

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістр

Освітній рівень

Метод автоматизованого керування процесом покриття деталей антикорозійним  
сплавом цинк-кобальт

Назва теми

КвРАКІТР.2023044.01.08.ПЗ

Галузь знань 15 «Автоматизація та приладобудування»

Шифр, назва

Спеціальність 151 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка»

Шифр, назва

Освітня програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка»

Назва

Виконав:

студент 1 курсу, група АКІТРм-23-1



Підпис

Артем ДМІТРІЄВ

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник



Підпис

Людмила КОРЕЦЬКА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер



Підпис

Людмила КОРЕЦЬКА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:  
зав. кафедри автоматизації,  
комп'ютерно-інтегровані  
технології та робототехніка



Підпис

Валерій МАРТИНЮК

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

«18» грудня 2024 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інформаційних технологій

Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТтаР

Валерій МАРТИНЮК

01 вересня 2024р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Дмитрієву Артему Богдановичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1 Тема роботи: Метод автоматизованого керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт

Керівник роботи Корецька Л. О. к.т.н, доцент

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, учене звання

Затверджено наказом ректора університету від 26.08.2024 р. №60

2 Строк подання студентом роботи на кафедру 02.12.2024р.

3 Вихідні дані до роботи Аналіз сучасних методів покриття деталей антикорозійними сплавами. Розробка алгоритмічного та програмного забезпечення автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт

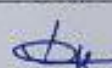
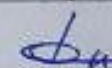
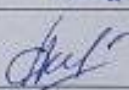
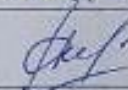
4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. Огляд сучасних методів покриття деталей антикорозійними сплавами. Побудова моделі надійності АСКППДАСЦК. Алгоритмічне та програмне забезпечення АСКППДАСЦК. Аналіз надійності АСКППДАСЦК. Висновки.

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень):

Презентаційні матеріали

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

| Розділ        | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата  |   |
|---------------|---|---|---|
|               |   | завдання видав  | завдання прийняв  |
| Антиплагіат   | Федула М.В., доцент кафедри АКІТтаР       |  |  |
| Нормоконтроль | Корецька Л.О., доцент кафедри АКІТтаР     |  |  |

7 Дата видачі завдання 01 вересня 2024р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

|    | Назва розділу кваліфікаційної роботи  | Строк виконання | Примітка |
|----|---|-----------------|----------|
| 1. | Вступ   | 10.09.2024р.    | Виконано |
| 2. | Огляд літературних джерел та патентних даних  | 25.09.2024р.    | Виконано |
| 3. | Огляд існуючих методів покриття деталей антикорозійними сплавами  | 15.10.2024р.    | Виконано |
| 4. | Алгоритмічне проектування автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт         | 30.10.2024р.    | Виконано |
| 5. | Розробка програмного забезпечення автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт | 10.11.2024р.    | Виконано |
| 6. | Висновки  | 15.11.2024р.    | Виконано |
| 7. | Оформлення пояснювальної записки до ДР  | 20.11.2024р.    | Виконано |
| 8. | Оформлення презентаційних матеріалів  | 1.12.2024р.     | Виконано |
|    |   |                 |          |
|    |   |                 |          |
|    |   |                 |          |
|    |   |                 |          |
|    |   |                 |          |
|    |   |                 |          |
|    |   |                 |          |
|    |   |                 |          |

Студент



Підпис

Артем ДМІТРІЄВ

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи



Підпис

Людмила КОРЕЦЬКА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Метод автоматизованого керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт».

Автор роботи: Дмитрієв Артем Богданович.

Керівник роботи: Корецька Людмила Олександрівна.

Пояснювальна записка: 76 с., 36 рис., 5 табл., 1 дод., 71 джерело.

Графічна частина: 14 презентаційних слайдів

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ, АВТОМАТИЗОВАНА ЛІНІЯ, ПАНЕЛЬ КЕРУВАННЯ, ЛЮДИНО-МАШИННИЙ ІНТЕРФЕЙС, БЛОК-СХЕМА, АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ, СТРУКТУРНА СХЕМА, ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА, ОПТИЧНИЙ ДАТЧИК, ПРОГРАМОВАНИЙ ЛОГІЧНИЙ КОНТРОЛЕР, ПРОМИСЛОВИЙ РОБОТ МАНІПУЛЯТОР, ПОКРИТТЯ ДЕТАЛЕЙ, АНТИКОРОЗІЙНЕ ПОКРИТТЯ.

**Мета роботи:** розробити автоматизовану систему керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт. Розроблено автоматизовану систему керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт, яка забезпечує безперебійне нанесення антикорозійного сплаву цинк-кобальт на деталь чи виріб, при попередній обробці деталі за допомогою кислотного розчину і абразивного матеріалу, а також з кінцевою дефектоскопією нанесеного антикорозійного покриття.



Підпис студента

02.12.2024

Дата

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧКИ.....  | 4  |
| ВСТУП.....  | 5  |
| 1 АНАЛІЗ МЕТОДУ ПОКРИТТЯ ДЕТАЛЕЙ АНТИКОРОЗІЙНИМ СПЛАВОМ ЦИНК-КОБАЛЬТ .....  | 7  |
| 1.1 Загальні відомості про покриття деталей антикорозійними сплавами .....  | 7  |
| 1.2 Огляд основних способів газотермічного нанесення антикорозійного покриття .....   | 11 |
| 1.3 Висновки до першого розділу.....  | 22 |
| 2 АНАЛІЗ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОКРИТТЯ ДЕТАЛЕЙ АНТИКОРОЗІЙНИМ СПЛАВОМ ЦИНК-КОБАЛЬТ НА СТІЙКІСТЬ ТА РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ .....                   | 24 |
| 2.1 Огляд процесу аналізу систем автоматизованого керування на стійкість та надійність .....  | 24 |
| 2.2 Визначення стійкості автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт .....  | 29 |
| 2.3 Визначення показників якості регулювання автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт за перехідними характеристиками..... | 37 |
| 2.4 Розрахунок показників надійності автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт.....   | 42 |
| 2.5 Висновки до другого розділу .....   | 45 |
| 3. ПРОЕКТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОКРИТТЯ ДЕТАЛЕЙ АНТИКОРОЗІЙНИМ СПЛАВОМ ЦИНК-КОБАЛЬТ .....   | 47 |
| 3.1 Розробка структурної схеми автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт .....  | 47 |
| 3.2 Вибір технічних засобів автоматизації автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт.....                                    | 48 |
| 3.3 Висновки до третього розділу.....   | 58 |

|  |    |
|--|----|
| 4. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОКРИТТЯ ДЕТАЛЕЙ АНТИКОРОЗІЙНИМ СПЛАВОМ ЦИНК-КОБАЛЬТ..... | 59 |
| 4.1 Розробка алгоритму керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт.....                            | 59 |
| 4.2 Розробка програми керування системи покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт.....                              | 71 |
| 4.3 Висновки до четвертого розділу.....  | 76 |
| ВИСНОВКИ.....  | 78 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....   | 80 |
| ДОДАТОК А Стаття у фаховому журналі.....   | 88 |

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАЧКИ

АК – алгоритм керування

АП – антикорозійне покриття

АСКППДАСЦК – автоматизована система керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт

КС – конвеєрна стрічка

ЛМІ – людино-машинний інтерфейс

ОД – оптичний датчик

ОК – об'єкт керування

ПРМ – промисловий робот маніпулятор

САК – система автоматизованого керування

ТП – технологічний процес

ТС – технологічна схема

ЧП – частотний перетворювач

## ВСТУП

У сучасних реаліях підприємства (фірми) акцентують свою увагу на забезпеченні довговічності та антикорозійної стійкості металевих виробів. Одним із найефективніших методів захисту металевих деталей (виробів) від впливу агресивного середовища є нанесення спеціальних АП. Особливої уваги заслуговують сплави на основі цинку, зокрема цинк-кобальтові, які поєднують високу стійкість до корозії та зносостійкість. Ці сплави відзначаються покращеними механічними властивостями, що значно підвищує їх ефективність в умовах агресивних середовищ [1-8].

Щорічне зростання вимог до якості продукції, зниження витрат і екологічних впливів ставить перед підприємствами (фірмами) завдання впровадження сучасних технологій автоматизації виробничих процесів. АСКППДАСЦК є інноваційним рішенням, що дозволяє досягти стабільно високої якості АП, оптимізувати витрати матеріалів і енергії, а також підвищити продуктивність виробництва. Впровадження таких систем допомагає не лише знизити виробничі витрати, але й покращити екологічну ситуацію за рахунок зменшення використання шкідливих хімічних речовин і енергії [9-13].

Збільшена якість АП призведе до покращення довговічності деталей (виробів), що, у свою чергу, допоможе зменшити витрати, пов'язані зі зношуванням деталей (виробів) під час експлуатації. Тривалість служби таких деталей (виробів) без необхідності в обслуговуванні або заміні частин значно знижує загальні витрати на їх утримання та ремонт, що є важливим фактором у зниженні витрат підприємства.

Розробка таких АП [13-18] потребує інтеграції передових технологій і АСКППДАСЦК. До їх складу можуть входити роботизовані комплекси, сенсорні системи для моніторингу стану АП та програмне забезпечення для управління і координації роботи АСКППДАСЦК. Ключовим аспектом є забезпечення сумісності та ефективної взаємодії між усіма компонентами системи, що дозволяє

гарантувати її безперебійну та продуктивну роботу. Це дозволяє досягти високої точності нанесення АП, контролювати їх якість на всіх етапах і забезпечити відповідність вимогам до антикорозійної стійкості металевих виробів.

*Мета роботи* розробка та проектування автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт.

*Об'єкт дослідження* процес автоматизованого покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт.

*Предмет дослідження* – автоматизована система керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт.

*Наукова новизна* – універсальний підхід до напилення АП на деталь (виріб) за рахунок попередньої обробки деталі (виробу) та кінцевої дефектоскопії.

# 1 АНАЛІЗ МЕТОДУ ПОКРИТТЯ ДЕТАЛЕЙ АНТИКОРОЗІЙНИМ СПЛАВОМ ЦИНК-КОБАЛЬТ

## 1.1 Загальні відомості про покриття деталей антикорозійними сплавами

Надійність і довговічність сучасного промислового обладнання значною мірою залежать від надійності агрегатів і механізмів, працездатність яких визначається багатьма зовнішніми чинниками. Серед заходів, спрямованих на забезпечення їх ефективної роботи, важливу роль відіграє розробка і застосування технологій зміцнення поверхні та відновлення деталей (виробів) за допомогою АП. Зміцнення поверхонь деталей (виробів) за рахунок нанесення зносостійких АП дозволяє суттєво скоротити витрати матеріальних, енергетичних і трудових ресурсів, забезпечити їх надійну роботу в різноманітних умовах експлуатації та підвищити якість виробництва [1-18].

Актуальним також є завдання підвищення жаростійкості, корозійної стійкості, міцності та фретингостійкості деталей (виробів) [4-23]. Для цього необхідна розробка і впровадження інноваційних технологій нанесення функціональних АП для поверхневого зміцнення. Такий підхід базується на новій концепції створення конструкційних матеріалів: механічна міцність забезпечується матеріалом основи, а зносо-, жаро- і корозійна стійкість – функціональними АП зі спеціально розробленим складом, структурою і перевіреними властивостями. Виходячи із поставленої задачі і залежно від необхідного результату використовують різні типи АП. Їх класифікація зображена на рисунку 1.1.

Застосування таких АП не лише підвищує працездатність деталей (виробів), але й забезпечує значну економію дорогих і дефіцитних елементів, оскільки АП зазвичай наносяться шаром товщиною від 5-8 до 250-300 мкм [3-7]. Існує безліч технологічних методів покривання деталей АП, що включають наступні методи (рис. 1.2).

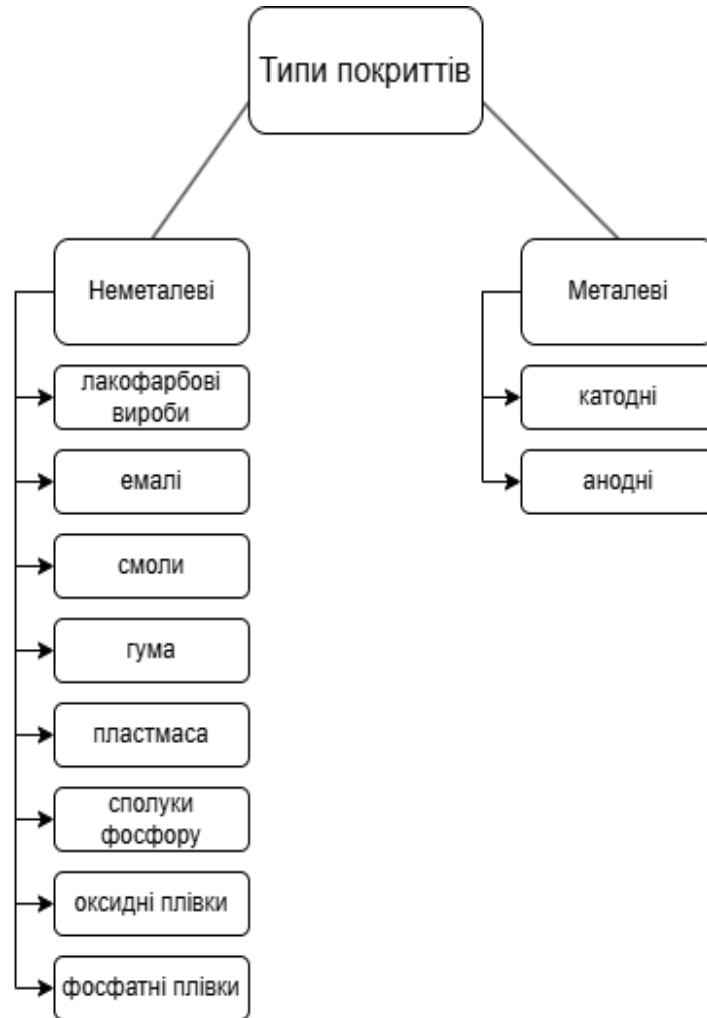


Рисунок 1.1 – Типи АП



Рисунок 1.2 – Методи покривання деталей (виробів) АП

Використання цих методів значно підвищує міцність зчеплення АП з основою, зменшує пористість АП, покращує їхню якість та забезпечує ефективну роботу в різних умовах експлуатації. АП використовуються для поверхневої обробки конструкційних матеріалів деталей (виробів) з метою підвищення їхньої зносо-, жаро-, тепло- та корозійної стійкості, а також поліпшення теплоізоляційних, оптичних і електроізоляційних характеристик, включаючи відновлення розмірів зношених деталей (виробів) [5-14].

Серед різноманітних методів захисту матеріалів, які працюють за температур 850–1200°C, особливу роль відіграють температуростійкі АП. У багатьох випадках такі АП ефективно функціонують навіть за одночасної дії високих температур, механічних навантажень та агресивних середовищ. Такі АП призначаються для:

- захисту конструкційних матеріалів деталей (виробів) від газової корозії;
- теплоізолюючого бар'єру між газом (що нагрівається до високих температур) та металом;
- захисту деталей (виробів) від механічного зносу в умовах підвищених та високих температур.

Задля продовження терміну експлуатації різних металевих деталей (виробів) можливо нанести на них АП за допомогою напилення певних металів чи сплавів металів на поверхню деталі (виробу). Під цим терміном розуміють процеси плазмового або газополум'яного напилення АП, а також електродугової металізації [3-12]. Цей процес складається з наступних кроків:

1. Попередня очистка поверхні деталі (виробу).
2. Деталь (виріб) піддається абразивно-струминевій обробці.
3. Перенесення активованих частинок металу, що напилюється.

Таке АП не тільки захищає від корозії, але і може застосовуватися з метою відновлення зношених поверхонь деталей (виробів). АП поділяється на види залежно від металу чи сплаву який наноситься на деталь (виріб), їх зображено на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Види АП

Алюмінієві та цинкові АП є одним із найефективніших способів захисту металоконструкцій, включаючи несучі елементи, як у забрудненому повітрі, так і у водному середовищі. Метод напилення АП особливо підходить для захисту великих конструкцій, таких як крани, мости, резервуари та різноманітні ємності, оскільки розміри об'єктів, що обробляються, не мають обмежень. У той час як звичайне фарбування забезпечує захист лише на 3-5 років, оцинкована поверхня деталі (виробу), додатково напилена АП для захисту від корозії, може служити 30-50 років. Існують різні методи нанесення АП на поверхню деталі (виробу) [8-11]. Їх зображено на рисунку 1.4.

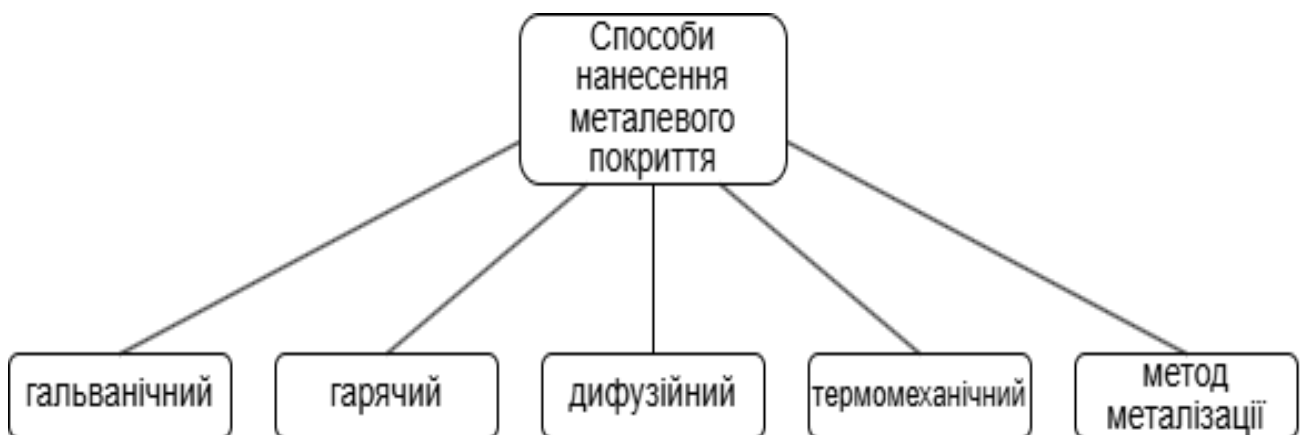


Рисунок 1.4 – Методи нанесення АП на поверхню

Пріоритетним напрямком в технологічних процесах поверхневого зміцнення деталей (виробів) є комплексні методи, що передбачають як послідовно, так і одночасно використання двох і та більшої кількості методів [5-15]. Представниками таких технологій слід вважати:

- газотермічне напилення АП з подальшою лазерною обробкою;
- поверхневу механотермічну обробку;
- електромагнітну наплавку з одночасним поверхневим пластичним деформуванням.

Окрім основної функції – захисту матеріалів деталей (виробів) від корозії, ерозії та перегріву, жаростійкі та теплостійкі АП можуть надавати поверхням деталей додаткові специфічні властивості, такі як оптичні чи діелектричні. Практика показує, що хімічне руйнування температуростійких АП зазвичай має локальний характер і починається в місцях технологічних дефектів, таких як пори, пухирі чи тріщини. Одним із ефективних рішень цієї проблеми є застосування багатошарових АП, які складаються з двох, трьох або більше тонких шарів різного складу. Такі АП демонструють високу ефективність навіть за складних умов експлуатації [6-17].

Результати досліджень підтверджують необхідність широкого впровадження сучасних технологій поверхневого зміцнення деталей. Для вирішення комплексних наукових і технологічних завдань потрібна консолідація зусиль спеціалістів різних галузей.

## 1.2 Огляд основних способів газотермічного нанесення антикорозійного покриття

Для підвищення працездатності деталей (виробів) сучасної техніки чи механізмів, та відновлення їх розмірів до початкових характеристик широко застосовуються методи газотермічного напилення АП, а саме:

- полум'яний;

- детонаційний;
- дуговий;
- плазмовий.

Для нанесення АП використовуються різноманітні матеріали, зокрема порошки різних металів, дроти, стрижні та гнучкі шнури [3-15].

Процес газотермічного нанесення АП полягає у створенні спрямованого потоку дисперсних часток металу, які переносяться на поверхню оброблюваної деталі (виробу). Цей процес забезпечує формування шару АП за оптимальних значень температури та швидкості. У газополум'яному напилюванні джерелом теплової енергії є полум'я, що утворюється внаслідок згоряння суміші кисню і пального газу. Напилювання АП в залежності від стану напиленого матеріалу може бути трьох типів:

- дротове;
- пруткове;
- порошкове.

Матеріал для напилення АП у вигляді дроту або стрижня подається через центральний отвір пальника, де він розплавляється під дією полум'я. Стиснене повітря розпилює розплавлений матеріал на дрібні частинки, які осідають на оброблюваній поверхні деталі (виробу). Газополум'яний метод також дозволяє наносити АП із порошкового матеріалу. У цьому випадку металевий порошок подається в пальник із бункера через отвір, прискорюється потоком транспортуючого газу (суміш кисню і пального газу) і, потрапляючи в полум'я на виході із сопла, нагрівається. Частинки порошку металу, захоплені гарячим газовим потоком, наносяться на поверхню деталі (виробу). У порошкових пальниках, як і у дротових, подача матеріалу в полум'я і розгін розплавлених часток здійснюється за допомогою стисненого повітря [3-16]. Принцип дротового газополум'яного напилювання АП зображено на рисунку 1.5.

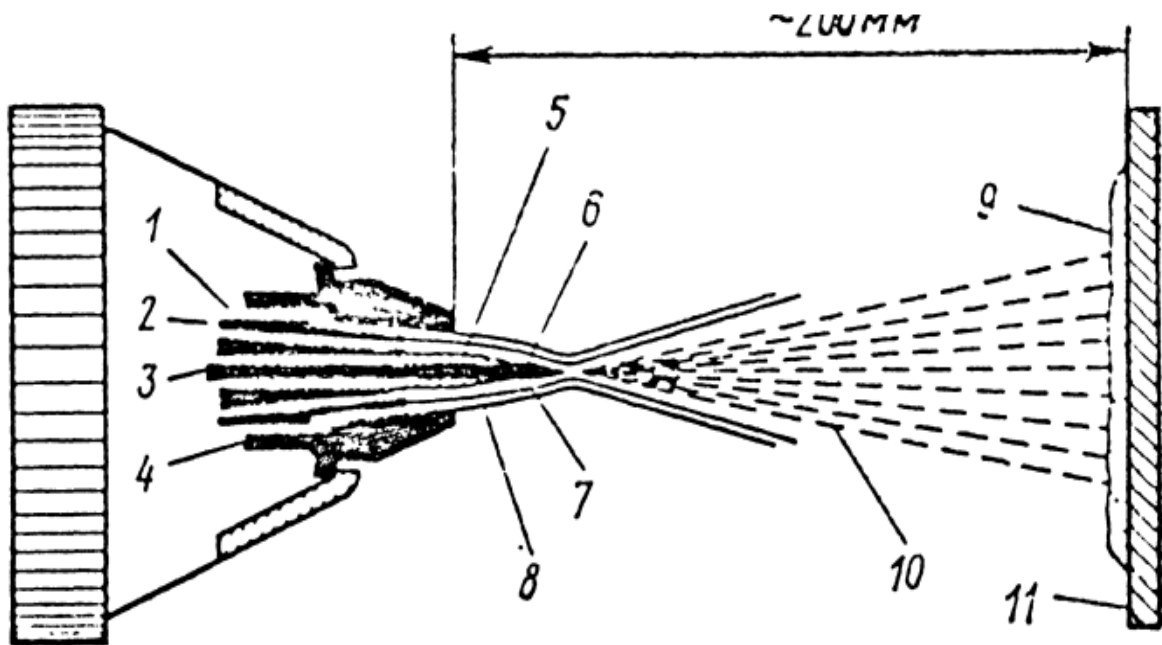


Рисунок 1.5 – Схема дротового газополум'яного напилювання АП

1 - стиснене повітря, 2 - ацетилено-киснева пальна суміш, 3 - дріт, 4 - насадок, 5 - ядро ацетилено-кисневого полум'я, 6 - оплавлений кінець дроту, 7 - смолоскип полум'я, 8 - повітряний потік, 9 - АП, 10 - потік часток напиленого матеріалу, 11 - основний матеріал.

До переваг газополум'яного напилювання АП відносяться:

1. Можливість одержання АП з більшості матеріалів, що плавляться при температурі до 3000 °С без їх розкладання.
2. Досить висока продуктивність процесу (до 8-10 кг/год порошків сплавів) з ефективним використанням матеріалу (понад 95%).
3. Низький рівень шуму і світлових випромінювань, що дозволяє оператору працювати без додаткових засобів персонального захисту.
4. Простота обслуговування, доступність і мобільність обладнання, що дозволяє робити напилювання АП на місці, без необхідності демонтажу виробів.

Основними недоліками газополум'яного способу напилювання АП з порошкових матеріалів є:

1. Обмеження напилюваних матеріалів за температурою плавлення (не більше 3000 °С).

2. Невисока міцність зчеплення АП з основою деталі чи виробу (5-25 МПа при випробуванні на нормальний відрив).
3. Значна пористість АП (5-25%), що ускладнює їх використання в корозійних середовищах без додаткової обробки.
4. Низький коефіцієнт використання енергії газополум'яного струменя для нагрівання порошкового матеріалу металу (2-12%).

До газополум'яного методу належить детонаційне напилювання АП, яке базується на використанні енергії детонації суміші кисню та пального газу. Детонація – це специфічна форма поширення полум'я, що за певних умов досягає швидкості, яка перевищує швидкість звуку в цьому середовищі, і наближається до вибуху. Якщо запалити пальну суміш газів за допомогою електричної іскри у спеціальній трубці чи стволі (рис. 1.6), фронт полум'я починає поширюватися вздовж ствола із поступово зростаючою швидкістю, доки не утвориться детонаційна хвиля [5-12].

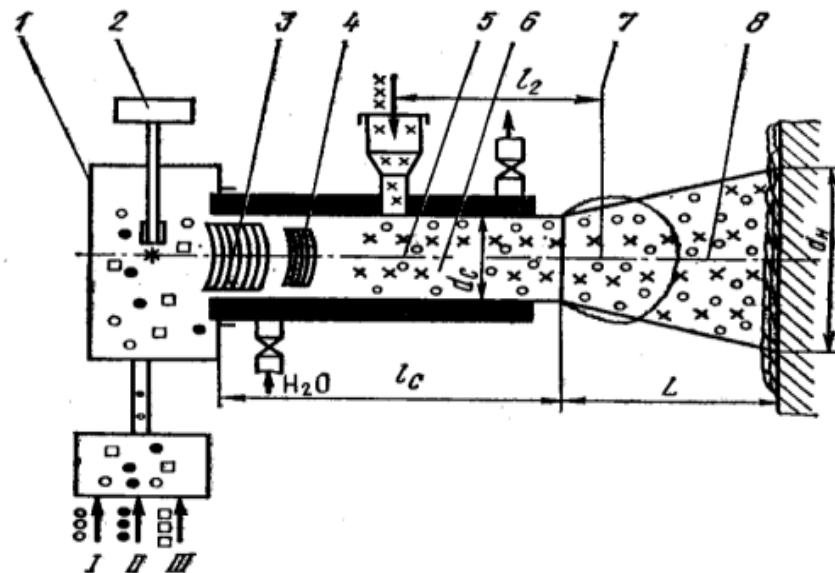


Рисунок 1.6 – Схема детонаційного напилювання АП

I - пальний газ, II-окислювальний газ, III- технологічний газ,  $d_c$  - діаметр сопла,  $l_c$  - довжина сопла.

У порівнянні з газополум'яним, детонаційний метод напилювання АП знаходить більше застосування в авіаційній промисловості, а також на ремонтних підприємствах.

Недоліки детонаційного метода напилювання АП:

1. Високий рівень шуму (125-140 Дб) і інші шкідливі впливи, що потребують ізоляції робочої зони.
2. Технологічні обмеження у нанесенні АП з матеріалів, які містять елементи, що активно взаємодіють з компонентами середовища.
3. Неможливість обробки гнучких або нежорстких деталей (виробів), через високі імпульсні навантаження, що виникають під час впливу продуктів детонації на підкладку.
4. Обмеження щодо твердості напиленої поверхні деталі (виробу), яка не повинна перевищувати HRC 60.

