

Міністерство освіти і науки України
Львівський національний університет ветеринарної медицини та
біотехнологій ім. С.З.Гжицького
Факультет механіки, енергетики та інформаційних технологій
Кафедра інформаційних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

першого бакалаврського рівня на тему:

**«АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ
ВАКУУМНОГО НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ»**

Виконав: студент групи Акт-42сп
спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-
інтегровані технології та робототехніка»

Гонтар О.Ю.

Керівник роботи:

Запорожцев С.Ю.

ЛЬВІВ-2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Освітній ступінь «Бакалавр» за спеціальністю –
174 – „Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка”

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Завідувач кафедри _____
д.т.н., проф. А.М. Тригуба
“___” _____ 202_ р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студенту
Гонтару Остапу Юрійовичу

1. Тема роботи

«Автоматизація технологічної установки для вакуумного нанесення покриттів»

Керівник роботи: Запорожцев Сергій Юрійович, к.т.н., доцент.

затверджена наказом по університету від “25” лютого 2025 р., № 123/к-с .

2. Строк подання студентом роботи: 10.06.2025 р.

3. Початкові дані до роботи:

Загальні технологічні вимоги та обмеження при розробці автоматики для установок вакуумного нанесення покриттів; ДСТи, СНіПи; документація основних виробників ПЛК. Робоча температура 400 °С; час нагріву 5 хв; вага субстрату 0,5 кг; площа підкладки 0,01 м²; товщина підкладки 20 мм; матеріал підкладки – термометричне скло.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

1.1 Аналіз предметної області

1.2 Принципи вакуумного нанесення покриттів

1.3 Конструктивні особливості вакуумних установок

1.4 Основні вимоги до процесу та його стабільності

2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ’ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Структура об’єкта керування

2.2 Температурний режим підкладок як об’єкт регулювання

2.3 Параметри впливу та вимірювання

2.4 Особливості автоматизації процесу нанесення покриттів

3 РОЗРАХУНКИ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

3.1 Визначення характеристик об’єкта регулювання

3.2 Побудова моделі САР

3.3 Аналіз системи автоматичного регулювання

3.4 Вибір мікроконтролера, датчиків та виконавчих пристроїв

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Аналіз предметної області. Математичні моделі об'єкта керування. Визначення характеристик об'єкта. Модель об'єкта регулювання. Розрахунок параметрів моделі САР. Перевірка моделі. Коригування моделі САР. Вибір технічних засобів реалізації. Висновки.

6. Консультанти з розділів:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1, 2, 3, 5	Запорожцев С.Ю., доцент кафедри інформаційних технологій		
4	Городецький І.М., доцент кафедри управління проектами та безпеки виробництва		

7. Дата видачі завдання ____ 202__ р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Написання першого розділу та означення головних завдань роботи	25.02 - 21.03.25	
2	Виконання другого розділу та формування початкових даних	22.03 - 11.04.25	
3.	Виконання третього розділу та узагальнення отриманих результатів роботи	12.04 - 11.05.25	
4.	Написання розділу: «Охорона праці»	12.05 - 17.05.25	
5.	Вартісне оцінення ефективності пропозицій роботи	18.05 - 23.05.25	
6.	Завершення роботи в цілому	24.05 - 10.06.25	

Студент

(підпис) Гонтар О.Ю.

Керівник роботи

(підпис) Запорожцев С.Ю.

РЕФЕРАТ

УДК 681.5 : 621.793.1

Автоматизація технологічної установки для вакуумного нанесення покриттів

Гонтар О.Ю. Кафедра ІТ – Дубляни, ЛНУВМБ ім.С.З. Гжицького, 2025.

Кваліфікаційна робота: 63 с. текст. част., 14 рис., 11 арк. ілюстраційного матеріалу, 16 джерел.

Об'єкт дослідження – управління процесом вакуумного нанесення покриттів.

Мета роботи – підвищення ефективності процесу вакуумного нанесення покриттів за рахунок системи автоматичного регулювання температурою підкладки.

Проведені аналіз предметної області та розгляд існуючих математичних моделей, які виявили необхідність автоматичної підтримки температури підкладки для стабільного процесу вакуумного нанесення покриттів. По вхідним даним визначені параметри об'єкту регулювання. Побудована модель САР та розраховані її основні параметри. Проведений підбір параметрів регулятора. Запропоновані технічні засоби для реалізації системи, а саме - мікроконтролер, відкалібрований модуль термопари, світлодіодний дисплей та симісторний регулятор потужності. Розроблені міри по охороні праці та навколишнього середовища, а також здійснений розрахунок економічної ефективності системи.

Ключові слова: вакуумне нанесення покриттів, система автоматичного регулювання, об'єкт регулювання, регулятор, мікроконтролер.

Keywords: vacuum coating, automatic adjustment system, adjustment object, regulator, microcontroller.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	8
1.1 Аналіз предметної області	8
1.2 Принципи вакуумного нанесення покриттів	12
1.3 Конструктивні особливості вакуумних установок	16
1.4 Основні вимоги до процесу та його стабільності	20
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ	23
2.1 Структура об'єкта керування	23
2.2 Температурний режим підкладок як об'єкт регулювання	26
2.3 Параметри впливу та вимірювання	30
2.4 Особливості автоматизації процесу нанесення покриттів	33
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКИ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ	36
3.1 Визначення характеристик об'єкта регулювання ..	36
3.2 Побудова моделі САР	42
3.3 Аналіз системи автоматичного регулювання	43
3.4 Вибір мікроконтролера, датчиків та виконавчих пристроїв	46
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	53
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ	57
ВИСНОВКИ	61
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	62

ВСТУП

В сучасному промисловому виробництві покриття функціональних поверхонь відіграють ключову роль у підвищенні надійності, довговічності та специфічних властивостей матеріалів. Особливої актуальності набуває вакуумне нанесення покриттів - технологія, яка дозволяє досягти високої однорідності, чистоти й контрольованої товщини шару при мінімальному впливі сторонніх домішок. Цей метод активно використовується у виробництві електроніки, оптики, інструментів і багатьох інших галузях, де вимоги до якості поверхні та стабільності її властивостей є критичними.

Разом із тим, ефективність вакуумного нанесення покриттів значною мірою залежить від дотримання точного температурного режиму, особливо в зоні підкладки. Навіть незначне відхилення температури від оптимального діапазону може призвести до зміни структури покриття, порушення його адгезії або появи внутрішніх напружень. У зв'язку з цим, однією з найважливіших складових успішного нанесення покриттів є контроль температури підкладки з високою точністю і стабільністю у часі. Вручну досягти такого рівня керування практично неможливо, особливо з урахуванням інерційності системи та зовнішніх збурень, що виникають у процесі.

Ці обставини зумовлюють потребу у впровадженні автоматизованих систем регулювання, які дозволяють підтримувати параметри процесу в заданих межах незалежно від змін у навколишньому середовищі чи варіацій у характеристиках обладнання. Застосування цифрових мікроконтролерів, точних температурних датчиків та адаптивних алгоритмів керування відкриває нові можливості для покращення керованості процесу. Особливо ефективним є впровадження ПД-регуляторів, які дозволяють реалізувати як стабілізаційні, так і слідкуючі режими, забезпечуючи мінімізацію перерегулювань і високий ступінь повторюваності циклів нанесення.

Крім технічної переваги, автоматизація технологічного процесу створює також економічний ефект: зменшується споживання енергії, знижується кількість браку, скорочується час на виконання операцій і підвищується загальна ефективність виробництва. В перспективі автоматизована система може бути інтегрована у ширші виробничі комплекси або «розумні» технологічні лінії, що дозволяє здійснювати віддалений моніторинг, збір даних та оптимізацію параметрів у реальному часі.

Виходячи з цього, розробка системи автоматичного керування температурою підкладки під час вакуумного нанесення покриттів є актуальним інженерним завданням, що має як наукове, так і практичне значення. Мета цієї роботи полягає у створенні математичної та апаратної моделі системи, здатної забезпечити необхідну точність регулювання з урахуванням обмежень реального технологічного середовища. В роботі буде проаналізовано об'єкт керування, визначено структуру системи автоматичного регулювання, здійснено вибір апаратної бази та перевірено ефективність обраного підходу за допомогою моделювання та техніко-економічного аналізу.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

1.1 Аналіз предметної області

Технології вакуумного нанесення покриттів сформувалися на перетині матеріалознавства, фізики твердого тіла та інженерії високого вакууму, і сьогодні вони становлять основу багатьох високотехнологічних виробництв. Ключова ідея полягає в тому, що у середовищі з дуже низьким тиском зменшується ймовірність небажаних зіткнень частинок, отже речовина переходить з джерела до поверхні підкладки у майже невтратному, високочереваному потоці. Саме це робить вакуумне напилення незамінним, коли необхідно сформувати шар із заданою товщиною, структурою та хімічною чистотою. [1-3]

Сучасний стан галузі визначається кількома стратегічними викликами. По-перше, мініатюризація електроніки вимагає все тонших і більш функціональних шарів, де параметри, що вимірюються нанометрами, впливають на характеристики пристрою в цілому. По-друге, зростає попит на екологічно безпечні процеси: традиційні гальванічні методи породжують токсичні відходи, тоді як вакуумне напилення дозволяє уникнути небезпечних електролітів. По-третє, виробники прагнуть знизити енергоспоживання й одночасно підвищити продуктивність, що неможливо без глибокої автоматизації й точного контролю параметрів процесу в реальному часі.

