Universal Robots UR10 (рисунок 1.7) — це один з найпопулярніших промислових роботів шарнірного типу, відомий своєю універсальністю, гнучкістю, здатністю працювати безпосередньо поруч із людьми та зручністю в інтеграції на виробництвах різного масштабу.



Рисунок 1.7 – Робот шарнірного типу Universal UR10

Фізичні параметри робота Universal UR10: вага – 17 кг, діаметр основи – 149 мм, матеріали – алюміній, пластик, сталь. Він має 6 ступенів свободи, що дозволяє виконувати складні маніпуляції та точні рухи у тривимірному просторі. Ця модель здатна піднімати вантажі масою до 10 кг, робочий радіус дії становить 1300 мм, а точність позиціювання до $\pm 0,1$ мм. UR10 має високу швидкість руху, що дозволяє виконувати операції швидко та ефективно, зменшуючи час циклу. Крім того, перевагою даної моделі є її зручне та інтуїтивне програмування, що необхідно для швидкого налаштувати робота на виконання нових завдань. Ціна такого робота – до \$30000[16].

Характеристики Universal Robots UR10 відповідають вимогам, які необхідні для виробництва, а його можливості забезпечать підвищення ефективності та швидкості виготовлення протезувальних деталей.

2. АВТОМАТИЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА

2.1 Опис технологічного процесу керування

Для реалізації завдань даного виробництва планується використання промислового робота Universal Robots UR10, який здатний виконувати точні кутові переміщення. Як зазначено у першому розділі, UR10 був обраний через його високі технічні характеристики, адаптивність до виробничих процесів і можливість інтеграції з автоматизованими системами управління.

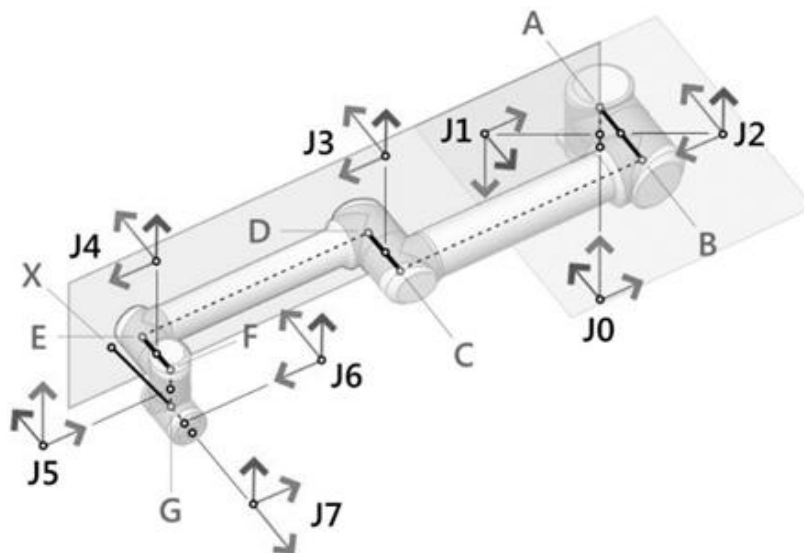


Рисунок 2.1 – Розташування датчиків положення шарнірів[22]

Усі частини обраного робота з'єднані шарнірним механізмом із кількома ступенями свободи. Кожна шарнірна ланка обладнана датчиками положення (рисунок 2.1), що працюють на фазоаналоговому принципі. Цей принцип ґрунтується на вимірюванні різниці фаз між задаючим сигналом, який подається від керуючої системи, та сигналом зворотного зв'язку, який надходить із датчика, встановленого на шарнірі. Ця різниця фаз перетворюється на числові значення, які дозволяють визначити поточне положення шарніра.

Датчики положення (J0 - J7) формують три числові вектори, що описують координати кожної осі у просторі протягом заданого часового інтервалу. Дані,

отримані з кожного датчика, передаються до контролера, де вони обробляються та зберігаються у вигляді структурованих списків для подальшого аналізу[21].

Контролер використовує дані датчиків для визначення положення кожного шарніра робота на основі кутів Ейлера. Кути Ейлера розраховуються за допомогою відомих формул.

Траєкторія руху робота визначається за допомогою інтерполяції між початковим і кінцевим положеннями шарнірів. Один з основних методів – це лінійна інтерполяція у просторі кутів з'єднання:

$$J_{\text{проміж}}(t) = J_{\text{старт}} \times (1 - t) + J_{\text{кінц}} \times t \quad (2.1)$$

, де $t \in [0,1]$ — часовий параметр, а $J_{\text{старт}}$ і $J_{\text{кінц}}$ — початкове та кінцеве положення відповідного шарніра.

Таким чином, швидке та точне регулювання кута нахилу шарнірів є критично важливим для забезпечення коректної роботи робота та виконання виробничих завдань.

2.2 Вибір технічних засобів автоматизації

При виборі технічних засобів автоматизації для виробництва протезів, необхідно враховувати різні фактори, такі як вартість, вимоги до точності та швидкості роботи. Для автоматизованого керування роботом застосовуватимемо: програмований логічний контролер та локаційний датчик.

Програмований логічний контролер — електронний пристрій, який використовується для автоматизації технологічних процесів таких як, керування конвеєрною лінією, насосами на станціях водопостачання, тощо[11]. Він використовується для забезпечення стабільного і точного контролю над промисловим обладнанням, таким як роботи, механічні руки, тощо. Його основними перевагами є значна кількість пристроїв вводу-виводу, надійність, тривалий термін служби, а також можливість роботи в складних умовах виробництвах: висока вологість, пил, перепади температури, вібрації тощо.

Серед доступних моделей можна розглянути ОВЕН ПЛК160 (рисунок 2.2). Цей програмований логічний контролер з дискретними і аналоговими входами/виходами на борту, розроблений для управління технологічними процесами і автоматизації обладнання в промисловості. Контролери цієї лінійки рекомендуються для побудови розподілених систем керування малого і середнього масштабу, і їх диспетчеризації[9]. До переваг даного контролера слід віднести:

- легке інтегрування в існуючі системи автоматизації, завдяки підтримці RS-485 і Ethernet;
- ARM-процесор, за допомогою якого можна забезпечити достатню швидкість для більшості промислових задач;
- підтримка розширення, яка дає можливість збільшити кількість входів і виходів;
- можливість під'єднання панелей операторів, GSM-модемів, зчитувачів штрих-кодів тощо.



Рисунок 2.2 - Зовнішній вигляд ОВЕН ПЛК160

Локаційний датчик — це прилад, що містить первинний перетворювач і функціонує за допомогою випромінювання та прийому сигналів для визначення

місця розташування, положення чи руху об'єктів у просторі. Для отримання інформації про відстань до об'єкта необхідно, щоб об'єкт або середовище навколо нього випромінювали чи відбивали сигнал, який сприйматиметься сенсором.

Залежно від призначення, локаційні датчики поділяють на: датчики виявлення та датчики вимірювання відстані. Датчики виявлення зазвичай з таких елементів, як світлодіод і фотодіод, і на виході формують сигнал типу «True/False». Датчики вимірювання відстані працюють на основі аналізу часу, за який сигнал проходить від світлодіода до об'єкта і назад до фотодіода. Схематичне зображення базового локаційного датчика наведено на рисунку 2.3.

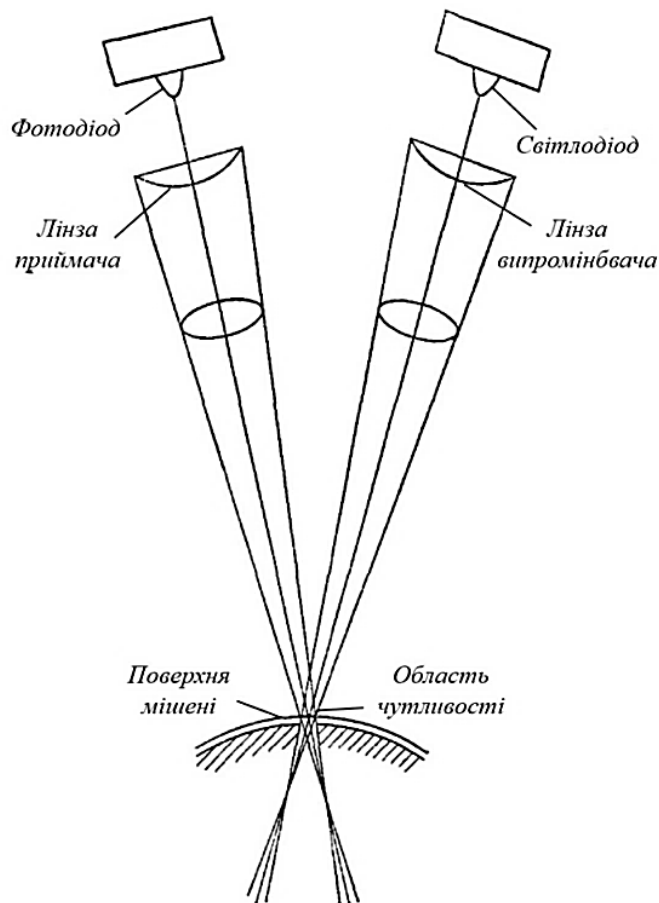


Рисунок 2.3 – Принцип роботи базового локаційного датчика[2]

У виробництві протезів датчик допомагає вимірювати відстані до деталі, виявляти перешкоди або наявність об'єкта маніпулювання у робочій зоні. Також, вони дають можливість своєчасно передбачити небезпеку, щоб загальмувати робота, або орієнтувати його рух в іншому напрямку.

Серед локаційних датчиків середнього цінового сегменту, можна звернути увагу на датчики виробника Omron або Keyence. Вони мають хорошу чутливість, точність, та добре справляються з необхідними процесами на невеликих об'єктах.