Розміри та форма деталей при детонаційному нанесенні АП обмежуються лише технічними можливостями обладнання для переміщення виробів (детонаційно-газової гармати) і розмірами звукоізованого боксу (камери), в якому здійснюється обробка деталі (виробу). Внутрішні циліндричні поверхні діаметром понад 10 м і з відкритими кінцями повинні мати довжину, що не перевищує 1,5 діаметра [1-7].

Дугове напилення АП здійснюється таким чином: два дроти (діаметром 1,5-3,2 мм) подаються через два канали в пальнику, між їх кінцями утворюється дуга, що розплавляє дріт. Розплавлений метал захоплюється струменем стиснутого повітря, що виходить через центральне сопло електронапилювача, і переноситься на поверхню деталі (виробу) у вигляді дрібних розплавлених часток. Розпилення та транспортування розплавленого металу здійснюються стисненим повітрям, хоча для напилення корозійностійкими металами або алюмінієвими сплавами часто використовують азот. При дуговому напилюванні АП при використанні постійного струму процес протікає стабільно, забезпечуючи утворення АП з дрібнозернистою структурою при високій продуктивності. Схему дугового напилювання АП

зображено на рисунку 1.7: 1 - насадок, 2 - місце введення напилюючого матеріалу (дроту), 3 - місце подачі стиснутого повітря.

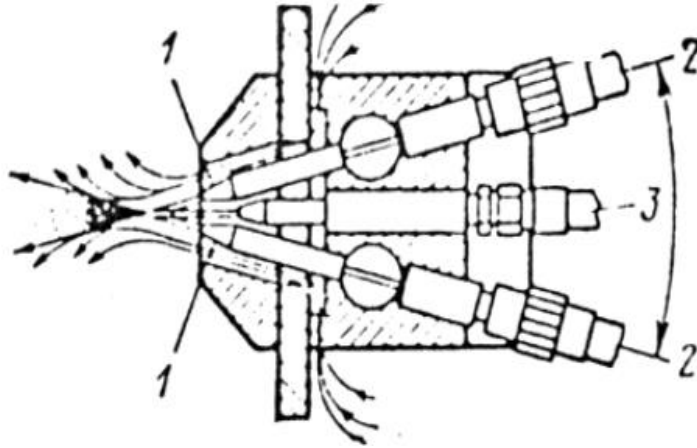


Рисунок 1.7 – Схема дугового напилювання АП

Дугова металізація АП має наступні переваги:

1. Використання потужних електрометалізаційних установок дозволяє значно збільшити продуктивність процесу нанесення АП і зменшити час обробки.
2. Електрометалізація забезпечує утворення більш міцних покриттів, що краще з'єднуються з основою деталі (виробу).
3. При використанні дроту з двох різних металів можна одержати АП у вигляді їх сплаву, який називаються псевдосплавом.
4. Експлуатаційні витрати при електрометалізації невеликі.

До числа недоліків дугового напилювання АП відноситься:

1. Ризик перегріву і окислювання напиленого матеріалу при низьких швидкостях подачі дроту.
2. Велика кількість тепла, що виділяється при горінні дуги, може призвести до значного вигорання легуючих елементів, що містяться в АП.

Метод газоплазмового напилювання АП є одним з найбільш поширених і використовується для напилювання АП та подальшого оплавлення покриттів із самофлюсуючих сплавів на основі нікелю та кобальту, а також для нанесення

керамічних і інших тугоплавких матеріалів. Плазмою називають газ, в якому більше 1% молекул перебувають в іонізованому стані, при цьому кількість позитивних іонів дорівнює кількості електронів та негативно заряджених іонів. Плазма характеризується високою електропровідністю [3-5].

При плазмово-дуговому напилюванні АП з порошкових матеріалів плавлення початкового матеріалу відбувається в плазмовому струмені, температура якого складає 5000-5500 °К. Плазмовий струмінь утворюється шляхом подачі плазмоутворюючого газу в електричну дугу, що виникає між двома електродами. Плазмовий струмінь – це потік речовини, що складається з електронів, іонів та нейтральних атомів плазмоутворюючого газу. У якості плазмоутворюючих газів можуть застосовувати:

- аргон;
- азот;
- водень;
- аміак;
- водяну пару;
- повітря;
- гелій;
- та інші гази, а також їхні суміші.

Частки вихідного металевого порошку, потрапляючи в плазмовий струмінь, розплавляються і переносяться на поверхню оброблюваної деталі (виробу). Використовуючи плазму, можна наносити АП з майже всіх тугоплавких матеріалів, які в плазмовому струмені не сублімують і не піддаються інтенсивному розкладу.

Принцип плазмового напилювання АП (рис. 1.7) полягає в тому, що між катодом (чистим або з додаванням 2% торію чи вольфраму) і мідним соплом (з водяним охолодженням), яке є анодом, виникає дуга, що нагріває робочий газ. Газ, що надходить у сопло пальника, виводиться через нього у вигляді плазмового струменя.

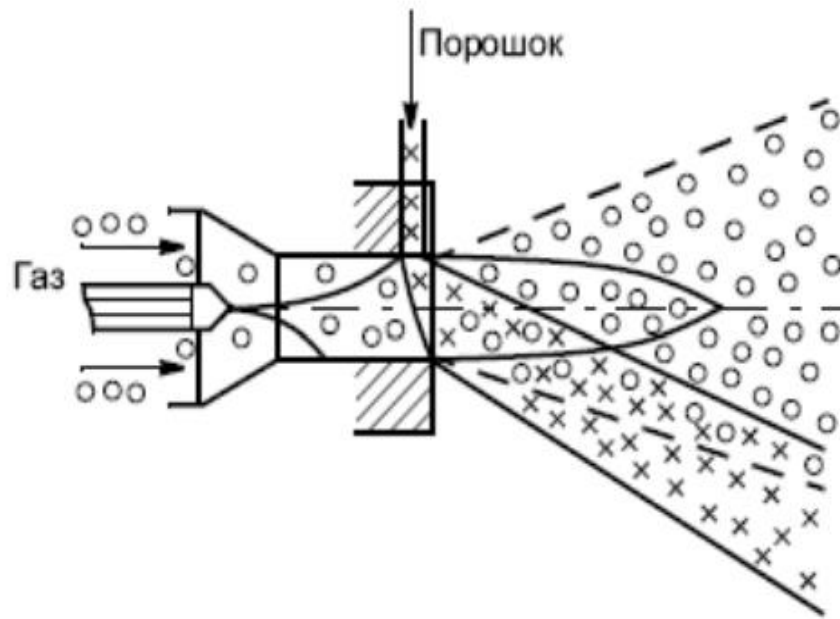


Рисунок 1.7 – Схема плазмового напилювання АП

В даний час у промисловості для одержання плазми використовують два типи пальників:

- плазмово-дугові;
- плазмово-струминні.

У плазмово-дуговому пальнику (рис. 1.8, а) електрична дуга горить між анодом (оброблюваний матеріал або експериментальний зразок) і катодом, виготовленим з вольфраму або вольфрамового сплаву, що містить приблизно 2% торію. Стабілізацію дуги забезпечує закручений потік робочого газу, який виходить із сопла пальника [3].

У плазмово-струминному пальнику (рис. 1.8, б) дуга утворюється між вольфрамовим катодом і анодом у вигляді мідного сопла. Дуга нагріває робочий газ до високої температури, який подається з закрученням у камеру пальника і виходить через сопло у вигляді плазмового струменя. Подача газу з інтенсивним закрученням у камеру пальника стабілізує процес горіння дуги і підвищує її температуру.

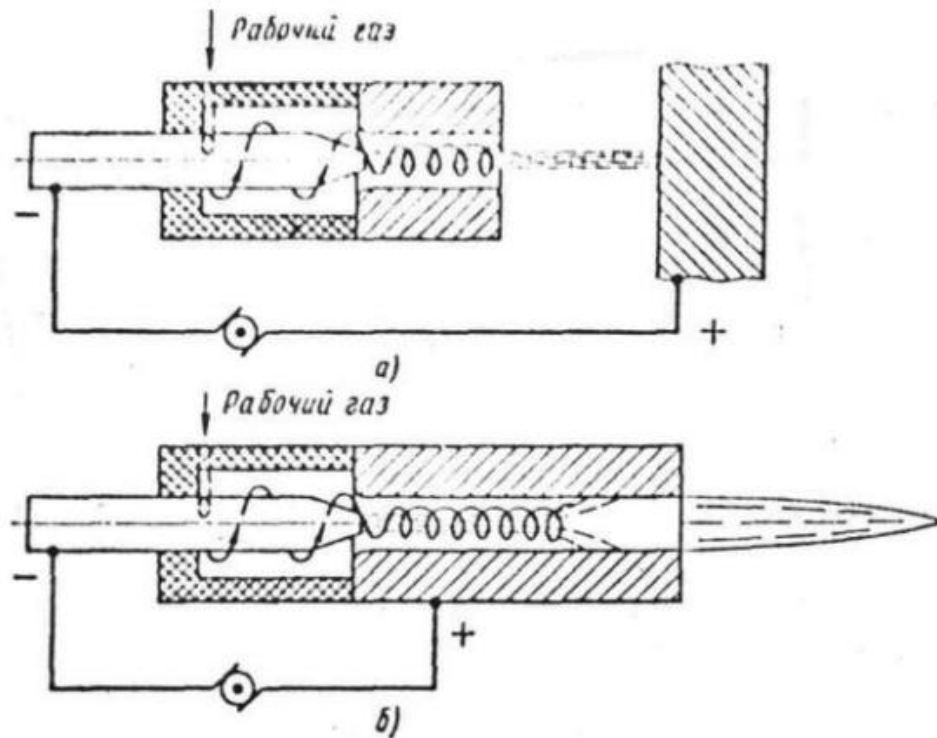


Рисунок 1.8 – Схема плазмово-дугового(а) і плазмово-струменного(б) пальника

Плазмові пальники дозволяють створити плазмовий струмінь, середня температура якого на виході із сопла досягає кількох тисяч градусів. Ця температура є достатньою для розплавлення будь-яких твердих речовин. Однак при напилюванні на поверхню деталі (виробу) важливо уникати розплавлення та термічної деформації основи деталі (виробу), тому для цього часто використовують плазмово-струминні пальники (розпилювачі) [4].

Напилювання АП плазмовим струменем має такі особливості:

- висока температура плазмового струменя дозволяє ефективно наносити АП з тугоплавких матеріалів;
- температуру струменя можна регулювати в широкому діапазоні, змінюючи діаметр сопла та параметри роботи розпилювача;
- є можливість наносити АП з різних матеріалів, включаючи метали, кераміку та органічні матеріали;
- в напиленому АП утворюється мінімальна кількість окислів, оскільки використовується інертний газ;

– при необхідності напилювання АП можна проводити в спеціальній ємності, заповненій інертним газом.

До переваг плазмового методу напилення АП відносяться:

1. Універсальність методу, оскільки він дозволяє наносити АП з різноманітних матеріалів, таких як метали, сплави, окисли, карбіди, нітриди, бориди, пластмаси та їхні комбінації, чого не можна досягти іншими методами.
2. Зручність керування процесом нанесення АП завдяки можливості регулювати енергетичні параметри плазми в залежності від технологічних вимог.
3. Здатність наносити АП як на великі, так і на малі поверхні, а також на деталі (вироби) складної форми.
4. Під час процесу напилення АП поверхня деталі (виробу), що покривається, нагрівається до відносно низьких температур, що дозволяє зберігати структуру і властивості матеріалу основи.
5. Можливе використання газів, що не містять кисень, у плазмових пальниках, що знижує ймовірність окислення як напиленого АП, так і матеріалу основи.
6. Температура плазмового струменя значно вища, ніж температура полум'я, утвореного при згорянні ацетилену.
7. Плазмові АП мають вищу щільність і кращу адгезію до основи.

1.1. Постановка задачі на проектування автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт

Технологічний процес АСКППДАСЦК складається з наступних основних операцій:

1. Підготовка поверхні деталі до напилення АП.
2. Нанесення АП.
3. Механічна обробка АП.
4. Додаткове нанесення АП (опціонально).

## 5. Контроль якості АП.

В загальному вигляді схема технологічного процесу АСКППДАСЦК зображена на рисунку 1.9.

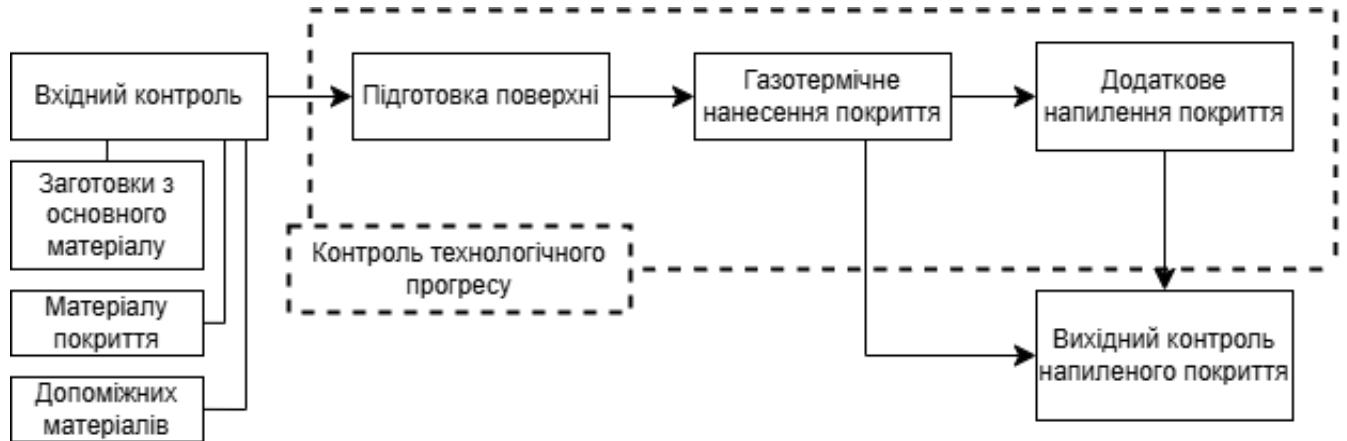


Рисунок 1.9 – Схема технологічного процесу АСКППДАСЦК

Словесний АК виглядає наступним чином:

1. При натисканні на кнопку («Старт») система запускається.
2. При натисканні на кнопку («Стоп») система зупиняється.
3. При спрацьовуванні ОД в сховищі з АП система подає сигнал про відсутність АП.
4. При натисканні на кнопку («Подача АП») відбувається подача АП в напилювач.
5. При спрацьовуванні ОД в сховищі з допоміжними матеріалами система подає сигнал про їх відсутність.
6. При спрацьовуванні ОД на КС перед хімічною очисткою КС призупиняється на 10 хв., запускається процес хімічної очистки деталі і через 10 хв. вимикається.
7. При натисканні на кнопку («Хім. очистка») деталь опускається в чан з кислотним розчином для подальшої хімічної обробки, після обробки деталь підіймається.

8. При спрацьовуванні ОД на КС перед абразивною підготовкою КС призупиняється на 5 хв., запускається процес абразивної підготовки деталі і через 5 хв. вимикається.

9. При натисканні на кнопку («Абразивна підготовка») деталь опускається в контейнер з абразивним матеріалом для подальшої підготовки, після підготовки деталь підіймається.

10. При спрацьовуванні ОД на КС перед покриттям АП КС призупиняється на 2 хв., вмикається газотермічний напилювач і через 2 хв. вимикається.

11. При натисканні на кнопку («Увімк. напилювач») вмикається газотермічний напилювач.

12. При натисканні на кнопку («Вимк. напилювач») вимикається газотермічний напилювач.

13. При натисканні на кнопку («Додаткове напилення») КС зупиняється на 2 хв., вмикається газотермічний напилювач і напилює додатковий шар АП і вимикається.

14. При спрацьовуванні ОД на КС перед дефектоскопом КС призупиняється на 4 хв., дефектоскоп сканує деталь і через 4 хв. вимикається.

15. При натисканні на кнопку («Увімк. дефектоскоп») вмикається дефектоскоп і перевіряє деталь на наявність недосконалостей.

16. При натисканні на кнопку («Вимк. дефектоскоп») вимикається дефектоскоп.

### 1.3 Висновки до першого розділу

Було розглянуто сучасні технології нанесення АП на деталі (вироби), які сприяють підвищенню їх жаростійкості, корозійної стійкості, міцності та фретингостійкості. Використання плазмових пальників, зокрема плазмово-

струминних, дозволяє досягати високих температур, що забезпечує ефективне нанесення АП з тугоплавких матеріалів без ризику термічної деформації основи деталі (виробу).

Інноваційні технології напилювання АП, підвищують продуктивність процесу та якість АП, що забезпечує їх міцніше з'єднання з основним матеріалом деталі (виробу). Завдяки цьому, АП отримує високі показники зносостійкості та витривалості навіть в умовах високих навантажень і агресивних середовищ. Загалом, застосування функціональних АП з спеціально розробленим складом і структурою є ключовим для досягнення високих експлуатаційних характеристик деталей (виробів) у різних умовах. Це дозволяє значно збільшити термін служби деталей (виробів), знижуючи витрати на обслуговування і ремонти, а також покращити ефективність їх роботи в умовах підвищених температур, механічних навантажень та корозії.

## 2 АНАЛІЗ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОКРИТТЯ ДЕТАЛЕЙ АНТИКОРОЗІЙНИМ СПЛАВОМ ЦИНК-КОБАЛЬТ НА СТІЙКІСТЬ ТА РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ

### 2.1 Огляд процесу аналізу систем автоматизованого керування на стійкість та надійність

САК, призначена для керування технологічним процесом або агрегатом, повинна забезпечувати працездатність, тобто підтримувати параметри в межах, які не призводять до значних порушень процесу або роботи агрегату чи окремих елементів. Працездатність САК залежить від її стійкості, що означає здатність САК повернутися до стану рівноваги після усунення причини, яка спричинила відхилення.

САК вважається нестійкою, якщо в результаті впливу вхідного сигналу чи збурення регульована величина починає необмежено зростати. Коливання в технічній САК виникають за наявності у її замкненому контурі двох елементів, здатних накопичувати й віддавати енергію. У електричних ланцюгах такими елементами є ємність і індуктивність, а в механічних САК – рухомі маси й пружини. В електромеханічних САК одне середовище, що накопичує енергію, зазвичай є електричним, а інше – механічним. Коли коливання набувають сталого характеру, енергія почергово передається між двома елементами: одним, що накопичує її, і іншим, що передає її в середовище. Якщо до САК не надходить додаткова енергія ззовні або її надходження недостатнє для компенсації втрат усередині САК, коливання поступово згасають, і САК переходить у стан спокою.

Зазвичай, якщо САК стійка при невеликих відхиленнях, її вважають стійкою і при значніших відхиленнях. Стійкість САК можна проілюструвати за допомогою

системи "куля - поверхня" (рис. 2.1). Рух кульки всередині кільця – незалежно від величини відхилення, кулька завжди повернеться у вихідне положення.

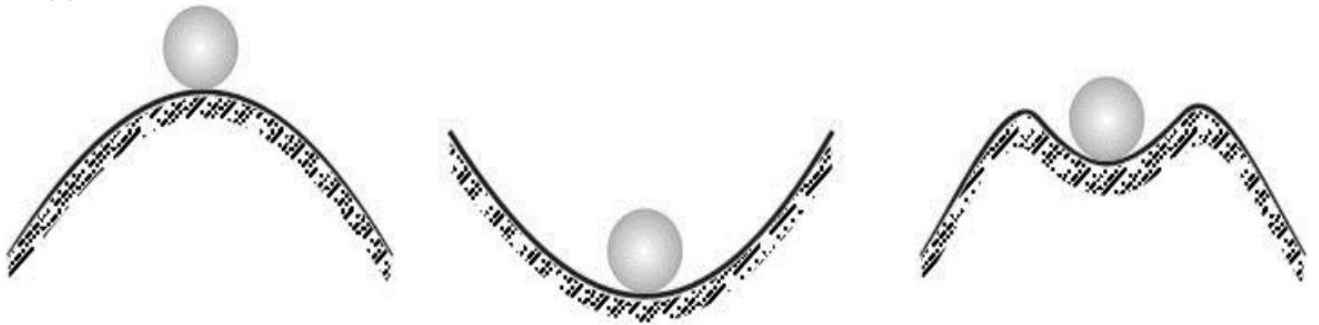


Рисунок 2.1 – Приклад визначення стійких станів системи куля - поверхня

Існують САК, які є стійкими для невеликих відхилень, але стають нестійкими за значних змін, оскільки їхня стійкість залежить від величини початкового відхилення. Така САК вважається стійкою лише тоді, коли кулька, відхилена від початкового положення, залишається в межах западини або жолоба. Якщо кулька виходить за ці межі, вона вже не може повернутися у вихідне положення, і САК стає нестійкою. Наприклад, при русі кульки по опуклій траєкторії навіть найменше відхилення спричиняє її рух вниз, і повернення у вихідне положення стає неможливим, тобто система нестійка [34-36].

Стійкість є ключовою умовою працездатності САК, адже система повинна нормально функціонувати та залишатися нечутливою до зовнішніх збурень. Стійкість САК визначається здатністю підтримувати задане значення регульованого параметра з потрібною точністю і повертатися до нього після завершення перехідного процесу.

Таким чином, характер перехідного процесу дає змогу оцінити стійкість САК. Якщо САК стійка (рис. 2.2, а), то перехідна характеристика прагне до нуля за достатньо великого часу:  $\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = 0$ . Якщо ж САК нестійка, то  $\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = \infty$ , що означає її нездатність повернутися в стан рівноваги. Вона може необмежено віддалятися від цього стану або здійснювати надмірні коливання (рис. 2.2, б). Варто

значити, що САК може бути стійкою за невеликих збурень, але ставати нестійкою під впливом сильніших зовнішніх впливів.

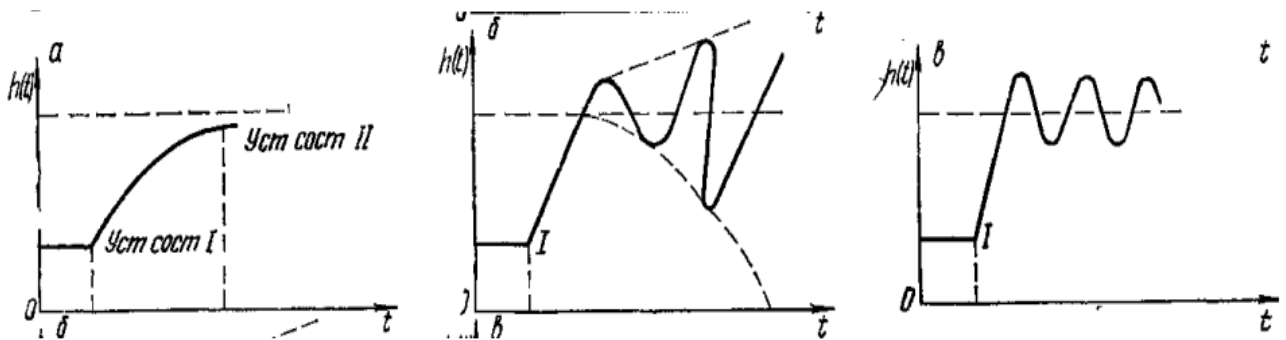


Рисунок 2.2 – Визначення стійкості САК згідно характеристики перехідної характеристики

Стійкість нелінійних САК можна оцінювати їхніми лінійними математичними моделями:

- якщо лінійна модель САК є стійкою, то й реальна САК також стійка. Жодні члени, відкинуті під час лінеаризації, не можуть змінити її стійкість;
- якщо лінійна модель САК нестійка, то й реальна САК нестійка. У цьому випадку відкинуті члени також не впливають на стійкість;
- якщо лінійна модель САК перебуває на межі стійкості, то оцінити стійкість реальної САК лише за цією моделлю неможливо. Необхідно проаналізувати члени, відкинуті під час лінеаризації.

При вивченні стійкості нелінійних САК вводяться поняття стійкості «в малому», «в великому» та «в цілому» («абсолютна»):

- стійкість «в малому» - відома область, у якій САК зберігає стійкість, але її межі не визначені;
- стійкість «в великому» - визначені чіткі межі області стійкості САК;
- стійкість «в цілому» («абсолютна») - САК здатна повернутися у вихідний стан за будь-яких початкових відхилень чи збурень.

Аналіз стійкості САК доцільно виконувати аналітично, знаходячи корені характеристичного рівняння. Якщо всі корені (дійсні та уявні) характеристичного

рівняння знаходяться в лівій напівплощині комплексної площини (ліворуч від уявної осі), то лінійна САК є стійкою. Уявна вісь у цьому випадку є межею стійкості САК [38-42].

САК перебуває на межі стійкості за наявності нульового кореня, пари уявних коренів або кореня, розташованого на нескінченності ( $p_i = \infty$ ). Якщо в характеристичному рівнянні вільний член дорівнює нулю ( $a_n = 0$ ), це свідчить про наявність нульового кореня. Таку САК називають нейтрально стійкою (рис. 2, в), оскільки вона є стійкою не відносно керованої величини  $y$ , а відносно швидкості її зміни ( $\frac{dy}{dt}$ ).

Надійність – це здатність об'єкта САК виконувати задані функції, зберігаючи встановлені експлуатаційні показники в межах заданих значень протягом часу.

Об'єкт – це технічний виріб САК, створений для виконання певних цілей, який аналізується на етапах проєктування, виробництва, випробувань і експлуатації.

Елемент – найпростіша складова частина виробу САК, яка, залежно від задачі, може включати кілька деталей.

Система – це сукупність взаємодіючих елементів САК, що функціонують спільно для виконання заданих функцій.

Залежно від поставленого завдання, поняття "елемент" і "система" можуть змінюватися. Надійність об'єкта САК визначається його основними станами та подіями:

- справність САК - стан об'єкта САК, за якого він повністю відповідає вимогам, встановленим НТД;
- працездатність САК - стан об'єкта САК, за якого він здатний виконувати свої функції, зберігаючи основні параметри в межах, визначених НТД;
- граничний стан САК - стан об'єкта САК, за якого його використання стає недопустимим або недоцільним;
- відмова САК - подія, що виражається у втраті об'єктом САК працездатності;

– критерій відмови САК - ознака або сукупність ознак, за якими визначається факт відмови об'єкта САК.

Надійність САК є комплексною характеристикою, яка включає низку простих властивостей, що залежать від призначення об'єкта САК та умов його експлуатації.

– безвідмовність САК - здатність об'єкта САК безперервно зберігати працездатність протягом певного напрацювання або часу;

– напрацювання САК - тривалість або обсяг роботи об'єкта САК, що вимірюється у незменшуваних величинах, таких як години роботи, кількість циклів навантаження, кілометри пробігу тощо;

– довговічність САК - здатність об'єкта САК зберігати працездатність до досягнення граничного стану за умови дотримання встановленої САК технічного обслуговування і ремонтів;

– ремонтпридатність САК - здатність об'єкта САК до попередження, виявлення причин відмов, а також підтримання і відновлення працездатності через технічне обслуговування та ремонт;

– збережуваність САК - здатність об'єкта САК зберігати необхідні експлуатаційні характеристики протягом і після періоду зберігання чи транспортування.

Залежно від типу об'єкта, надійність САК може визначатися усіма вищезгаданими властивостями або їх частиною. Показник надійності САК кількісно характеризує, наскільки об'єкт САК володіє властивостями, що забезпечують його надійність. Деякі показники надійності САК (технічний ресурс або термін служби) мають розмірність, в той час як інші (ймовірність безвідмовної роботи або коефіцієнт готовності) є безрозмірними.

Технічний ресурс САК - це напрацювання об'єкта САК від початку його експлуатації або відновлення після ремонту до настання граничного стану.

Призначений ресурс САК - це сумарний наробіток об'єкта САК, після досягнення якого експлуатацію необхідно припинити незалежно від його стану.

Термін служби САК - це календарний період експлуатації об'єкта САК (включаючи зберігання, ремонти та інші процеси) з початку до настання граничного стану об'єкта САК.