Впродовж останніх двох десятиліть вакуумні технології стали стандартом у виробництві мікросхем і дисплеїв. Магнетронне розпилення забезпечує формування електродів тонкоплівкових транзисторів і контактних шарів у світлодіодних матрицях, а електронно-променеве напилення використовується для осадження діелектричних багатошарових дзеркал у лазерній оптиці. У вирішенні завдань трибології покриття на основі нітридів титану чи алюмінію,

нанесені у вакуумі, подовжують ресурс ріжучого інструменту в кілька разів без додаткових мастильних матеріалів. У медичних імплантатах тонкі оксидні або алмазоподібні вуглецеві плівки виконують роль біосумісних бар'єрів, покращуючи остеоінтеграцію та мінімізуючи ризик відторгнення. Автомобільна та аерокосмічна галузі експлуатують бар'єрні шари з алюмінію або хрому для створення легких, корозійностійких корпусних елементів із декоративним металевим блиском.

Типи покриттів, що формуються у вакуумі, охоплюють провідні, діелектричні, надтверді, оптичні та бар'єрні шари. Кожен клас відповідає специфічній технологічній задачі. Провідні плівки з міді чи срібла забезпечують мінімальний електричний опір у мікро- й наноструктурах, тоді як діелектричні оксиди кремнію або алюмінію виступають ізоляторами у багатошарових структурах пам'яті. Нітрид титану та хромні сплави підвищують твердість і зносостійкість деталей, а багатошарові оптичні фільтри на основі чергування високо- і низькорелієфних матеріалів дозволяють формувати задані спектральні характеристики пропускання й відбивання. Бар'єрні шари витримують дифузію газів чи вологи, що критично для органічної електроніки та харчової упаковки.

Сам процес вакуумного нанесення еволюціонував від простого термічного випаровування до складних гібридних схем. У магнетронних джерелах іонізований газ створює плазмову хмару, що підвищує ефективність і дозволяє осаджувати покриття при знижених температурах підкладки, зберігаючи термочутливі матеріали. Іонно-плазмові системи з імпульсним живленням HPPMS (High Power Pulsed Magnetron Sputtering) генерують високу іонізацію випаровуваного матеріалу, завдяки чому контроль над енергією й напрямком частинок стає ще точнішим. Паралельно розвиваються методи атомної шарової епітаксії, які, хоча формально відносять до хіміко-фізичних процесів, здійснюються у високому вакуумі і забезпечують атомарно гладкі шари з унікальною точністю товщини.

Допоміжні системи також зазнали істотного удосконалення. Сучасні вакуумні насоси на основі магнітної підвішеного ротора практично усувають механічні вібрації, зменшуючи забруднення частинками. Кріогенне осушення парогазової суміші підвищує чистоту середовища і стабільність базового тиску. Інтегрована діагностика оптичної густини плазми й спектроскопічний контроль складу пари дозволяють у режимі реального часу коригувати параметри, підтримуючи однорідність і відтворюваність властивостей нанесених шарів у межах статистичного відхилення менше одного відсотка.

Застосування вакуумного напилення дедалі частіше поєднується із завданнями функціональної інтеграції. Тонкоплівкові сонячні елементи на основі телуриду кадмію чи перовськітних структур вимагають одночасного формування електропровідних та пасивуючих шарів на одній і тій самій лінії. У виробництві OLED-дисплеїв кожен піксель складається з кількох послідовно напилених органічних і металевих шарів. Високоточний контроль товщини, температури та швидкості росту критичний, оскільки навіть незначні флуктуації погіршують яскравість, однорідність і термін служби пристроїв. Саме тому розвиток методів керування покриттям у вакуумному середовищі став однією з ключових науково-технічних тенденцій останніх років.

Автоматизація процесу вакуумного нанесення покриттів є не просто вимогою підвищення ефективності — вона перетворилася на визначальний фактор якості продукції. Традиційне керування, засноване на попередньо заданих режимах, не здатне враховувати миттєві відхилення в динаміці процесу: зміни температури джерела, флуктуації тиску чи нестабільність напруги на магнетроні. Навіть незначне відхилення параметрів призводить до варіацій товщини шару, появи дефектів, зменшення адгезії або зміни функціональних властивостей покриття. З огляду на це, системи керування мають бути гнучкими, адаптивними й здатними в режимі реального часу відслідковувати, аналізувати й коригувати перебіг процесу.

Одним із центральних елементів таких систем є регулятор температури. Вакуумне напилення часто передбачає нагрів підкладки до високих температур

— у випадку оксидних або нітридних плівок вони можуть перевищувати 400 °С. Температура визначає швидкість дифузії, ступінь кристалічності, межу розділу фаз, і врешті — мікроструктуру плівки. Відповідно, будь-яке коливання температури безпосередньо впливає на кінцеві властивості шару: оптичну прозорість, електропровідність, твердість або корозійну стійкість. Зазвичай у промислових установках використовують PID-регулятори, що дозволяють враховувати як поточне відхилення, так і його похідні та інтеграл. Однак для процесів із швидкими перехідними та сильною інерційністю (як у масивних скляних або керамічних підкладках) традиційні налаштування часто не забезпечують бажаної точності й швидкості стабілізації.

Особливістю таких систем є також мультифізичність об'єкта керування. Під час нагріву змінюється теплопровідність і теплоємність матеріалу, відбувається перерозподіл температури по об'єму підкладки, а в умовах вакууму роль випромінювального теплообміну переважає над конвекційним. Крім того, у самій камері відбувається складна взаємодія між плазмою, іонізованими частинками та поверхнею підкладки. Наявність високочастотних коливань, обумовлених магнетронною генерацією, може викликати паразитні індуктовані струми в нагрівальних елементах або термopарах. Це вимагає не лише фізичного екранування та ізоляції контурів, але й фільтрації вимірювальних сигналів та цифрової компенсації перешкод.

Автоматизована система, що керує процесом нанесення покриття, повинна включати як сенсорний рівень, так і контур керування в замкненому циклі. Сенсори фіксують температуру підкладки (інфрачервоні або термopари), тиск у камері (іонізаційні та п'єзорезистивні датчики), потік газів (масовий витратомір), склад середовища (мас-спектрометр або оптичні сенсори), а також електричні параметри джерел живлення. Ці дані передаються у центральний контролер, зазвичай реалізований на основі ПЛК, цифрового сигналового процесора або вбудованої системи на базі ARM-архітектури.

У перспективі, сучасні установки дедалі частіше інтегруються в загальнофабричні мережі, де процес нанесення покриттів виступає як окрема

операція в ланцюгу Smart Manufacturing. Протоколи типу OPC UA або EtherCAT забезпечують уніфікований обмін даними між контролерами, панелями оператора та хмарними сервісами для аналітики. Це відкриває можливості для дистанційного моніторингу, автоматичного створення звітів про параметри серій, прогнозування відмов і адаптивного перепрограмування режимів у залежності від конкретної партії виробів.

Усе це вимагає розробки інтелектуальних систем керування, які можуть не лише реагувати на відхилення, а й передбачати їх. Поєднання класичного PID-регулювання з методами штучного інтелекту, наприклад, нейромережевими моделями, дозволяє реалізовувати адаптивне керування, що враховує історію процесу, тип підкладки, попередні режими та поточний стан устаткування. Саме такий підхід стає необхідною умовою забезпечення стабільної якості покриття, зниження енергоспоживання й розширення функціональності вакуумних систем.

Таким чином, автоматизація вакуумного нанесення покриттів — це багаторівнева задача, яка включає точне керування нагрівом, стабілізацію динамічних параметрів, інтеграцію з цифровими протоколами обміну даними та розробку адаптивних стратегій регулювання. У наступному розділі буде проаналізовано, як ці вимоги реалізуються в конкретній установці, та на основі яких технічних рішень можлива їх оптимізація.

1.2 Принципи вакуумного нанесення покриттів

Процес вакуумного нанесення покриттів ґрунтується на керованому перенесенні речовини з твердого або рідкого джерела у вигляді атомів, молекул або іонів у напрямку до підкладки, де відбувається осадження з утворенням суцільного шару. [4-5] Це перенесення здійснюється у середовищі з глибоким вакуумом, зазвичай з тиском у межах 10^{-2} – 10^{-6} Па, що мінімізує взаємодію частинок з молекулами залишкового газу та забезпечує прямолінійний рух осаджуваних частинок. Вакуум також запобігає забрудненню поверхні підкладки й дозволяє точно контролювати умови формування плівки.

Фізична суть процесу передбачає три основні стадії: генерація потоку речовини з джерела, транспортування у вакуумному просторі та конденсація на охолодженій поверхні підкладки. Під час випаровування або розпилення атоми та молекули джерела набувають енергії, достатньої для подолання потенційного бар'єру зв'язку у твердому тілі й переходять у газоподібний стан. Цей стан не є рівноважним, що обумовлює інтенсивний потік частинок у напрямку від джерела.

У разі термічного випаровування джерело нагрівається до температури, за якої швидкість сублімації або випаровування речовини досягає потрібного рівня. Нагрівання здійснюється електричними резистивними нагрівачами, лінійками або човниками з тугоплавких металів (вольфраму, молібдену), розміщених у безпосередньому контакті з матеріалом покриття. Кінетична енергія випарених частинок у цьому методі є порівняно низькою (порядку 0,1–0,3 еВ), що призводить до меншої щільності плівок і потребує нагріву підкладки для поліпшення адгезії та реорганізації структури шару. Однак термічне випаровування залишається простим та широко застосовуваним способом, особливо для нанесення металів з низькою температурою плавлення, таких як алюміній, срібло, золото або мідь.