Omron E3Z(рисунок 2.4) — це оптичний фотоелектричний датчик, який широко використовується в промисловій автоматизації. Серія E3Z є популярною завдяки надійності, компактності та простоті в експлуатації. Він може працювати в режимі дифузного відбиття, через променевий бар'єр або з ретрорефлектором, що дає гнучкість у виборі відповідного типу для певних завдань[7]. До переваг цієї моделі можна віднести:

- здатність розпізнавати об'єкти на відстані, від кількох сантиметрів до кількох метрів;
- наявність дискретного виходу, що полегшує з'єднання з програмованим логічним контролером або іншими контролерами;
- стійкість до пилу і вологи, що робить його придатним для використання в несприятливих умовах;
- швидкість та точність реагування на зміни положення об'єкта.



Рисунок 2.4 - Зовнішній вигляд датчика Omron E3Z

2.3 Створення алгоритму керування роботом

Для автоматизації виробництва, необхідно написати алгоритм керування, який дозволить організувати безперервний процес автоматизованої обробки заготовок, контролюючи всі етапи операцій і забезпечуючи інтеграцію з зовнішніми пристроями та механізмами. Основна програма керування повинна враховувати вихідні сигнали, для керування пневматичними розподільниками, вхідні сигнали, що надходять від кінцевих вимикачів і кнопок управління, включати алгоритми автоматичного повернення робота в початкове положення і режим ручного керування, що дозволить оператору здійснювати індивідуальні команди.

Увесь алгоритм можна поділити на чотири логічних частини:

- режим початкового положення;
- запуск технологічного процесу;
- циклічні операції системи;
- режим завершення програми.

Спершу, необхідно ініціалізувати усі вхідні та вихідні сигнали, і налаштувати програму для обробки команд з кнопок та інших пристроїв управління. Крім того, потрібно задати роботизованій системі початкове положення для виконання операцій.

При отриманні команди «Початкове положення» подається сигнал на встановлення всіх виконавчих елементів у початкову позицію. Після цього, оператор повинен переконатися, що всі датчики сигналізують про досягнення початкового положення.

Наступним етапом активується кнопка «Старт», яка переводить всю систему в процес запуску. В цей момент, конвеєр розпочинає переміщення заготовок, а локаційний датчик - перевіряє наявність заготовки на конвеєрі. У разі виявлення, сигнал передається у контролер, який здійснює переміщення деталі до робочої зони і активує інструмент для подальшої обробки.

Після завершення процесу утворення отвору, на програмований логічний

контролер подається сигнал для переміщення конвеєра на наступну позицію. Далі, датчик перевіряє наявність наступних заготовок та їх розміщення. За потреби, запускається процес переміщення заготовки в задане положення, за допомогою робота. Даний процес відбувається циклічно, до моменту обробки останньої деталі.

У разі відсутності деталі, система переходить до завершальної підпрограми. Завершальний режим повертає маніпулятор до початкового положення та зупиняє рух конвеєра.

Також, для екстрених випадків необхідно включити режим аварійної зупинки, який при натисканні кнопки «Стоп» зупинятиме всі операції та подаватиме сигнал «Вимкнено» на всі виконавчі елементи для негайного припинення роботи. Також, після ініціалізації існуватиме можливість активації ручного управління, для того щоб оператор міг здійснювати окремі команди за допомогою віртуальних або фізичних кнопок.

2.4 Структурна схема системи керування

Структурна схема системи автоматизованого керування (рисунок 2.5) промисловим роботом розробляється на основі вибраних технічних засобів автоматизації. Вона є багаторівневою і включає такі функціональні блоки: блоки датчиків конвеєра та маніпулятора, блок керування промисловим роботом, блоки виконавчих пристроїв конвеєра та маніпулятора, блок вводу/виводу.

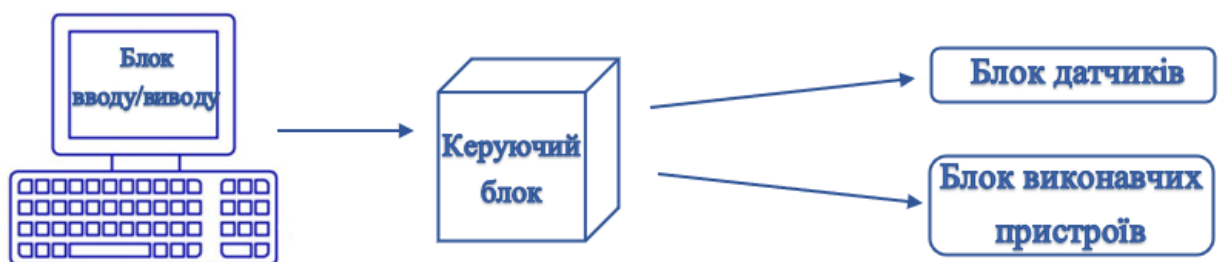


Рисунок 2.5 – Структурна схема системи керування

Блок керування промисловим роботом є центральним елементом системи і забезпечує координацію роботи інших компонентів. Його структура включає: мікроконтролер, блоки перетворювання даних: цифро-аналогові або аналого-цифрові перетворювачі, а також джерела живлення, які забезпечують стабільне електропостачання всіх елементів конвеєра та маніпулятора.

Блок вводу/виводу забезпечує взаємодію оператора із системою і включає: екран оператора та панель індикаторів. На екрані оператора відображається інформація про стан системи, параметри процесів і можливі помилки, а також він дозволяє вводити необхідні параметри, такі як координати для отворів, матеріал деталі, глибину свердління тощо. Панель індикаторів – сигналізує про критичні ситуації, зношення компонентів або перевищення допустимих навантажень.

Блок датчиків маніпулятора містить: датчики положення шарнірів, датчик перевірки наявності мітки на деталі та датчик зношення свердла. Датчики положення шарнірів забезпечують надання інформації про кутове положення кожного шарніра в реальному часі. Датчик наявності мітки на деталі дозволяє маніпулятору точно позиціонувати інструмент відносно деталі. Датчик зношення свердла – відстежує стан ріжучого інструмента.

Блок виконавчих пристроїв маніпулятора включає в себе блок двигунів маніпулятора, які здійснюють переміщення шарнірів маніпулятора згідно з командами контролера.

Блок датчиків конвеєра складається з інфрачервоних лазерних датчиків, які перевіряють наявність деталі у робочій зоні маніпулятора. Вони забезпечують високу точність і швидкість виявлення об'єктів.

Блок виконавчих пристроїв конвеєра містить електродвигун, який здійснює рух конвеєрної стрічки, забезпечуючи транспортування деталей у зону роботи маніпулятора.

Технологічний процес виготовлення протезувальних деталей відбувається наступним чином. Спершу, оператор через термінал або комп'ютер вводить необхідні параметри у базу даних. Додані координати отворів, матеріал та маса

деталі, глибина отвору та інше, завантажуються у керуючий блок маніпулятора. Також, на цьому етапі контролюється максимальна швидкість конвеєра (0,25 - 0,8 м/с), яка залежить від маси деталі. Максимальна допустима вага деталі - 6кг.

Після цього, запускається конвеєр з деталями. Інфрачервоні датчики конвеєра на початку робочої зони робота фіксують наявність, початок та кінець деталі. Коли конвеєр зупиняється, зап'ястя маніпулятора вирівнюється за трьома осями, далі перевіряється відхилення позиції мітки за даними датчика (при потребі положення корегується), і після цього робот робить отвори згідно заданих координат.

Виконавши дані етапи, конвеєр відновлює роботу. В робочу зону під'їжджає наступна деталь, для якої виконуються аналогічні дії. Описана послідовність виконується до тих пір, поки оператор не зупинить процес через термінал або комп'ютер.

2.5 Функціональна схема системи керування

Функціональна схема детальніше показує принцип дії системи керування промисловим роботом (рисунок 2.6). Вона реалізована за допомогою ряду сенсорів, які забезпечують точне визначення положення та виконання операцій.

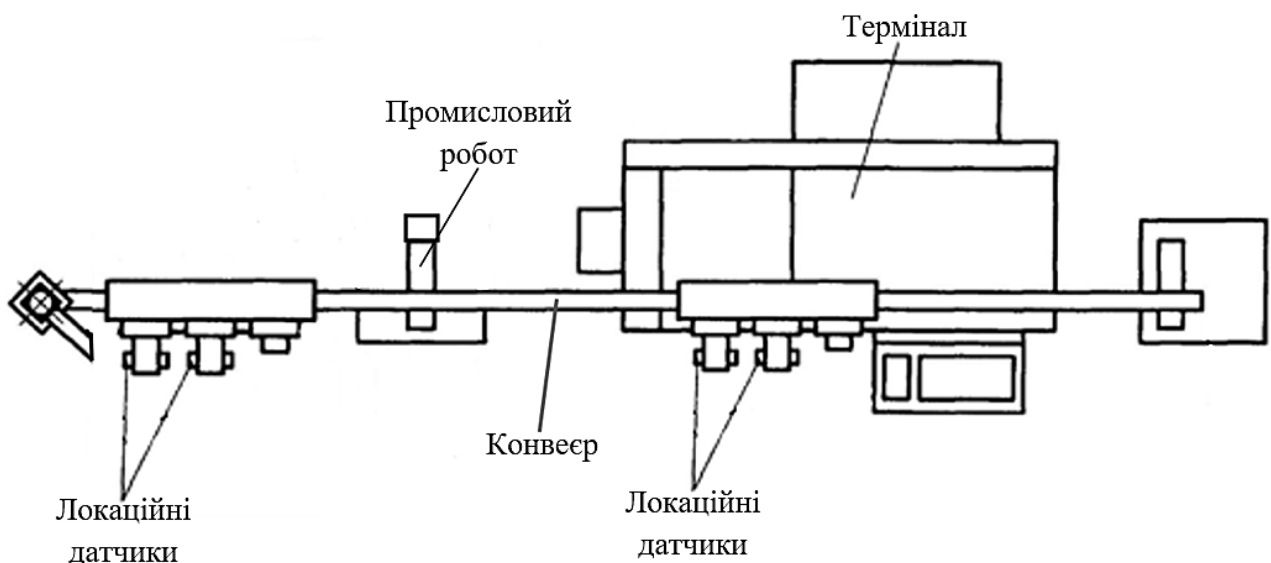


Рисунок 2.6 – Функціональна схема системи керування

На границях робочої зони маніпулятора та вздовж бортів конвеєра встановлені датчики, які працюють за таким принципом: інфрачервоний лазер випромінює промінь на приймач, розташований на протилежному боці конвеєра. В момент, коли деталь перекриває промінь, приймач фіксує сигнал, який свідчить про надходження деталі у робочу зону.