2.2 Визначення стійкості автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт

Розрахунок стійкості АСКППДАСЦК за критерієм Рауса:

Застосування алгебраїчних критеріїв засноване на дослідженні комбінацій коефіцієнтів характеристичного рівняння, яким є знаменник передаточної функції АСКППДАСЦК (2.1).

$$a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n = 0 \quad (2.1)$$

Характеристичне рівняння відповідає стійкій АСКППДАСЦК, якщо всі коефіцієнти першого стовпця таблиці Рауса позитивні. Якщо хоча б один коефіцієнт має від'ємне значення, то АСКППДАСЦК не стійка, а якщо хоча б один коефіцієнт має нульове значення - то АСКППДАСЦК на межі стійкості.

Таблиця Рауса (2.2) має (n+1) рядок і (n+1) стовпець (n – найвищий ступінь відносно s характеристичного рівняння) і складається таким чином:

- у першому рядку таблиці Рауса розміщуються коефіцієнти АСКППДАСЦК з парними індексами, починаючи з  $a_0$ ;
- у другому рядку - коефіцієнти АСКППДАСЦК з непарними індексами, починаючи з  $a_1$ ;
- решта елементів таблиці визначається по співвідношеннях;
- відсутні елементи таблиці замінюються нулями.

$$R = \begin{vmatrix} a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & & & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & & & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & & & & \\ C_n & 0 & 0 & 0 & & & & \end{vmatrix} \quad (2.2)$$

де:

$$\begin{aligned} a_{31} &= a_2 - a_3 \cdot \frac{a_0}{a_1} = a_2 - a_3 r_1; \\ a_{32} &= a_4 - a_5 \cdot r_1; \\ a_{33} &= a_6 - a_7 \cdot r_1; \\ a_{41} &= a_3 - a_{32} \cdot \frac{a_1}{a_{31}} = a_3 - a_{32} \cdot r_2; \\ a_{42} &= a_5 - a_{33} \cdot r_2, \text{ та інші аналогічно.} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Підставлення значень:

$$A(s) = 2,15s^3 + 1,15s^2 + 4,89s + 2,37, \quad (2.4)$$

$$R = \begin{vmatrix} 2,15 & 4,89 & 0 \\ 1,15 & 2,37 & 0 \\ 0,459 & 0 & 0 \\ 2,36 & 0 & 0 \end{vmatrix}. \quad (2.5)$$

Висновок: Згідно критерію Рауса АСКППДАСЦК, що описується характеристичним рівнянням, є стійкою, так як коефіцієнти першого стовпця позитивні.

Розрахунок стійкості АСКППДАСЦК за критерієм Воронова:

Стійкість і якість АСКППДАСЦК з характеристичним поліномом можна оцінити за допомогою наступних показників:

Наближені частоти, що сполучають (2.6):

$$\omega_k = \frac{a_{k-1}}{a_k}, k = 1, 2, \dots, n. \quad (2.6)$$

Показники якості (2.7):

$$\Omega_k = \frac{\omega_{k+1}}{\omega_k} = \frac{a_k^2}{a_{k-1}a_{k+1}}, k = 1, 2, \dots, n - 1. \quad (2.7)$$

Показники стійкості (2.8):

$$W_k = \frac{\omega_{k+2}}{\omega_k} = \Omega_k \Omega_{k+1} = \frac{a_k a_{k+1}}{a_{k-1} a_{k+1}}, k = 1, 2, \dots, n - 2. \quad (2.8)$$

Значення (2.7) приблизно дорівнюють спряженим частотам на ділянках, де визначаючими є дійсні корні, відповідні до аперіодичних ланок. Якщо  $\Omega < 1,7...2$ , то значення  $\omega_{k,k+1} = \sqrt{\omega_k \omega_{k+1}}$  наближає, сполучену частоту на ділянці, де визначеною є пара комплексно-сполучених коренів, відповідних до коливальної ланки.

Виконання нерівностей (2.9) є необхідною умовою стійкості САК.

$$\frac{a_0}{a_2} < \frac{a_1}{a_3} < \dots < \frac{a_{k-1}}{a_{k+1}} < \dots < \frac{a_{n-2}}{a_n}, \quad (2.9)$$

З використанням показників стійкості САК умова (2.8) запишеться у вигляді (2.10):

$$W_k > 1, k = 1, 2, \dots, n - 2. \quad (2.10)$$

Невиконання хоча б одного з нерівностей (2.9) є достатньою умовою нестійкості АСКППДАСЦК. Виконання необхідної умови стійкості САК (2.9) ще не означає, що САК буде стійкою. Тому потрібно виконання ряд достатніх умов стійкості САК (2.11):

$$W_k > 2,148, k = 1, 2, \dots, n - 2. \quad (2.11)$$

З виразу (2.7) випливає, що умова (2.10) буде завжди виконуватися, якщо показники якості АСКППДАСЦК задовольняють обмеженням (2.12):

$$\Omega_k > \sqrt{2,148} = 1,466, k = 1, 2, \dots, n - 1. \quad (2.12)$$

Таким чином, (2.10) є достатньою умовою стійкості АСКППДАСЦК, що сформована по показникам якості АСКППДАСЦК. На практиці потрібно щоб АСКППДАСЦК мала деякий запас стійкості і якості, тому поряд з умовами (2.10), (2.11) запропонована умова стійкості АСКППДАСЦК із запасом (2.13):

$$W_k > 3, k = 1, 2, \dots, n - 2. \quad (2.13)$$

і також умова стійкості і якості АСКППДАСЦК (2.14) (якісної стійкості):

$$\Omega_k > \sqrt{3} = 1,732, k = 1, 2, \dots, n - 1. \quad (2.14)$$

Якщо всі  $\Omega_k \geq 4$ , то всі коріння полінома будуть речовинним. Визначення стійкості АСКППДАСЦК за алгебраїчним критерієм стійкості Воронова, при характеристичному рівнянні (2.15) АСКППДАСЦК:

$$0,01s^6 + 0,5s^5 + s^4 + 6s^3 + 10s^2 + 4s + 3 = 0, \quad (2.15)$$

$$0,01 < 0,083 < 0,1 < 1,5 < 3,33. \quad (2.16)$$

Визначимо показник стійкості (2.17) АСКППДАСЦК:

$$W_k = 2,22 > 2,148. \quad (2.17)$$

Висновок: АСКППДАСЦК є стійкою, тому, що умова критерію Воронова виконується і стійкість АСКППДАСЦК достатня згідно показникам якості.

Розрахунок стійкості АСКППДАСЦК за критерієм Михайлова:

Критерій Михайлова засновано на використанні характеристичного рівняння САК (2.18):

$$G(s) = 0,1s^4 + s^3 + 10s^2 + 40s + 100. \quad (2.18)$$

При цьому в характеристичному рівнянні САК (2.18) необхідно підставити замість  $s$  вираз  $j\omega$ , а після цього з обліком того, що  $j^2 = -1, j^3 = -j, j^4 = 1$  отримаємо вираз (2.19) у вигляді:

$$G = a_0(j\omega)^n + a_1(j\omega)^{n-1} + \dots + a_{n-1}j\omega + a_n = 0, \quad (2.19)$$

і в числовому вигляді (2.20):

$$G(j\omega) = 0,1(j\omega)^4 + (j\omega)^3 + 10(j\omega)^2 + 40j\omega + 100. \quad (2.20)$$

Виділяємо дійсну (2.21) і уявну (2.22) частини і представимо характеристичне рівняння (2.23) АСКППДАСЦК у вигляді комплексного поліному:

$$G(j\omega) = R(\omega) + jQ(\omega), \quad (2.21)$$

$$R(\omega) = 0,1\omega^4 - 10\omega^2 + 100, \quad (2.22)$$

$$J(\omega) = -\omega^3 + 40\omega. \quad (2.23)$$

Згідно критерію Михайлова, АСКППДАСЦК стійка, якщо годограф (рис. 2.3) (що описується кінцем вектору  $G(j\omega)$ ) при зміні частоти  $\omega$  від 0 до  $\infty$ , починаючи при  $\omega = 0$  на дійсній позитивній на півосі, описує послідовне число квадрантів координатної площини, рівній порядку  $n$  характеристичного рівняння АСКППДАСЦК.

Знаходимо величини  $R(\omega)$  і  $Q(\omega)$  і будуємо графік  $R(\omega) = f Q(\omega)$  в площині комплексних змінних. Результати розрахунків зведемо до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Розрахункові дані для побудови графа Михайлова для АСКППДАСЦК.

| $\omega$    | 0   | 2    | 4     | 6    | 7    | 9    | 10   |
|-------------|-----|------|-------|------|------|------|------|
| $R(\omega)$ | 100 | 61,6 | -34,4 | -130 | -150 | -54  | 100  |
| $J(\omega)$ | 0   | 72   | 96    | 24   | -63  | -269 | -600 |

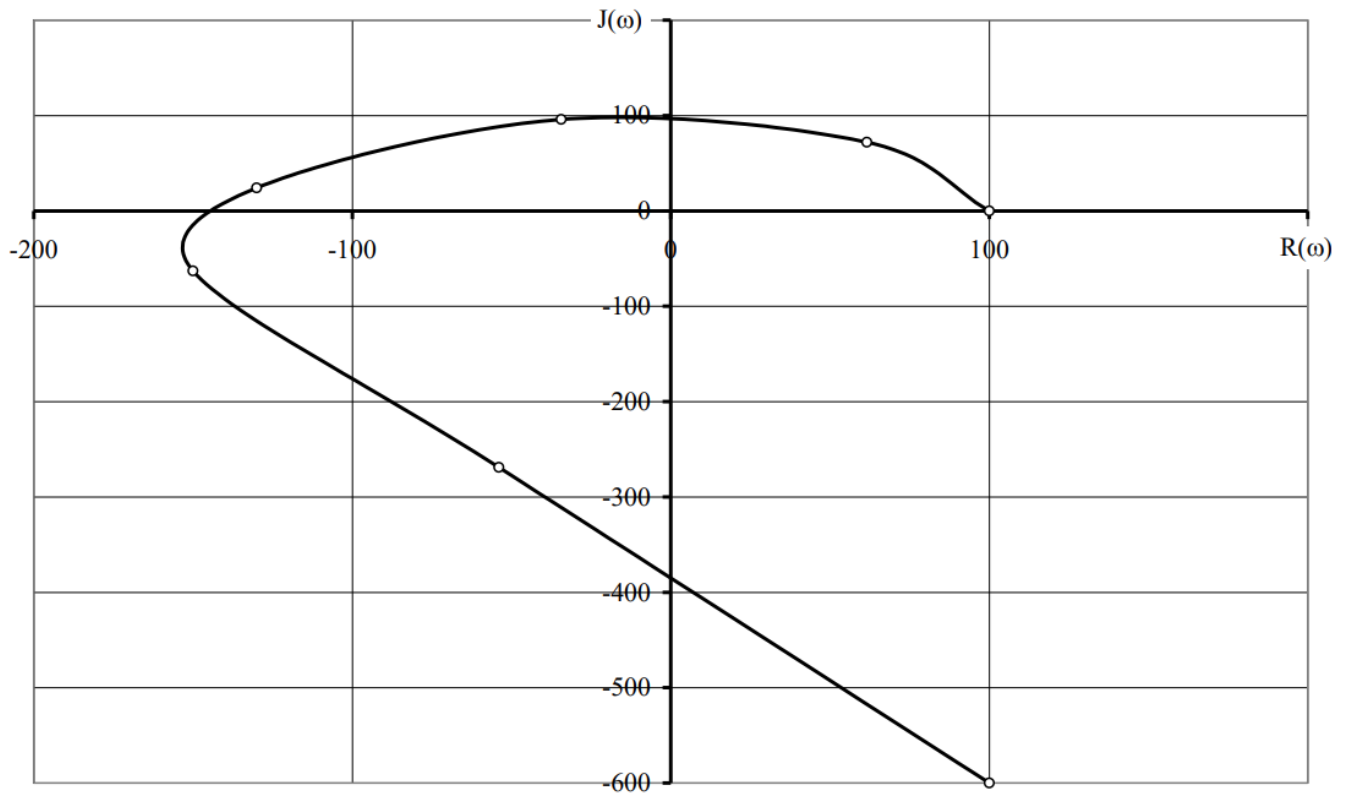


Рисунок 2.3 – Годограф Михайлова для АСКППДАСЦК

АСКППДАСЦК є стійкою, якщо годограф Михайлова послідовно проходить проти годинної стрілки через чотири квадранти, обгортає крапку з координатами  $(0; 0)$  та йде в нескінченність.

За цими ж даними побудуємо окремі залежності  $R(\omega)$  та  $J(\omega)$  від  $\omega$  для визначення запасу стійкості АСКППДАСЦК. Зближення коренів поліномів показує те, що АСКППДАСЦК наближається до межі стійкості.

Запас стійкості для АСКППДАСЦК визначається за формулою (2.24):

$$z = \frac{c}{d} 100\% = \frac{3}{3,15} 100 = 95,2\%. \quad (2.24)$$

Висновок: АСКППДАСЦК є стійкою, тому що виконується вимоги критерію Михайлова і запас стійкості АСКППДАСЦК дорівнює 95,2 %.

Розрахунок стійкості АСКППДАСЦК за критерієм Найквіста:

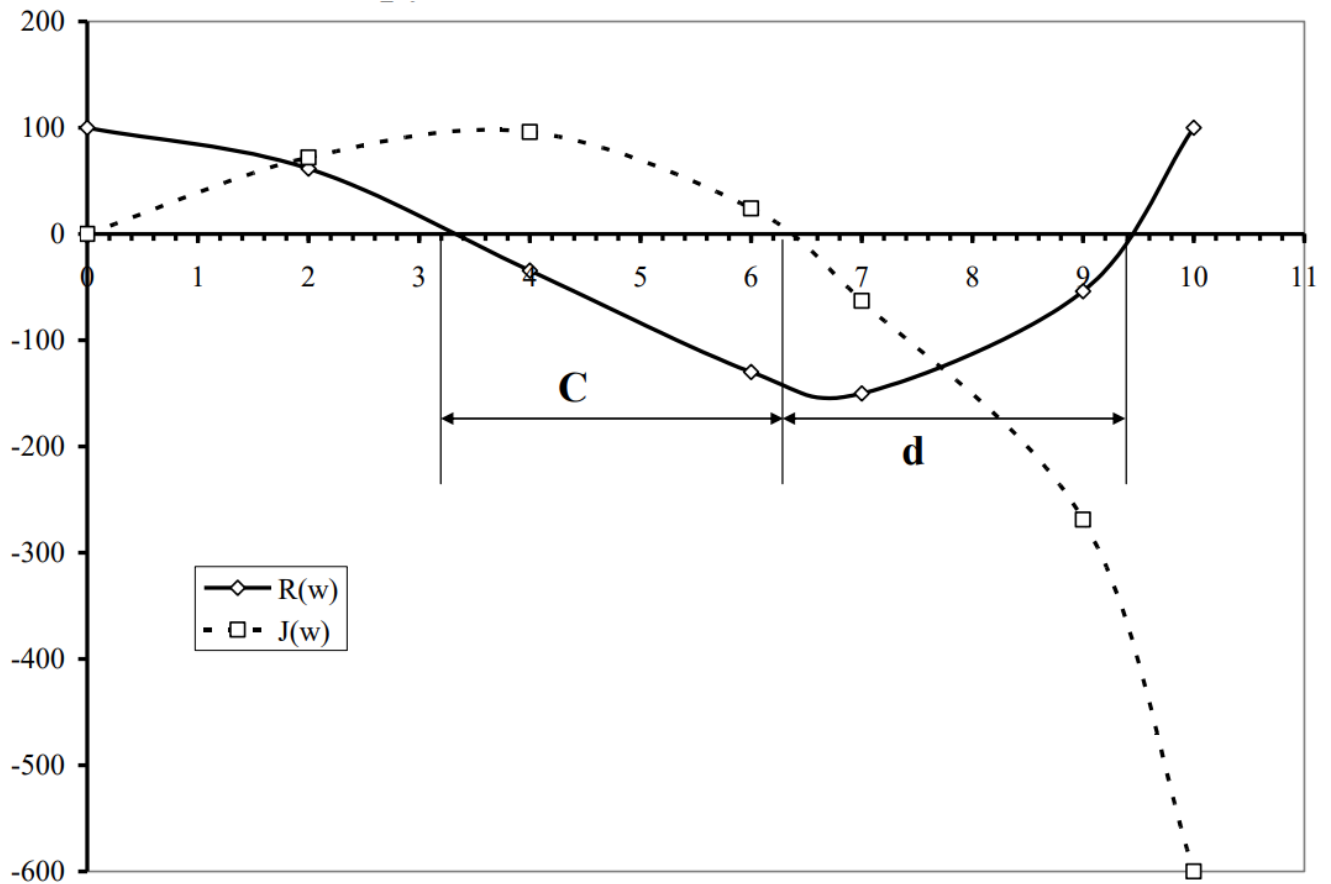


Рисунок 2.4 – Визначення запасу стійкості для АСКППДАСЦК

Розглянемо визначення стійкості АСКППДАСЦК за частотним критерієм Найквіста на прикладі передаточної функції (2.25) АСКППДАСЦК:

$$W(s) = \frac{s^4 + 3s^3 + 4s^2 + 11s + 9}{3s^3 + 2s^2 + 1,1s + 2}. \quad (2.25)$$

Передаточна функція АСКППДАСЦК знаходиться по виразу (2.26) і має вигляд:

$$W_p(s) = \frac{W(s)}{1 - W(s)} = \frac{s^4 + 3s^3 + 4s^2 + 11s + 9}{-s^3 - 2s^2 - 9,9s - 7}. \quad (2.26)$$

Згідно з критерієм Найквіста АСКППДАСЦК стійка, якщо АФЧХ розімкненої системи при зміні частоти від 0 до нескінченності, не охоплює точку з координатою  $(-1; j0)$ , або якщо АФЧХ АСКППДАСЦК при зміні частоти від 0 до

нескінченності охоплює точку  $(-1; j0)$  в додатному напрямку (проти годинникової стрілки)  $q$  разів, рівному числу коренів з додатною реальною частиною характеристичного рівняння АСКПДАСЦК. Годограф Найквіста зображений на рисунку 2.5.

Виконуємо заміну  $s = j\omega$  і відокремлюємо дійсну та уявну частину передаточної функції АСКПДАСЦК, використовуючи допоміжні вирази (2.27 - 2.30):

$$W_p(s) = \frac{(j\omega)^4 + 3(j\omega)^3 + 4(j\omega)^2 + 11j\omega + 9}{-(j\omega)^4 - 2(j\omega)^2 - 9,9j\omega - 7}, \quad (2.27)$$

$$W(j\omega) = R(j\omega) + jQ(\omega), \quad (2.28)$$

$$R(\omega) = \frac{a(\omega) \cdot c(\omega) + b(\omega) \cdot d(\omega)}{c^2(\omega) + d^2(\omega)}, \quad (2.29)$$

$$Q(\omega) = \frac{b(\omega) \cdot c(\omega) - a(\omega) \cdot d(\omega)}{c^2(\omega) + d^2(\omega)}. \quad (2.30)$$

Враховуючи, що  $j^3 = -j$ ,  $j^2 = -1$  передаточна функція АСКПДАСЦК матиме вигляд (2.31):

$$W(j\omega) = \frac{-\omega^8 + 6\omega^6 + 5,7\omega^4 - 62,9\omega^2 - 63}{\omega^8 - 10\omega^6 + 18\omega^4 + 53\omega^2 + 49} + j \left[ \frac{-6\omega^7 + 26,9\omega^5 - 82,6\omega^3 + 166,1\omega}{\omega^8 - 10\omega^6 + 18\omega^4 + 53\omega^2 + 49} \right]. \quad (2.31)$$

Задаємося значенням  $\omega \in [0; +\infty)$  і заводимо у таблицю 2.2 отримані дані.

Таблиця 2.2 – Результати розрахунків для АСКПДАСЦК.

|             |      |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\omega$    | 0    | 0,1   | 0,2   | 0,3   | 0,4   | 0,5   | 0,6   | 0,8   | 1     | 5     | 10    |
| $R(\omega)$ | 0    | -0,13 | -0,23 | -0,31 | -0,35 | -0,39 | -0,41 | -0,43 | -0,39 | -0,82 | 0,94  |
| $Q(\omega)$ | 1,28 | 1,21  | 0,99  | 0,87  | 0,78  | 0,69  | 0,62  | 0,51  | 0,42  | -0,41 | -0,27 |

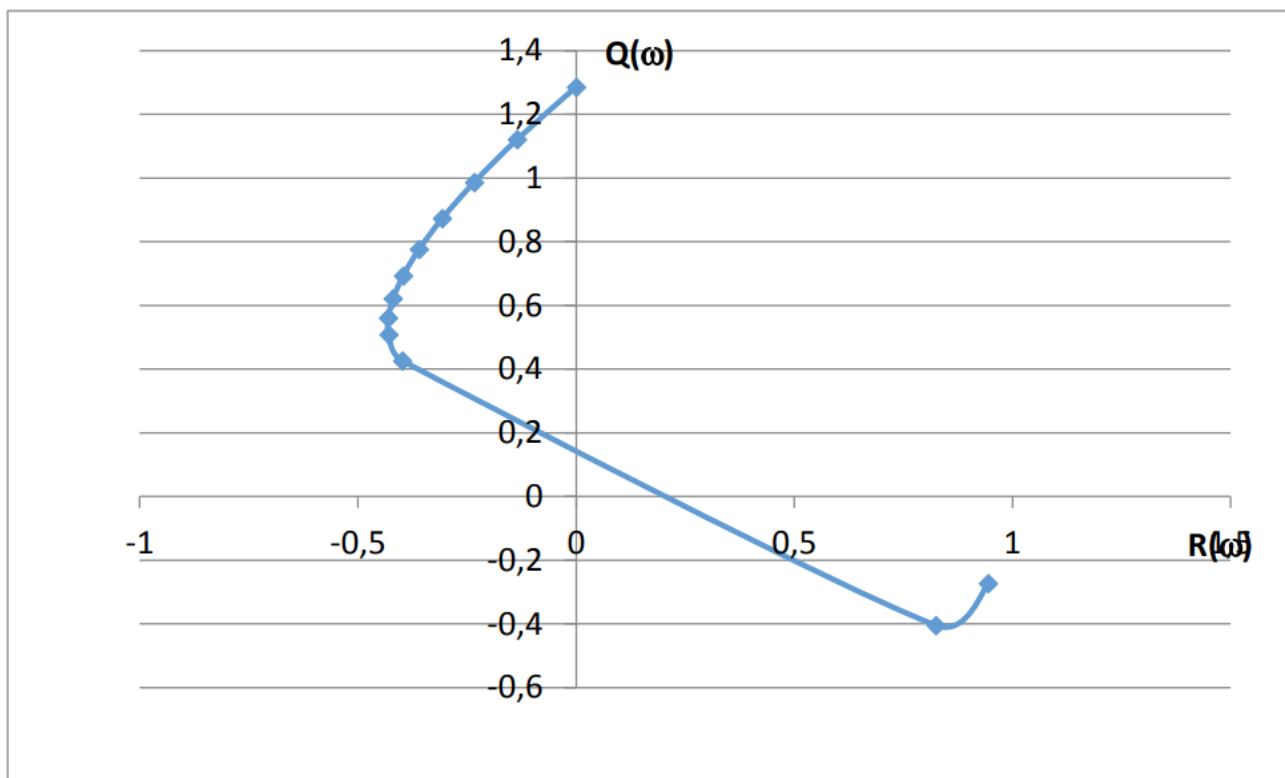


Рисунок 2.5 – Годограф Найквіста для АСКППДАСЦК

Висновок: Оскільки годограф Найквіста АСКППДАСЦК не охоплює точку з координатами  $(-1; j0)$  у від'ємному напрямку, то АСКППДАСЦК стійка.

2.3 Визначення показників якості регулювання автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт за перехідними характеристиками

Для працездатності АСКППДАСЦК також потрібно, щоб процес автоматизованого керування здійснювався при забезпеченні заданих показників якості процесу керування. Якість процесу керування визначається поведінкою АСКППДАСЦК при переході з одного режиму роботи в інший. Для визначення показників якості АСКППДАСЦК проводиться аналіз реакції АСКППДАСЦК на різного роду типові сигнали. Для забезпечення стійкої і високоякісної роботи

АСКППДАСЦК повинна забезпечити задану точність відповідно до вимог технологічного процесу як в усталеному, так і в динамічному режимах.

Для оцінки якості роботи АСКППДАСЦК в перехідних режимах скористаємося перехідними характеристиками АСКППДАСЦК. Для отримання кривої перехідного процесу застосовано метод трапецій Солодовникова.

Для отримання речової частотної характеристики АСКППДАСЦК необхідно у вираз передаточної функції АСКППДАСЦК підставити замість  $s \Rightarrow j\omega$  і виділити дійсну і уявну частини (2.32):

$$W(s) = \frac{0,15s^2 + 3,58s}{2,15s^3 + 1,15s^2 + 4,89s + 2,37}. \quad (2.32)$$

Використовуючи допоміжні коефіцієнти, визначимо дійсну частину  $R(\omega)$ :  
 $a = -0,15\omega^2$  - дійсна частина чисельника;  $b = 3,58\omega$  - уявна частина чисельника;  
 $c = -1,15\omega^2 + 2,37$  - дійсна частина знаменника;  $d = -2,15\omega^3 + 4,89\omega$  - уявна частина знаменника.

Задаючись значенням  $\omega$  від 0 до  $\infty$ , визначимо для різних частот значення  $R(\omega)$ , розрахунки наведені в таблиці 2.3, за значеннями якої побудовано дійсну частотну характеристику  $R(\omega) = f(\omega)$ .

Таблиця 2.3 – Розрахована дійсна характеристика  $R(\omega)$  АСКППДАСЦК.

|             |   |      |      |      |       |        |       |       |       |        |        |
|-------------|---|------|------|------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|
| $\omega$    | 0 | 1    | 1,25 | 1,5  | 1,75  | 2      | 4     | 6     | 8     | 10     | 15     |
| $R(\omega)$ | 0 | 1,07 | 2,11 | 9,27 | -1,78 | -0,862 | -0,12 | -0,05 | -0,03 | -0,016 | -0,007 |

Отриману дійсну частотну характеристику АСКППДАСЦК розбиваємо на три трапеції, їх показано на рисунку 2.6. Кожна з трапецій характеризується параметрами (таблиця 2.4):

- висотою  $\pm R_i(0)$ ;
- частотою зрізу  $\omega_n$ ;
- частотою зламу  $\omega_a$ .