Більш енергоємним і контрольованим методом є електронно-променеве випаровування. У цьому випадку пучок електронів, прискорений напругою кілька десятків кіловольт, фокусується на поверхні мішені, викликаючи локальний нагрів до температур, що значно перевищують температури плавлення. Завдяки високій щільності енергії (до 10^6 Вт/см²), можливе випаровування надтвердих і тугоплавких матеріалів (наприклад, оксидів, карбідів, боридів), а також зональне плавлення без забруднення кріпильних елементів або нагріву всієї камери. Перевагою цього методу є також можливість керування швидкістю напилення у широких межах та фокусування потоку на задану ділянку. Електронно-променеве випаровування активно використовується в оптиці, мікроелектроніці та виробництві жаростійких покриттів.

Інший поширений метод — магнетронне розпорошення — реалізується за допомогою імпульсного або постійного електричного розряду в низькому вакуумі з додаванням робочого газу, зазвичай аргону. Речовина покриття, яка виступає у вигляді катода (мішені), під дією йонів аргону руйнується внаслідок зіткнень, а вибиті атоми спрямовуються до підкладки. Для підвищення ефективності розряду та зниження робочого тиску використовуються постійні магнітні поля, які утримують електрони поблизу мішені, створюючи магнетрон. У результаті щільність плазми зростає, а процес розпилення відбувається при зниженій енергії електричного поля, що дозволяє уникати надмірного нагріву підкладки.

Магнетронне розпилення є надзвичайно універсальним: воно дозволяє наносити не лише метали, але й оксиди, нітриди, фториди або композитні шари, з можливістю контролю стехіометрії шляхом введення активного газу (O_2 , N_2) у розряд. Висока кінетична енергія частинок (до 10 еВ) сприяє формуванню щільних, аморфних або нанокристалічних плівок із високим ступенем адгезії навіть при кімнатній температурі підкладки.

Ключовим етапом у більшості методів вакуумного нанесення є процес іонізації, який суттєво змінює характер взаємодії частинок як між собою, так і з поверхнею підкладки. Іонізація може відбуватись як за рахунок взаємодії з електронами у плазмі, так і під дією зовнішнього електричного чи магнітного поля. Іонізовані частинки мають значно більшу кінетичну енергію, що дозволяє глибше проникати у поверхневі шари підкладки та активніше впливати на мікроструктуру покриття.

У процесі магнетронного розпилення або дугового випаровування велика частина речовини досягає стану плазми. В цьому випадку формування шару вже не є результатом простого конденсаційного осадження, як у випадку звичайного термічного випаровування. Іони речовини, пришвидшені електричним полем, активно імплантуються у поверхню підкладки, забезпечуючи міцне зчеплення та ініціюючи ростові процеси з утворенням щільного, структурованого шару. Це

дозволяє отримувати плівки з високими механічними, оптичними або бар'єрними властивостями.

Сам транспорт частинок у вакуумному середовищі відбувається безтурбулентно, оскільки середній вільний пробіг частинок у таких умовах значно перевищує розміри робочої камери. Це означає, що більшість атомів та молекул досягають підкладки без зіткнень, зберігаючи свою напрямленість, енергію та навіть заряд. Завдяки цьому забезпечується можливість точної локалізації нанесення, створення масок, шаблонів і нанесення мультишарових структур з високою просторовою роздільною здатністю.

Останній етап — конденсація — є критичним для формування структури та властивостей плівки. Частинка, яка досягла поверхні підкладки, може або адсорбуватися та залишитися у складі шару, або десорбуватися, повернувшись у газову фазу. Вірогідність осадження залежить від температури підкладки, енергії частинки та її природи. Для того, щоб забезпечити необхідну щільність і однорідність шару, часто використовують підігрів підкладки до температури 100–300 °С, а іноді й вище. Це стимулює поверхневу міграцію атомів, що сприяє зростанню кристалів і заповненню дефектів.

Крім температури, важливим параметром є швидкість нанесення. Занадто висока швидкість може призвести до порушення структури шару або внутрішніх напружень, тоді як надто низька — до перевипаровування, особливо у випадку летких речовин. Висока щільність енергії плазми чи електронного пучка дозволяє точно регулювати ці параметри, змінюючи товщину шару з точністю до нанометрів.

Таким чином, принципи вакуумного нанесення покриттів базуються на детальному розумінні взаємодії енергії, речовини та вакуумного середовища. Різні методи — від простого термічного випаровування до високотехнологічного плазмового розпилення — дозволяють адаптувати процес до вимог конкретного застосування, будь то тонкі електропровідні шари, захисні оксидні покриття чи складні нанокompозити.

1.3 Конструктивні особливості вакуумних установок

Технологічні установки для вакуумного нанесення покриттів (рис.1.1) — це складні технічні комплекси, що поєднують у собі фізику високого вакууму, термодинаміку, електродинаміку та автоматизоване керування. Кожен елемент такої системи виконує важливу функцію в загальному ланцюжку процесу осадження плівки, забезпечуючи точність, стабільність і повторюваність результатів. [6-7] Незважаючи на значну варіативність конструкцій, можна виокремити ключові функціональні блоки, які є спільними для більшості установок (рис.1.2).



Рисунок 1.1 - Установка для вакуумного нанесення покриттів

Центральним елементом будь-якої вакуумної системи є робоча камера. Це герметичний об'єм, усередині якого створюються й підтримуються задані умови вакууму, температури, газового складу та електричних полів. Камера виготовляється з матеріалів, що мають низький коефіцієнт газовиділення — зазвичай з нержавіючої сталі або алюмінієвих сплавів — і має внутрішню

поверхню, що піддається ретельній обробці, аби мінімізувати сорбцію молекул. Усередині розміщуються підкладки, джерела напilenня, термодатчики, зондові системи та комунікації для подачі струму, охолодження або контролю.

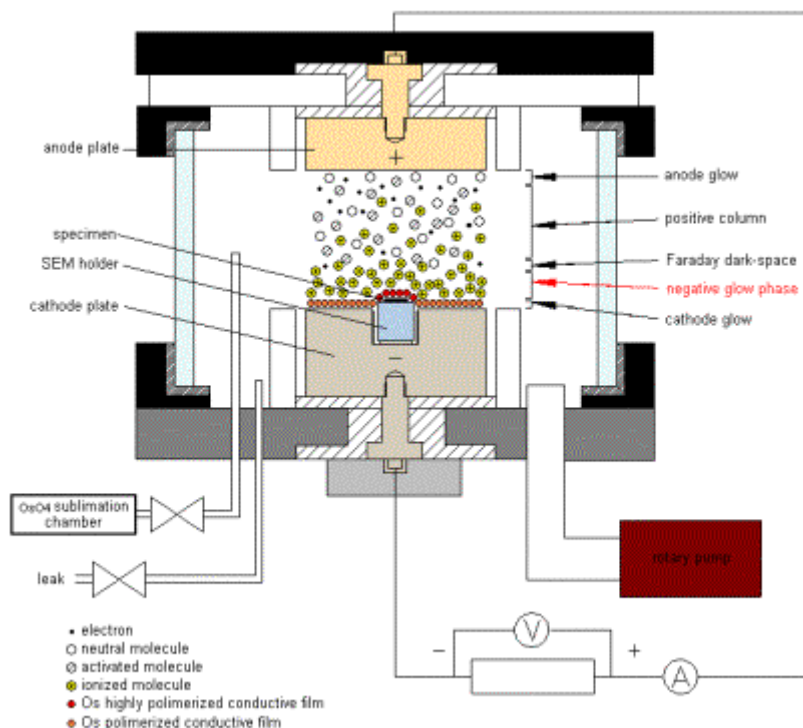


Рисунок 1.2 - Схема устаткування для вакуумного нанесення покриттів

Ключова вимога до робочої камери — стабільне підтримання вакууму. Рівень залишкового тиску безпосередньо впливає на траєкторію руху частинок, чистоту осадженого шару та ефективність іонізації. Досягнення глибокого вакууму забезпечується каскадним застосуванням вакуумних насосів — від попереднього до основного.

На першому етапі використовується форвакуумний насос (ротаційний або мембранний), який знижує тиск до рівня приблизно 10^{-2} Па, що вже дозволяє включити високовакуумний насос — дифузійний, турбомолекулярний або іонний. Кінцевий тиск у діапазоні 10^{-4} – 10^{-7} Па забезпечує майже вільний рух атомів від джерела до підкладки, без зіткнень із молекулами залишкових газів.

Наступним важливим елементом є джерело покриття. Його конструкція залежить від вибраного методу нанесення. У випадку термічного випаровування

це — резистивно нагрітий тигель або човник, через який пропускається електричний струм. Джерело випаровує матеріал, зазвичай у вигляді гранул або дроту, до температури плавлення. Для електронно-променевої установки використовується концентрований пучок електронів, що фокусуються на матеріалі й локально розплавляють його. У випадку магнетронного розпилення джерелом є мішень з матеріалу покриття, яка піддається бомбардуванню іонами інертного газу, що вибивають з її поверхні атоми у вакуум.

Фізика кожного джерела формує не лише саму динаміку переносу речовини, а й мікроструктуру покриття. Наприклад, термічне випаровування дає слабоіонізовану фазу, придатну для нанесення на чутливі підкладки, тоді як магнетронне розпилення створює високоіонізоване середовище, що забезпечує високу щільність покриття.