Датчик наявності мітки на деталі являє собою високоточну камеру з роздільною здатністю 1,3 МП, розташовану на відстані 30 мм від об'єкта. Вона фіксує зображення з подальшою цифровою обробкою. Після проведення кореляційного аналізу визначається відхилення мітки від центра, яке враховується для корекції координат деталі.

Регулятор позиції знаходиться в блоці перетворень, де відбувається управління напругою для більш точного та швидкого коригування відхилення положення. Параметри положення вводяться через термінал, включаючи координати точки над отвором та глибину отвору. Всі координати передаються до мікроконтролера, який порівнює задані параметри з поточним положенням. Використовуючи формули обчислення кутів Ейлера, розраховується необхідний кут нахилу кожного шарніра. Напруга подається на шарніри до тих пір, поки поточне положення маніпулятора не співпадає із заданим.

Коли координати збігатимуться із заданими, маніпулятор активує інструмент, який за допомогою трьох шарнірів вирізьблюватиме отвір та рухатиметься до необхідної глибини, визначеної параметрами та підтвердженої сигналами з датчиків. Після досягнення потрібної глибини, маніпулятор повертатиметься у вихідне положення над отвором. Якщо потрібні додаткові отвори, цикл повторюється, забезпечуючи точне досягнення всіх заданих координат.

Після цього, конвеєр з деталями відновлює свою роботу, а робот переходить в режим очікування до моменту, поки наступна деталь потрапить у робочу зону маніпулятора.

3. РОЗРАХУНОК МОДЕЛІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

3.1 Визначення еквівалентних параметрів

Визначення еквівалентних параметрів є важливим етапом, який дозволяє порівнювати різні моделі маніпуляторів, оптимізувати їхні налаштування та адаптувати під специфіку конкретних виробничих процесів. Даний етап дозволяє забезпечити ефективність і точність робіт під час виконання виробничих завдань. Встановлення цих параметрів передбачає врахування таких характеристик, як довжина ланок, діапазон рухів, швидкість та навантаження.

У таблиці 3.1 наведено основні характеристики обраного маніпулятора, які використовуватимуться під час розрахунків еквівалентних параметрів.

Таблиця 3.1 – Характеристики маніпулятора Universal Robots UR10[22]

Вага рухомої частини	14,264 кг
Радіус робочої зони	1300 мм
Робоча напруга	220 В
Діапазон робочих температур	0–50 °С
Клас захисту	IP54
Кількість витків двигуна	2200
Компенсуюча обмотки	0.4
Кількість фаз напруги	6
Сила струму двигуна	3,5 А
Опір обмотки якоря двигуна	3,14 Ом
Індуктивний опір фази трансформатора	0,408 Ом
Індуктивність фази трансформатора	0,0013 Гн

Під час керування двигуном постійного струму через регулювання якірного кола управління здійснюється через вплив на струм якоря. Такий вплив описується таким диференціальним рівнянням[3]:

$$x(t) = R_y(t) + L \frac{d_y(t)}{dt} \quad (3.1)$$

, де R – еквівалентний опір ланцюга якоря, L – його еквівалентна індуктивність.

З урахуванням навантаження диференціальний вираз матиме вигляд:

$$x(t) = J \frac{d_y(t)}{dt} + y(t) \quad (3.2)$$

, де J – приведений момент інерції.

Опір обмотки якоря з урахуванням збільшення температури, розраховується так:

$$R_{ят} = 1,2 * R_я = 1,2 * 3,14 = 3,768 \quad (3.3)$$

, де $R_я$ це опір обмотки якоря двигуна. Звідси, при температурі 16 °C опір обмотки буде рівний 3,768 Ом.

Розрахунок опору, який спричинений комутаційними процесами у тиристорному перетворювачі:

$$R_{тп} = \frac{X * m}{2\pi} = \frac{0,408 * 6}{2\pi} = \frac{2,448}{2\pi} = 0,389 \quad (3.4)$$

, де X — індуктивний опір фази трансформатора, а m — кількість фаз випрямленої напруги.

Опір щіткового контакту двигуна визначаємо так:

$$R_{щк} = \frac{2}{I} = \frac{2}{3,5} = 0,571 \quad (3.5)$$

, де I – сила струму двигуна.

Еквівалентний опір кола якоря знаходимо за формулою:

$$R_{ек} = R_{ят} + R_{фт} + R_{тп} + R_{щк} \quad (3.6)$$

Підставляючи значення, отримані під час попередніх розрахунків, маємо:

$$R_{ек} = 3,768 + 0,365 + 0,389 + 0,571 = 5,093 \quad (3.7)$$

Обчислення індуктивності обмотки якоря:

$$L_{я} = \frac{30 * U * C}{\pi * n * I} \quad (3.8)$$

, де C – компенсуюча обмотка, U – робоча напруга, I – сила струму двигуна, а n — кількість витків. Звідси:

$$L_{я} = \frac{30 * 220 * 0,4}{\pi * 2200 * 3,5} = 0,109 \quad (3.9)$$

Еквівалентна індуктивність кола якоря становить:

$$L_{ея} = L_{я} + L_{фт} = 0,109 + 0,0013 = 0,1103 \quad (3.10)$$

, де $L_{фт}$ – індуктивність фази трансформатора.

Приведений момент інерції обчислюється за формулою:

$$J = m_{м} * r^2 \quad (3.11)$$

, де $m_{м}$ — маса рухомої частини маніпулятора, а r^2 — половина радіуса робочої зони (у метрах). Розрахунок:

$$J = 14,264 * 0,65^2 \approx 6,02654 = 6,03 \quad (3.12)$$

3.2 Моделювання перехідного процесу

Для моделювання перехідного процесу, спершу необхідно виконати перетворення Лапласа, яке дасть можливість визначити передавальні функції системи. Таке перетворення є ключовим інструментом у дослідженні та аналізі

перехідних процесів, і дозволяє спростити процес моделювання.

Перетворенням Лапласа називають інтегральне перетворення часової функції $f(t)$ у комплексну площину $F(s)$. Пряме перетворення Лапласа записується наступним чином[8]:

$$F(s) = \mathcal{L}\{f(t)\} = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt \quad (3.13)$$

Для перетворення похідних застосовується теорема про диференціювання оригіналу, згідно якої якщо $f(t) = F(s)$ і функції $f'(t)$, $f''(t)$, ..., $f^n(t)$ є оригіналами, то:

$$f'(t) = S * F(s) - f(0) \quad (3.14)$$

$$f''(t) = S^2 * F(s) - S * f(0) - f'(0) \quad (3.15)$$

Використовуючи перетворення Лапласа, маємо рівняння:

$$x(S) = Ry(S) + LSy(S) \quad (3.16)$$

$$x(S) = JSy(S) + y(S) \quad (3.17)$$

Передавальною функцією $W(s)$ називається відношення між вхідним та вихідним сигналами і їх динамічними змінами:

$$W_1(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{(R+LS)} = \frac{1}{(5,093+0,1103S)} \quad (3.18)$$

$$W_2(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{1}{(JS+1)} = \frac{1}{(6,02654S+1)} \quad (3.19)$$

Перехідний процес відображає зміну координат системи до певного сталого значення за умови її стійкості. Для того щоб знайти загальну передавальну функцію перехідного процесу положення потрібно обчислити добуток двох послідовних передавальних функцій, та помножити його на інтегральну ланку:

$$W_3(s) = \frac{1}{s} \quad (3.20)$$

$$W_1(s) * W_2(s) * W_3(s) = W(S) \quad (3.21)$$

Звідси, маємо передавальну функцію:

$$W(S) = \frac{1}{(5,093+0,1103S)} * \frac{1}{(6,02654S+1)} * \frac{1}{S} = \frac{1}{(0,6647S^3+30,8S^2+5,093S)} \quad (3.22)$$

Для моделювання даної передавальної функції перехідного процесу керування промисловим роботом, скористаюсь програмним середовищем Matlab (рисунок 3.1).

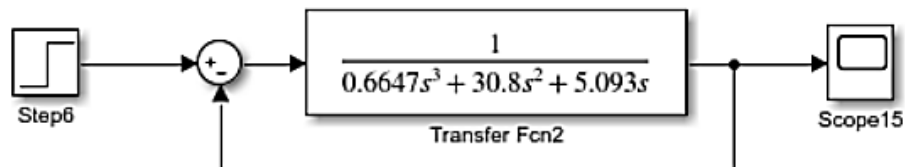


Рисунок 3.1 – Передавальна функція перехідного процесу керування промисловим роботом

Завдяки пакету Simulink можна відстежувати динаміку перехідного процесу у заданий проміжок часу (рисунок 3.2).