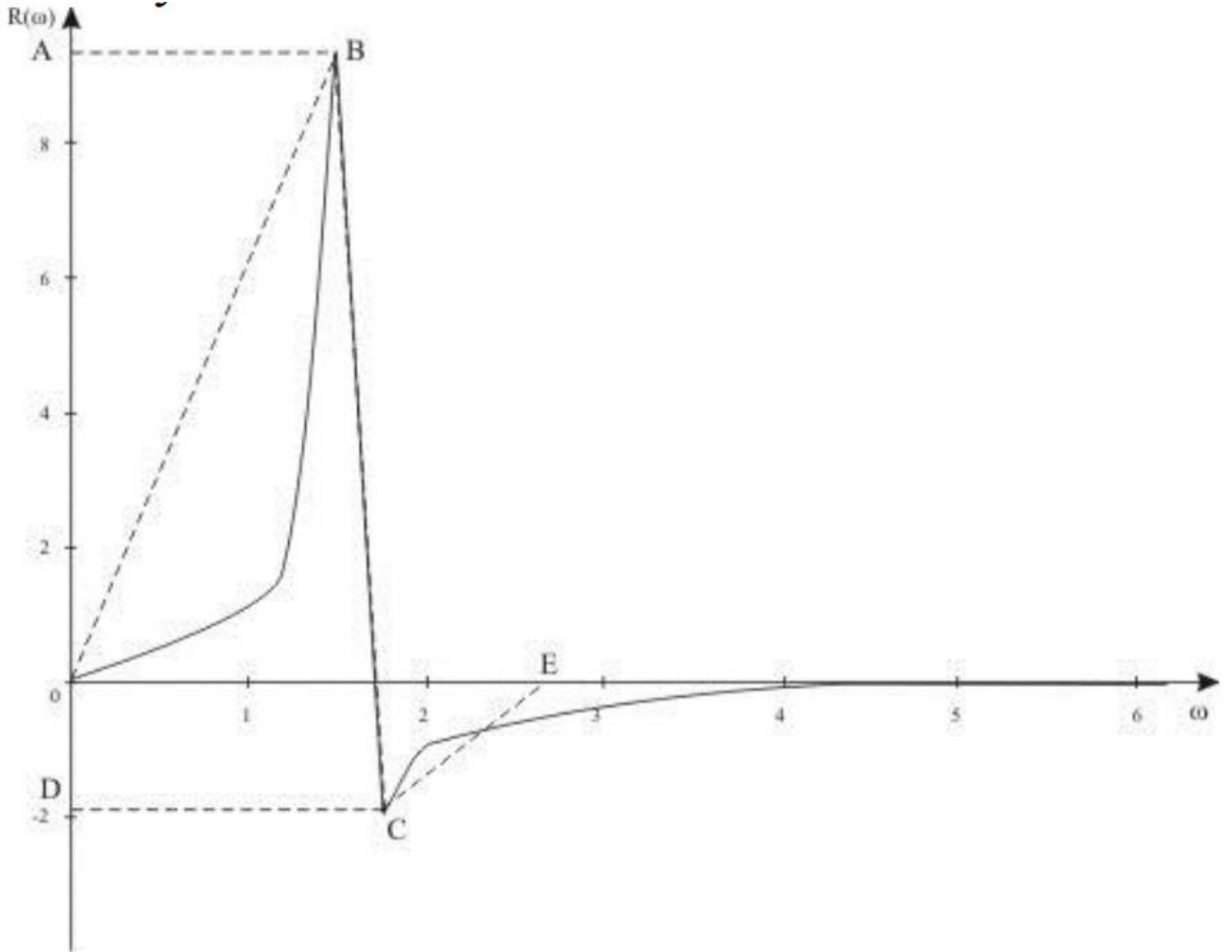


Рисунок 2.6 – Речова характеристика АСКППДАСЦК

Через відношення значень частот зламу і зрізу визначається коефіцієнт нахилу  $\chi$  (2.33) для кожної трапеції:

$$\chi = \frac{\omega_a}{\omega_n} \quad (2.33)$$

Таблиця 2.4 Параметри трапецій Солодовнікова для АСКППДАСЦК.

| Трапеція | R    | $\omega_n$ | $\omega_a$ | $\chi$ |
|----------|------|------------|------------|--------|
| ABD      | -9,7 | 0          | 1,5        | 0      |
| ABCD     | 12,1 | 1,5        | 1,7        | 0,88   |
| OECD     | -2,4 | 1,7        | 2,6        | 0,65   |

Для побудови перехідного процесу АСКПДАСЦК використовується поняття одиничної трапеції, в якій  $R_i(0) = 1$  і  $\omega_n = 1$ . Для перевірки правильності апроксимації речової частотної характеристики АСКПДАСЦК необхідне виконання умови (2.34):

$$\sum_{i=1}^n Ri(0) = R(0). \quad (2.34)$$

Розбиття трапецій АСКПДАСЦК проведене правильно оскільки:

$$\sum_{i=1}^n Ri(0) = -9,7 + 12,1 - 2,4 = 0. \quad (2.35)$$

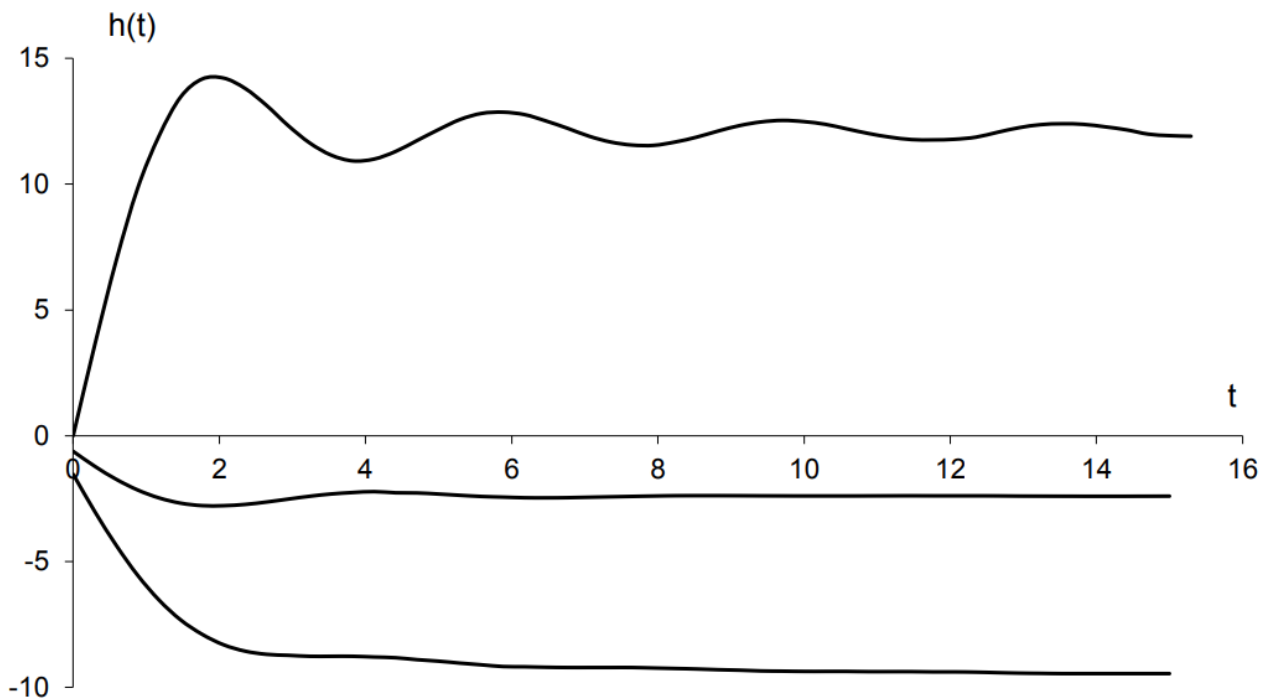


Рисунок 2.7 – Перехідні характеристики АСКПДАСЦК

Для побудови перехідного процесу АСКПДАСЦК визначаємо значення для кожної трапеції (2.36 - 2.38):

$$\chi_1 = \frac{0}{1,5} = 0, \quad (2.36)$$

$$\chi_2 = \frac{1,5}{1,7} = 0,88, \quad (2.37)$$

$$\chi_3 = \frac{1,7}{2,6} = 0,65. \quad (2.38)$$

Визначаємо параметри перехідного процесу одиничних трапецій АСКПДАСЦК по таблиці  $h$  - функцій. За даними таблиці  $h$  - функцій будемо криві перехідних процесів для кожної з трьох трапеції АСКПДАСЦК. Підсумувавши значення ординат трьох кривих, будемо значення перехідного процесу всієї АСКПДАСЦК (рис. 2.7).

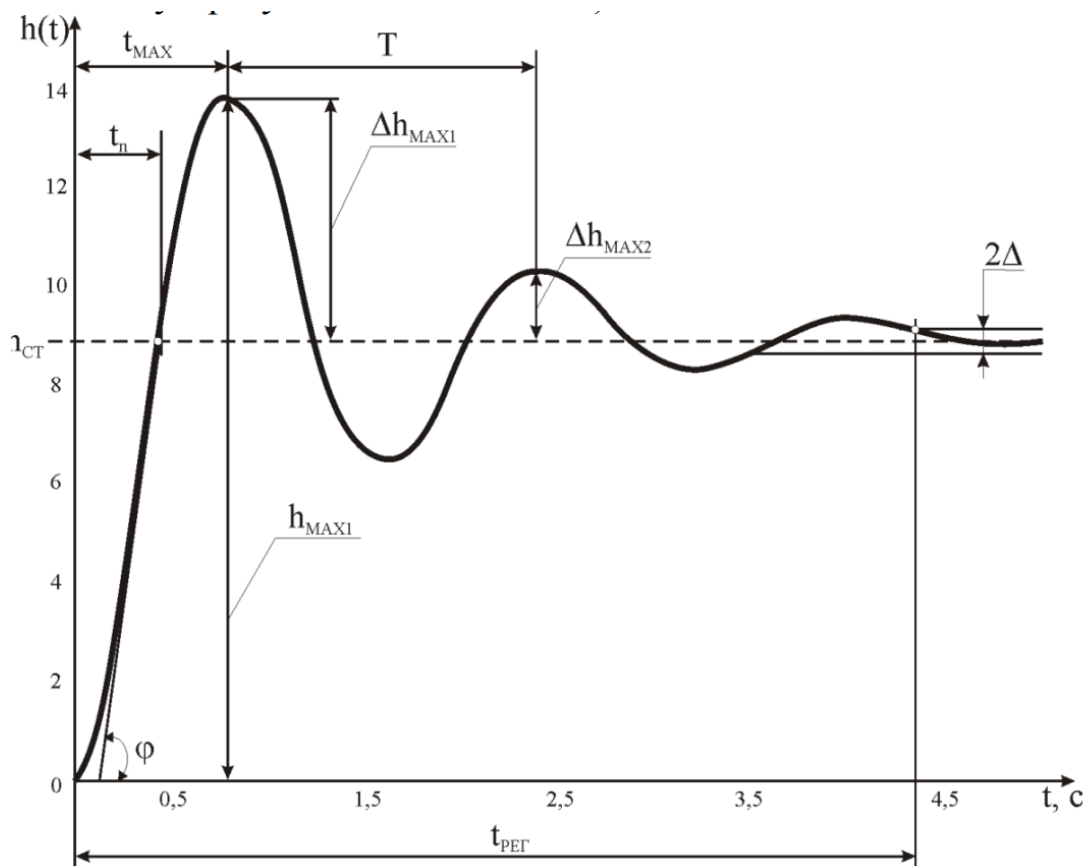


Рисунок 2.8 – Показники якості АСКПДАСЦК

Для визначення показників якості регулювання АСКПДАСЦК необхідно проаналізувати розрахункову перехідну характеристику АСКПДАСЦК. Вимоги до якості процесу регулювання можуть бути різними залежно від вимог до регульованого ТП. Показники якості АСКПДАСЦК представлені на рисунку 2.8.

де:

1.  $t_{\text{РЕГ}}$  - час регулювання, дозволяє оцінити швидкодію АСКППДАСЦК.
2. Статична похибка регулювання АСКППДАСЦК - дійсне відхилення регульованої величини від заданого значення по закінченні перехідного процесу.
3.  $h_{\text{МАХ1}}$  - максимальне відхилення регульованої величини (перший максимум регульованої величини).
4.  $h_{\text{МАХ}}$  - час досягнення першого максимуму.
5. Максимальне перерегулювання АСКППДАСЦК:

$$\sigma_{\text{МАХ}} = \frac{x_m - x_{\infty}}{x_{\infty}} \cdot 100\% \quad (2.39)$$

6. Коливальність АСКППДАСЦК - число коливань  $n_p$  регульованої величини протягом часу  $t_{\text{РЕГ}}$ .
7. Власна частота коливань АСКППДАСЦК:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} \quad (2.40)$$

8.  $\eta$  - загасання перехідного процесу АСКППДАСЦК:

$$\eta = 1 - \exp\left\{-\frac{2\pi}{n_p}\right\} \quad (2.41)$$

$$d_c = \ln \frac{\Delta h_{\text{МАХ1}}}{\Delta h_{\text{МАХ2}}} \quad (2.42)$$

9.  $\left[\frac{dx}{dt}\right]_{\text{МАХ}}$  - максимальна швидкість відпрацювання регульованої величини АСКППДАСЦК.

2.4 Розрахунок показників надійності автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт

До основних показників надійності АСКППДАСЦК відносять час наробітку на відмовлення й імовірність безвідмовної роботи елементів АСКППДАСЦК. Вихідною кількісною оцінкою для розрахунку надійності АСКППДАСЦК є інтенсивність відмовлень окремих елементів АСКППДАСЦК (2.43).

$$\lambda_{\Sigma} = k \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad (2.43)$$

де:  $\lambda_i$  - значення інтенсивності відмовлень  $i$ -го елемента АСКППДАСЦК;

$k$  - поправочний коефіцієнт, що враховує вплив навколишнього середовища.

Час наробітку на відмовлення (2.44) є величиною, зворотної значенню інтенсивності відмовлень елементів АСКППДАСЦК.

$$T_{\text{нар}} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}}. \quad (2.44)$$

Імовірність безвідмовної роботи (2.45 - 2.46) АСКППДАСЦК підкоряється експонентному закону і визначається для окремого елемента АСКППДАСЦК і для всієї АСКППДАСЦК.

$$P_i(t) = e^{-\lambda_i t x}, \quad (2.45)$$

$$P_{\Sigma} = e^{-\lambda_{\Sigma} t x}. \quad (2.46)$$

де:  $t x$  - час роботи, для якого визначаються параметри надійності.

Розрахунок надійності для показників елементів і систем АСКППДАСЦК:

Електродвигун:

$$T_{\text{нар}} = \frac{1}{0,015} = 66,67 \text{ год}, \quad (2.47)$$

$$P_i(t) = e^{-1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 100} = 0,861. \quad (2.48)$$

ЧП:

$$T_{\text{нар}} = \frac{1}{0,012} = 83,34 \text{ год}, \quad (2.49)$$

$$P_i(t) = e^{-1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 100} = 0,887. \quad (2.50)$$

ОД:

$$\lambda_{\Sigma} = 10 \cdot 6 \cdot 0,009 = 0,54, \quad (2.51)$$

$$T_{\text{нар}} = \frac{1}{0,009} = 111,12 \text{год}, \quad (2.52)$$

$$P_i(t) = e^{-9 \cdot 10^{-4} \cdot 100} = 0,914, \quad (2.53)$$

$$P_{\Sigma} = e^{-9 \cdot 10^{-4} \cdot 6 \cdot 100} = 0,583. \quad (2.54)$$

Ультразвуковой дефектоскоп:

$$T_{\text{нар}} = \frac{1}{0,016} = 62,5 \text{год}, \quad (2.55)$$

$$P_i(t) = e^{-1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 100} = 0,852. \quad (2.56)$$

ПРМ:

$$\lambda_{\Sigma} = 10 \cdot 2 \cdot 0,015 = 0,3, \quad (2.57)$$

$$T_{\text{нар}} = \frac{1}{0,015} = 66,67 \text{год}, \quad (2.58)$$

$$P_i(t) = e^{-1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 100} = 0,86, \quad (2.59)$$

$$P_{\Sigma} = e^{-1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 100} = 0,74. \quad (2.60)$$

Газоэлектрический напильвач:

$$T_{\text{нар}} = \frac{1}{0,017} = 58,8 \text{год}, \quad (2.61)$$

$$P_i(t) = e^{-1,7 \cdot 10^{-3} \cdot 100} = 0,843. \quad (2.62)$$

Таблиця 2.5 Розраховані показники надійності для елементів АСКППДАСЦК.

| Назва                      | К-сть | Інтенсивність відмовлення одного елемента | Час наробітку на відмовлення, год | Інтенсивність безвідмовної роботи одного елемента | Сумарна інтенсивність безвідмовної роботи |
|----------------------------|-------|---|-----------------------------------|---|---|
| Електродвигун              | 1     | 0,015                                     | 66,67                             | 0,861   | 0,861                                     |
| ЧП                         | 1     | 0,012                                     | 83,34                             | 0,887   | 0,887                                     |
| ОД                         | 6     | 0,009                                     | 111,12                            | 0,914   | 0,583                                     |
| Ультразвуковий дефектоскоп | 1     | 0,016                                     | 62,5                              | 0,852   | 0,852                                     |
| ПРМ                        | 2     | 0,015                                     | 66,67                             | 0,861   | 0,741                                     |
| Газоелектричний напилувач  | 1     | 0,017                                     | 58,8                              | 0,843   | 0,843                                     |

## 2.5 Висновки до другого розділу

В даному розділі було проаналізовано АСКППДАСЦК на стійкість та надійність. АСКППДАСЦК демонструє стійкість відповідно до критерію Воронова, оскільки виконуються всі необхідні умови стійкості САК, зокрема показники якості, що перевищують встановлені межі. Умови, що стосуються запасу стійкості АСКППДАСЦК, також підтверджують надійність АСКППДАСЦК. Годографи Найквіста та Михайлова свідчать про те, що АСКППДАСЦК не охоплює критичну точку, що вказує на її стійкість.

Додатковий аналіз амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик показує, що АСКППДАСЦК має достатній запас фазової та амплітудної стійкості. Це підтверджує можливість стабільної роботи АСКППДАСЦК в умовах впливу зовнішніх збурень та зміни параметрів об'єкта керування. Проведені дослідження динамічної поведінки АСКППДАСЦК показали відсутність коливальних процесів

та перевищення перехідної складової за встановлені межі. Крім того, отримані результати свідчать про високу ефективність АСКППДАСЦК в умовах неповної або неточної інформації про параметри об'єкта. Результати моделювання та експериментальні дані підтвердили адекватність розроблених алгоритмів регулювання, що забезпечують швидку адаптацію системи до зміни зовнішніх умов та структурних збурень. Таким чином, АСКППДАСЦК демонструє надійну та ефективну роботу в широкому діапазоні режимів функціонування.

### 3. ПРОЕКТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОКРИТТЯ ДЕТАЛЕЙ АНТИКОРОЗІЙНИМ СПЛАВОМ ЦИНК-КОБАЛЬТ

3.1 Розробка структурної схеми автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт

На рисунку 3.1 зображена розроблена структурна схема АСКППДАСЦК відповідно до технологічної схеми АСКППДАСЦК. Дана структурна схема являє собою технічне завдання зі своїм словесним АК.

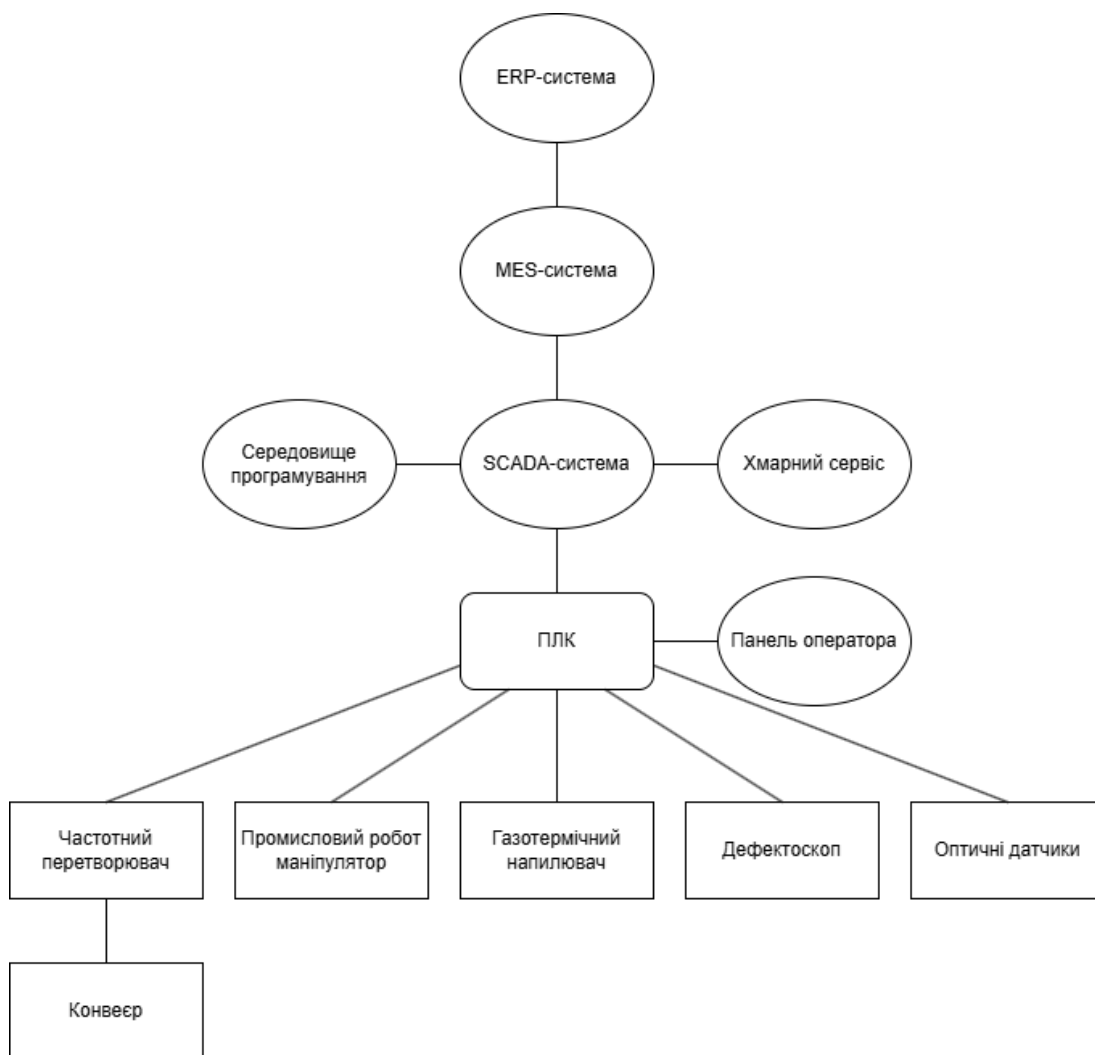


Рисунок 3.1 – Структурна схема АСКППДАСЦК

Розроблена структурна схема працює наступним чином, за допомогою людино-машинного інтерфейсу у вигляді панелі керування, Веб-панелі оператора, хмарного сервісу, персонального або індустріального комп'ютера, проводиться налаштування параметрів системи автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт.

При натисканні на кнопку «Старт» система запускається і автоматично починається перевірка на наявність АП і допоміжних матеріалів. При спрацюванні відповідного ОД у сховищі АП чи допоміжних матеріалів ОД подає сигнал на ЛМІ, що сигналізує про відсутність АП чи допоміжних матеріалів.

Спочатку, при проходженні деталі (виробу) по КС її фіксує ОД і подає сигнал на ПРМ, який перекладає деталь (виріб) у ємність з кислотним розчином з метою знежирення поверхні деталі (виробу), після завершення знежирення ПРМ перекладає деталь (виріб) назад на КС.

Потім, при спрацюванні наступного ОД на КС подається сигнал на ПРМ, що переносить деталь (виріб) в контейнер з абразивним матеріалом з метою надійного зчеплення антикорозійного матеріалу з поверхнею деталі (виробу), після цього ПРМ кладе деталь назад на КС.

Наступним кроком є напилення АП на деталь (виріб) за допомогою газотермічного напилювача. При спрацьовуванні ОД перед напилювачем, КС зупиняється і АП напилюється на деталь (виріб). При потребі можливо здійснити додаткове напилення при натисканні відповідної кнопки на ЛМІ.

Далі деталь (виріб), за допомогою ультразвукового дефектоскопу, проходить сканування поверхні на факт наявності нерівностей і неоднорідності покриття.

3.2 Вибір технічних засобів автоматизації автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт

Огляд компаній світового масштабу, що займаються виробництвом та розробкою ТЗА для АСКПДАСЦК, демонструє на ринку різні варіанти рішень у сфері ПЛК. Однак, на основі проведеного аналізу техніко-економічних показників з урахуванням специфіки операційних характеристик, при проектуванні АСКПДАСЦК з урахуванням співвідношення найбільшої якості і найоптимальнішої ціни, для функцій ПЛК було обрано ПЛК фірми ОВЕН моделі 210-03-CS (рис. 3.2), що забезпечує програмне керування операційними характеристиками.



Рисунок 3.2 – ПЛК АСКПДАСЦК

ПЛК цього типу забезпечує для АСКПДАСЦК розширені комунікаційні можливості, високий рівень надійності, функціональну та кібербезпеку АСКПДАСЦК, можливість створення програмного забезпечення з використанням актуальних версій інструментів програмування, адаптацію АСКПДАСЦК до старих проектів програмного забезпечення, безпосереднє використання баз даних в АСКПДАСЦК із подальшою підтримкою веб-візуалізації, діагностику та налаштування АСКПДАСЦК через веб-інтерфейс і підключення до хмарних сервісів.

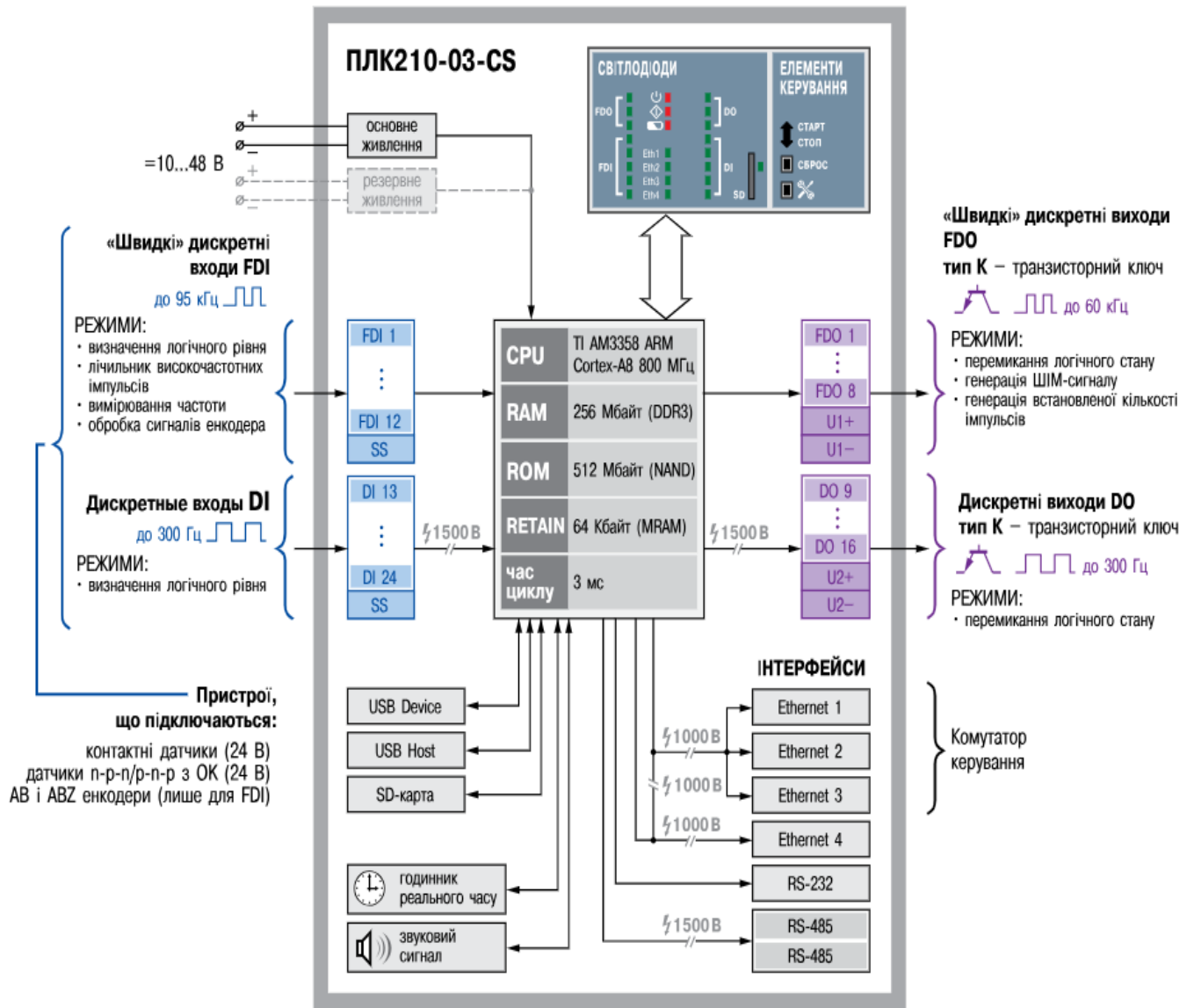


Рисунок 3.3 – Функціональна схема ПЛК АСКПДАСЦК

Крім того, підтримка розширених протоколів зв'язку, таких як Modbus, OPC UA, MQTT та інші сучасні інтерфейси, дозволяє інтегрувати АСКПДАСЦК у промислові мережі різного рівня складності. Завдяки вбудованим функціям аналізу даних та можливостям їх обробки у реальному часі, ПЛК забезпечує підвищення продуктивності АСКПДАСЦК та оперативність прийняття рішень. Також передбачено можливість масштабування системи для роботи з великими обсягами даних та підтримка розподіленої архітектури, що є важливим для сучасних

автоматизованих комплексів[15-33]. Функціональна схема цього ПЛК АСКППДАСЦК наведена на рисунку 3.3.