Установки часто оснащуються системою нагріву підкладок, яка відіграє критичну роль у формуванні якісного шару. Підвищена температура сприяє дифузії атомів по поверхні, зменшенню дефектів росту, вирівнюванню шару, зміні морфології. Залежно від призначення установки, використовуються резистивні нагрівачі, ІЧ-випромінювачі або навіть лазерні джерела. Температурний режим повинен підтримуватись стабільно, із точністю до одиниць градусів Цельсія, що потребує зворотного зв'язку від термодатчиків і відповідного керування потужністю.

У сучасних вакуумних установках важливу роль відіграють системи контролю, які реалізують не лише моніторинг поточних параметрів процесу, але й активно впливають на його перебіг через механізми автоматичного регулювання. Основні контрольовані параметри включають тиск у камері, температуру підкладок, швидкість напылення, потужність джерел іонізації, а також склад газової атмосфери у випадку реактивного напылення.

Контроль тиску забезпечується вакуумметрами різних типів — п'єзоелектричними, термопарними, іонізаційними, що охоплюють різні діапазони: від атмосферного до надглибокого вакууму. Дані з цих сенсорів надходять до керуючого контролера, який у режимі реального часу регулює

роботу насосів або ж інтерфейсу подачі газу, зокрема у випадку, коли потрібна підтримка плазми за допомогою інертних або реакційних газів (аргон, кисень, азот).

Температурний контроль здійснюється за допомогою термопар, інфрачервоних пірометрів або вбудованих у підкладкотримачі датчиків. На основі їхніх показників працює система ПД-регулювання потужності нагрівачів. Це забезпечує необхідну термостабільність, яка критично важлива при нанесенні функціональних плівок, особливо оптичних, діелектричних або напівпровідникових, де коливання температури можуть призвести до зміни показника заломлення чи товщини шару.

Швидкість напилення контролюється кварцовими моніторами, які визначають масу осадженого матеріалу на контрольну пластинку за резонансною частотою коливань. Ці дані можуть використовуватись у замкнутому контурі керування, що дає змогу динамічно змінювати параметри джерела випаровування або потужність іонного розпилення.

Окрім цього, в установку інтегруються електронні системи керування, які реалізують автоматичну послідовність дій: вакуумування, підігрів, запуск джерел, контроль тривалості та завершення процесу. Зазвичай управління здійснюється через ПЛК або вбудовану обчислювальну систему із сенсорним інтерфейсом або ПК-орієнтованим програмним забезпеченням. Такі комплекси дозволяють реалізовувати рецептурне управління, повторюваність процесів і збирання технологічних даних для подальшого аналізу.

Ще один критично важливий конструктивний вузол — це система підведення енергії та охолодження. Для стабільної роботи джерел напилення, особливо електронно-променевих або магнетронних, необхідне ефективне тепловідведення, яке досягається за допомогою рідинного або повітряного охолодження. Енергетичне живлення реалізується високостабільними джерелами струму та напруги, що мають захист від перенавантаження, імпульсних завад і викликів високовольтної пробою у вакуумі.

Загалом, ефективна взаємодія всіх компонентів установки — від механічної конструкції до програмного керування — визначає стабільність і якість процесу нанесення покриття.

1.4 Основні вимоги до процесу та його стабільності

Стабільність процесу вакуумного нанесення покриттів є визначальним фактором у досягненні високої якості кінцевого продукту. Усі технологічні параметри, зокрема температура підкладки, тиск у вакуумній камері, швидкість нанесення та енергетичні характеристики джерела випаровування чи розпилення, мають бути не просто контрольованими, а підтримуваними в жорстко заданих межах. Найменші коливання цих величин можуть спричинити відхилення в товщині покриття, зміну його фізичних чи хімічних властивостей, порушення адгезії або формування дефектів кристалічної структури. [8]

Одним із найчутливіших параметрів є температура підкладки. У процесі нанесення тонких плівок температура визначає не лише рівень зчеплення покриття з основою, а й перебіг міжатомної дифузії, формування зерен, фазовий стан матеріалу. Занадто висока температура може викликати термічне розкладання складних матеріалів або надмірну дифузію, в той час як занижена температура часто призводить до формування аморфних шарів або появи пустот у структурі плівки.

Залежність швидкості дифузії D від температури можна описати за допомогою рівняння Арреніуса:

$$D = D_0 \exp \left(-\frac{E_a}{kT} \right)$$

де D_0 — префактор (характерна швидкість), E_a — енергія активації, k — стала Больцмана, T — абсолютна температура в Кельвінах.

Це рівняння показує, що невелика зміна температури в області робочих значень може призвести до експоненційного зростання або зниження швидкості процесів, що прямо впливає на структуру покриття.

Іншим критичним параметром є тиск. Рівень вакууму не лише забезпечує чистоту середовища, але й визначає тип взаємодії частинок у процесі переносу матеріалу. При надто високому тиску зростає ймовірність зіткнень парових частинок з молекулами газу, що знижує спрямованість потоку і призводить до нерівномірного нанесення. При дуже низькому тиску, навпаки, можуть виникати складнощі з утриманням плазми або зменшується ефективність іонного активування. Зокрема, в процесі магнетронного розпорошення для стабільного розряду необхідно підтримувати тиск у межах $10^{-2} \dots 10^{-3}$ Па, що створює баланс між частотою зіткнень і ефективністю іонізації.

Швидкість нанесення шару також має бути стабільною. У випадку зміни потужності джерела або умов випаровування, товщина плівки буде змінюватися, що є особливо критичним для оптичних і функціональних покриттів, де точність у межах ± 1 нм може мати вирішальне значення. Крім того, нерівномірність нанесення може спричинити залишкові механічні напруження в плівці, що призведе до її розтріскування або відшарування.

Підтримка стабільності параметрів реалізується через автоматизовані системи керування, які використовують як зворотний зв'язок (наприклад, сигнал від кварцового монітора), так і математичні моделі процесу для передбачення його динаміки. У більш складних випадках — з використанням адаптивних регуляторів або навіть нейромережевих моделей.

Оцінка стабільності процесу нанесення покриттів включає не лише контроль моментальних значень параметрів, а й аналіз їхніх коливань у часі. Навіть при дотриманні середнього значення температури чи тиску, наявність високочастотних флуктуацій може спричинити суттєві відхилення в структурі плівки. Наприклад, періодичні коливання температури підкладки призводять до формування шаруватих структур зі змінними фізичними властивостями, що може бути як бажаним (у випадку інженерованих багатошарових покриттів), так і критичним дефектом — залежно від цільового призначення виробу.

Для запобігання подібним ситуаціям застосовуються інерційні фільтри сигналів, цифрові моделі прогнозування стану об'єкта, а також введення

критичних діапазонів допустимих відхилень. Під час реального процесу всі вимірювані параметри записуються та аналізуються в режимі реального часу. Наприклад, система може сигналізувати про «дрейф» температури, якщо середній приріст перевищує $0,5^{\circ}\text{C}$ за хвилину, навіть якщо загальне значення ще перебуває в допустимих межах.

Особливої уваги потребує точність вимірювання. Помилка датчика температури $\pm 2^{\circ}\text{C}$ для більшості металевих покриттів може не мати критичного впливу, але в умовах нанесення діелектричних або композитних структур вона вже буде суттєвою. Аналогічно, для вимірювання товщини плівки використовують кварцові монітори, точність яких залежить від калібрування та стабільності температури самого датчика. У випадку автоматизованих процесів, де використовується керування за зворотним зв'язком, помилкові виміри можуть призводити до некоректного регулювання потужності випаровування, що своєю чергою викликає порушення рівномірності осадження.

Ще один важливий аспект стабільності — це відтворюваність. Навіть якщо процес виконується в тих самих умовах, використання іншої партії матеріалу, відхилення у калібруванні обладнання чи знос джерел випаровування можуть змінити результат. Тому важливим є не лише підтримка параметрів у заданих межах, а й документування кожного циклу, включно з технічними характеристиками застосованих компонентів. У передових виробництвах формується повний цифровий «паспорт покриття», який містить графіки температур, тиску, потужності, швидкості осадження, іонного струму, а також часові мітки запуску/завершення кожного етапу.

Таким чином, точне та стабільне керування технологічними параметрами є ключем до успішного функціонування вакуумних установок нанесення покриттів. Це вимагає комплексного підходу, що включає як точні сенсорні системи, так і високоточні регулятори та алгоритми контролю.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Структура об'єкта керування

Розгляд вакуумної установки як об'єкта керування передбачає її декомпозицію на функціональні підсистеми, кожна з яких виконує специфічну роль у забезпеченні заданих параметрів технологічного процесу. [9-10] Такий підхід дозволяє не лише краще зрозуміти логіку взаємодії між окремими елементами системи, а й формалізувати її в термінах автоматичного керування — через визначення вхідних, вихідних і проміжних величин, об'єктів впливу, контурів зворотного зв'язку тощо.

З точки зору керування, технологічну установку можна подати у вигляді структурної моделі, яка включає чотири основні рівні: джерела енергії, виконавчі механізми, сенсорну систему та центральний модуль керування. В основі цієї структури лежить поняття потоків: енергетичних (теплових, електричних), масових (матеріалів покриття), інформаційних (сигналів зворотного зв'язку). На перетині цих потоків і розташовані ключові вузли — наприклад, випарювач, який є одночасно споживачем електричної потужності, джерелом парової фази матеріалу покриття та об'єктом температурного контролю.