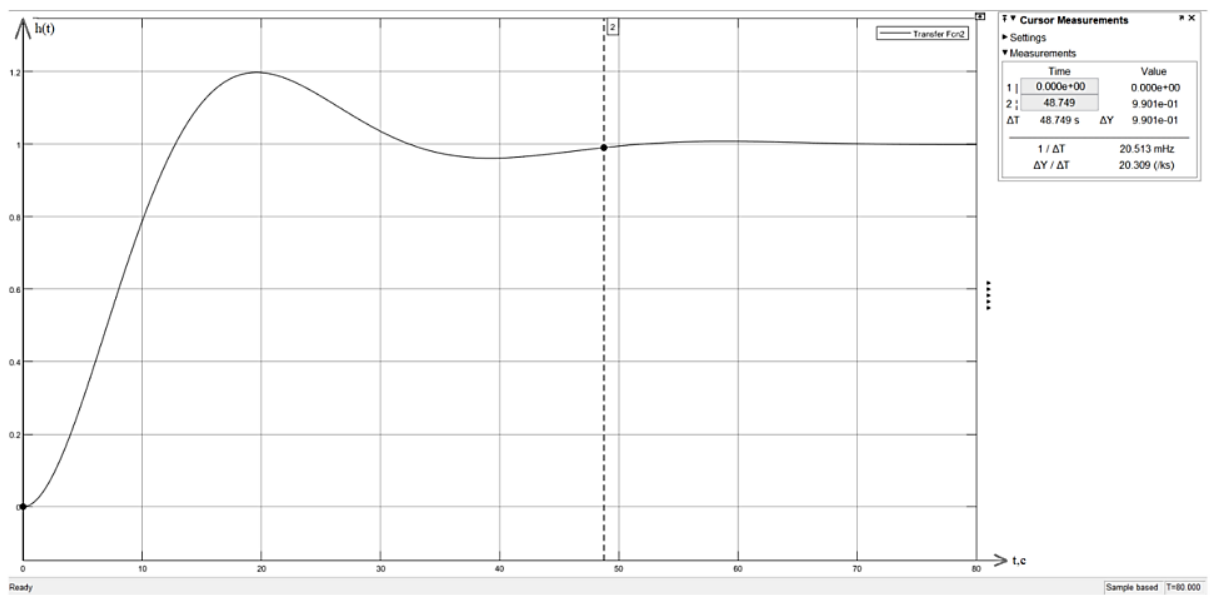


Рисунок 3.2 – Графік перехідного процесу функції

На рисунку 3.2 показано, що перехідний процес досягає задовільного стану приблизно за 48,8 секунд, а стабільного – 71,3 секунди. Звідси, можна зробити висновок, що без застосування регулятора система демонструє

повільний перехід до стабільного стану.

Також, використовуючи отриману передавальну функцію, будуємо графіки частотних характеристик даної системи (рисунки 3.3 – 3.4).

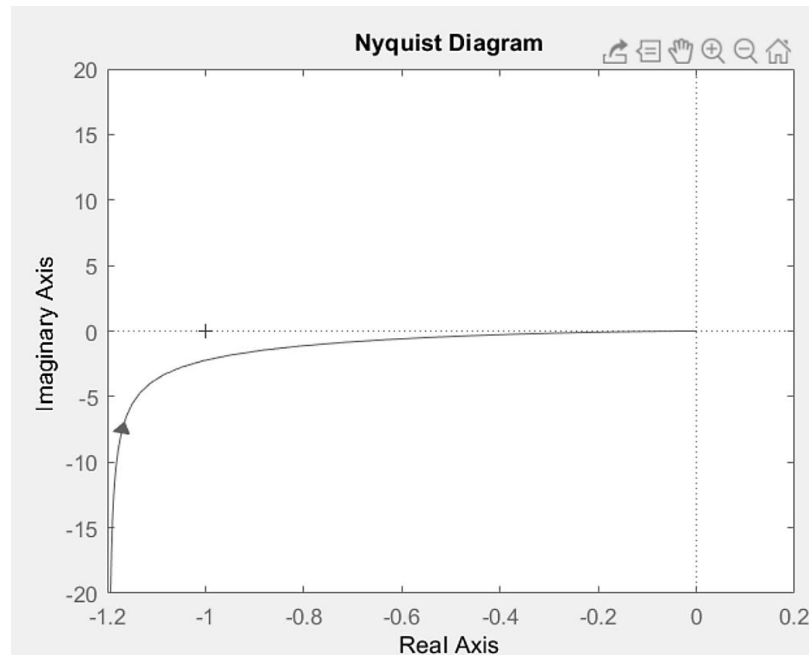


Рисунок 3.3 – Амплітудно-фазова частотна характеристика системи

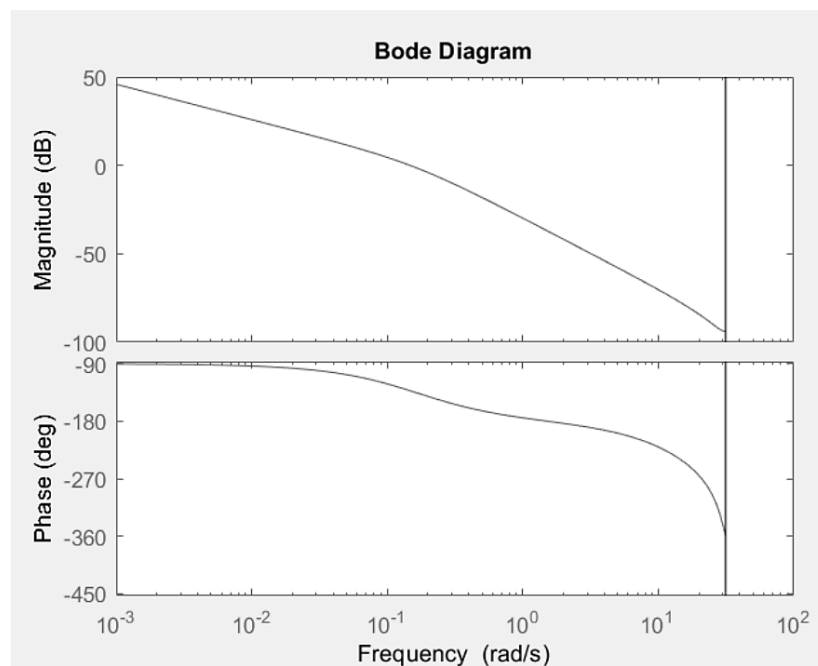


Рисунок 3.4 – Логарифмічна амплітудна та частотна характеристика системи

3.3 Аналіз дискретних цифрових послідовностей

Визначимо передавальну функцію приведеної безперервної частини:

$$W_{\text{пбч}}(s) = \frac{1-e^{-T_0s}}{s} W_{\text{бч}}(s) \quad (3.23)$$

$$W_{\text{пбч}}(z) = Z \left\{ \frac{1-e^{-T_0s}}{s} W_{\text{бч}}(s) \right\} = Z \left\{ \frac{W_{\text{бч}}(s)}{s} \right\} - Z \left\{ \frac{1-e^{-T_0s} W_{\text{бч}}(s)}{s} \right\} \quad (3.24)$$

Застосувавши теорему заміщення аргументу отримуємо:

$$Z \left\{ \frac{W_{\text{бч}}(s)}{s} \right\} - z^{-1} Z \left\{ \frac{W_{\text{бч}}(s)}{s} \right\} = \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{W_{\text{бч}}(s)}{s} \right\} \quad (3.25)$$

Щоб перейти від безперервної функції системи до цифрової, використовуватиму Z-перетворення.

Z-перетворення – це математичний метод аналізу дискретних цифрових послідовностей, який дозволяє досліджувати динаміку систем за допомогою перетворення часових дискретних функцій у комплексну площину[24]. Таке перетворення є справедливим за умови, що час квантування менший за основну часову константу передавальної функції неперервної системи. Система повинна мати на один нуль менше, ніж полюсів, а ступінь знаменника має перевищувати ступінь чисельника. Для Z-перетворення використаю наступні формули:

$$\frac{1}{(s+a)} = \frac{z}{z-e^{-aT}} \quad (3.26)$$

$$\frac{1}{s} = \frac{z}{z-1} \quad (3.27)$$

$$\frac{1}{s^2} = \frac{Tz}{(z-1)^2} \quad (3.28)$$

Підставляємо у формулу значення для передавальної функції $W_{\text{бч}}(s)$, а також час квантування $T=0.1$ с. Звідси отримуємо:

$$W_{\text{пбч}}(z) = \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{W_{\text{бч}}(s)}{s} \right\} = \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{1}{0,6647s^4 + 30,8s^3 + 5,093s^2} \right\} \quad (3.29)$$

Далі, знаходжу корені знаменника використовуючи формулу

дискримінанта:

$$D = b^2 - 4ac \quad (3.30.1)$$

$$D = 30,8^2 - 4 * 0,6647 * 5,093 \quad (3.30.2)$$

$$D = 935,0987 \approx 935,1 \quad (3.30.3)$$

$$S = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a} \quad (3.31.1)$$

$$S_{1,2} = \frac{-30,8 \pm \sqrt{935,0987}}{2 * 0,6647} = \frac{-30,8 \pm 30,5794}{2 * 0,6647} \quad (3.31.2)$$

Звідси, корені знаменника:

$$S_1 = -0,1659$$

$$S_2 = -46,1708$$

Після цього, розкладаю дріб на суму простих дробів:

$$W_{\text{пбч}}(z) = \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{A}{S} + \frac{B}{S^2} + \frac{C}{S+0,1659} + \frac{D}{S+46,1708} \right\} \quad (3.32)$$

Знаходжу невідомі:

$$AS(S + 0,1659)(S + 46,1708) + B(S + 0,1659)(S + 46,1708) + CS^2(S + 46,1708) + DS^2(S + 0,1659) = 1 \quad (3.33)$$

При $S = 0$:

$$B(0 + 0,1659)(0 + 46,1708) = 1 \quad (3.34.1)$$

$$B * 0,1659 * 46,1708 = 1 \quad (3.34.2)$$

$$B = \frac{1}{7,65973572} = 0,1305528071 \approx 0,1306 \quad (3.34.3)$$

При $S = -0,1659$:

$$C(-0,1659)^2(-0,1659 + 46,1708) = 1 \quad (3.35.1)$$

$$C * 0,02752281 * 46,0049 = 1 \quad (3.35.2)$$

$$C = \frac{1}{1,266184121769} = 0,7897745539589367 \approx 0,7898 \quad (3.35.3)$$

При $S = -46,1708$:

$$D(-46,1708)^2(-46,1708 + 0,1659) = 1 \quad (3.36.1)$$

$$D * 2\,131,74277264 * (-46,0049) = 1 \quad (3.36.2)$$

$$D = -\frac{1}{98\,070,613081026} = -0,000010196734460 \approx -0,000010197 \quad (3.36.3)$$