Трифазний асинхронний двигун (рис. 3.4) має три обмотки на статорі, розміщені на  $120^\circ$  одна відносно іншої, з'єднані в зірку або трикутник, і живляться трифазним змінним струмом. Двигун з короткозамкнутим ротором є конструктивно простішим і надійнішим у роботі порівняно з фазним двигуном, має кращі показники коефіцієнта потужності ( $\cos \varphi$ ) та КПД, але має гірші пускові характеристики.



Рисунок 3.4 – Електродвигун T71A2 0,37

При підключенні обмоток статора до трифазної мережі виникає обертове магнітне поле, яке взаємодіє з обмоткою ротора, індукуючи в ній електричну напругу. Це спричиняє виникнення струмів у стрижнях ротора. Внаслідок взаємодії цих струмів з обертовим магнітним полем на роторі утворюються електромагнітні сили, які генерують обертальний момент. Цей момент змушує ротор обертатися з тією ж кутовою швидкістю, що і поле статора. Таким чином, між обмотками статора та ротора існує лише магнітний зв'язок, подібно до трансформатора, але з тим відмінністю, що ротор обертається.

Його технічні характеристики:

- вага: 6,2 кг;

- обмотки на статорі: 3;
- потужність: 0,37 кВт;
- частота обертання: 2800 об/хв.

Горизонтальний конвеєр (рис. 3.5) може бути використаний на різних виробництвах. Транспортер з колесами має ряд переваг: він простий і легкий у монтажі та експлуатації, а його налаштування займає мінімум часу. Опори обладнані поворотними колесами з гальмами. КС рухається по настилу, а для запобігання її провисанню передбачені підтримуючі ролики та натяжні механізми для регулювання натягу. Конструкція конвеєра виконана зі сталі.

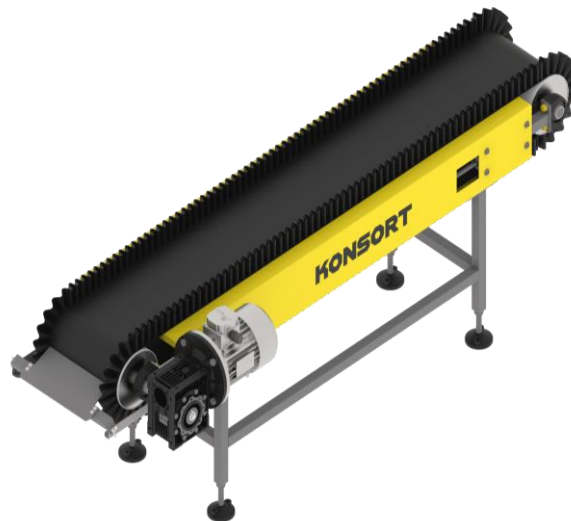


Рисунок 3.5 – Промисловий конвеєр Consort 2мм ПВХ

Це обладнання відповідає міжнародним стандартам безпеки і виготовляється згідно з актуальними вимогами. Конвеєр ідеально підходить для транспортування різних матеріалів і продуктів на лініях виробництва, складування, пакування та інших виробничих процесах. Завдяки своєму універсальному дизайну, він легко адаптується до специфікацій конкретних виробничих потреб. Проста конструкція дозволяє швидко замінювати зношені частини, що забезпечує мінімальні витрати на обслуговування.

Технічні характеристики конвеєра:

- тип стрічки: ПВХ;
- довжина стрічки: 2 мм;
- довжина конвеєра: 10000 мм;
- висота конвеєра: 800 мм ( $\pm 50$  мм);
- ширина стрічки: 800 мм;
- діаметр коліс транспортера: 200 мм;
- потужність мотор-редуктора: 1,5 кВт.



Рисунок 3.6 – ОД Schneider Electric XUB2BKSNL2T

Бар'єрний фотоелектричний ОД (рис. 3.6) від Telemecanique має корпус з металевою різьбою М18. Завдяки універсальному корпусу, ОД можна встановити безпосередньо на поверхню або на кронштейні за допомогою гайок. Він оснащений високоміцним корпусом із нікельованої латуні, що ідеально підходить для експлуатації при високих температурах, а також стійкою до подряпин лінзою з органічного скла для тривалої служби. Світлодіодні індикатори дають змогу контролювати стан ОД. Завдяки захисту IP65, цей ОД пристосований до роботи в суворих умовах. Оснащений стандартним роз'ємом М12, він сумісний з усіма кабелями для ОД, що є на ринку, або може мати вбудований кабель. ОД також забезпечує подвійну ізоляцію для додаткового захисту людей та обладнання від ураження електричним струмом.

Технічні характеристики ОД:

- напруга живлення: від 12 до 24 В;
- тип струму: постійний;
- робоча температура: від  $-25^{\circ}\text{C}$  до  $+55^{\circ}\text{C}$ .



Рисунок 3.7 – Ультразвуковий дефектоскоп NOVOTEST УД3701

Ультразвуковий дефектоскоп (рис. 3.7) УД3701 є старшою моделлю серед ультразвукових дефектоскопів. На відміну від портативного УД2301, ця модель має повнорозмірний корпус і дисплей, при цьому зберігаючи невелику вагу. Прилад оснащений розширеними функціями сучасного професійного обладнання, великим дисплеєм з високою роздільною здатністю (800×480 пікселів), а також можливістю керування через тач-скрін або клавіатуру. Він має акумулятор високої ємності. Ці характеристики роблять УД3701 одним із найкращих виборів серед дефектоскопів такого формату [25-38].

Окрім традиційного використання для контролю якості, цей дефектоскоп забезпечує високу точність вимірювання часу, що дозволяє дуже точно визначати товщину виробів і швидкість ультразвуку в матеріалі. Завдяки цьому режиму роботи приладу можна вимірювати товщину з точністю до 0,01 мм, що аналогічно

вимірюванням за допомогою сучасних товщиномірів з А-сканом, тим самим поєднуючи функції дефектоскопа і товщиноміра в одному пристрої.



Рисунок 3.8 – ЧП моделі SPLC-US-B-0R2G2

Скалярний ЧП (рис. 3.8) SPLC-US-B-0R2G2 потужністю 0,2 кВт (200 Вт) є економічним і малопотужним пристроєм, що призначений для регулювання обертів невеликих вентиляторів, насосів, швидкості руху КС та інших об'єктів, де використовуються трифазні асинхронні двигуни потужністю до 200 Вт на 220 В. Перетворювач підключається до стандартної однофазної побутової мережі 220 Вольт. SPLC-US-B-0R2G2 дозволяє регулювати оберти двигуна потужністю 0,2 кВт шляхом встановлення частоти, що задається вручну за допомогою потенціометра, через меню приладу або за допомогою ПІД-регулювання із зворотнім зв'язком, наприклад, через підключений до інвертора датчик тиску, рівня чи температури з аналоговим сигналом 0-5 В [24-29].

Цей ЧП також має ряд додаткових функцій, таких як захист від перевантаження, короткого замикання та перегріву, що забезпечує безпечну експлуатацію обладнання. Крім того, SPLC-US-B-0R2G2 підтримує функцію м'якого пуску, що дозволяє зменшити механічні навантаження на двигун КС при

запуску та продовжити його термін служби. Вбудовані інтерфейси для підключення зовнішніх датчиків і регулювання параметрів забезпечують високу точність налаштування і адаптацію до різних умов роботи.



Рисунок 3.9 – ПРМ STAUBLI TX40

6-осьовий ПРМ (рис. 3.9) TX40 оснащений шарнірним маніпулятором, що гарантує високу рухливість та експлуатаційну гнучкість. Його унікальний сферичний робочий простір дозволяє максимально ефективно використовувати доступну площу виробничого модуля. До додаткових переваг належить можливість встановлення робота на підлогу, стіну чи стелю, що забезпечує повну інтеграційну гнучкість. Завдяки міцній, повністю закритій конструкції з рівнем захисту IP65, маніпулятор є ідеальним для роботи в складних кліматичних умовах. Ця серія ПРМ встановлює нові стандарти продуктивності, забезпечуючи оптимальний баланс між швидкістю, міцністю, розмірами та робочим діапазоном. Інноваційні характеристики дозволяють використовувати ці ПРМ у всіх робочих зонах, включаючи екологічно чутливі середовища та з обмеженими можливостями, що робить їх надзвичайно універсальними [33-39]. Цей ПРМ оснащений шарнірним

механізмом з 6 ступенями свободи, що гарантує максимальну гнучкість у використанні.

Камера з газоелектричним напилювачем АП (рис. 3.10) оснащена двоступінчатою автоматичною системою очищення повітря. Її конструкція розроблена так, щоб максимально запобігати виходу АП за межі камери. Камера обладнана розсувними дверима в транспортних отворах і зручним контейнером для збору АП, який можна використовувати повторно. Вона забезпечує стабільну швидкість потоку в робочих і транспортних отворах, що підтримує чистоту в цеху.

Процес роботи включає автоматичне очищення фільтропатронів, яке може здійснюватися за допомогою кнопки оператора (або через таймер). Освітлення для деталі(виробу), що напилюється АП, забезпечують потужні LED світильники. Подача деталей (виробів) на напилення АП здійснюється за допомогою транспортної системи. Камера оснащена італійською пневматикою CAMOZZI та електричними компонентами від словенської компанії ETI. Витяжний вентилятор має потужність 4,0 кВт. Фільтропатрони виконані на 100% з поліестеру і легко очищуються завдяки монолітній конструкції корпусу та розміщенню LED світильників за склом.

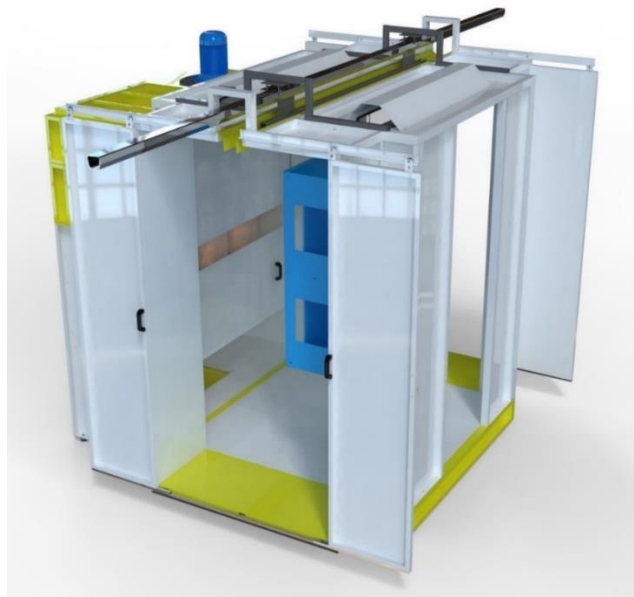


Рисунок 3.10 – Камера з газоелектричним напилювачем ONYX Standard

### 3.3 Висновки до третього розділу

У процесі розробки увага була приділена структурній схемі АСКППДАСЦК, яка включає наступні компоненти: ЛМІ, веб-панель оператора та інтеграцію з хмарними сервісами. АСКППДАСЦК забезпечує ефективне управління технологічними процесами, що включають транспортування деталей (виробів) по КС, їх попередню обробку та контроль якості АП. Використання сучасних технологій, таких як автоматизовані КС, електродвигуни, ОД, дозволяє знизити витрати на обслуговування та підвищити продуктивність виробництва. АСКППДАСЦК забезпечує автоматичну діагностику та моніторинг стану обладнання, що сприяє зменшенню простоїв і забезпеченню безперебійної роботи. Загалом, розроблена АСКППДАСЦК забезпечує високий рівень кіберзахисту та є адаптивною до специфічних виробничих потреб, що робить її важливим інструментом для сучасних підприємств (фірм), орієнтованих на впровадження інновацій та покращення якості продукції і зменшення собівартості.

## **4. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОКРИТТЯ ДЕТАЛЕЙ АНТИКОРОЗІЙНИМ СПЛАВОМ ЦИНК-КОБАЛЬТ**

### **4.1 Розробка алгоритму керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт**

Для створення прикладних програм управління АСКППДАСЦК застосовуються такі основні методи: табличний метод, метод графів переходів, метод часових діаграм, методи цифрових програмних автоматів, метод потокових блок-схем алгоритмів, а також метод покрокових діаграм. При розробці АСКППДАСЦК для написання програми управління було використано гібридний підхід, що поєднує зазначені методи. Проте, враховуючи, що програма управління та ПЛК, які застосовуються в АСКППДАСЦК, є програмними автоматами, найоптимальнішим буде підхід, заснований на методах створення потокових блок-схем алгоритмів і цифрових програмних автоматів [24-26].

Потокові блок-схеми алгоритмів можуть складатися з різних блоків, кожен з яких має свою функцію. До основних блоків належать:

- старт – операція початку АК;
- стоп – операція кінця або переривання АК;
- процес являє собою виконання дій АК;
- лінія потоку позначає послідовність переходів від одного блоку АК до іншого;
- ухвалення рішення використовується як розгалуження при необхідності виконання певних умов в АК.

Система логічних рівнянь АСКППДАСЦК, яка виконує функції управління, може бути отримана на основі побудованої потокової блок-схеми АК для ОК.

Для розробки програм за блок-схемами для АСКППДАСЦК використовуються два основних підходи:

- метод логічних блоків
- метод переходів.

Метод логічних блоків для АК АСКППДАСЦК базується на застосуванні інструкцій послідовного управління. Але програми, створені за цим методом, зазвичай мають значний об'єм.

На відміну від методу логічних блоків, метод переходів, що передбачає подання АК у вигляді сукупності станів, пов'язаних між собою переходами, позбавлений цього недоліку. Він дозволяє створювати компактний програмний код, здатний вирішувати широкий спектр завдань АСКППДАСЦК.

Потокова блок схема АСКППДАСЦК будується за наступними кроками:

1. Аналіз і усвідомлення процесу ОК АСКППДАСЦК.
2. Визначення основних дій АК АСКППДАСЦК та їх подання у вигляді блоків.
3. Встановлення послідовності дій АК АСКППДАСЦК та представлення їх у вигляді стрілок (що є переходами).
4. Формулювання умов для зміни послідовності АК АСКППДАСЦК і подання їх у формі блоків розгалуження.

Для побудови АК АСКППДАСЦК у кваліфікаційній роботі використано метод переходів. Для зручності було виділено наступні етапи:

I. Розробка блок-схеми алгоритму АСКППДАСЦК по словесному описі, який було наведено в першому розділі. Розроблена блок-схема алгоритму АСКППДАСЦК наведена на рисунках 4.1 - 4.3.

Перша частина блок-схеми АСКППДАСЦК зображена на рисунку 4.1. Вона описує процес сигналізації про відсутність АП чи допоміжних матеріалів АСКППДАСЦК, при спрацюванні відповідних ОД.

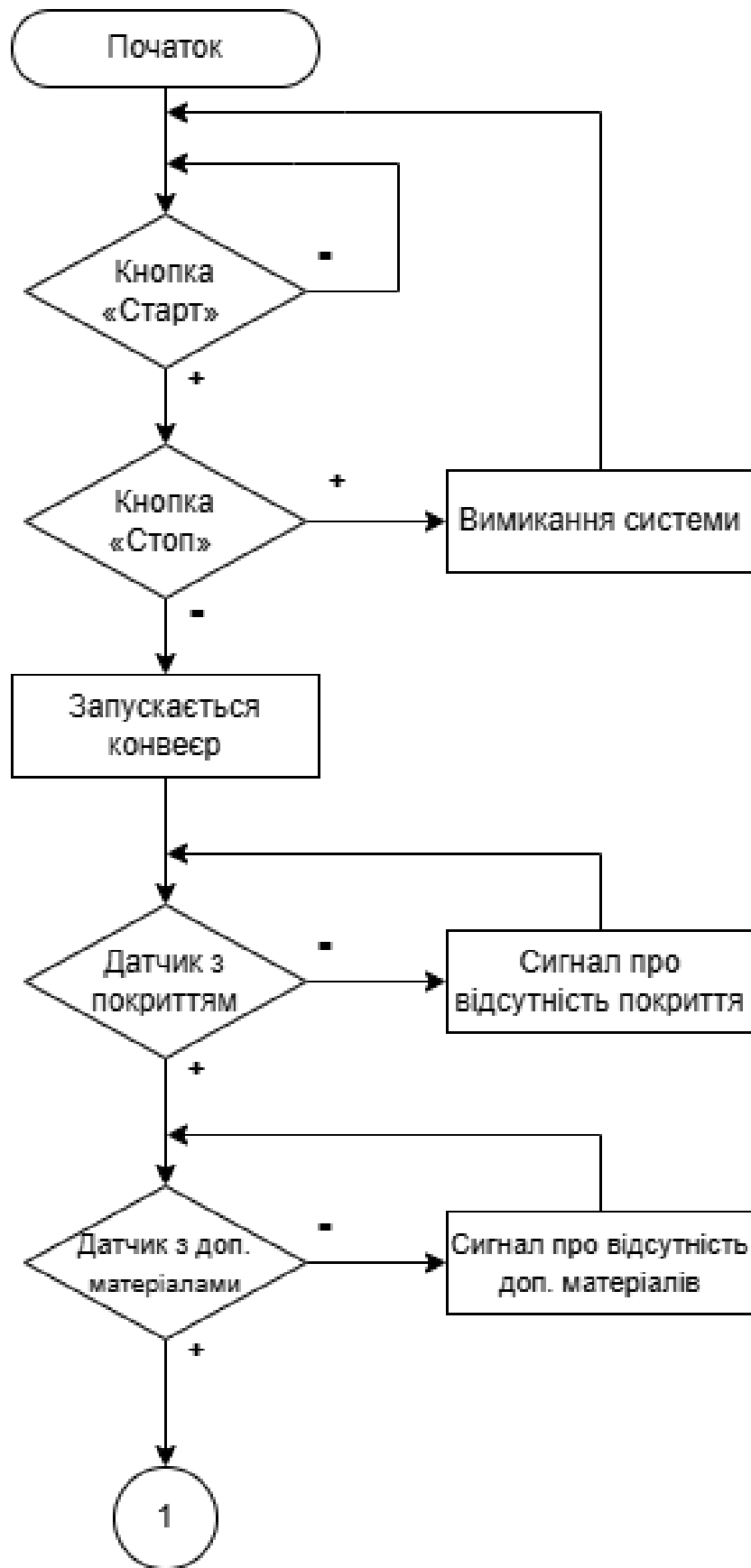


Рисунок 4.1 – Перша частина блок-схеми АСКППДАСЦК з сигналом про відсутність АП чи допоміжних матеріалів

На рисунку 4.2 зображено другу частину блок-схеми АСКППДАСЦК, яка описує процес попередньої обробки деталі (виробу) в два етапи (хімічна обробка і абразивна підготовка) і подальше напилення АП на деталь (виріб).



Рисунок 4.2 – Друга частина блок-схеми АСКППДАСЦК з обробкою і напиленням деталі (виробу)

На рисунку 4.3 зображено третю частину блок-схеми АСКППДАСЦК, яка описує процес додаткового напилення АП на деталь (виріб), при натисканні на відповідну кнопку на ЛМІ, і кінцевою перевіркою деталі на наявність нерівності і неоднорідності покриття за допомогою ультразвукового дефектоскопу.

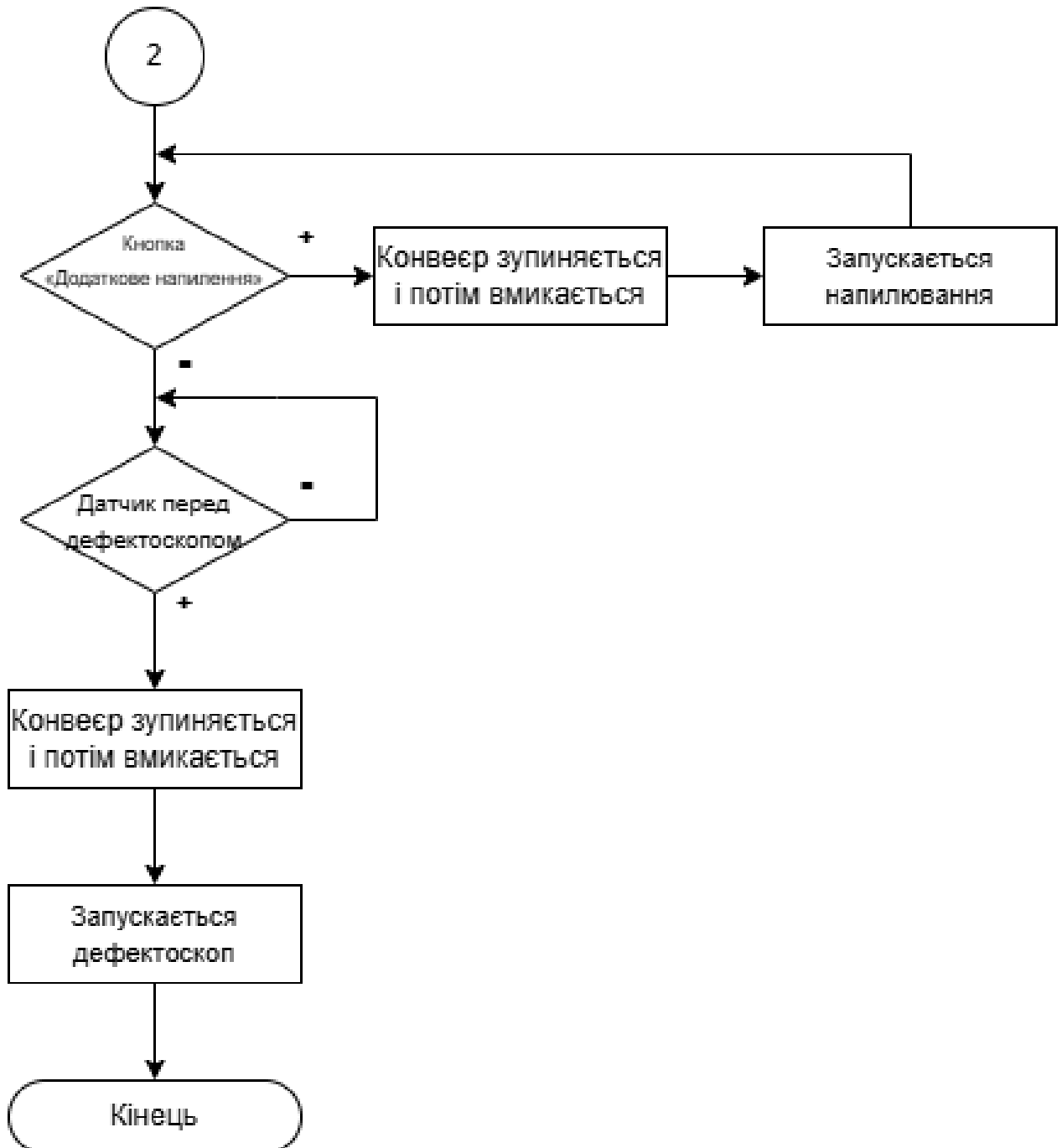


Рисунок 4.3 – Третя частина блок-схеми АСКППДАСЦК з додатковим напиленням АП і дефектоскопією

П.Блокам та переходам у потоковій блок-схемі алгоритму АСКППДАСЦК необхідно здійснити присвоєння змінних. Така блок-схема алгоритму АСКППДАСЦК представлена на рисунках 4.4 - 4.6.

На рисунку 4.4 зображено першу частину блок-схеми АСКППДАСЦК з сигналом про відсутність АП чи допоміжних матеріалів з присвоєними змінними для блоків та переходів.

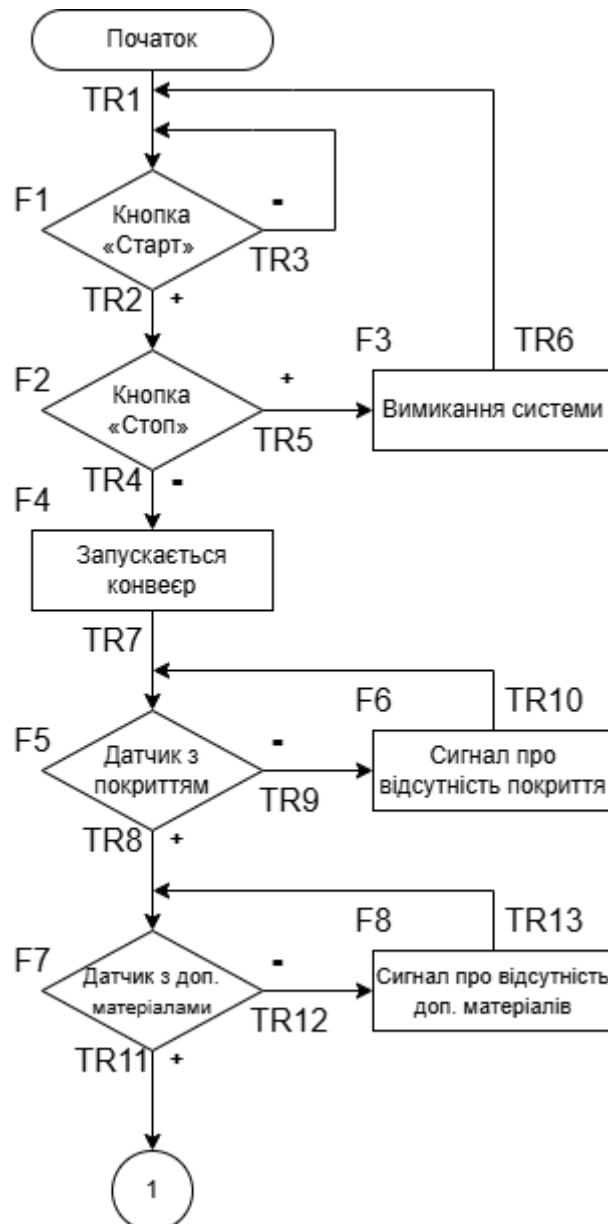


Рисунок 4.4 – Перша частина блок-схеми АСКППДАСЦК з сигналом про відсутність АП чи допоміжних матеріалів з присвоєними змінними для блоків та переходів

На рисунку 4.5 зображено другу частину блок-схеми АСКПДАСЦК з обробкою і напиленням деталі (виробу) з присвоєними змінними для блоків та переходів.

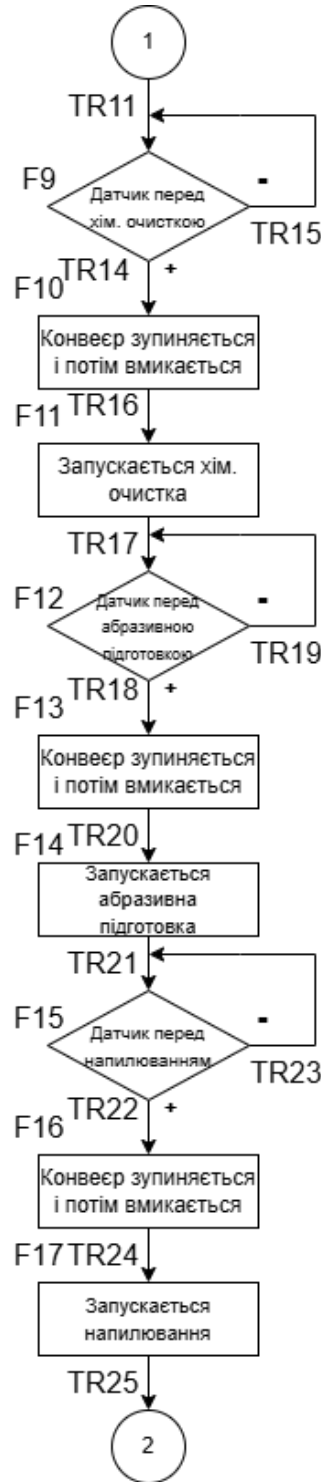


Рисунок 4.5 – Друга частина блок-схеми АСКПДАСЦК з обробкою і напиленням деталі (виробу) з присвоєними змінними для блоків та переходів.

На рисунку 4.6 зображено третю частину блок-схеми АСКППДАСЦК з додатковим напильням АП і дефектоскопією з присвоєними змінними для блоків та переходів.