Кожна функціональна частина установки має своє місце у загальній ієрархії керування. Так, вакуумна камера виконує не лише роль середовища, у якому відбувається процес, але і є частиною об'єкта керування, оскільки тиск усередині неї безпосередньо впливає на ефективність випаровування і конденсації. Контроль тиску досягається через регулювання роботи вакуумних насосів, що підключаються або відключаються на основі показників датчиків тиску, зв'язаних із контролером нижнього рівня.

Особливої уваги заслуговує система нагріву підкладок. Вона зазвичай містить електронагрівачі, що керуються за допомогою широтно-імпульсної

модуляції (ШІМ) або тиристорних регуляторів. Вхідним сигналом для цього контуру є задане значення температури (референс), а зворотний зв'язок формується на основі показів термопар або терморезисторів, розташованих поблизу підкладки. Центральний ПД-регулятор підтримує температуру в межах допустимих відхилень, мінімізуючи помилки за інтегральним критерієм.

Окремо слід згадати підсистему керування джерелом покриття. У випадку термічного випаровування вона включає у себе джерело живлення випарника, систему контролю потужності та схеми безпеки. Сигнал керування тут визначає не просто включення або виключення джерела, а безперервне регулювання поданої енергії з метою підтримки постійної швидкості випаровування, що, своєю чергою, забезпечує стабільну товщину плівки на підкладці.

Інформаційна модель такої системи передбачає наявність кількох каналів зворотного зв'язку. Найважливіші з них — це температурний зворотний зв'язок з підкладки, сигнал від вакуумметра, а також зчитування показів товщиноміра покриття. Усі ці сигнали аналізуються в реальному часі та порівнюються із заданими значеннями. Якщо виявлено відхилення, центральний контролер коригує відповідні сигнали керування.

Загалом, технологічна установка для вакуумного нанесення покриттів у вигляді керованої системи може бути описана диференціальними рівняннями або передатними функціями для окремих контурів керування, наприклад:

$$T_p(t) = f(Q_{in}(t), h(t))$$

де T_p — температура підкладки, Q_{in} — потужність нагрівача, h — коефіцієнт тепловіддачі в умовах вакууму. Такий формалізований підхід дозволяє перейти до аналізу стійкості, оптимізації параметрів регуляторів, побудови моделей у середовищах MATLAB/Simulink або аналогічних платформах.

Окрім безпосередньої дії керування, важливою складовою системи є механізм синхронізації між підсистемами, який забезпечує узгоджене функціонування всіх компонентів технологічної установки. Це означає, що всі

дії виконавчих механізмів мають відбуватись у строго визначеній послідовності, з урахуванням фізичних обмежень та логіки технологічного процесу. Наприклад, запуск джерела випаровування без досягнення заданого вакууму є неприпустимим — це може призвести до окиснення матеріалу, нерівномірного осадження або аварійної ситуації. Отже, на рівні логіки керування впроваджуються протоколи взаємозалежного запуску та блокування, які реалізуються у вигляді послідовностей подій або матриць дозволів.

Центральне місце в такій структурі займає контролер або промисловий мікропроцесорний пристрій, який координує сигнали керування, обробляє інформацію з датчиків і генерує відповідні реакції у реальному часі. В умовах сучасної автоматизації та Industry 4.0 цей контролер може бути інтегрований у більшу мережу (через протоколи Modbus, OPC-UA тощо), забезпечуючи збирання статистичних даних, хмарне зберігання та віддалений моніторинг.

Важливо зазначити, що структура керування має модульну побудову, що дозволяє легко адаптувати систему до різних конфігурацій обладнання. Наприклад, у разі зміни типу джерела покриття (з термічного на електронно-променевого), змінюється лише один модуль керування, без потреби повної перебудови всієї системи. Аналогічно, система нагріву може бути доповнена або замінена — наприклад, на індукційний або інфрачервоний нагрів — за збереження загальної логіки керування.

Окремої уваги потребує взаємодія об'єкта керування з оператором, яка реалізується через інтерфейс людина-машина (НМІ). Це програмно-апаратний засіб, що дозволяє задавати параметри, запускати технологічні етапи, а також візуалізувати стан системи у вигляді графіків, індикаторів і повідомлень. Важливо, що система має надавати не лише поточні значення, але й попередження у разі наближення до критичних режимів. Така функція досягається за рахунок вбудованої логіки аналізу трендів та обчислення похідних значень (наприклад, швидкість зміни температури).

Структура об'єкта керування може бути представлена у вигляді системи динамічних рівнянь, що описують зміну основних параметрів у часі.

Наприклад, для температурного контуру:

$$C \frac{dT_p(t)}{dt} = Q_{in}(t) - h(T_p(t) - T_{env}),$$

де C — теплоємність підкладки, $T_p(t)$ — температура підкладки, T_{env} — температура середовища в камері, $Q_{in}(t)$ — миттєве теплопостачання, h — ефективний коефіцієнт тепловіддачі.

Це рівняння описує тепловий баланс і дозволяє побудувати передатну функцію між вхідним сигналом (теплова потужність) і вихідною змінною (температура). Такий опис необхідний для розробки алгоритмів керування, підбору параметрів регулятора та імітаційного моделювання.

Подібним чином можна описати й динаміку зміни тиску у вакуумній камері. Якщо позначити $P(t)$ як тиск у камері, Q_{out} — ефективність відкачування, а Q_{in} — інтенсивність газовиділення, то рівняння має вигляд:

$$V \frac{dP(t)}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t),$$

де V — об'єм камери. Це дозволяє описати поведінку системи у часі та визначити, за яких умов вона може вийти на стабільний рівень вакууму.

Таким чином, розгляд об'єкта керування в технології нанесення покриттів як формалізованої багатоконтурної системи дозволяє не лише ефективно керувати її станом, а й створити основу для впровадження адаптивних та інтелектуальних стратегій. Моделювання, ідентифікація параметрів та узгоджене керування підсистемами стають необхідними передумовами для досягнення високої точності, енергоефективності та повторюваності процесів.

2.2 Температурний режим підкладок як об'єкт регулювання

Процес нагріву підкладок у вакуумній установці є одним із ключових елементів керованої системи, оскільки температурний режим безпосередньо впливає на адгезію покриття, мікроструктуру шару, його механічні та оптичні властивості. [11] З точки зору автоматизації, цей процес характеризується

високими вимогами до точності, стабільності та швидкодії, що обумовлено як фізичними властивостями матеріалу підкладки, так і особливостями теплопередачі у вакуумі.

Фізична модель нагріву підкладки ґрунтується на розв'язанні рівняння нестационарної теплопровідності:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q(t)$$

де ρ — густина матеріалу підкладки, c — її питома теплоємність, λ — коефіцієнт теплопровідності, T — температура в даній точці, $q(t)$ — щільність теплового потоку з боку нагрівача.

У вакуумі процес теплопередачі значною мірою визначається променевою складовою, оскільки теплопровідність повітря практично нульова. Тому основним механізмом передачі енергії до підкладки є теплове випромінювання:

$$q = \varepsilon \sigma (T_{\text{нагр}}^4 - T_{\text{підкл}}^4)$$

де ε — коефіцієнт випромінювання поверхні, σ — стала Стефана-Больцмана, $T_{\text{нагр}}$ — температура нагрівального елемента, $T_{\text{підкл}}$ — температура підкладки. Така нелінійна залежність вимагає особливої уваги при моделюванні динаміки системи та синтезі регуляторів.

Визначальним параметром динамічної поведінки є теплова інерційність, яка проявляється у вигляді затримки нагріву і характерного часу виходу на сталий температурний режим. Інерційність залежить від маси підкладки, її теплоємності, відстані до джерела тепла та потужності нагрівача. Для підкладки з масою 0,5 кг і питомою теплоємністю, скажімо, 800 Дж/(кг·К), кількість енергії, необхідна для нагріву на 100°C, становитиме:

$$Q = mc\Delta T = 0.5 \cdot 800 \cdot 100 = 40000 \text{ Дж}$$

З урахуванням того, що потужність нагрівача обмежена, наприклад, до 150 Вт, час нагріву до цільової температури в таких умовах становитиме:

$$t = \frac{Q}{P} = \frac{40000}{150} \approx 267 \text{ с}$$

Цей приклад свідчить про те, що процес нагріву має помітну часову стійкість і не може бути змінений миттєво, що накладає обмеження на швидкість регулювання.

У системі керування температурою підкладок важливу роль відіграє тип зворотного зв'язку. Найпоширенішим є температурний зворотний зв'язок, реалізований за допомогою термопар або терморезисторів, інтегрованих у або поблизу підкладки. Цей сигнал надходить на контролер, який порівнює його із заданим значенням і формує управляючий вплив (наприклад, через ШІМ на тиристор або симістор, що керує потужністю нагрівача).

Типова динамічна модель такої системи може бути представлена у вигляді аперіодичної ланки першого порядку з запізненням:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-sT_d}$$

де K — коефіцієнт підсилення, τ — постійна часу, T_d — час запізнення. Наявність запізнення вимагає підвищеної обережності при налаштуванні регулятора, особливо при застосуванні ПІД-контролера, оскільки занадто агресивні параметри можуть призвести до автоколивань або нестабільності.

З погляду системного аналізу, процес нагріву підкладок належить до об'єктів із розподіленими параметрами, однак для цілей керування його часто апроксимують сконцентрованими моделями з параметрами, приведеними до середнього температурного стану. Найпростіше лінеаризоване уявлення дає змогу застосовувати методи класичного автоматичного регулювання.