При $S = 1$:

$$A * 1(1 + 0,1659)(1 + 46,1708) + B(1 + 0,1659)(1 + 46,1708) + C * 1^2(1 + 46,1708) + D * 1^2(1 + 0,1659) = 1 \quad (3.37.1)$$

$$A * 1,1659 * 47,1708 + B * 1,1659 * 47,1708 + C * 47,1708 + D * 1,1659 = 1 \quad (3.37.2)$$

$$A * 54,9964357 + B * 54,9964357 + C * 47,1708 + D * 1,1659 = 1 \quad (3.37.3)$$

Підставляємо знайдені невідомі B , C та D :

$$A * 54,9964357 + 0,1306 * 54,9964357 + 0,7898 * 47,1708 + (-0,000010197) * 1,1659 = 1 \quad (3.38.1)$$

$$A * 54,9964357 + 7,1825345024 + 47,9606 + -0,000011888682 = 1 \quad (3.38.2)$$

$$A * 54,9964357 + 55,143122613718 = 1 \quad (3.38.3)$$

$$A * 54,9964357 = -54,143122613718 \quad (3.38.4)$$

$$A = -\frac{54,143122613718}{54,9964357} = -0,9844842111053026 \approx -0,984484 \quad (3.38.5)$$

Звідси, невідомі простих дробів мають значення: $A = -0,984484$, $B = 0,1306$, $C = 0,7898$, $D = -0,000010197$

Підставляю всі знайдені невідомі:

$$W_{\text{пбч}}(z) = \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{-0,984484}{s} + \frac{0,1306}{s^2} + \frac{0,7898}{s+0,1659} + \frac{-0,000010197}{s+46,1708} \right\} \quad (3.39)$$

Використовуючи формули Z -перетворень простих дробів, маємо:

$$\frac{-0,984484}{s} = \frac{-0,984484z}{z-1} \quad (3.40)$$

$$\frac{0,1306}{s^2} = \frac{0,1306z}{(z-1)^2} \quad (3.41)$$

$$\frac{0,7898}{s+0,1659} = \frac{0,7898z}{z-e^{-0,01659}} \quad (3.42)$$

$$\frac{-0,000010197}{s+46,1708} = \frac{-0,000010197z}{z-e^{-46,1708}} \quad (3.43)$$

Отримані значення дозволяють записати передавальну функцію у такому вигляді:

$$W_{\text{пбч}}(z) = \frac{z-1}{z} \left(\frac{-0,984484z}{z-1} + \frac{0,1306z}{(z-1)^2} + \frac{0,7898z}{z-e^{-0,01659}} + \frac{-0,000010197z}{z-e^{-46,1708}} \right) \quad (3.44.1)$$

$$W_{\text{пбч}}(z) = \frac{z-1}{z} * \frac{0,984484z*(z-1)*(z-e^{-0,01659})*(z-e^{-46,1708})+0,1306z*(z-e^{-0,01659})*}{(z-1)^2*(z-e^{-0,01659})*} \\ \frac{*(z-e^{-46,1708})+0,7898z*(z-1)^2*(z-e^{-46,1708})-0,000010197z*(z-1)^2*(z-e^{-0,01659})}{*(z-e^{-46,1708})} \quad (3.44.2)$$

Розв'язавши цю функцію, отримуємо:

$$W_{\text{пбч}}(z) = \frac{0,0001102z^2+0,0002413z+0,000126}{z^3-1,993428z^2+1,003147z-0,009719} \quad (3.44.3)$$

На основі цієї передавальної функції у дискретній площині можна спостерігати астатизм першого порядку.

Далі, виношу за дужки $(z-1)$, для подальшого досліджування системи:

$$\frac{z^3-1,993428z^2+1,003147z-0,009719}{z-1} = z^2 - 0,993428z + 0,009719 \quad (3.45)$$

Звідси:

$$W_{\text{пбч}}(z) = \frac{0,0001102z^2+0,0002413z+0,000126}{(z-1)(z^2-0,993428z+0,009719)} \quad (3.46)$$

Для виведення графіків перехідного процесу керування ввожу всі функції в програмне середовище Matlab (рисунок 3.5), і у Simulink виконаю моделювання функцій Z-перетворення (рисунок 3.6).

```
>> w1=tf([1],[0.1103 5.093])

w1 =

          1
-----
0.1103 s + 5.093

Continuous-time transfer function.

>> w2=tf([1],[6.02654 1])

w2 =

          1
-----
6.027 s + 1

Continuous-time transfer function.

>> w3=tf([1],[1 0])

w3 =

          1
-----
s

Continuous-time transfer function.
```

Рисунок 3.5 – Передавальні функції перехідного процесу

Для моделювання використовую функцію Z-перетворення розраховану вручну та у додатку Matlab.

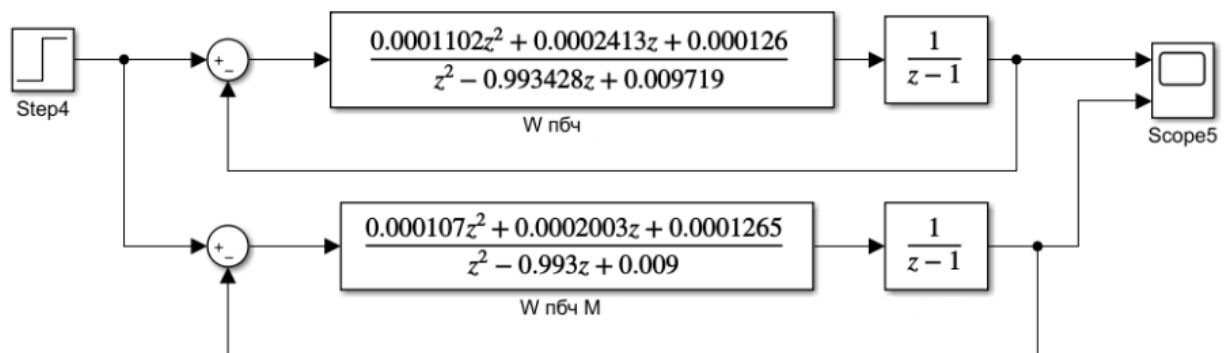


Рисунок 3.6 – Передавальні функції в програмному пакеті Simulink

Виводимо на екран (рисунок 3.7) графіки передаточних функцій змодельованих в програмному пакеті Simulink.

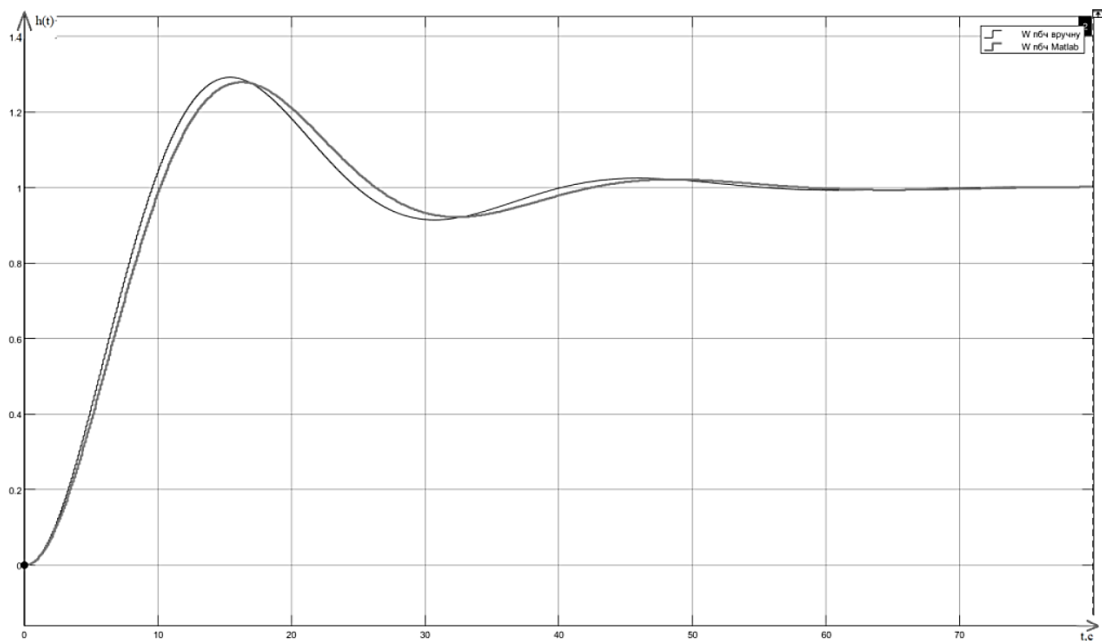


Рисунок 3.7 – Графіки передаточних функцій

Отримані результати показують, що:

- час стабілізації – 9,428 секунди;
- час перехідного процесу – 46 секунд;
- перерегулювання – 29,2%;
- похибка – 0%.

Також, аналогічність графіків передаточних функцій підтверджує якість перехідного процесу після Z-перетворення, та дозволяє продовжити дослідження стійкості та якості системи.

3.4 Аналіз стійкості та якості системи

Визначення стійкості системи в контексті автоматичного керування відноситься до здатності системи зберігати свої характеристики, та повертатися до стану рівноваги або стійкого режиму роботи, після зовнішнього впливу або змін внутрішніх умов. Це є важливим етапом при проектуванні та аналізі автоматичних систем керування. Розуміння стійкості допомагає забезпечити

надійну та безпечну роботу системи, уникати небажаних коливань, перевантажень або руйнування системи.

3.4.1 Розрахунок стійкості системи

Стійкість системи визначається на основі аналізу її властивостей, таких як: власні значення, передаточні функції, структура і т.д. Зазвичай, використовуються різні методи та критерії для визначення стійкості системи, залежно від її типу та характеристик.