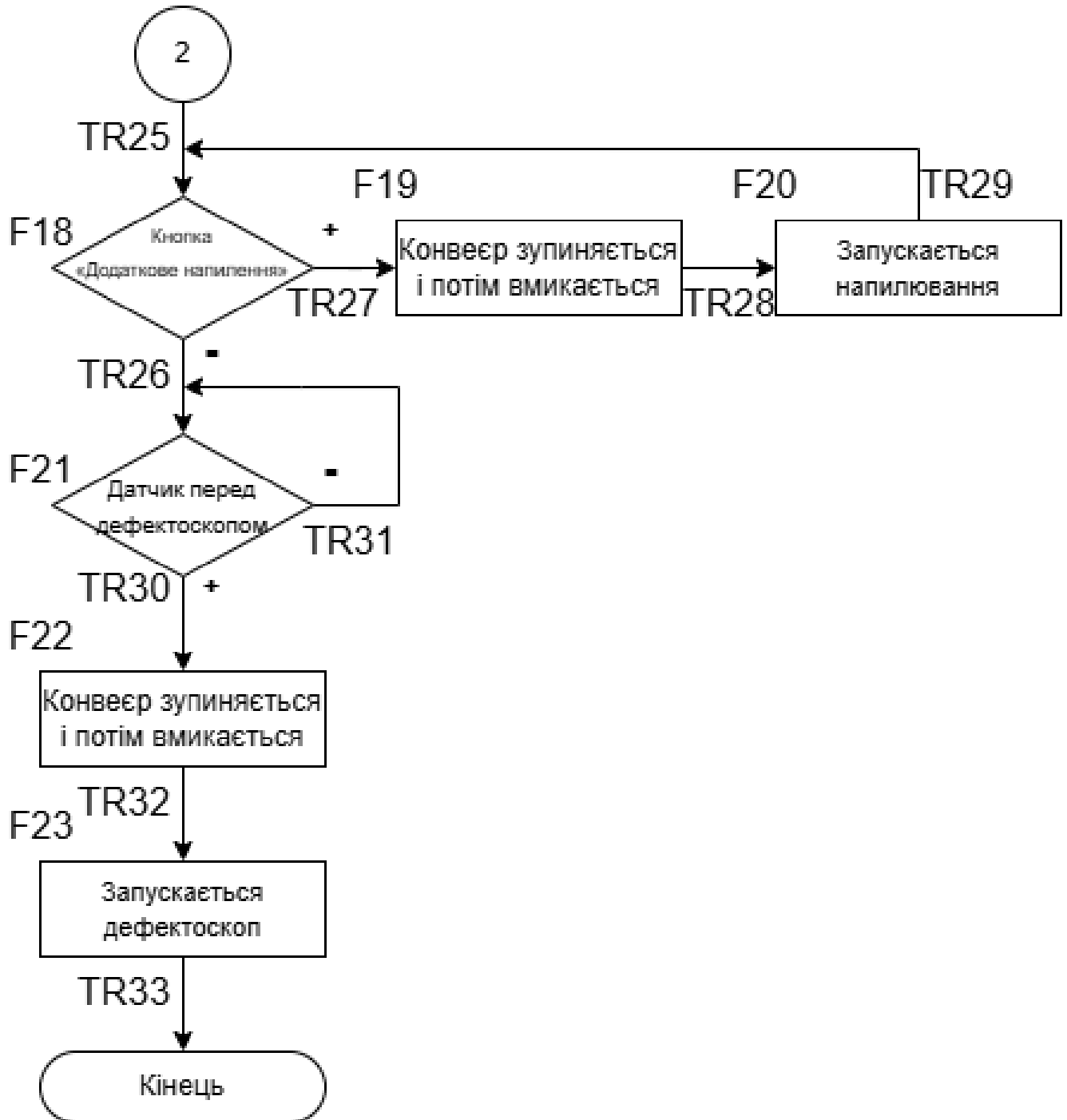


Рисунок 4.6 – Третя частина блок-схеми АСКППДАСЦК з додатковим напильням АП і дефектоскопією з присвоєними змінними для блоків та переходів

### III. Визначення вхідних та вихідних змінних для ПЛК АСКППДАСЦК:

1. Кнопка «Старт» ЛМІ АСКППДАСЦК - кнопка, що запускає систему.
2. Кнопка «Стоп» ЛМІ АСКППДАСЦК - кнопка, що зупиняє систему.
3. Кнопка «Подача АП» ЛМІ АСКППДАСЦК – кнопка, що відповідає за подачу АП в напилювач.
4. Кнопка «Хім. очистка» ЛМІ АСКППДАСЦК - кнопка, що подає сигнал на маніпулятор, який опускає деталь в чан з кислотним розчином.
5. Кнопка «Абразивна підготовка» ЛМІ АСКППДАСЦК - кнопка, яка подає сигнал на маніпулятор, що опускає деталь в контейнер з абразивним матеріалом.
6. Кнопка «Увімк. напилювач» ЛМІ АСКППДАСЦК - кнопка, що вмикає газотермічний напилювач.
7. Кнопка «Вимк. напилювач» ЛМІ АСКППДАСЦК - кнопка, що вимикає газотермічний напилювач.
8. Кнопка «Додаткове напилення» ЛМІ АСКППДАСЦК - кнопка, що зупиняє конвеєр на 2 хв. і вмикає газотермічний напилювач.
9. Кнопка «Увімк. дефектоскоп» ЛМІ АСКППДАСЦК - кнопка, що вмикає дефектоскоп.
10. Кнопка «Вимк. дефектоскоп» ЛМІ АСКППДАСЦК - кнопка, що вимикає дефектоскоп.
11. d1 - ОД в сховищі з АП АСКППДАСЦК, що подає сигнал про відсутність АП.
12. d2 - ОД в сховищі з допоміжними матеріалами АСКППДАСЦК, що подає сигнал про відсутність допоміжних матеріалів.
13. d3 - ОД на КС АСКППДАСЦК перед хімічною очисткою, що подає сигнал на ЧП, призупиняє конвеєр на 10 хв. і запускає процес хімічної очистки деталі.

14. d4 - ОД на КС АСКППДАСЦК перед абразивною підготовкою, що подає сигнал на ЧП, призупиняє конвеєр на 5 хв. і запускає процес абразивної підготовки деталі.

15. d5 - ОД на КС АСКППДАСЦК перед покриттям АП, що подає сигнал на ЧП, призупиняє конвеєр на 2 хв. і вмикає газотермічний напилювач.

16. d6 - ОД на КС АСКППДАСЦК перед дефектоскопом, що подає сигнал на ЧП, призупиняє конвеєр на 4 хв. і вмикає дефектоскоп.

17. Частотний перетворювач - перетворювач, який подає сигнал на КС.

18. Маніпулятор1 - ПРМ, що розташований біля хімічної очистки.

19. Маніпулятор2 - ПРМ, що розташований біля абразивної підготовки.

20. Напилювач - газотермічний напилювач, що наносить АП на деталь.

21. Дефектоскоп - дефектоскоп, що перевіряє якість покриття.

IV.Написання (розробка) логічних рівнянь (3.1 - 3.33) для переходів потокової блок- діаграми АК АСКППДАСЦК:

$$TR1 = \text{InitBit} \quad (3.1)$$

$$TR2 = F1 \quad (3.2)$$

$$TR3 = \overline{F1} \quad (3.3)$$

$$TR4 = \overline{F2} \quad (3.4)$$

$$TR5 = F2 \quad (3.5)$$

$$TR6 = F3 \quad (3.6)$$

$$TR7 = F4 \quad (3.7)$$

$$TR8 = F5 \quad (3.8)$$

$$TR9 = \overline{F5} \quad (3.9)$$

$$TR10 = F6 \quad (3.10)$$

$$\text{TR11} = \text{F7} \quad (3.11)$$

$$\text{TR12} = \overline{\text{F7}} \quad (3.12)$$

$$\text{TR13} = \text{F8} \quad (3.13)$$

$$\text{TR14} = \text{F9} \quad (3.14)$$

$$\text{TR15} = \overline{\text{F9}} \quad (3.15)$$

$$\text{TR16} = \text{F10} \quad (3.16)$$

$$\text{TR17} = \text{F11} \quad (3.17)$$

$$\text{TR18} = \text{F12} \quad (3.18)$$

$$\text{TR19} = \overline{\text{F12}} \quad (3.19)$$

$$\text{TR20} = \text{F13} \quad (3.20)$$

$$\text{TR21} = \text{F14} \quad (3.21)$$

$$\text{TR22} = \text{F15} \quad (3.22)$$

$$\text{TR23} = \overline{\text{F15}} \quad (3.23)$$

$$\text{TR24} = \text{F16} \quad (3.24)$$

$$\text{TR25} = \text{F17} \quad (3.25)$$

$$\text{TR26} = \overline{\text{F18}} \quad (3.26)$$

$$\text{TR27} = \text{F18} \quad (3.27)$$

$$\text{TR28} = \text{F19} \quad (3.28)$$

$$\text{TR29} = \text{F20} \quad (3.29)$$

$$TR30 = F21 \quad (3.30)$$

$$TR31 = \overline{F21} \quad (3.31)$$

$$TR32 = F22 \quad (3.32)$$

$$TR33 = F23 \quad (3.33)$$

V.Написання (розробка) логічних рівнянь (3.34 - 3.56) для блоків потокової блок- діаграми АК АСКПДАСЦК:

$$F1 = (F1 + TR1 + TR3 + TR6) \cdot \overline{TR2} \quad (3.34)$$

$$F2 = (F2 + TR4) \cdot \overline{TR4} \cdot \overline{TR5} \quad (3.35)$$

$$F3 = (F3 + TR5) \cdot \overline{TR6} \quad (3.36)$$

$$F4 = (F4 + TR4) \cdot \overline{TR7} \quad (3.37)$$

$$F5 = (F5 + TR7 + TR10) \cdot \overline{TR8} \cdot \overline{TR9} \quad (3.38)$$

$$F6 = (F6 + TR9) \cdot \overline{TR10} \quad (3.39)$$

$$F7 = (F7 + TR8 + TR13) \cdot \overline{TR11} \cdot \overline{TR12} \quad (3.40)$$

$$F8 = (F8 + TR12) \cdot \overline{TR13} \quad (3.41)$$

$$F9 = (F9 + TR11 + TR15) \cdot \overline{TR14} \cdot \overline{TR15} \quad (3.42)$$

$$F10 = (F10 + TR14) \cdot \overline{TR16} \quad (3.43)$$

$$F11 = (F11 + TR16) \cdot \overline{TR17} \quad (3.44)$$

$$F12 = (F12 + TR17 + TR19) \cdot \overline{TR18} \cdot \overline{TR9} \quad (3.45)$$

$$F13 = (F13 + TR18) \cdot \overline{TR20} \quad (3.46)$$

$$F14 = (F14 + TR20) \cdot \overline{TR21} \quad (3.47)$$

$$F15 = (F15 + TR21 + TR23) \cdot \overline{TR22} \cdot \overline{TR23} \quad (3.48)$$

$$F16 = (F16 + TR22) \cdot \overline{TR24} \quad (3.49)$$

$$F17 = (F17 + TR24) \cdot \overline{TR25} \quad (3.50)$$

$$F18 = (F18 + TR25 + TR29) \cdot \overline{TR26} \cdot \overline{TR27} \quad (3.51)$$

$$F19 = (F19 + TR27) \cdot \overline{TR28} \quad (3.52)$$

$$F20 = (F20 + TR28) \cdot \overline{TR29} \quad (3.53)$$

$$F21 = (F21 + TR26 + TR31) \cdot \overline{TR30} \quad (3.54)$$

$$F22 = (F22 + TR30) \cdot \overline{TR32} \quad (3.55)$$

$$F23 = (F23 + TR32) \cdot \overline{TR33} \quad (3.56)$$

VI. Написання (розробка) логічних рівнянь (3.57 - 3.61) для виходів АСКППДАСЦК:

$$\text{Частотний перетворювач} = F1 \cdot \overline{F2} \quad (3.57)$$

$$\text{Маніпулятор1} = F10 \quad (3.58)$$

$$\text{Маніпулятор2} = F13 \quad (3.59)$$

$$\text{Напилювач} = F16 + F19 \quad (3.60)$$

$$\text{Дефектоскоп} = F22 \quad (3.61)$$

4.2 Розробка програми керування системою покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт

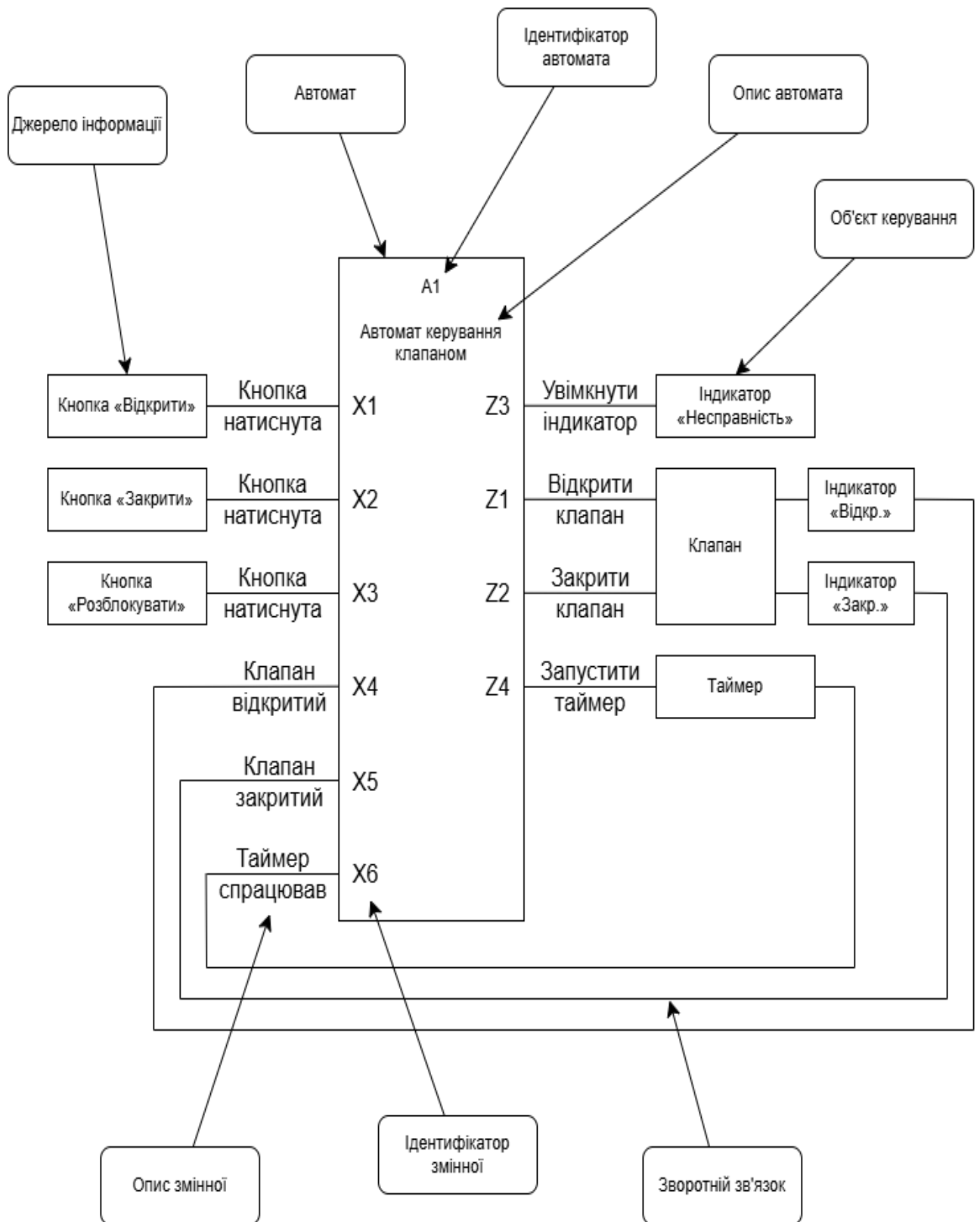


Рисунок 4.7 – Схема зв'язків автомата САК

Специфікація структури САК, нарівні зі специфікацією поведінки, є одним із ключових результатів процесу проектування та вимагає використання відповідної

нотації. У програмуванні, яке передбачає явне виділення станів, для опису структури САК застосовується графічна нотація схеми зв'язків автоматів. Для кожного автомата САК схема зв'язків створюється окремо. На ній сам автомат зображується у вигляді прямокутника. Зліва від прямокутника розташовуються джерела інформації (у подійних системах їх називають також постачальниками подій) – це елементи САК або зовнішнього середовища, які формують вхідні впливи для автомата [34-37]. Систему зв'язків автомата САК можна побачити на рисунку 4.7

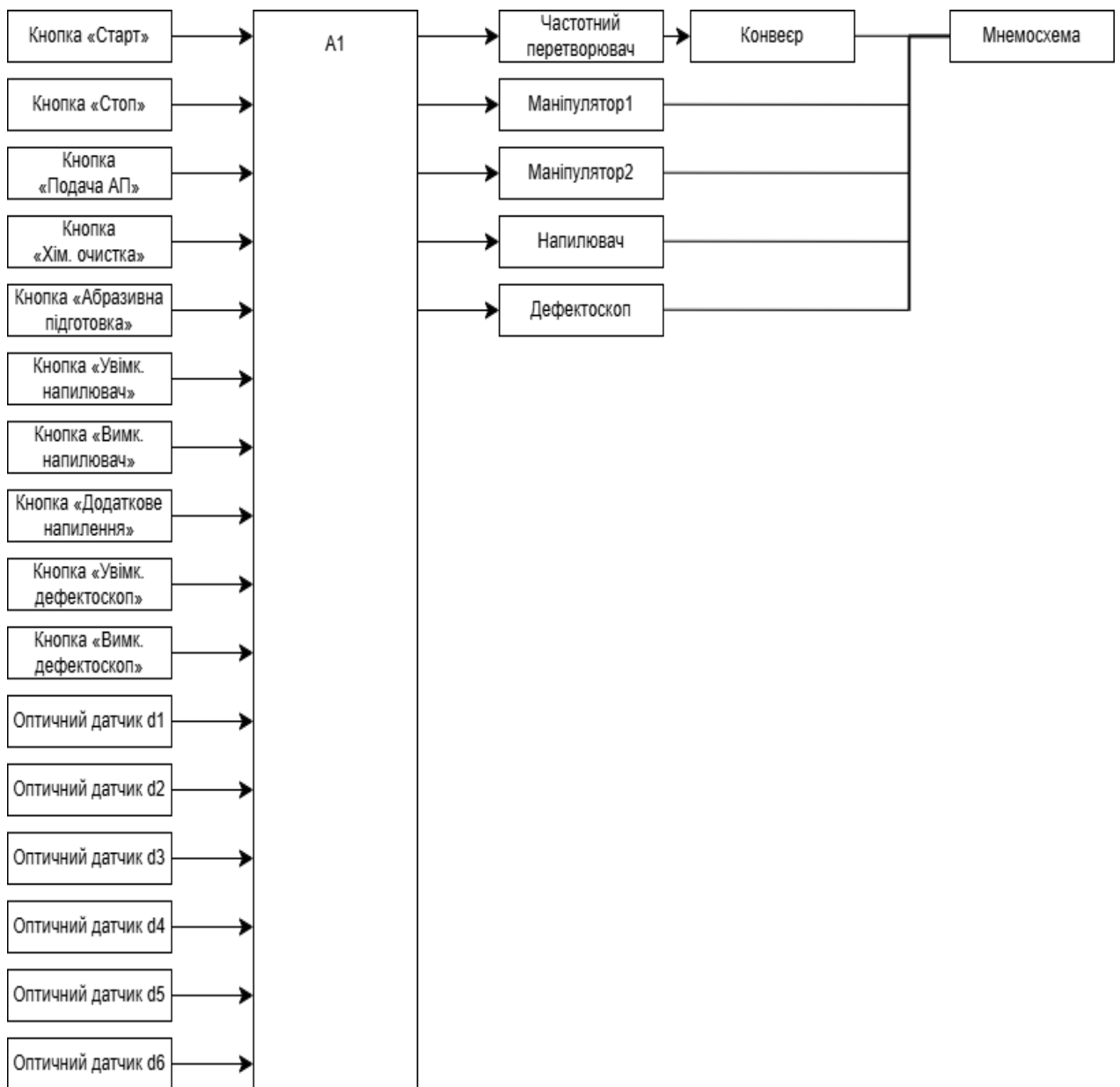


Рисунок 4.8 – Розроблений цифровий автомат АСКПДАСЦК

Для кожної події САК, вхідної змінної або предиката, що відповідає номеру стану, між автоматом і джерелом інформації проводиться лінія, позначена ідентифікатором і словесним описом цієї події (змінної або предиката). Така схема зв'язків виконує функцію розшифровки скорочених ідентифікаторів подій і змінних, що використовуються в діаграмі переходів. Це дозволяє зробити діаграму переходів компактною, навіть у разі значної кількості вхідних і вихідних змінних. Приклад схеми зв'язків автомата САК клапаном зображено на рисунку 4.7.

Праворуч від автомата розміщуються його об'єкти управління та підлеглі (вкладені або викликані) автомати. Для кожної вихідної змінної проводиться лінія між автоматом і відповідним об'єктом управління, позначена ідентифікатором і описом цієї змінної.

Якщо викликаному автомату передаються одна чи кілька подій, то для кожної з них також проводиться окрема лінія з відповідним позначенням. У випадку, коли об'єкти управління одночасно виступають джерелами інформації, формуючи частину вхідних змінних автомата, вони також зображуються праворуч, а лінії, які відповідають таким вхідним змінним, позначаються як зворотні зв'язки. Розроблений цифровий автомат АСКППДАСЦК зображений на рисунку 4.8.

Діаграма переходів автомата АСКППДАСЦК представляє собою орієнтований граф, у якому вершини відповідають керуючим станам, а дуги - переходам між ними. Вершини графа зображаються у вигляді кіл, що містять номер, назву стану та опис вихідних впливів у цьому стані. Вихідні впливи зазначаються через перелік ідентифікаторів вихідних змінних або викликаних вкладених автоматів.

Дуги графа САК позначаються умовами переходу та вихідними впливами під час переходу. Умова переходу подається у вигляді довільної булевої формули, яка базується на вхідних змінних, подіях або предикатах, що залежать від номерів станів інших автоматів САК (у разі взаємодії через обмін номерами станів). Якщо булева формула є громіздкою, її можна замінити скороченим ідентифікатором. Умова переходу відділяється від вихідного впливу горизонтальною лінією. На

діаграмах прийнято звертатися до змінних, подій і автоматів САК за їх короткими символічними ідентифікаторами. Це зумовлено тим, що на великих діаграмах довгі мнемонічні імена можуть або не поміститися, або створити візуальне перевантаження графа [27-33].

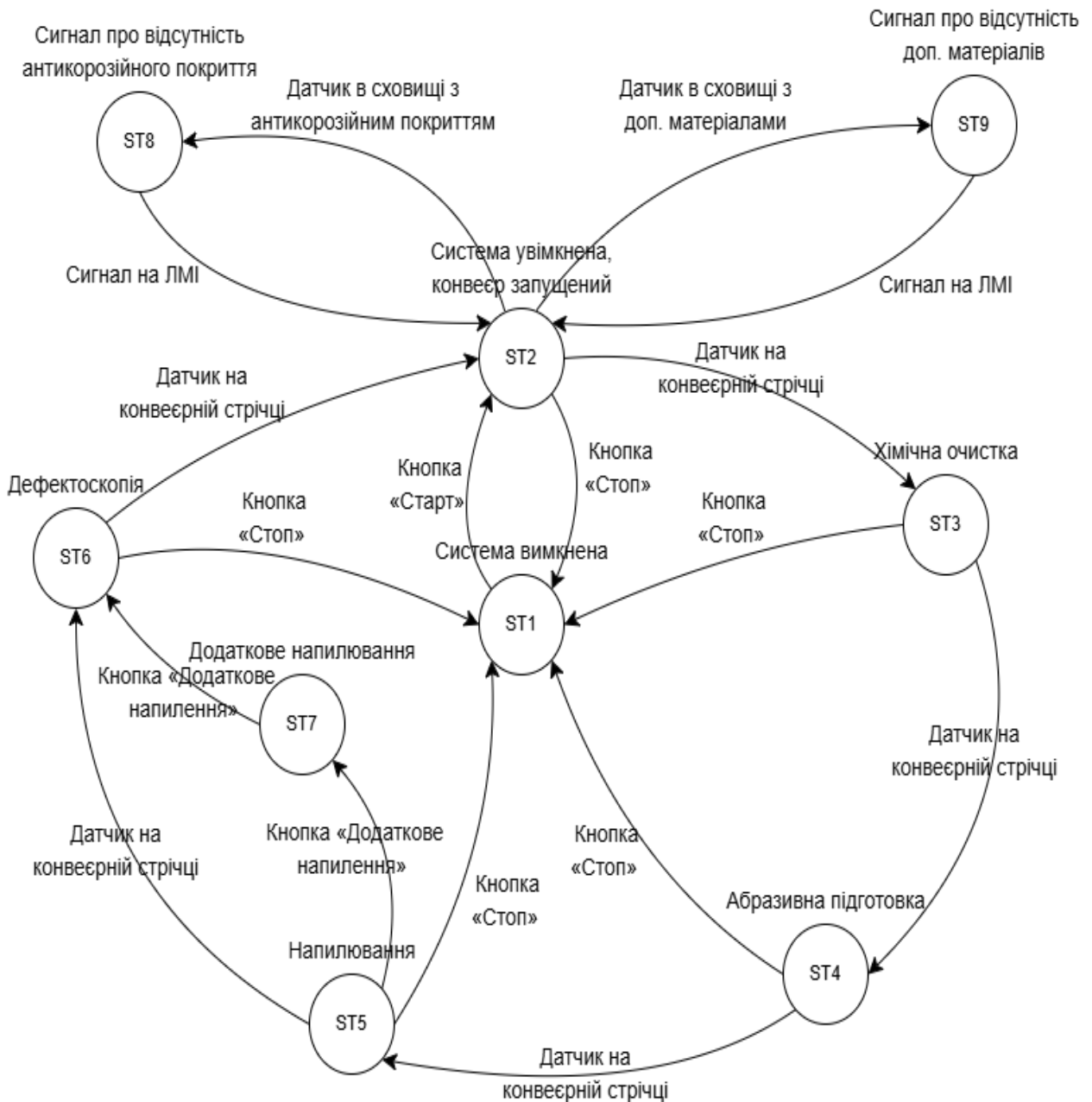


Рисунок 4.9 – Розроблений граф переходів АСКППДАСЦК

Якщо кілька станів автомата САК мають однакові вихідні переходи (з тією ж умовою, вихідним впливом і цільовою вершиною), їх можна об'єднати в групу,

замінивши кілька однакових переходів одним – груповим. Таке групування доцільно використовувати, коли певний набір станів автомата САК має спільну логіку поведінки, але виділення цих станів в окремий автомат є недоцільним. Графічно групу станів позначають рамкою.

Ще одним методом нотації є переходи з пріоритетами. Цей підхід дозволяє визначати пріоритети для дуг, які виходять з одного стану автомата САК. Пріоритетність задає порядок перевірки умов переходів: першою перевіряється умова на дузі з найвищим пріоритетом, а останньою - на дузі з нижчим.

Граф переходів САК вважається некоректним, якщо для кількох дуг, що виходять із одного стану, умови можуть одночасно бути істинними. У такій ситуації автомат САК не зможе однозначно визначити, за якою з дуг здійснити перехід. Використання переходів із пріоритетами усуває це протиріччя, надаючи перевагу дузі з вищим пріоритетом.

Допускається, щоб кілька дуг мали однаковий пріоритет, але між ними не повинно бути суперечностей. На графі переходів САК пріоритет позначається натуральним числом перед позначенням переходу. За домовленістю, менші числа відповідають вищим пріоритетам, тобто відображають порядок, у якому перевіряються переходи. Розроблений граф переходів АСКППДАСЦК зображений на рисунку 4.9.