Оскільки під час технологічного циклу температура повинна змінюватись за певною траєкторією (наприклад, плавний розігрів до 400°C , утримання на плато, потім зниження), у системі керування передбачаються режими роботи з переходом між ними. Це зумовлює потребу не лише у стабілізації температури, а й у відстеженні бажаного профілю зміни температури в часі.

Реалізація такого сценарію зазвичай ґрунтується на використанні цифрового контролера, у якому задається температурна траєкторія у вигляді таблиці або функціонального виразу. Наприклад, профіль може бути представлений як послідовність відрізків:

- лінійний розігрів $T(t)=T_0+rt$, де r — швидкість підйому температури;
- плато $T(t)=T_{\text{макс}}$, упродовж часу $t_{\text{утрим}}$;
- охолодження природне або контрольоване зниження температури до початкового рівня.

Контролер, порівнюючи поточну температуру з заданим значенням профілю, формує управляючу дію на нагрівач. У разі виявлення відхилення може спрацьовувати не лише ПІД-регулятор, а й коригувальна логіка, що враховує, наприклад, швидкість зміни температури, щоб уникнути перегріву або теплового удару.

Особливу складність для системи становлять зовнішні збурення та структурні зміни — наприклад, коливання температури навколишніх елементів установки, які впливають на тепловий баланс, або осідання шару покриття, яке змінює оптичні та теплові властивості поверхні підкладки. Це означає, що модель об'єкта є слабо інваріантною, і традиційні регулятори не завжди можуть забезпечити бажану точність.

У таких випадках доцільним є застосування адаптивного керування або методів зі спостерігачем стану, які дозволяють уточнювати параметри моделі в процесі роботи установки. Наприклад, метод ідентифікації поточної теплової сталої часу або ефективного теплового опору в режимі реального часу дозволяє перебудовувати регулятор без зупинки процесу.

Ще одним аспектом, що визначає вибір алгоритму керування, є вимоги до стабільності температури. Для більшості вакуумних процесів флуктуації температури підкладки в межах $\pm 1^\circ\text{C}$ можуть призводити до змін товщини шару, градієнтів напруження або небажаних фазових перетворень у покритті. Саме тому в системах керування реалізуються надточні методи згладжування сигналу, подвійне вимірювання з усередненням, а іноді — інфрачервоне дистанційне зондування температури для зменшення локальних похибок.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що температурний режим підкладки у вакуумній установці — це чутливий і критичний об'єкт регулювання, який вимагає:

- наявності точного датчика зворотного зв'язку;
- адекватної математичної моделі;
- гнучкого регулятора, здатного працювати як у стабілізаційному, так і у слідкуючому режимі;
- алгоритмів, стійких до змін параметрів об'єкта та зовнішніх збурень.

2.3 Параметри впливу та вимірювання

Для забезпечення високоточного керування технологічним процесом вакуумного нанесення покриттів критично важливо ідентифікувати як параметри впливу на систему, так і ті змінні, які підлягають безперервному моніторингу. Це дозволяє забезпечити зворотний зв'язок, реалізувати адаптивні алгоритми і виявляти відхилення на ранніх етапах. Підхід до аналізу параметрів базується на розмежуванні їх на вхідні (керуючі) та вихідні (контрольовані або результативні).

До основних вхідних параметрів системи належить, насамперед, потужність, що подається на нагрівачі підкладки. У типових випадках це електричний струм, що регулюється через імпульсні або аналогові керовані схеми, і визначає швидкість підйому температури. Вплив цього параметра має виражений динамічний характер, оскільки теплова інерція підкладки зумовлює

затримку між керуючим сигналом і досягненням заданої температури. Саме тому цей канал входу є центральним у побудові моделей керованої системи.

Іншим суттєвим параметром є положення підкладки відносно джерела покриття. Геометрична конфігурація впливає на рівномірність розподілу частинок речовини, що осаджується. Відстань до мішені, кут нахилу підкладки, швидкість її переміщення або обертання визначають густину потоку частинок на одиницю площі, а відтак — і швидкість осадження. Таким чином, положення також може розглядатись як вхідний параметр, що керується відповідними приводами (механічними чи магнітними).

Серед вихідних параметрів, які слугують джерелом зворотного зв'язку, ключовим є температура підкладки. Її вимірювання здійснюється або за допомогою термопар, або через оптичні пірометри, які дозволяють уникнути контакту з поверхнею. У виборі сенсорів особливу роль відіграє швидкодія та точність: навіть короточасні перегріву можуть спричинити зміну фазового стану покриття чи його мікроструктури. Формально температура є спостережуваною змінною, що використовується для реалізації замкненого регулювання.

Іншим важливим контрольованим параметром є швидкість нанесення покриття, яка залежить не лише від енергетичних характеристик джерела осадження (наприклад, сили магнетронного розряду), а й від умов у вакуумній камері (тиску, складу залишкових газів). Вона визначається побічно — через контроль товщини шару в часі, часто із застосуванням датчиків кварцового резонатора, які реєструють зміну маси через зміну частоти коливань. Такий метод дає змогу в реальному часі відстежувати темп процесу і, при потребі, коригувати його.

Обробка вимірювальних сигналів у системі автоматизації є ключовим етапом між збором даних та прийняттям керуючих рішень. Після отримання аналогового сигналу від сенсора, наприклад термопари, необхідно здійснити аналого-цифрове перетворення (ADC) з достатньою розрядністю (зазвичай не менше 12–16 біт) для забезпечення прийнятної точності. Наприклад, при

діапазоні вимірювання температури 0–600°C роздільність 16 біт дозволяє досягти чутливості близько 0,01°C, що є критичним для точного контролю термічного режиму.

Важливо також застосовувати фільтрацію сигналів, щоб компенсувати електромагнітні завади, імпульсні наводки та шумові флуктуації. У більшості випадків застосовуються цифрові фільтри низьких частот (наприклад, згладжувальні фільтри ковзного середнього або фільтри Калмана у складніших випадках), які зберігають динаміку, але зменшують випадкові коливання. Це особливо важливо для стабільного функціонування регулятора температури, де навіть поодинокі шумові пульсації можуть викликати помилкову реакцію виконавчого механізму.

Щодо вимірювання товщини покриття через кварцові резонатори, потрібно враховувати, що сигнал від резонатора є височастотним (кілька МГц), і перетворюється у зміщення частоти, яке корелює з масою нанесеного матеріалу. Використання точних частотомірів або спеціалізованих інтегральних схем дозволяє досягти мікронної точності. Однак такі системи є чутливими до температурних коливань, тому часто додатково стабілізуються або калібруються з урахуванням термокомпенсації.

Усі ці сигнали потрапляють у контролер або мікропроцесорну систему, де обчислюється відхилення фактичного значення від заданого, а також генеруються відповідні команди керування. Паралельно здійснюється логування даних, що дозволяє аналізувати процес постфактум або виявляти довгострокові тренди.

Загалом можна зробити висновок, що точність, швидкодія та шумостійкість вимірювального тракту визначають не лише якість керування, але й кінцеву якість самого покриття. Невідповідність між реальним та вимірним значенням будь-якого з параметрів може спричинити порушення рівномірності осадження, перегрів або недогрів підкладки, а отже – зниження експлуатаційних характеристик виробу.

2.4 Особливості автоматизації процесу нанесення покриттів

Автоматизація процесу вакуумного нанесення покриттів, зокрема термостатування підкладок, вимагає комплексного підходу до побудови системи керування, яка повинна одночасно відповідати кільком критичним вимогам: точності, стабільності, швидкодії та відмовостійкості. На відміну від звичайних терморегуляційних систем, у вакуумних технологіях навіть незначне відхилення температури від оптимального діапазону може призвести до зміни структури плівки, зниження адгезії або неоднорідності шару по площині.

Особливої уваги потребує температурне керування, яке має бути здатним реагувати не лише на зміну зовнішніх умов (наприклад, коливання напруги живлення або охолодження), але й на внутрішню динаміку процесу: зміну теплоємності підкладки, зміну ефективного теплообміну внаслідок осадження покриття, нелінійність потужності нагрівального елемента. Така система не може бути реалізована за допомогою простого двопозиційного або пропорційного регулювання — необхідно залучати більш гнучкі методи, здатні працювати з об'єктом, що має інерційні, нелінійні й змінні характеристики.

Найбільш розповсюдженим у таких випадках є ПД-регулятор, структура якого дозволяє компенсувати основні динамічні особливості об'єкта. Його математичний вираз у неперервній формі має вигляд:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

де: $u(t)$ — вихідний керуючий сигнал, $e(t) = T_{\text{зад}} - T_{\text{вим}}$ — похибка між заданою і виміряною температурою, K_p , K_i , K_d — коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференціальної дії відповідно.

Пропорційна складова забезпечує базовий вплив, інтегральна усуває сталу похибку, а диференціальна — згладжує швидкі зміни і запобігає перерегулюванню. Проте вибір параметрів K_p , K_i , K_d є нетривіальним завданням,

особливо якщо об'єкт має змінну інерційність (наприклад, через зміну маси підкладок або ступінь вакууму, що впливає на тепловідвід).

У реальних умовах промислових установок часто спостерігаються параметричні нестабільності. Наприклад, в момент початку наплення температура нагрівального елемента може залишатись сталою, але температура самої підкладки почне змінюватись внаслідок зміни радіаційного теплообміну. У цьому випадку класичний ПІД-регулятор може або "запізнюватися", або викликати коливання температури. Це підштовхує до використання адаптивних алгоритмів, здатних в реальному часі змінювати свої параметри відповідно до змін в поведінці об'єкта.