Дослідження стійкості полягає у знаходженні коренів характеристичного рівняння замкненої цифрової системи, для якої передавальна функція має такий вигляд:

$$W_3(z) = \frac{W_{\text{пбч}}(z)}{1 + W_{\text{пбч}}(z)} \quad (3.47)$$

Якщо підставити значення передавальної функції $W_{\text{пбч}}(z)$ цифрової системи, рівняння набуває наступного вигляду:

$$W_3(z) = \frac{\frac{0,0001102z^2 + 0,0002413z + 0,000126}{(z-1)(z^2 - 0,993428z + 0,009719)}}{1 + \frac{0,0001102z^2 + 0,0002413z + 0,000126}{(z-1)(z^2 - 0,993428z + 0,009719)}} \quad (3.48.1)$$

$$W_3(z) = \frac{0,0001102z^2 + 0,0002413z + 0,000126}{z^3 - 1,9933178z^2 + 1,0033883z - 0,009593} \quad (3.48.2)$$

Відповідно, характеристичне рівняння замкнутої системи матиме вигляд:

$$D(z) = z^3 - 1,9933178z^2 + 1,0033883z - 0,009593 \quad (3.49)$$

Знаходжу корені рівняння $D(z) = 0, z_i$, де $i = \overline{1, n}$, n – порядок поліному $D(z)$. При умові, що $|z_i| < 1$ усі корені рівняння знаходяться всередині одиничного кола на z -площині, і система називається стійкою.

Знаходжу корені характеристичного рівняння:

$$z^3 - 1,9933178z^2 + 1,0033883z - 0,009593 = 0 \quad (3.50)$$

Для прикладу, значення змінної z замінимо на:

$$z = x + 0,664439267 \quad (3.51)$$

Тоді, характеристичне рівняння набуває вигляду:

$$(x + 0,664439267)^3 - 1,9933178 * (x + 0,664439267)^2 + 1,0033883 * (x + 0,664439267) - 0,009593 = 0 \quad (3.52.1)$$

$$x^3 + 3 * 0,664439267 * x^2 + 3 * 0,664439267^2 * x + 0,664439267^3 - 1,9933178 * (x^2 + 2 * 0,664439267 * x + 0,664439267^2) + 1,0033883 * x + 0,664439267 - 0,009593 = 0 \quad (3.52.2)$$

$$x^3 + 1,99332x^2 + 1,324439x + 0,293336 - 1,99332x^2 - 2,648877x - 0,880009 + 1,0033883x + 0,664439267 - 0,009593 = 0 \quad (3.52.3)$$

$$x^3 - 0,3210503172656133x + 0,0704249038332615 = 0 \quad (3.52.4)$$

Обчислюю отримане рівняння за допомогою теореми Вієта. Після введення заміни та скорочень, отримую квадратне рівняння:

$$v^2 + 0,0704249038 v + 0,0012256192 = 0 \quad (3.53)$$

Далі, знаходжу корені використовуючи формулу дискримінанта:

$$D = b^2 - 4ac \quad (3.54.1)$$

$$D = 0,0704249038^2 - 4 * 0,0012256192 \quad (3.54.2)$$

$$D = 0,0049596670752393 - 0,0049024768 \quad (3.54.3)$$

$$D = 0,0000571902752393 \approx 0,0000572 \quad (3.54.4)$$

Звідси, корені знаменника:

$$v = \frac{-b \pm \sqrt{D}}{2a} \quad (3.55.1)$$

$$v_{1,2} = \frac{-0,0704249038 \pm \sqrt{0,0000572}}{2} = \frac{-0,0704249038 \pm 0,0075630682}{2} \quad (3.55.2)$$

$$v_1 = -0,03143123553820561 \approx -0,03143124$$

$$v_2 = -0,03899366829505588 \approx -0,0389937$$

Обчислені значення підставляю у вираз, і отримую три корені рівняння:

$$x_1 = 0,3273453967043163 - i * 0,0203644043591813 \quad (3.56)$$

$$x_2 = -0,654690793408631 \quad (3.57)$$

$$x_3 = 0,3273453967043127 + t * 0,0203644043 \ 591819 \quad (3.58)$$

Підставивши корені у формулу z , маємо:

$$z_1 = 0,99178466 + i * 0,0203644 \quad (3.59)$$

$$z_2 = 0,00974847 \quad (3.60)$$

$$z_3 = 0,99178466 - i * 0,0203644 \quad (3.61)$$

Знаходжу модулі:

$$|z_1| = \sqrt{0,99178466^2 + 0,0203644^2} = 0,9919937 \quad (3.62)$$

$$|z_2| = \sqrt{0,00974847^2} = 0,00974847 \quad (3.63)$$

$$|z_3| = \sqrt{0,99178466^2 - 0,0203644^2} = 0,9915756 \quad (3.64)$$

Звідси, умова стійкості $|z_i| < 1$ виконана, тому система є стійкою.

3.4.2 Аналіз стійкості системи за допомогою критерію Гурвіца

Існує широкий набір критеріїв для оцінки стійкості автоматизованих систем управління, які включають як аналітичні, так і графічні підходи. Одним із таких методів є критерій Гурвіца.

Критерій Гурвіца – це метод оцінки стійкості системи прийняття рішень в умовах невизначеності. Він дозволяє враховувати ризик і потенційні наслідки рішень, шляхом призначення вагових коефіцієнтів різним станам системи. Перевагою методу є принципова простота, а недоліком — виконання розрахунків для кожного варіанта рішення та кожної ситуації може бути складним та вимагати значних обчислювальних ресурсів, особливо при наявності багатьох варіантів та ситуацій[4].

Згідно з критерієм Гурвіца: для визначення стійкості системи необхідно і достатньо, щоб всі мінори визначника були додатніми.

З коефіцієнтів характеристичного рівняння будуємо визначник Гурвіца, за алгоритмом:

1. По головній діагоналі зліва направо виставляються всі коефіцієнти характеристичного рівняння.
2. Від кожного елемента діагоналі, вгору і вниз добуваються стовпці визначника так, щоб індекси спадали зверху вниз;
3. На місце коефіцієнтів з індексами менше нуля чи більше n ставляться нулі.

Спершу, характеристичне рівняння прирівнюємо до нуля:

$$D(z) = z^3 - 1,9933178z^2 + 1,0033883z - 0,009593 = 0 \quad (3.65)$$

Звідси, визначник матиме вигляд:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1,0033883 & 0,009593 \\ 1 & 1,9933178 \end{vmatrix} \quad (3.66)$$

Далі, обчислюємо мінори визначника:

$$\Delta_1 = 1,0033883 > 0 \quad (3.67)$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1,0033883 & 0,009593 \\ 1 & 1,9933178 \end{vmatrix} = 1,990477357996 > 0 \quad (3.68)$$

Оскільки, всі мінори визначника Гурвіца є додатніми, то роблю висновок, що система є стійкою.

3.4.3 Аналіз якості системи

За допомогою аналізу якості системи, можна оцінити її функціональність та здатність ефективно реагувати на збурення або зміну умов. Якість системи визначається її поведінкою в часі, точністю роботи в сталому режимі, а також

показниками перехідного процесу, такими як перерегулювання, час встановлення та час регулювання. Такий аналіз дозволяє виявити сильні та слабкі сторони системи, оптимізувати її параметри та забезпечити відповідність вимогам стійкості та точності.

Вибір періоду квантування є одним з найважливіших факторів якості цифрових систем. Зменшення цього періоду підвищує точність моделювання безперервної системи, і навпаки значне збільшення – призводить до погіршення динамічних характеристик та нестабільності системи.

Для аналізу якості беремо передавальну функцію:

$$W_{\text{пбч}}(z) = \frac{0,0001102z^2 + 0,0002413z + 0,000126}{(z-1)(z^2 - 0,993428z + 0,009719)} \quad (3.69)$$

Моделюю передавальну функцію цифрової системи у середовищі Matlab(рисунок 3.8).

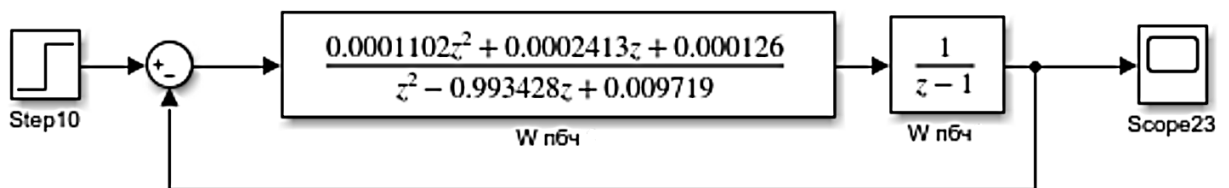


Рисунок 3.8 – Передавальна функція цифрової системи

Після моделювання передавальної функції, отримую графік перехідної характеристики цифрової системи(рисунок 3.9).

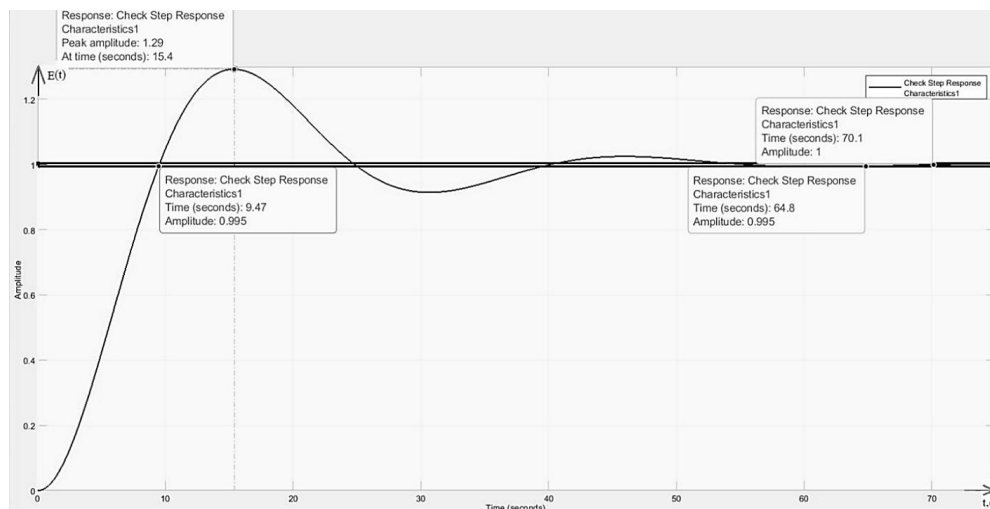


Рисунок 3.9 – Графік перехідної характеристики цифрової системи

З отриманого графіку отримую наступні показники якості перехідного процесу:

- $h_{max} = 1,29$ – максимальне значення відгуку;
- $t_{пп} = 64,8$ с – час перехідного процесу;
- $h_{ст} = 1$ – усталене значення;
- $t_{вст} = 9,47$ с – час встановлення.