#### 4.3 Висновки до четвертого розділу

Для розробки прикладної програми для АСКППДАСЦК було застосовано гібридний підхід. Оскільки програма керування та ПЛК АСКППДАСЦК функціонують як цифрові автомати, найбільш ефективним та універсальним рішенням є підхід, який базується на використанні потокових блок-схем АК та методів цифрових програмних автоматів.

У цій кваліфікаційній роботі для побудови АСКППДАСЦК було застосовано метод переходів, який передбачає подання АК у вигляді множини станів, пов'язаних переходами. Блок-схеми АСКППДАСЦК дозволяють чітко візуалізувати процеси обробки та напilenня, а також взаємозв'язки між різними елементами системи. Важливим аспектом є також визначення пріоритетів для переходів, що дозволяє оптимізувати логіку поведінки автоматів. Це забезпечує можливість швидкого реагування на зміни умов у технологічному процесі та підвищує точність управління. Таким чином, поєднання потокових блок-схем АК та методів цифрових програмних автоматів САК є найбільш оптимальним і універсальним підходом для розробки програмного забезпечення систем керування в АСКППДАСЦК.

## ВИСНОВКИ

По закінченню КрВ було створено детальний огляд АСКППДАСЦК, були розглянуті різні аспекти, пов'язані з проектуванням, аналізом на стабільність, розробкою та програмним забезпеченням цієї САК. Було наведено інформацію про типи АП, газотермічне напилення АП на поверхню деталей (виробів), розглянуто його переваги і недоліки а також про розробку прикладної програми керування АСКППДАСЦК.

У першому розділі було проаналізовано різні типи АП, їх властивості, методи та способи нанесення на поверхню деталі (виробу). Розглянуто основні класифікації АП, їх склад та особливості застосування у промисловості. Було надано інформацію про газотермічне напилення АП, його методи, переваги і недоліки. Також детально описано процеси підготовки поверхні деталі (виробу) перед нанесенням АП, вплив параметрів напилення на якість отриманого шару.

В другому пункті надано інформацію про процес аналізу САК на стійкість та надійність, проаналізовано АСКППДАСЦК на стійкість (за критеріями Рауса, Воронова, Михайлова і Найквіста), надійність і було визначено показники якості регулювання. АСКППДАСЦК демонструє високу надійність, стійкість до змін зовнішніх умов та можливість адаптації до різних режимів функціонування, що значно підвищує її ефективність у реальних виробничих умовах.

Третій пункт охоплює проектування АСКППДАСЦК, у межах якого розроблено детальний опис структурної та технологічної схем, а також АК АСКППДАСЦК. Описано застосовані технічні засоби разом із їхніми характеристиками та особливостями. Проведено аналіз вимог до технічного забезпечення, а також визначено переваги й недоліки обраних технічних рішень.

У четвертій частині для розробки програми АСКППДАСЦК було застосовано гібридний підхід. Оскільки програма керування та ПЛК є цифровими автоматами, оптимальним рішенням стало використання потокових блок-схем алгоритмів і методів цифрових програмних автоматів. Для побудови

АСКППДАСЦК було обрано метод переходів, що ґрунтується на поданні АК у вигляді станів, пов'язаних переходами.

Отже, автоматизація процесу газотермічного напилення АП на деталі (вироби) є важливою складовою фізичного і механічного зміцнення деталей (виробів) і зменшення впливу агресивного зовнішнього середовища на них. Важливу роль відіграє також інтеграція сенсорних технологій і систем зворотного зв'язку, що дозволяють забезпечити постійний моніторинг процесів нанесення покриттів і їх автоматичну корекцію за заданими параметрами. Це не лише підвищує продуктивність технологічного процесу, але й забезпечує високу якість кінцевої продукції, відповідаючи вимогам сучасного виробництва. Взагалі, автоматизоване напилення АП на деталі (вироби) є незамінним процесом, яке може, при відносно невеликих фінансових витратах, значно збільшити корозійну і зносостійкість деталі (виробу), що призведе до зменшення витрат пов'язаних з поломкою деталей.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ**

1. Corrosion and aging of organic aviation coatings / T. ZHANG et al. Chinese Journal of Aeronautics. 2023. Vol. 36, no. 4. P. 1–35.
2. Matthews S., James B., Hyland M. High temperature erosion–oxidation of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–NiCr thermal spray coatings under simulated turbine conditions // Corrosion Science. 2013. No. 70. P. 203–211.
3. Research Progress of Coating Preparation on Light Alloys in Aviation Field: A Review / N. Li et al. MPDI. 2022. Vol. 15, no. 23. P. 1–20.
4. Improving the Corrosion Resistance of Aluminum Alloy by Creating a Superhydrophobic Surface Structure through a Two-Step Process of Etching Followed by Polymer Modification / T. Shi et al. MDPI. 2022. Vol. 14, no. 21. P. 1–13.
5. Thakur L., Arora N., Jayaganthan R., Sood R. An investigation on erosion behavior of HVOF sprayed WC–CoCr coatings // Applied Surface Science. 2011. No. 258. P. 1225–1234.
6. Kamal S., Jayaganthan R., Prakash S. Evaluation of cyclic hot corrosion behaviour of detonation gun sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–25 % NiCr coatings on nickel- and iron-base superalloys // Surface and Coatings Technology. 2009. No. 203. P. 1004–1013.
7. Chatha S.S., Sidhu H.S., Sidhu B.S. High temperature hot corrosion behavior of NiCr and Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–NiCr coatings on T91 boiler steel in an aggressive environment at 750 °C // Surface and Coatings Technology. 2012. No. 206. P. 3839–3850.
8. Shukla V.N., Jayaganthan R., Tewarib V.K. Degradation Behavior of HVOF-Sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–25 % NiCr Cermet Coatings Exposed to High Temperature // Materials Today: Proceedings. 2015. Vol. 2. Issue 4. P. 1805–1813.
9. Cao F., Song G.-L., Atrens A. Corrosion and passivation of magnesium alloys. Corrosion Science. 2016. Vol. 111. P. 835–845.
10. Розробка технології дисперсного модифікування жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінних двигунів / Н. Є. Калініна та ін.

Aerospace technic and technology. 2021. № 3. С. 49–53. URL: <https://doi.org/10.32620/aktt.2021.3.06>

11. The evaluation of corrosion properties of coated materials by utilization of EIS / J. Brezinová et al. *Koroze a ochrana materialu*. 2016. Vol. 60, no. 2. P. 35–40. URL: <https://doi.org/10.1515/kom-2016-0006>

12. Автоматизація технологічних процесів: лабораторний практикум з дисципліни для здобувачів вищої освіти спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування»; 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»; 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / уклад.: П. С. Майдан, Д.А.Макаришкін, Е. О. Золотенко, А. В. Буряк. –Хмельницький : ХНУ, 2021. –116 с.

13. Тимчик Р. С. Пристрій керування транспортною стрічкою [Електронний ресурс] / Роман Сергійович Тимчик - 2019. - Режим доступу до ресурсу: <http://elar.khmnu.edu.ua/handle/123456789/12206>

14. ОВЕН ПЛК. Середовище програмування CODESYS 2.3 [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://owen.ua/ua/programne-zabezpechennja/seredovyshe-programuvannja-codesys-2-3/documentacija-po-codesys-2-3>

15. Акопов, А. С. Імітаційне моделювання: підручник і практикум для академічного бакалаврату / А. С. Акопов. - К. : "Корнійчук", 2017. – 136с.

16. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М. Куценко,В.Ф. Яковлєв та ін. – К.: Аграрна освіта, 2011. – 449 с.

17. Gonzales R. C. Digital Image Processing Using MATLAB / R. C. Gonzales , R. E. Woods, S. Eddins. – Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2004. – 492 p.

18. Автоматика та електропривод техніки реєстрації інформації [Електронний ресурс] : навч. посіб. / Г. Г. Власюк, В. М. Співак, К. О. Трапезон, В. Б. Швайчен-ко. - Київ : Освіта України, 2010. - 159 с. - Режим доступу: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/19129>.

19. Воробйова О. М. Технічні засоби автоматизації: навч. посіб. / О. М. Воробйова, Ю. В. Флейта. - Одеса : ОНАЗ ім. О. С. Попова, 2018. - 208 с.
20. Мікропроцесорна техніка. Однокристальні мікроконтролери: навч. посібник / С.Р.Михайлов. -К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2014. -123 с.
21. Електроніка та мікросхемотехніка: Навчальний посібник / За ред. проф. В.Ф. Яковлєва. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 329 с.
22. Електрика та магнетизм : підручник / Л. Д. Дідух. - Тернопіль : Підручники і посібники, 2020. - 464 с. - Режим доступу : <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/31412..>
23. Тріщук Р. Л. Алгоритм керування комплексним технологічним процесом зміцнення циліндричних сталевих поверхонь деталей поліграфічного обладнання [Електронний ресурс] / Руслан Любомирович Тріщук – 2019. - Режим доступу до ресурсу: <http://ttdruk.vpi.kpi.ua/article/view/184574>
24. Технічний сервіс в агропромисловому комплексі: навчальний посібник / Коновалюк О.В., Кіяшко В.М., Колісник М.В. – К.: Аграрна освіта, 2013. – 404 с.
25. Електропривід сільськогосподарських машин, агрегатів та потокових ліній: Підручник / Є.Л. Жулай, Б.В. Зайцев, Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, Д.Г. Войтюк; За ред. Є.Л. Жулая. – К.: Вища освіта, 2001. – 288 с.: іл.
26. Будіщев М. С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : Підручник / М. С. Будіщев. – Львів : Афіша, 2001. – 424 с.
27. Ткачук В.І. Електромеханотроніка. Підручник/ В.І. Ткачук. - Львів: НУ “Львівська політехніка”, 2006. - 440 с.
28. Комп’ютери та комп’ютерні технології : навч. посіб. Ч. 1. Програмування в математичному пакеті MathCAD / В.П. Лисенко. І.М. Болбот. – К. : Аграрна освіта, 2010. – 229 с.
29. Ремонт машин та обладнання : підручник / [Сідашенко О.І. та ін.]; за ред. проф. О.І. Сідашенка, О.А. Науменка. – К. : Агроосвіта, 2014. – 665 с.

30. Загальна технологія харчової промисловості у прикладах і задачах: Підручник / ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., БУХКАЛО С.І., КАПУСТЕНКО П.О. та ін. – К.: ЦУЛ, 2011. – 832 с. – (МОН України. НТУ “ХП”)
31. Greenspan D. Introduction to Numerical Analysis and Applications / D. Greenspan. – Markham : Chicago, 1971. – 176 p.
32. Півняк Г.Г. Сучасні частотно-регульовані електроприводи зі широтно-імпульсною модуляцією: Монографія/ Г.Г. Півняк, О.В Волков.. -
33. Титаренко М.В., Електротехніка: Навчальний посібник/ М.В. Титаренко. – К.: Кондор, 2013. – 240 с.
34. Експлуатація машин і обладнання: Навчальний посібник / Ружицький М.А., Рябець В.І., Кіяшко В.М. та ін. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 617 с.
35. Коржик М. В. Моделювання об’єктів та систем керування засобами MatLab: навч. посіб. Для студ. вищ. навч. закл. / М. В. Коржик. – Київ : НТУУ “КП”, 2016. – 174 с.
36. Костін М. О. Теоретичні основи електротехніки [Текст]: підручник у 3 т. / М. О. Костін, О. Г. Шейкіна. – Дніпро: Видво ДНУЗТ, 2006. – Т. 1. – 336 с; 2007.- Т.2.- 276 с; 2011. – Т.3, Ч.1. – 224 с; 2012.– Т.3, Ч.2. – 352 с.
37. Bart Zeeuw van der Laan. System reliability analysis of belt conveyor / Bart Zeeuw van der Laan. –Transportation engineering, 2016. – 73 p.
38. Колонтаєвський Ю. П. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник / Ю. П. Колонтаєвський. - Київ : Каравела, 2006. - 384 с.
39. Kvyetnyu R. Basics of Modelling and Computational Methods / R. Kvyetnyu. – Вінниця : ВДТУ, 2007. – 147 с.
40. Колонтаєвський Ю. П. Промислова електроніка і мікросхемотехніка / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков. під ред. А. Г. Соскова. – Вид. 2-ге, виправл. і доповн. – Харків : ХДАМГ, 2003. – 281 с.
41. Механізація, електрифікація та автоматизація сільськогосподарського виробництва : підруч. у 2 т : Т 2 / А.В. Рудь, І.М. Бендера, Д.Г. Войтюк та ін. ; за ред. А.В. Рудя. – К. : Агроосвіта, 2012. – 434 с.; іл.

42. Image Processing Toolbox For Use with Matlab, User's Guide. Version 3. – The Math Works Inc., 2004. – 775 p.
43. Качан Ю. Г. Лінійна електротехніка (теоретичні основи) [Текст]: навч. посібник / Ю. Г. Качан.– Запоріжжя: Вида-во Запорізької держ. інж. академії, 2005. – 206 с.
44. Михайленко В.Є., Інженерна та комп'ютерна графіка: Підручник / В.Є. Михайленко, В.В. Ванін, С.М. Ковальов; За ред. В.Є. Михайленка. – 6-е вид. – К.: Каравела, 2012. – 368 с.
45. Руденко В. С. Промислова електроніка / В. С. Руденко, В. Я. Ромашко, В. В. Трифонюк. – Київ : Либідь, 2003. – 432 с.
46. Дубовой В. М. Основи застосування ЕОМ у інженерній діяльності / В. М. Дубовой, Р. Н. Кветний. – К. : ІСДО України, 1994. – 285 с.
47. Електроніка і мікропроцесорна техніка / Сенько В.І., Лисенко В.П., Юрченко О.М., Лукін В.Є., Руденський А.А. — К. : «Агроосвіта», 2015. — 676 с.
48. Simulink. Dynamic System Simulation for MatLab : Using Simulink[Electron resource]. – Natick, MA : The MathWorks, Inc, 1999. – 605 p
49. Виговський В. С. Автоматизація керування живильними насосами енергоблоку потужністю 200 МВт / В. С. Виговський, Ю. С. Грищук // Вісник НТУ «ХП». Серія : Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – 2015. – № 13 (1122). – С. 20–31.
50. Монтаж електрообладнання і систем керування / За заг. ред. проф. Яковлева В.Ф. – К.: Аграрна освіта, 2009. – 348 с.
51. Гуржій А. М. Електротехніка та основи електроніки : підручник для здобувачів професійної (професійно-технічної) освіти / А. М. Гуржій, С. К. Мещанінов, А. Т. Нельга, В. М. Співак. - Київ : Літера ЛТД, 2020. - 288 с.
52. Макаренко В. В. Цифрова та імпульсна схемотехніка. Моделювання та аналіз : навч. посіб. для студентів, які навчаються за напрямом підготовки «Акустотех-ніка» [Електронний ресурс] / В. В. Макаренко, В. М. Співак ; НТУУ

«КП». -Київ : НТУУ «КП», 2015. - 314 с. - Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/19099>.

53. Автоматизація технологічних процесів і системи автоматичного керування: Навчальний посібник /Барало О.В., Самойленко П.Г.,Гранат С.Є., Ковальов В.О. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 557 с.

54. Коруд В.І., Електротехніка: Підручник / В.І. Коруд, О.Є. Гамола, С.М. Малинівський; За заг. ред. В.І. Коруда. – 3-є вид., переробл. і доп. – Львів: Магнолія Плюс, 2006. – 447 с.

55. Механізація, електрифікація та автоматизація сільськогосподарського виробництва : підруч. у 2 т : Т 1 / А.В. Рудь, І.М. Бендера, Д.Г. Войтюк та ін. ; за ред. А.В. Рудя. – К. : Агроосвіта, 2012. – 584 с.; іл.

56. Теорія електропривода : Підручник / [М. Г. Попович, М.Г. Борисик, В.А. Гаврилюк та ін.] ; за ред. М. Г. Поповича. – Київ : Вища шк., 2003. – 454 с.

57. Костинюк Л.Д. Моделювання електроприводів/ Л.Д. Костинюк, В.І. Мороз, Я.С. Паранчук.. - Львів: НУ “Львівська політехніка”, 2004. - 404 с.

58. Електротехнологія. Навчально-методичний посібник із контрольними завданнями. Укладач: Кашенко П.С.

59. Панчевний Б. І. Загальна електротехніка: теорія і практика / Б. І. Панчевний, Ю. Ф. Свергун. - 2-ге вид. - Київ : Каравела, 2004. - 440 с.

60. Бойко В. І. Мікрокомп'ютерна техніка / В. І. Бойко, А. Т. Нельга. - 2-ге вид. - Київ : Науково-методичний центр вищої освіти, 2008. - 254 с.

61. Довідникова книга з електроенергетики: навчальний посібник/ П.В. Волох, М.П. Цоколенко, Л.В. Ревенко, В.А. Грічаненко та ін. –К. : Аграрна освіта, 2014. – 506 с.

62. Експлуатація машин і обладнання: Навчальний посібник / Ружицький М.А., Рябець В.І., Кіяшко В.М. та ін. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 617 с.

63. Іскович-Лотоцький Р. Д. Манжілевський О. Д. Обладнання автоматизованих виробництв. Частина 1. Верстати-автомати : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2017. 91 с.

64. Бобух А.О. Автоматизовані системи керування технологічними процесами: навчальний посібник. Харків: ХНАМГ, 2006. 185 с.
65. Ладієва, Л. Р. Оптимізація систем керування [Електронний ресурс] : навчальний посібник. КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 232 с.
66. Ладієва Л.Р. Оптимізація технологічних процесів : навчальний посібник. К.: НМЦ ВО, 2003. 209 с.
67. Мірошник М.А. Системи автоматизації проектування пристроїв і систем автоматики. Основи систем автоматизації проектування : конспект лекцій. Харків: УкрДАЗТ, 2014. 102 с.
68. Основи побудови автоматизованих систем управління : навч. посіб. / І. Пількевич та ін. Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2014. 182 с.
69. Коруд В.І., Електротехніка: Підручник / В.І. Коруд, О.Є. Гамола, С.М. Малинівський; За заг. ред. В.І. Коруда. – 3-є вид., переробл. і доп. – Львів: Магнолія Плюс, 2006. – 447 с.
70. Kvyetnyu R. Basics of Modelling and Computational Methods / R. Kvyetnyu. – Вінниця : ВДТУ, 2007. – 147 с.
71. Колонтаєвський Ю. П. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник / Ю. П. Колонтаєвський. - Київ : Каравела, 2006. - 384 с.

## Додаток А

### Стаття у фаховому журналі (подана до редакції журналу «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»)

УДК 681.5

КОРЕЦЬКА Людмила

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-4284-4936>

[koretskal@khmnu.edu.ua](mailto:koretskal@khmnu.edu.ua)

МАКАРИШКІН Денис

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3447-811X>

[makaryshkinde@khmnu.edu.ua](mailto:makaryshkinde@khmnu.edu.ua)

ФІГОЛЬ Світлана

Вінницький технічний фаховий коледж

ДМІТРИЄВ Артем

Хмельницький національний університет

#### АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ПОКРИТТЯ ДЕТАЛЕЙ АНТИКОРОЗІЙНИМ СПЛАВОМ

*У статті представлено варіант проектування автоматизованої системи покриття деталей антикорозійним сплавом. Дана система включає попередню обробку деталі, що покривається, в два етапи і кінцевий контроль виробу на наявність недосконалостей при покритті. Підготовка деталі виконується в два кроки: спершу деталь опускається в ємність з кислотним розчином з метою знежирення поверхні деталі, а потім в контейнер з абразивним матеріалом для обробки поверхні з метою надійного зчеплення антикорозійного матеріалу з поверхнею деталі. При необхідності на деталь можливо нанести додатковий шар антикорозійного покриття для покращення його ефективності і довговічності. Для контролю нанесення антикорозійного покриття використовується ультразвуковий дефектоскоп, який перевіряє поверхню на наявність нерівності і неоднорідності покриття.*

**Ключові слова:** автоматизована система керування, панель керування, людино-машинний інтерфейс, блок-схема, алгоритм керування, структурна схема, технологічна схема, оптичний датчик, промисловий робот маніпулятор, покриття деталей, антикорозійне покриття.

KORETSKA Liudmyla, MAKARYSHKIN Denys, DMITRIIEV Artem

Khmelnytskyi National University

FIGOL Svitlana

Vinnitskyi Technical Vocational College

#### ALGORITHMIC SUPPORT OF THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR THE COATING PROCESS OF PARTS WITH ANTI-CORROSION ALLOY

*The article presents a design option for an automated system for coating parts with an anticorrosive alloy. This system includes pre-treatment of the part to be coated in two stages and final inspection of the product for imperfections during coating. The preparation of the part is carried out in two steps: first, the part is lowered into a container with an acid solution to degrease the surface of the part, and then into a container with abrasive material for surface treatment to ensure reliable adhesion of the anticorrosive material to the surface of the part. If necessary, an additional layer of*

*anticorrosive coating can be applied to the part to improve its effectiveness and durability. To control the application of the anticorrosive coating, an ultrasonic flaw detector is used, which checks the surface for unevenness and inhomogeneities of the coating. The control data is automatically processed by a system that determines the degree of compliance of the coating with the specified technical characteristics.*

*The article presents the developed block diagram of the control algorithm of the automated system for controlling the process of coating parts with an anticorrosive alloy with pre-treatment and spraying of the part, the system of logical equations of the control algorithm, the digital automaton of the algorithmic support of the automated system and the transition graph of the software automaton.*

*The use of such an automated system will lead to an increase in durability, corrosion resistance and improvement of the quality of the finished product.*

**Keywords:** *automated control system, control panel, human-machine interface, block diagram, control algorithm, structural diagram, technological diagram, optical sensor, industrial robot manipulator, coating of parts, anti-corrosion coating.*

## **ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ**

У сучасних реаліях виробництва деталей різного призначення, а особливо при розробці деталей авіаційної техніки [1], підприємства та фірми акцентують свою увагу на забезпеченні довговічності та антикорозійної стійкості металевих виробів. Одним із найефективніших методів захисту металевих деталей від впливу агресивного середовища є нанесення спеціальних антикорозійних покриттів [2]. Особливої уваги заслуговують сплави, які поєднують високу стійкість до корозії та зносостійкість [3].

Щорічне зростання вимог до якості продукції, зниження витрат і екологічних впливів ставить перед підприємствами та фірмами завдання впровадження сучасних технологій автоматизації виробничих процесів. Автоматизована система керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом є інноваційним рішенням, що дозволяє досягти стабільно високої якості покриттів, оптимізувати витрати матеріалів і енергії, а також підвищити продуктивність виробництва. Збільшена якість антикорозійного покриття призведе до покращення довговічності деталей, що у свою чергу, допоможе зменшити витрати пов'язані зі зношуванням деталей під час експлуатації.

Розробка таких автоматизованих систем керування потребує інтеграції передових технологій. До їх складу можуть входити робототехнічні комплекси, сенсорні системи, виконавчі механізми, мережеві технології, інтелектуальні мехатронні системи керування, засоби людино-машинного інтерфейсу, мікропроцесорні системи та програмне забезпечення для керування (управління) і координації роботи автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом у сучасному кіберфізичному виробництві. Ключовим аспектом є забезпечення сумісності та ефективної взаємодії між усіма компонентами автоматизованої системи керування, що дозволяє гарантувати її безперебійну та продуктивну роботу.

## **АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ**

Надійність і довговічність сучасного промислового обладнання значною мірою залежать від надійності агрегатів і механізмів, працездатність яких визначається багатьма зовнішніми чинниками [4-5]. Серед заходів, спрямованих на забезпечення їх ефективної роботи, важливу роль відіграє розробка і застосування технологій зміцнення поверхні та відновлення деталей за допомогою антикорозійних покриттів. Зміцнення поверхонь деталей за рахунок нанесення зносостійких антикорозійних покриттів дозволяє суттєво скоротити витрати матеріальних, енергетичних і трудових ресурсів, забезпечити їх надійну роботу в різноманітних умовах експлуатації та підвищити якість виробництва [6].

Одним з головних факторів, що визначають надійність і довговічність деталей авіаційної техніки, є їхнє зношування [1-3]. До інтенсивного зношування найбільше схильні вузли та деталі, що працюють при важких навантаженнях та в агресивних середовищах. Так у процесі експлуатації газотурбінні двигуни схильні до силових, теплових впливів і зносу. Відповідальні деталі турбін: компресорні лопатки, ротора та корпуси працюють в умовах високих температур у поєднанні зі значними навантаженнями, зумовленими відцентровими силами інерції та різницями тисків. Після тривалої експлуатації в умовах ерозійного впливу повітряного потоку

при підвищених температурах (200-300 °С) основними видами пошкоджень лопаткового апарату є ерозійне та корозійне зношування робочої поверхні, а також втомне руйнування [1-2].

Для підвищення зносостійкості, жаростійкості та ерозійної стійкості деталей авіаційних двигунів застосовують різні типи покриттів, що напилюються. Широко використовують напилення при капітальному ремонті двигуна, для відновлення зношених деталей [3].

Проводячи аналіз сучасних літературних джерел, можна зробити висновок, що основним методом антикорозійної протидії є процес газотермічного напилення [7], який полягає в тому, що матеріал для покриття вводиться в джерело тепла, температура якого досить висока, щоб його пластифікувати. При «холодному» напиленні, порошковий матеріал не нагрівається, а розганяється надзвуковим потоком газу до стадії пластифікації на поверхні деталі. У випадку газотермічного нанесення покриттів, потік газу, що володіє високою швидкістю, захоплює частинки покриття і з дуже великою швидкістю спрямовує їх на попередньо підготовлену поверхню деталі. Поступово накладаючись один на одного частинки формують шарове покриття з сильною анізотропією фізичних і механічних властивостей. Матеріал антикорозійного покриття може бути у вигляді порошку, дроту, стрижня, стрічки або шнура. Характерний розмір частинок у потоці газу складає від 5 до 200 мкм. Характерна товщина покриттів близько 1 мм. На рис. 1. наведено класифікацію методів газотермічного напилення [7].

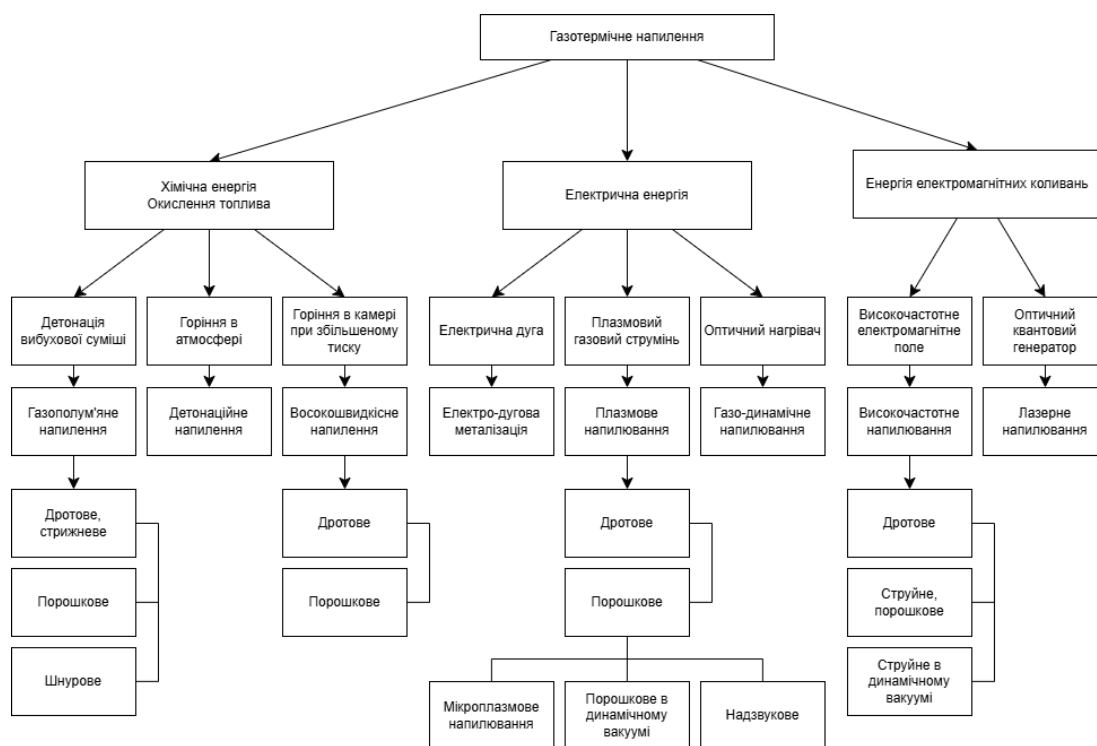


Рис. 1. Класифікація методів газотермічного напилення антикорозійного покриття

## ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

**Метою роботи є:** розробка алгоритмічного забезпечення для автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом для покращення довговічності деталей і зменшення грошових витрат на їх заміну.

## ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Технологічний процес покриття деталей антикорозійним сплавом складається з наступних основних етапів:

- підготовка поверхні деталі до напилення антикорозійного покриття;
- нанесення антикорозійного покриття;
- механічна обробка антикорозійного покриття;
- контроль якості антикорозійного покриття.

В загальному вигляді схема технологічного процесу покриття деталей антикорозійним сплавом зображена на рисунку 2.

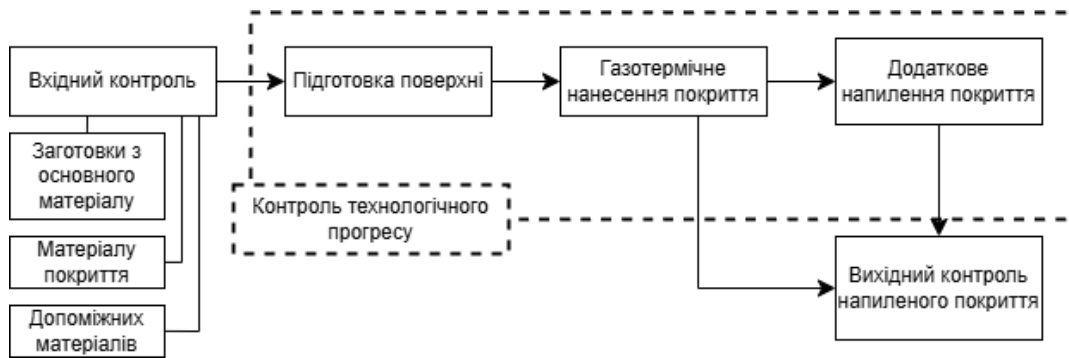


Рис. 2. Схема технологічного процесу покриття деталей антикорозійним сплавом

Словесний алгоритм керування виглядає наступним чином:

1. При натисканні на кнопку («Старт») система запускається.
2. При натисканні на кнопку («Стоп») система зупиняється.
3. При спрацьовуванні оптичного датчика в сховищі з антикорозійним покриттям система подає сигнал про відсутність антикорозійного покриття.
4. При натисканні на кнопку («Подача антикорозійного покриття») відбувається подача антикорозійного покриття в напилювач.
5. При спрацьовуванні оптичного датчика в сховищі з допоміжними матеріалами система подає сигнал про їх відсутність.
6. При спрацьовуванні оптичного датчика на конвеєрі перед хімічною очисткою конвеєр призупиняється на 10 хв., запускається процес хімічної очистки деталі і через 10 хв. вмикається.
7. При натисканні на кнопку («Хім. очистка») деталь опускається в резервуар з кислотним розчином для подальшої хімічної обробки, після обробки деталь підіймається.
8. При спрацьовуванні оптичного датчика на конвеєрі перед абразивною підготовкою конвеєр призупиняється на 5 хв., запускається процес абразивної підготовки деталі і через 5 хв. вмикається.
9. При натисканні на кнопку («Абразивна підготовка») деталь опускається в контейнер з абразивним матеріалом для подальшої підготовки, після підготовки деталь підіймається.
10. При спрацьовуванні оптичного датчика на конвеєрі перед покриттям антикорозійного покриття конвеєр призупиняється на 2 хв., вмикається газотермічний напилювач і через 2 хв. вмикається.
11. При натисканні на кнопку («Увімк. напилювач») вмикається газотермічний напилювач.
12. При натисканні на кнопку («Вимк. напилювач») вмикається газотермічний напилювач.
13. При натисканні на кнопку («Додаткове напилення») конвеєр зупиняється на 2 хв., вмикається газотермічний напилювач і напилює додатковий шар антикорозійного покриття і вмикається.
14. При спрацьовуванні оптичного датчика на конвеєрі перед дефектоскопом конвеєр призупиняється на 4 хв., дефектоскоп сканує деталь і через 4 хв. вмикається.
15. При натисканні на кнопку («Увімк. дефектоскоп») вмикається дефектоскоп і перевіряє деталь на наявність недосконалостей.
16. При натисканні на кнопку («Вимк. дефектоскоп») вмикається дефектоскоп.

На рисунку 3 представлена розроблена структурна схема автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом, яка була розроблена відповідно до технологічної схеми.

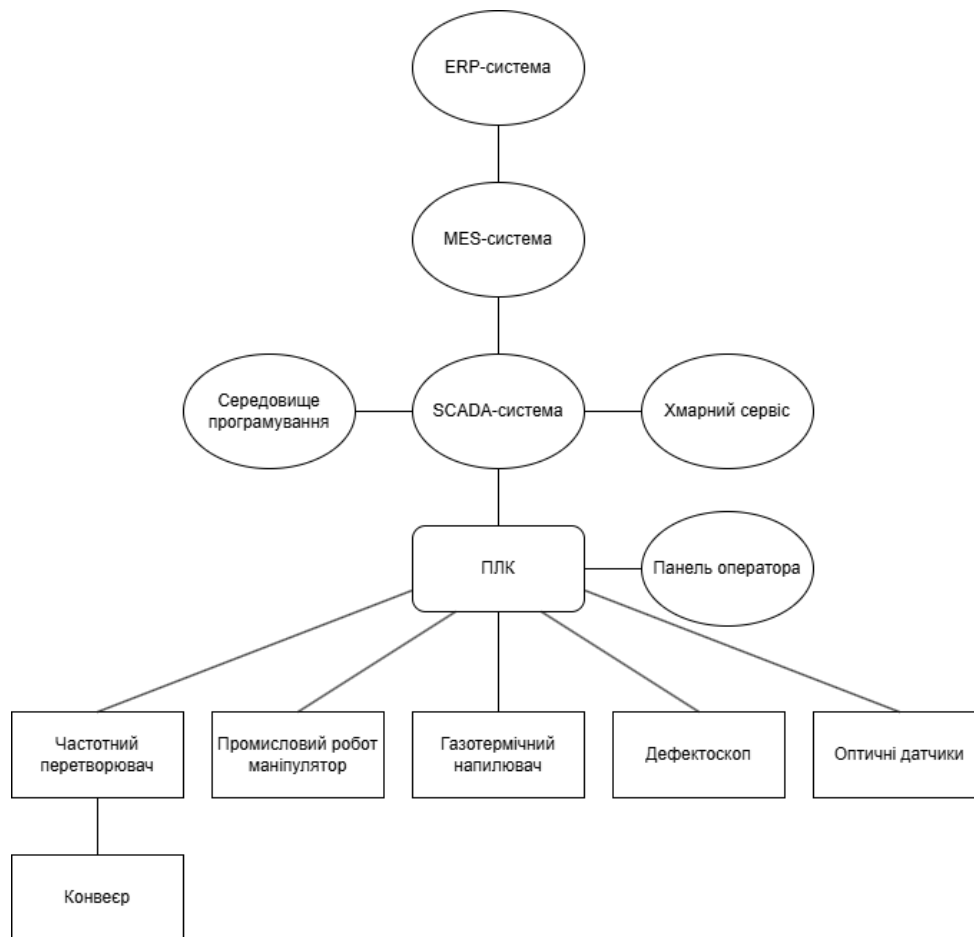


Рис. 3. Структурна схема автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом

Дана структурна схема працює наступним чином, за допомогою людино-машинного інтерфейсу у вигляді панелі керування, Веб-панелі оператора, хмарного сервісу, персонального або індустріального комп'ютера, проводиться налаштування параметрів автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом.

При натисканні на кнопку «Старт» система запускається і автоматично починається перевірка на наявність антикорозійного покриття і допоміжних матеріалів. При спрацюванні відповідного оптичного датчика у сховищі антикорозійного покриття чи допоміжних матеріалів, оптичний датчик подає сигнал на панель керування, що сигналізує про відсутність антикорозійного покриття чи допоміжних матеріалів.

Спочатку, при проходженні деталі по конвеєрній стрічці її фіксує оптичний датчик і подає сигнал на промисловий робот маніпулятор, який перекладає деталь у ємність з кислотним розчином з метою знежирення поверхні деталі, після завершення знежирення промисловий робот маніпулятор перекладає деталь назад на конвеєрну стрічку.

Потім, при спрацюванні наступного оптичного датчика на конвеєрній стрічці подається сигнал на промисловий робот-маніпулятор, що переносить деталь в контейнер з абразивним матеріалом з метою надійного зчеплення антикорозійного матеріалу з поверхнею деталі, після цього промисловий робот маніпулятор кладе деталь назад на конвеєрну стрічку.

Наступним кроком є наплення антикорозійного покриття на деталь за допомогою газотермічного напилювача. При спрацюванні оптичного датчика перед напилювачем, конвеєрна стрічка зупиняється і антикорозійне покриття напильється на деталь. При потребі можливо здійснити додаткове наплення при натисканні відповідної кнопки на людино-машинному інтерфейсі.

Далі деталь, за допомогою ультразвукового дефектоскопу, проходить сканування поверхні на факт наявності нерівностей і неоднорідності покриття.

На рисунку 4 зображено розроблену блок-схему алгоритму керування системи автоматизації процесом покриття деталей антикорозійним сплавом. Блокам та переходам у потоковій блок-схемі алгоритму автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом було присвоєно змінні.

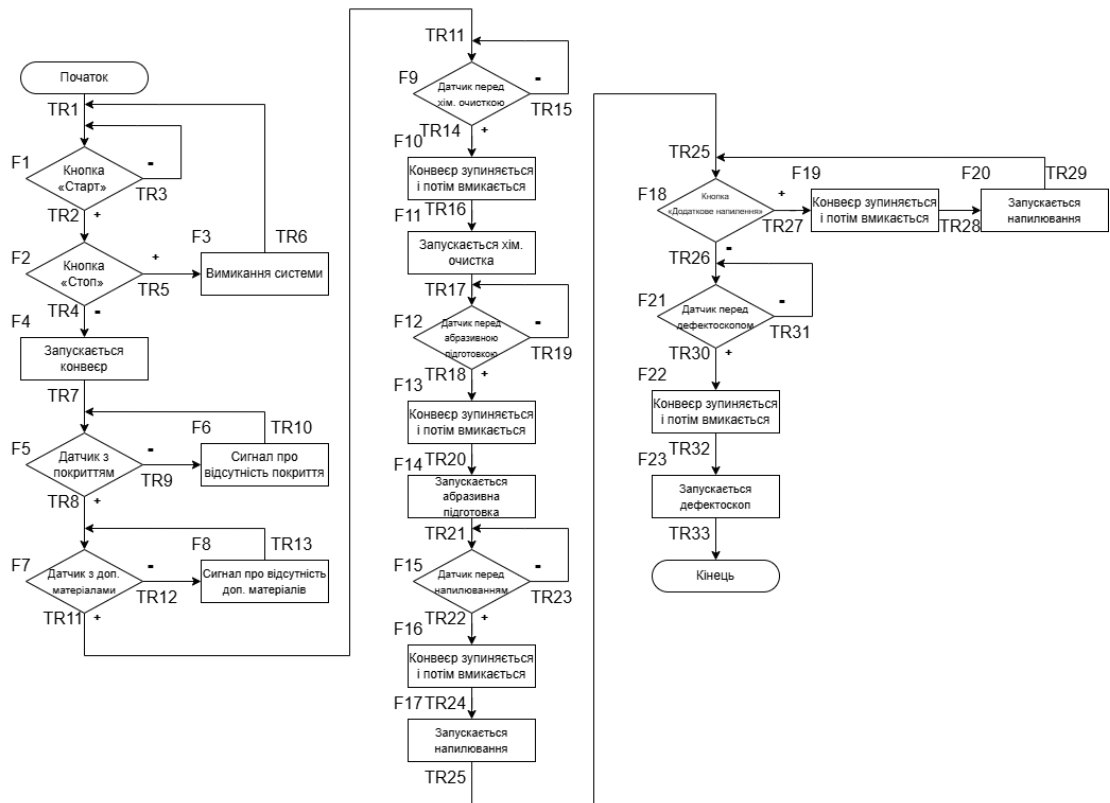


Рис. 4. Блок-схема алгоритму керування автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом

У науковій роботі розроблена система логічних рівнянь (1-33) алгоритму керування для переходів потокової блок-діаграми алгоритмічного забезпечення автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом виглядають наступним чином:

$$TR1 = \text{InitBit} \quad (1)$$

$$TR2 = F1 \quad (2)$$

$$TR3 = \overline{F1} \quad (3)$$

$$TR4 = \overline{F2} \quad (4)$$

$$TR5 = F2 \quad (5)$$

$$TR6 = F3 \quad (6)$$

$$TR7 = F4 \quad (7)$$

$$TR8 = F5 \quad (8)$$

$$TR9 = \overline{F5} \quad (9)$$

$$TR10 = F6 \quad (10)$$

$$TR11 = F7 \quad (11)$$

$$TR12 = \overline{F7} \quad (12)$$

$$TR13 = F8 \quad (13)$$

$$TR14 = F9 \quad (14)$$

$$TR15 = \overline{F9} \quad (15)$$

$$TR16 = F10 \quad (16)$$

$$TR17 = F11 \quad (17)$$

$$TR18 = F12 \quad (18)$$

$$TR19 = \overline{F12} \quad (19)$$

$$TR20 = F13 \quad (20)$$

$$TR21 = F14 \quad (21)$$

$$TR22 = F15 \quad (22)$$

$$TR23 = \overline{F15} \quad (23)$$

$$TR24 = F16 \quad (24)$$

$$TR25 = F17 \quad (25)$$

$$TR26 = \overline{F18} \quad (26)$$

$$TR27 = F18 \quad (27)$$

$$TR28 = F19 \quad (28)$$

$$TR29 = F20 \quad (29)$$

$$TR30 = F21 \quad (30)$$

$$TR31 = \overline{F21} \quad (31)$$

$$TR32 = F22 \quad (32)$$

$$TR33 = F23 \quad (33)$$

У науковій роботі розроблена система логічних рівнянь (34-56) алгоритму керування для блоків потокової блок-діаграми алгоритмічного забезпечення автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом виглядають наступним чином:

$$F1 = (F1 + TR1 + TR3 + TR6) \cdot \overline{TR2} \quad (34)$$

$$F2 = (F2 + TR4) \cdot \overline{TR4} \cdot \overline{TR5} \quad (35)$$

$$F3 = (F3 + TR5) \cdot \overline{TR6} \quad (36)$$

$$F4 = (F4 + TR4) \cdot \overline{TR7} \quad (37)$$

$$F5 = (F5 + TR7 + TR10) \cdot \overline{TR8} \cdot \overline{TR9} \quad (38)$$

$$F6 = (F6 + TR9) \cdot \overline{TR10} \quad (39)$$

$$F7 = (F7 + TR8 + TR13) \cdot \overline{TR11} \cdot \overline{TR12} \quad (40)$$

$$F8 = (F8 + TR12) \cdot \overline{TR13} \quad (41)$$

$$F9 = (F9 + TR11 + TR15) \cdot \overline{TR14} \cdot \overline{TR15} \quad (42)$$

$$F10 = (F10 + TR14) \cdot \overline{TR16} \quad (43)$$

$$F11 = (F11 + TR16) \cdot \overline{TR17} \quad (44)$$

$$F12 = (F12 + TR17 + TR19) \cdot \overline{TR18} \cdot \overline{TR9} \quad (45)$$

$$F13 = (F13 + TR18) \cdot \overline{TR20} \quad (46)$$

$$F14 = (F14 + TR20) \cdot \overline{TR21} \quad (47)$$

$$F15 = (F15 + TR21 + TR23) \cdot \overline{TR22} \cdot \overline{TR23} \quad (48)$$

$$F16 = (F16 + TR22) \cdot \overline{TR24} \quad (49)$$

$$F17 = (F17 + TR24) \cdot \overline{TR25} \quad (50)$$

$$F18 = (F18 + TR25 + TR29) \cdot \overline{TR26} \cdot \overline{TR27} \quad (51)$$

$$F19 = (F19 + TR27) \cdot \overline{TR28} \quad (52)$$

$$F20 = (F20 + TR28) \cdot \overline{TR29} \quad (53)$$

$$F21 = (F21 + TR26 + TR31) \cdot \overline{TR30} \quad (54)$$

$$F22 = (F22 + TR30) \cdot \overline{TR32} \quad (55)$$

$$F23 = (F23 + TR32) \cdot \overline{TR33} \quad (56)$$

У науковій роботі розроблена система логічних рівнянь (57-61) алгоритму керування для виходів потокової блок-діаграми алгоритмічного забезпечення автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом виглядають наступним чином:

$$Frequency\_converter = F1 \cdot \overline{F2} \quad (57)$$

$$Manipulator1 = F10 \quad (58)$$

$$Manipulator2 = F13 \quad (59)$$

$$Sprayer = F16 + F19 \quad (60)$$

На рисунку 5 зображено розроблений цифровий автомат алгоритмічного забезпечення автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом.

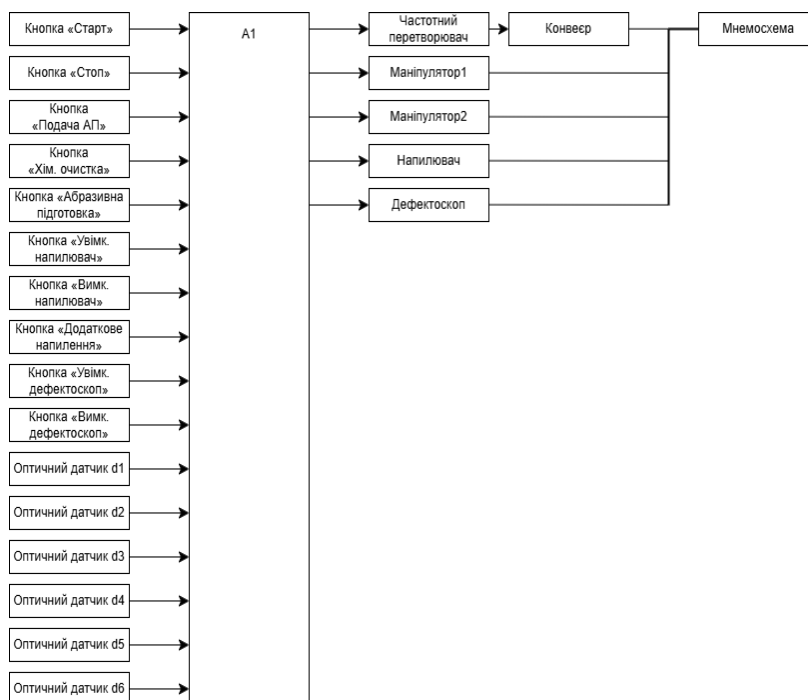


Рис. 5. Програмний автомат алгоритмічного забезпечення автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом

На рисунку 6 зображено граф переходів програмного автомату алгоритмічного забезпечення автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом.

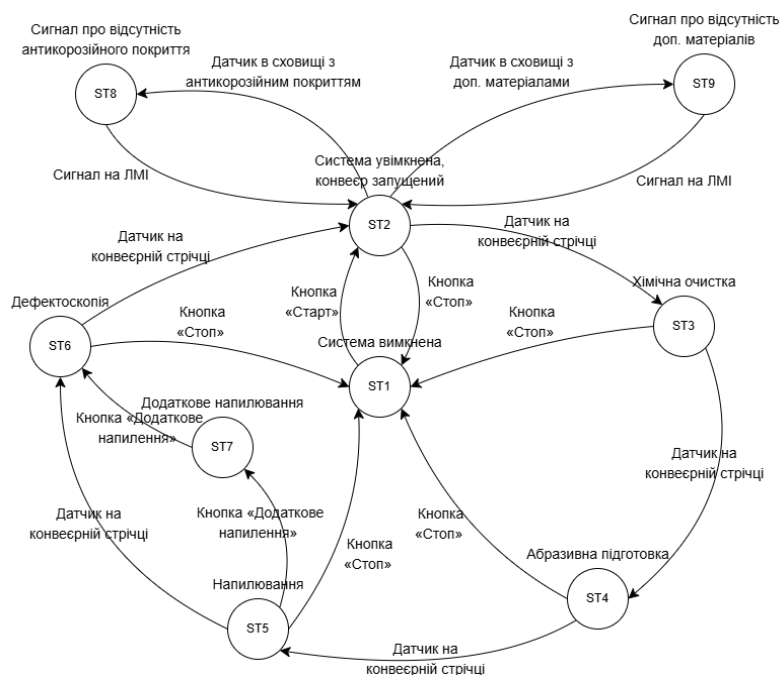


Рис. 6. Граф переходів автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом

## ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

### І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

У статті розглянуто сучасні методи газотермічного наплення антикорозійних покриттів. Встановлено, що кожен з цих методів має свої переваги та недоліки, що впливають на вибір технології в залежності від

специфіки виробництва та вимог до якості покриття деталей. Газотермічне напилення, в свою чергу, дозволяє використовувати різні форми матеріалів, але вимагає точного контролю процесу.

Автоматизація процесу нанесення антикорозійного покриття з використанням оптичних датчиків та промислових роботів маніпуляторів, значно підвищує точність і надійність виробництва, зменшуючи ризики помилок і підвищуючи якість кінцевого продукту. Впровадження таких технологій є важливим кроком у розвитку сучасних кіберфізичних виробництв, що прагнуть до підвищення конкурентоспроможності та зниження витрат.

У роботі розроблена структурна схема автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом, особливістю якої є врахування в алгоритмічному забезпеченні таких етапів, як робототизована попередня обробка поверхні деталі, робототизоване додаткове напилення (при потребі) і робототизоване керування процесом дефектоскопії.

Розроблено алгоритмічне забезпечення автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом у вигляді потокової блок-схеми, системи логічних рівнянь, графу переходів та програмного автомату алгоритму керування системи автоматизації, яка дозволяє підвищити ефективність керування та реалізувати її гнучкість та оптимізацію.

Проведені дослідження та відокремлення системи логічних рівнянь алгоритмічного забезпечення автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом дозволить в подальшому провести більш детальне моделювання функціонування системи автоматизації з передбаченням більшості можливих проблем, які можуть виникнути.

### Література

1. N. Li та ін. Research Progress of Coating Preparation on Light Alloys in Aviation Field: A Review: MPDI. 2022. Vol. 15, № 23. 20 с.
2. T. ZHANG та ін. Corrosion and aging of organic aviation coatings: Chinese Journal of Aeronautics. 2023. Vol. 36, № 4. 35 с.
3. Калініна Н. Є. та ін. Розробка технології дисперсного модифікування жароміцних нікелевих сплавів для лопаток газотурбінних двигунів: Aerospace technic and technology. 2021. № 3. 53 с.
4. IEC 61508-1:2010. Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems. Geneva: The International Electrotechnical Commission, 2010.
5. IEC 61511-1:2003. Functional Safety – Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector. Geneva: The International Electrotechnical Commission, 2003.
6. Matthews S., James B., Hyland M. High temperature erosion–oxidation of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–NiCr thermal spray coatings under simulated turbine conditions: Corrosion Science. 2013. № 70. 211 с.
7. Білик І. І., Руденький С. О. Технологія нанесення покриттів та їх властивості: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 120 с.

### References

1. N. Li and others. Research Progress of Coating Preparation on Light Alloys in Aviation Field: A Review: MPDI. 2022. Vol. 15, № 23. 20 p.
2. T. ZHANG and others. Corrosion and aging of organic aviation coatings: Chinese Journal of Aeronautics. 2023. Vol. 36, № 4. 35 p.
3. Kalinina N. E. and others. Rozrobka tekhnolohii dyspersnoho modyfikuvannia zharomitsnykh nikelevykh splaviv dlia lopatok hazoturbinykh dvyhuniv: Aerospace technic and technology. 2021. № 3. 53p.
4. IEC 61508-1-2010. Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems. Geneva: The International Electrotechnical Commission, 2010.
5. IEC 61511-1-2003. Functional Safety – Safety Instrumented Systems for the Process Industry Sector. Geneva: The International Electrotechnical Commission, 2003.
6. Matthews S., James B., Hyland M. High temperature erosion–oxidation of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>–NiCr thermal spray coatings under simulated turbine conditions: Corrosion Science. 2013. № 70. 211p.
7. Bilyk I. I., Rudenkyi S. O. Technology of coating application and their properties: Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2023. 120 p.

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Дмитрієв Артем Богданович

Тема: Метод автоматизованого керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт

Спеціальність: 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість сторінок записки 81

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Розроблено автоматизовану систему керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт, яка забезпечує безперебійне нанесення антикорозійного сплаву цинк-кобальт на деталь чи виріб, при попередній обробці деталі за допомогою кислотного розчину і абразивного матеріалу, а також з кінцевою дефектоскопією нанесеного антикорозійного покриття.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі розглянуто сучасні методи покриття деталей антикорозійними сплавами. Розроблено та детально описано об'єкт автоматизації. У другому розділі було побудовано модель надійності АСКПДАСЦК та розраховано показники надійності за різними методами. У третьому розділі розроблено алгоритм роботи та алгоритм функціонування автоматизованої системи керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт, яка забезпечує безперебійне нанесення антикорозійного сплаву цинк-кобальт. У четвертому розділі розроблено цифровий автомат АСКПДАСЦК а також створено граф переходів.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: у роботі недостатньо уваги приділяється кінцевій перевірці нанесеного антикорозійного покриття

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: відсутні

9. Оцінка дипломної роботи: добре (4/5)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи)

Петровський Сергій Степанович, доцент кафедри  
напів'онсервних машин ХНУ

"18" грудня 2024 р.

С.П. (підпис)

Завідувачу кафедри АКІТтаР  
д-ру техн.наук, проф. Мартинюку В.В.

Дмітрієв А.Б.

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курс, групи АКІТРМ-23-1

### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений(а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність плагіату ознайомлений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

02.12.2024

дата



підпис

# Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальне співпадіння з одним документом 5.0%

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Помилки в документах: 11%

|   |          |         |                             |         |
|---|----------|---------|-----------------------------|---------|
| ID: 161046<br>Назва: МКР Метод автоматизованого керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт<br>Додано в БД: 2024-12-18<br>Автора: Артем ДМІТРИЄВ<br>Керівники: Людмила КОРЕЦЬКА<br>Консультанти:<br>Опоненти: | Документ |         | Сумарний збіг по Базі Даних |         |
|   | Символи  | Лексеми | Символи                     | Лексеми |
|   | 74471    | 632     | 4527 (6%)                   | 59 (9%) |

## Джерело плагіату

| ID | Опис | Наявність плагіату в документі |         |
|----|------|--------------------------------|---------|
|    |      | Символи                        | Лексеми |

## Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Артем ДМІТРІСВ

Співавтор:

Назва: МКР Дмитрієв

Науковий керівник: Людмила КОРЕЦЬКА

Підрозділ: Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Коефіцієнт подібності 1:18.6%

Коефіцієнт подібності 2:5.1%

Мікропробіли: 40

Заміна букв: 6

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2024-12-18 17:59:30.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.


Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

Значна частина запозичень припадає на список літератури. В основному тексті роботи відсоток запозичень менший від 25%

2024-12-18

Дата

  
експерт М. В. Родина

**РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ  
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА  
РОБОТОТЕХНІКИ  
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ**

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Метод автоматизованого керування процесом покриття деталей антикорозійним сплавом цинк-кобальт

Автор: Дмитрієв Артем Богданович

Спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма: Освітньо-професійна програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Науковий керівник: Корецька Людмила Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

| № | Висновок   | Позначка про відповідність |
|---|--|----------------------------|
| 1 | Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.   | <b>відповідає</b>          |
| 2 | Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої й електронної версії роботи |                            |
| 3 | Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того, як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.      |                            |
| 4 | Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.   |                            |
| 5 | Інше:  |                            |

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

1) у тексті кваліфікаційної роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках (титулка, відомість документів), у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів тощо, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;

3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 18,64% і адресується до 17 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи


Валерій МАРТИНЮК

Валерій МАРТИНЮК

Людмила КОРЕЦЬКА