У більш складних випадках, особливо коли точність і стабільність процесу мають критичне значення, застосовуються адаптивні або самоналаштовувані регулятори, які не мають сталих значень коефіцієнтів K_p , K_i , K_d , а змінюють їх у залежності від поточного стану об'єкта або його ідентифікації в режимі реального часу. Такі системи використовують модель об'єкта (наприклад, у вигляді передавальної функції або моделі станів), яка постійно оновлюється на основі вимірювань. Це дозволяє ефективно працювати в умовах невизначеностей та змінних характеристик процесу.

Прикладом може слугувати метод мінімізації інтегрального критерію якості, де мета полягає в тому, щоб зменшити інтеграл від модуля похибки (або квадрату похибки) за весь період регулювання:

$$J = \int_0^T |e(t)| dt \quad \text{або} \quad J = \int_0^T e^2(t) dt$$

Адаптивний алгоритм мінімізує цей функціонал шляхом підлаштування параметрів регулятора. У цьому випадку система керування поводить себе не лише як стабілізатор, але й як система, що навчається на ходу.

Також існують підходи, засновані на розмитій логіці (fuzzy logic control), які можуть бути застосовані у випадках, коли неможливо точно описати модель

об'єкта або коли процес занадто складний для аналітичного опису. У системах вакуумного нанесення покриттів розмиті регулятори дозволяють врахувати експертні знання, наприклад, такі як: «якщо температура починає повільно знижуватись, але потужність ще висока, слід зменшити потужність повільніше, ніж зазвичай». Подібні правила неможливо описати формулами, але вони можуть бути реалізовані як логічні правила у fuzzy-контролері.

Крім того, важливим завданням автоматизації є забезпечення синхронізації між різними підсистемами. Наприклад, температура підкладки повинна бути узгоджена з тиском у камері та активністю джерела покриття. Надто ранній початок напилення може призвести до конденсації матеріалу на недостатньо нагрітій поверхні, що порушить цілісність шару. Тому часто реалізується ієрархічна система керування, де верхній рівень координує стан усієї установки, а нижчі рівні забезпечують регулювання окремих параметрів.

Таким чином, система керування процесом нанесення покриттів повинна володіти не лише стандартними функціями підтримки параметрів у заданому діапазоні, а й забезпечувати адаптацію до змінних умов, здатність до навчання і координацію дій усіх елементів установки. Тільки за таких умов можливо досягнути стабільності, відтворюваності та високої якості плівкових покриттів, що є ключовими для вакуумних технологій.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНКИ ТА ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Для моделювання роботи регулятора температури та визначення його заданих параметрів використовуються такі вихідні дані: початкова робоча температура; кінцева робоча температура; час нагрівання; вагові та розмірні параметри та матеріал підкладки; критерій типу та якості регулятора; тип теплового датчика.

Необхідно скласти модель регулятора, отримати і проаналізувати характеристику прискорення при переході від початкової температури до кінцевої.

Щоб реалізувати систему, необхідно буде в подальшому зробити ще деякі кроки. Зокрема, обрати відповідний мікроконтролер, який забезпечить необхідну швидкість обробки сигналів та достатню кількість входів-виходів для підключення всіх компонентів. Також треба буде обрати датчики та виконавчі механізми. Мікроконтролер має забезпечити стабільну роботу системи в умовах високих вимог до точності та швидкодії.

3.1 Визначення характеристик об'єкта регулювання

Для виконання розрахунків нам знадобляться вхідні дані:

- початкова температура $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$;
- робоча температура $\theta_1 = 400^\circ\text{C}$;
- час нагріву, $t = 5 \text{ хв} = 300 \text{ с}$;
- вага субстрату $m = 0,5 \text{ кг}$;
- площа підкладки $S = 0,01 \text{ м}^2$;
- товщина підкладки $d = 20 \text{ мм}$;
- матеріал підкладки – термометричне скло.

Об'єктом регулювання є субстрати (підкладки), температуру яких необхідно стабілізувати. Для цього в конструкцію вводиться регулюючий орган

- нагрівальний елемент. Його потужність можна розрахувати наступним чином. Кількість тепла, необхідна для нагріву

$$Q = m C (\theta_1 - \theta_0),$$

де m – маса тіла, що нагрівається, кг; C – питома теплоємність кДж/(кг×К), ($C = 0,67$ кДж/(кг×К) для термометричного скла); θ_1 , θ_0 – кінцева і початкова температури нагріву, К.

$$Q = 0,5 \cdot 0,67 \cdot (400 - 20) = 127,3 \text{ кДж.}$$

Будь-який технологічний тепловий процес супроводжується втратами, потужність яких можна врахувати за формулою:

$$P_{\text{втр}} = P_{\text{пит}} S,$$

де $P_{\text{пит}}$ – питомі втрати на одиницю площі, Вт/м², в розрахунках можна прийняти $P_{\text{пит}} = 1,1$ кВт/м²; S – площа поверхні втрат, м².

$$P_{\text{втр}} = 1,1 \cdot 0,01 = 0,011 \text{ кВт.}$$

Таким чином, необхідну сумарну потужність нагрівачів можна розрахувати за формулою:

$$P = k_3 (Q/t + P_{\text{втр}}),$$

де k_3 – коефіцієнт, що враховує запас потужності (можна враховувати $k_3 = 1,2 \dots 1,3$); Q – загальна кількість тепла для забезпечення теплового процесу, Дж; t – час теплового процесу, с; $P_{\text{втр}}$ – сумарна втрата потужності, Вт.

$$P = 1,2 \cdot (127,3/300 + 0,011) = 0,52 \text{ кВт.}$$

Обраний нагрівальний елемент повинен мати потужність не менше проектної. Для цього підбирається відповідний діаметр нагрівача і розраховується необхідна довжина, яка потім округляється в більшу сторону. Після остаточного підбору розмірів нагрівального елемента проводиться розрахунок його фактичної потужності.

Візьмемо нагрівальний елемент діаметром 8,5 мм з оболонкою з вуглецевої сталі. Необхідна довжина $l = P/P_0 = 0,52/0,53 = 0,98 \text{ м} \approx 1 \text{ м}$. Обрана потужність $P_b = 1 \cdot 0,53 = 0,53 \text{ кВт}$.

Після підбору нагрівального елемента обчислюються постійні часу і коефіцієнт передачі об'єкта. Об'єкт, що складається з електронагрівача і підкладок, має дві часові константи:

1) постійна часу нагрівального елемента:

$$T_1 = \frac{mC}{K_\tau S},$$

де m – маса ніхромової спіралі, кг, $m = m_0 l$ (l – довжина електронагрівача); C – питома теплоємність ніхрому; S – площа поверхні електронагрівача; K_τ – коефіцієнт теплопередачі, який в даному випадку може бути визначений як величина, обернена термічному опору електронагрівача ($K_\tau = 1/R$).

Термічний опір дорівнює сумі термічного опору піщаного шару всередині електронагрівача і термічного опору його оболонки:

$$R = R_n + R_{об} = \frac{\delta_n}{\lambda_n} + \frac{\delta_{об}}{\lambda_{об}},$$

де δ та λ – відповідно товщина і коефіцієнт теплопровідності піску або сталевій оболонки. При розрахунку враховується товщина оболонки $\delta_{об} = 0,5 \text{ мм}$,

товщина піщаного шару $\delta_{\text{п}} = r_{\text{т}} - 0,5 = 4,25 - 0,5 = 3,75$ мм ($r_{\text{т}}$ – радіус нагрівального елементу); $\lambda_{\text{п}} = 0,34$ Вт/(м×К), $\lambda_{\text{об}} = 47$ Вт/(м×К).

Термічний опір піщаного шару всередині електронагрівача і оболонки:

$$R_n = \frac{3,75 \cdot 10^{-3}}{0,34} = 0,011 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}, \quad R_{\text{об}} = \frac{0,5 \cdot 10^{-3}}{47} = 0,00011 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}.$$

Маса ніхромової спіралі

$$m = 0,2 \cdot 1 = 0,2 \text{ кг}.$$

Площа поверхні електронагрівача

$$S = 3,14 \cdot 0,0085 = 0,027 \text{ м}^2$$

Коефіцієнт теплопередачі

$$K_T = \frac{1}{0,011 + 0,00011} = 90,82 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}.$$

Постійна часу нагрівального елементу:

$$T_1 = \frac{0,2 \cdot 450}{90,82 \cdot 0,27} = 36,7 \text{ с}.$$

2) таким же чином визначається постійна часу субстратів:

$$T_2 = \frac{m \cdot C}{K_T \cdot S},$$

де m – маса субстратів, кг; C – питома теплоємність матеріалу підкладки; S – площа поверхні субстратів; $K_{\text{т}}$ – коефіцієнт теплопередачі, який в даному випадку може бути визначений як обернений термічному опору, тобто $K_{\text{т}} = \lambda/\delta$

Коефіцієнт теплопередачі субстратів

$$K_T = \frac{0,96}{0,02} = 48 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Постійна часу підкладки:

$$T_2 = \frac{0,5 \cdot 670}{48 \cdot 0,01} = 697,9 \text{ с}.$$

Коефіцієнт передачі об'єкта регулювання дорівнює відношенню вихідного значення до вхідного в стаціонарному режимі. Так як тепловіддача нагрівального елементу контролюється значенням напруги живлення, то напруга є вхідною величиною і в стаціонарному режимі при максимальній температурі дорівнює номінальній напрузі $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$. Так як нагрівальний елемент підбирається з запасом потужності, то максимальна різниця температур при нагріві становить:

$$\Delta\theta = (\theta_1 - \theta_0) \frac{P_o + P_{\text{emp}}}{\frac{Q}{t} + P_{\text{emp}}},$$