Після цього, рахую похибку $E(z)$ передавальної функції замкнутої системи:

$$E(z) = \frac{z}{z-1} \left(1 - \frac{W_{пбч}(z)}{1+W_{пбч}(z)} \right) \quad (3.70.1)$$

$$E(z) = \frac{z}{z-1} \left(1 - \frac{\frac{0,0001102z^2+0,0002413z+0,000126}{(z-1)(z^2-0,993428z+0,009719)}}{1+\frac{0,0001102z^2+0,0002413z+0,000126}{(z-1)(z^2-0,993428z+0,009719)}} \right) \quad (3.70.2)$$

$$E(z) = \frac{z}{z-1} \left(1 - \frac{0,0001102z^2+0,0002413z+0,000126}{(z-1)(z^2-0,993428z+0,009719)} \right) \quad (3.70.3)$$

$$E(z) = \frac{z^3-1,993428z^2+1,003147z-0,009719}{z^3-1,9933178z^2+1,0033883z-0,009593} * \frac{z}{z-1} \quad (3.70.4)$$

Далі, знаходжу ліміт $E(z)$ за формулою:

$$\varepsilon = \lim_{z \rightarrow 1} E(z) * (z - 1) \quad (3.71)$$

Підставляю $E(z)$ передавальної функції замкнутої системи у формулу ліміту, і отримую :

$$\varepsilon = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z^3-1,993428z^2+1,003147z-0,009719}{z^3-1,9933178z^2+1,0033883z-0,009593} * \frac{z}{z-1} * (z - 1) \quad (3.72.1)$$

$$\varepsilon = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z^4-1,993428z^3+1,003147z^2-0,009719z}{z^3-1,9933178z^2+1,0033883z-0,009593} \quad (3.72.2)$$

Далі, розкриваю ліміт функції:

$$\varepsilon = \frac{1^4-1,993428*1^3+1,003147*1^2-0,009719}{1^3-1,9933178*1^2+1,0033883-0,009593} \quad (3.73.1)$$

$$\varepsilon = \frac{1-1,993428+1,003147-0,009719}{1-1,9933178+1,0033883-0,009593} \quad (3.73.2)$$

$$\varepsilon = \frac{0}{0,0004775} = 0 \quad (3.73.3)$$

Оскільки, $\varepsilon = 0$, то в даній системі відсутня стала похибка. Збіг отриманих числових значень із графіками підтверджує точність моделювання та правильність розрахунків.

3.5 Синтез цифрового ПД-регулятора

Перехідний процес цифрової системи керування промисловим роботом демонструє астатизм першого порядку. Тому, для коректного відображення графіків у середовищі Matlab/Simulink, після Z-перетворення, було виділено інтегруючу ланку першого порядку. Наявність цієї складової стало поштовхом для розробки пропорційно-диференційного(ПД) регулятора, адже додавання ще однієї інтегруючої ланки могла б порушити стійкість системи та призвести до нестабільності перехідного процесу.

Синтез цифрового пропорційно-диференційного регулятора — це процес визначення параметрів регулятора для забезпечення оптимального управління об'єктом. Він включає розробку алгоритмів, які забезпечують необхідну точність, стійкість і швидкодію системи [14].

На рисунку 3.10 представлена структурна схема цифрового ПД-регулятора, передавальна функція якого:

$$W_{\text{ПД}}(z) = K_{\text{п}} + \frac{K_{\text{д}}(z-1)}{T_0 z} = \frac{K_{\text{п}} T_0 z + K_{\text{д}}(z-1)}{T_0 z} \quad (3.74)$$

, де T_0 — період квантування, $K_{\text{п}}$ — параметр пропорційної складової регулювання, $K_{\text{д}}$ — параметр диференціальної складової регулювання.

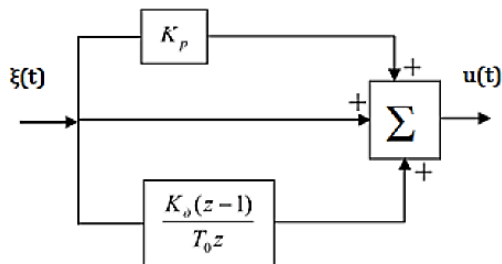


Рисунок 3.10 – Структурна схема цифрового ПД-регулятора

Передавальна функція розімкнутої системи з цифровим ПД-регулятором матиме вигляд:

$$W_{\text{рск}}(z) = W_{\text{ПД}}(z) * W_{\text{пбч}}(z) \quad (3.75.1)$$

$$W_{\text{рск}}(z) = \frac{K_{\text{п}}T_0z + K_{\text{д}}(z-1)}{T_0z} * \frac{0,0001102z^2 + 0,0002413z + 0,000126}{(z-1)(z^2 - 0,993428z + 0,009719)} \quad (3.75.2)$$

Для синтезу цифрового ПД-регулятора необхідно визначити параметри $K_{\text{п}}$ та $K_{\text{д}}$. Для їх знаходження, спершу необхідно визначити граничний коефіцієнт $K_{\text{гр}}$, який визначає границю стійкості системи. Для цього, використаю наступне рівняння:

$$D(w) = 4,006299w^3 + 3,96115w^2 + 0,03207w + 0,000478 + K_{\text{гр}} = 0 \quad (3.76)$$

Для спрощення розрахунків скористаюсь формулою:

$$a_1 * a_2 - a_0 * a_3 = 0 \quad (3.77)$$

Звідси:

$$0,03207 * 3,96115 - 0,000478 * 4,006299 - 4,006299 * K_{\text{гр}} = 0 \quad (3.78.1)$$

$$0,12704558 - 0,0019130078 - 4,006299 * K_{\text{гр}} = 0 \quad (3.78.2)$$

Отже, $K_{\text{гр}}$ дорівнює:

$$K_{\text{гр}} = \frac{0,12704558 - 0,0019130078}{4,006299} = \frac{0,1251325722}{4,006299} \quad (3.79)$$

$$K_{\text{гр}} = 0,031233956596$$

Далі, визначаю параметри $K_{\text{п}}$ та $K_{\text{д}}$. Для обчислення параметру пропорційної складової регулювання використовую формулу:

$$K_{\text{п}} = \frac{K_{\text{гр}}}{a_0} \quad (3.80)$$

, де a_0 взято з характеристичного рівняння, і рівне 0,0001102.

Тепер, підставляючи відомі коефіцієнти маємо:

$$K_{\pi} = \frac{0,031233956596}{0,0001102} = 283,429733176 \approx 283,43 \quad (3.81)$$

Для знаходження параметру диференціальної складової регулювання використовую формулу:

$$\frac{K_d}{T_0 * K_{\pi} + K_d} = C \quad (3.82)$$

, де C – полюс диференційного рівняння, що відповідає кореням знаменника передавальної функції.

Для знаходження значення обох полюсів системи розкладені дужки знаменника $W_{\text{пбч}}(z)$ квадратного рівняння прирівнюю до нуля:

$$(C_1 - 0,9835465124) = 0 \quad (3.83)$$

$$(C_2 - 0,009881587566) = 0 \quad (3.84)$$

Звідси:

$$C_1 = 0,9835465124$$

$$C_2 = 0,009881587566$$

Отримавши значення полюсів, знайдемо параметр для першого полюса, підставивши всі значення у формулу:

$$\frac{K_{d1}}{0,1 * 283,429733176 + K_{d1}} = 0,9835465124 \quad (3.85.1)$$

$$K_{d1} = 0,9835465124 * (28,3429733176 + K_{d1}) \quad (3.85.2)$$

$$K_{d1} = 27,876629 + 0,9835465124 K_{d1} \quad (3.85.3)$$

$$K_{d1} - 0,9835465124 K_{d1} = 27,876629 \quad (3.85.4)$$

$$0,016454 K_{d1} = 27,876629 \quad (3.85.5)$$

Звідси:

$$K_{d1} = \frac{27,876629}{0,016454} = 1694,21596 \quad (3.85.6)$$

Аналогічно виконую обчислення, для диференціального параметра для другого полюса. Обчисливши отримуємо:

$$K_{d2} = 0,2828687656 \quad (3.86)$$

Маючи всі коефіцієнти моделюю два окремих регулятори для першого(рисунок 3.11) та другого(рисунок 3.12) полюсів у середовищі Matlab.

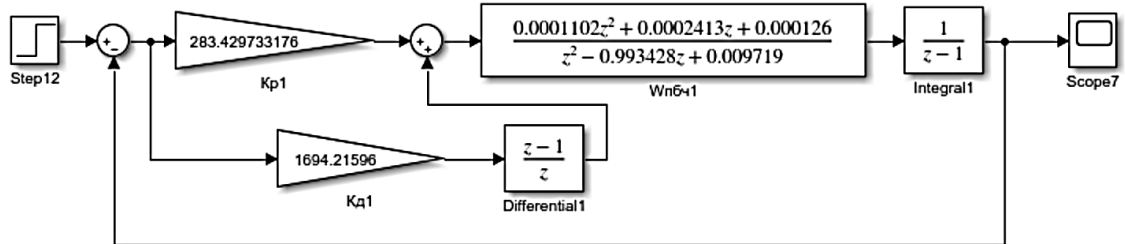


Рисунок 3.11 – Схема цифрового ПД-регулятора для першого полюсу з передаточною функцією

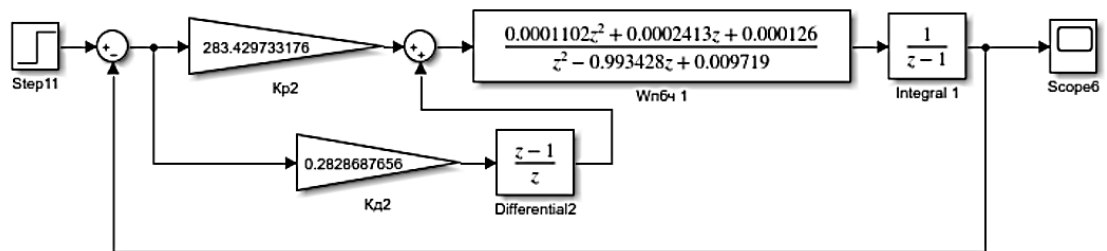


Рисунок 3.12 – Схема цифрового ПД-регулятора для другого полюсу з передаточною функцією

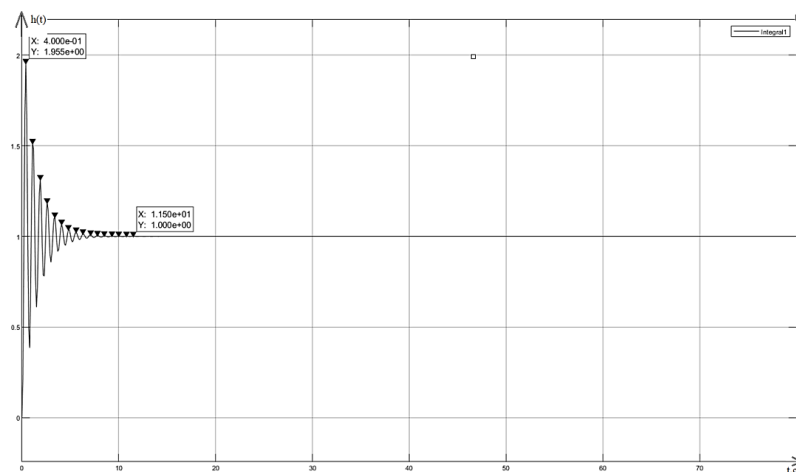


Рисунок 3.13 – Графік перехідного процесу з цифровим ПД-регулятором для першого полюсу

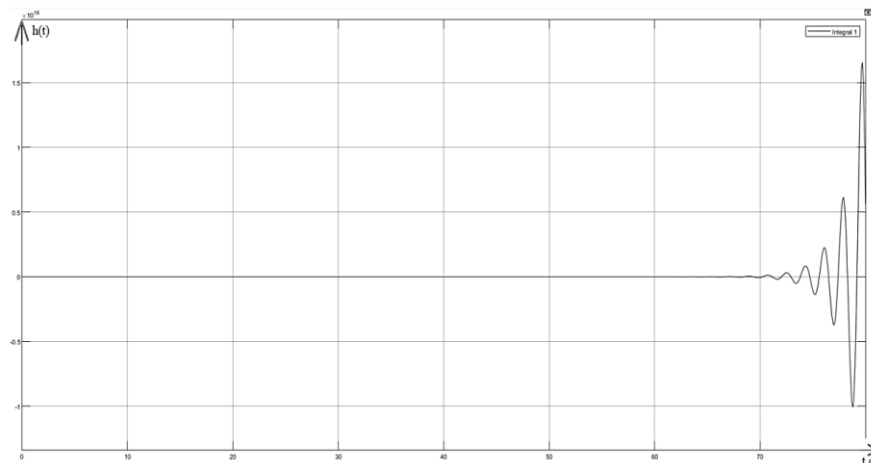


Рисунок 3.14 – Графік перехідного процесу з цифровим ПД-регулятором для другого полюсу

На графіках (рисунок 3.13 та рисунок 3.14) представлено результати регулювання змодельованих систем. Цифровий ПД-регулятор для першого полюсу демонструє значне перерегулювання, що перевищує допустимі межі, а час перехідного процесу складає 7,9 секунди. Другий ПД-регулятор є нестабільним, і є непридатним для подальшого використання [1].

Даний синтез свідчить про необхідність корекції певних параметрів системи, для врегулювання роботи регуляторів. Змінюючи параметри коефіцієнтів після оптимізації отримую графік(рисунок 3.15) трьох перехідних процесів, а саме: без регулятора, з ПД-регулятором, з ПД-регулятором після оптимізації.

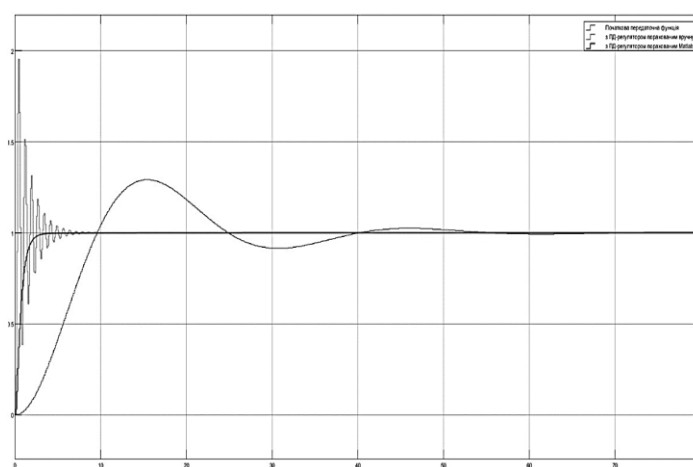


Рисунок 3.15 – Графік трьох перехідних процесів

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі розроблена система автоматизованого керування роботом при виготовленні протезувальних деталей. Основною метою цього проєкту є розвиток та пришвидшення процесу виготовлення протезувальних деталей за допомогою систем автоматизованого керування роботом.

Для досягнення поставленої мети був проведений аналіз технологічного процесу, процесу виготовлення протезувальних деталей та доступних промислових роботів. Відповідно до проаналізованої інформації, було обрано тип та модель робота-маніпулятора для подальшого застосування, а також здійснено вибір технічних засобів автоматизації, які відповідатимуть вимогам та виконуватимуть необхідні в даному виробництві функції. Також, був створений алгоритм керування роботом, складено структурну та функціональну схеми системи керування.

Відповідно до схем та алгоритму, проведений розрахунок еквівалентних параметрів, знаходження функції перехідного процесу та виконано Z-перетворення передавальної функції. Крім того, проаналізовано систему на якість та стійкість двома способами, в тому числі за допомогою критерію Гурвіца. Визначено, що система правильно розрахована, точно змодельована та є стійкою до зовнішніх впливів. А також, був синтезований та оптимізований цифровий ПД-регулятор.

В подальшому, рекомендовано проводити регулярний огляд обладнання та слідкувати за коректністю введених даних. За необхідності, модернізувати обладнання, що сприятиме підвищенню показників продуктивності виробництва.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Варков А.О. Розробка і дослідження системи управління маніпуляційним промисловим роботом. Книга – I. : ІГЕУ, 2015 – 146 с.
2. Голубєв Л. П., Ківа І. Л., Цись Б. І. Модернізація системи керування промислового маніпулятора. Наукова публікація – Київ: Технології та дизайн, 2020 – 4 с.
3. Забудський Є.І. Електричні машини: Частина 4. Навчальний посібник — М.: ООО «Мегаполіс», 2020 — 295 с.
4. Критерій стійкості Гурвіца // Вікіпедія — [Електронний ресурс] — Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Критерій_стійкості_Гурвіца
5. Трегубов В.Г. Проектування систем автоматизації. Навчальний посібник – Київ: Видавництво Ліра-К, 2019 – 344 с.
6. Маніпулятор // Вікіпедія — [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Маніпулятор>
7. Оптичний датчик Omron E3Z // Пе-Ко – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://peko.com.ua/sensors/photosensors/omron-e3z-b82-2m>
8. Перетворення Лапласа // Вікіпедія – [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Перетворення_Лапласа
9. ПЛК160-M02 Овен контролер // Гекомс – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://gekoms.org/catalog-owen-plc160-m02/>
10. Поліщук М. М., Ткач М. М. Робототехнічні системи: проектування і моделювання. Навчальний посібник – Київ: НТУ «КПІ», 2021 – 113 с.
11. Програмований логічний контролер // Вікіпедія – [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Програмований_логічний_контролер
12. Промисловий робот // Вікіпедія — [Електронний ресурс] — Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Промисловий_робот

13. Промислові роботи // Кафедра АВ – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://kaf-av.tntu.edu.ua/index.php/mn-abiturient/mn-articles/676-art-industrial-robots>
14. Репнікова Н.Б., Федулова В.Ю., Богодьорова Т.Я. Синтез цифрових систем управління з ПнД-регуляторами. Системи обробки інформації. Книга – Харків : НТУУ «ХПІ», 2008 – 113 с.
15. Робот Fanuc 20iA/20M // Abplanalp — [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://abplanalp.ua/robot-fanuc-robocut-20ia20m>
16. Робот UR10 — [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://kuka.com.ua/robot-ur10/>
17. Швець В.І., Шостачук Д.М. Виконавчі механізми, регулювальні органи і пристрої. Книга – Житомир: ЖДТУ, 2007 – 211с.
18. IRB 360 FlexPicker — [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://general-energy.com.ua/ru/irb-360-flexpicker-abb>
19. KR 1000 titan — [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://www.kuka.com/products/robot-systems/industrial-robots/kr-1000-titan>
20. SCARA G6 — [Електронний ресурс] — Режим доступу: https://www.epson.eu/en_EU/products/robots/scara-robots/scara-g6-series/p/44673
21. Szulczyński P., Kozłowski K. Parametric programming of industrial robots – S.: Archives of Control Sciences, 2015 – 225 p.
22. Universal Robots: user manual for UR10 – N: Universal Robots, 2019 – 230 p.
23. XY-X series // Yamana — [Електронний ресурс] — Режим доступу: <https://global.yamaha-motor.com/business/robot/lineup/xyx/pole/spec/>
24. Z-перетворення // Вікіпедія – [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Z-перетворення>