де θ_1 и θ_0 – кінцева і початкова температура нагріву; P_o – обрана потужність електронагрівача; Q – загальна кількість тепла для забезпечення теплового процесу, Дж; t – час теплового процесу, с; $P_{\text{втр}}$ – втрата потужності, Вт.

$$\Delta\theta = (450 - 70) \frac{0,53 + 0,011}{\frac{127,3}{300} + 0,011} = 472,2 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Коефіцієнт передачі об'єкта регулювання

$$K_o = \frac{\Delta\theta}{U_{\text{ном}}} = \frac{472,2}{220} = 2,36 \text{ }^\circ\text{C/В}.$$

Передавальна функція об'єкта регулювання

$$W_o = \frac{K_o}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} = \frac{2,36}{(36,7 s + 1)(697,9 s + 1)}$$

Об'єкт є двоємнісним (тобто має дві часові константи). Для подальшої роботи зручно представляти його у вигляді одноємнісної ланки з затримкою з передавальною функцією.

$$W_o(s) = \frac{K_o}{T_1 s + 1} e^{-s\tau}.$$

Для апроксимації передавальної функції об'єкта по одноємнісній ланці із затримкою побудуємо перехідну характеристику в програмі VisSim. [12] Так як $T_1 \ll T_2$, то можна прийняти $\tau = T_1$, то $T_0 = T_2$. Передавальна функція

$$W_o(s) = \frac{2,36}{697,9 s + 1} e^{-36,7 s}.$$

Моделювання двоємнісного та спрощеного об'єкта представлено на рис.3.1.

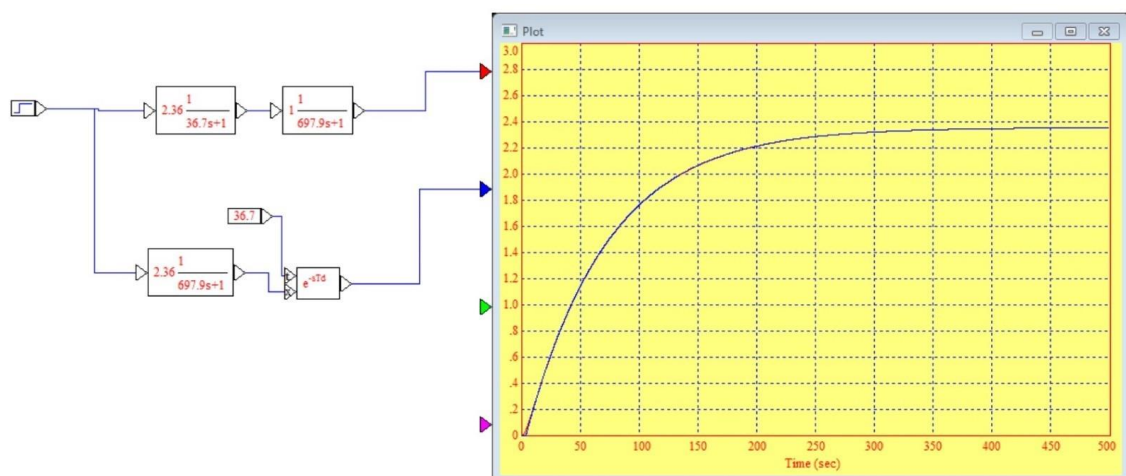


Рисунок 3.1 - Модель об'єкта регулювання

Таким чином, перший етап можна вважати виконаним, переходимо до побудови моделі системи автоматичного регулювання (САР).

3.2 Побудова моделі САР

Структура САР показана нижче (рис. 3.2).

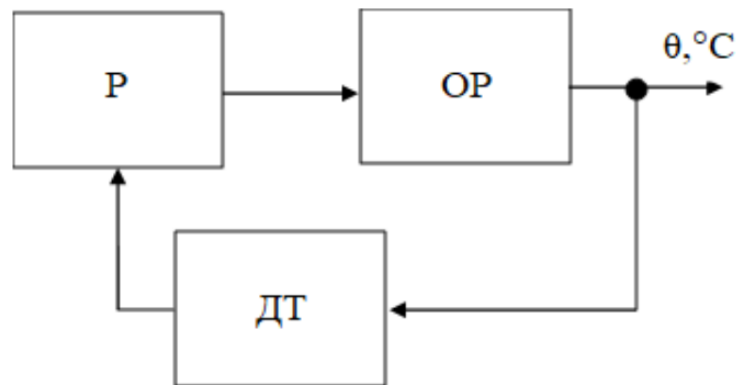


Рисунок 3.2 - Структурна схема САР

Тут Р - регулятор (контролер); ОР – об'єкт регулювання (нагрівальний елемент і підкладки); ДТ – датчик температури (чутливий елемент).

Для системи з раніше розглянутим об'єктом задається ПІД-контролер і параметр якості $\sigma = 0\%$. Датчик температури – термопара.

Налаштування регулятора:

$$K_p = \frac{0,95}{\frac{K_o \tau}{T_o}} ; T_i = 2,4\tau ; T_n = 0,4\tau$$

$$K_p = \frac{0,95}{2,36 \cdot 36,7 : 697,9} = 7,65 ; T_i = 2,4 \cdot 36,7 = 88,08 \text{ с} ; T_n = 0,4 \cdot 36,7 = 14,68 \text{ с}.$$

Передавальна функція ПІД-регулятора:

$$W_p(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_n \cdot s \right) = 7,65 \left(1 + \frac{1}{88,08 s} + 14,68 s \right)$$

Для роботи при максимальній температурі 450 °С використовуємо термопару ТХК9312-00. Її постійна часу (теплова інерція) становить 20 с. Коефіцієнт передачі визначається калібрувальною характеристикою. При температурі 70°С термоЕРС становить 4,728 мВ, при 450°С – 35,888 мВ. Коефіцієнт передачі:

$$k_{\partial m} = \frac{\Delta U}{\Delta \theta} = \frac{35,888 - 4,728}{450 - 70} = 0,082 \text{ мВ/}^{\circ}\text{С}.$$

Передавальна функція термодатчика

$$W_{\partial m}(s) = \frac{0,082}{20s + 1}.$$

Коефіцієнт передачі регулятора $K_p = 7,65/0,082 = 93,29$.

Структурна схема САР показана на рис. 3.3.

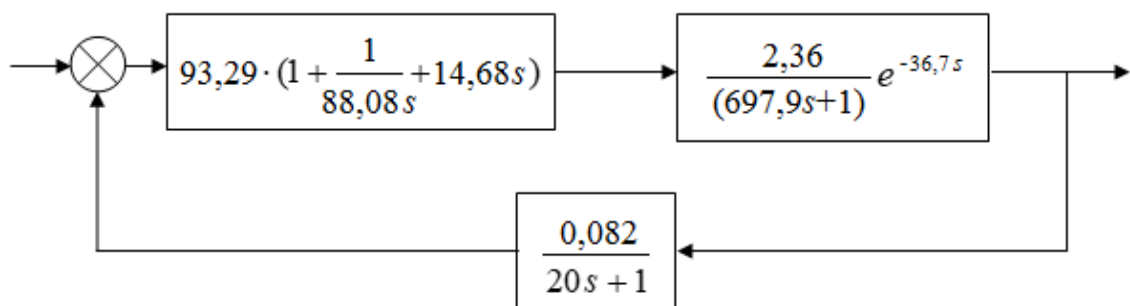


Рисунок 3.3 – Структурна схема САР після розрахунків

3.3 Аналіз системи автоматичного регулювання

Для аналізу побудуємо модель системи за допомогою програми VisSim (рис. 3.4).

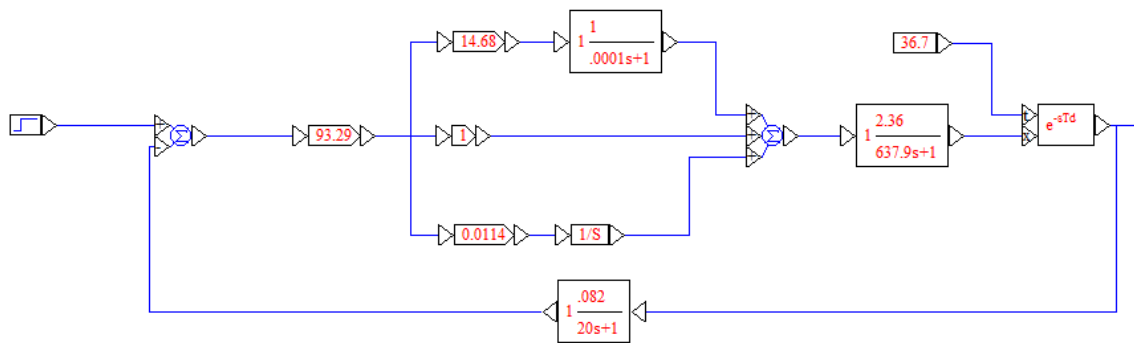


Рисунок 3.4 - Нескоригована модель САР

Якщо спробуємо змодельовати для цієї системи перехідний процес, то отримаємо нестабільність. Система з отриманими параметрами виявляється нестійкою, що добре видно з перехідного процесу (рис. 3.5).

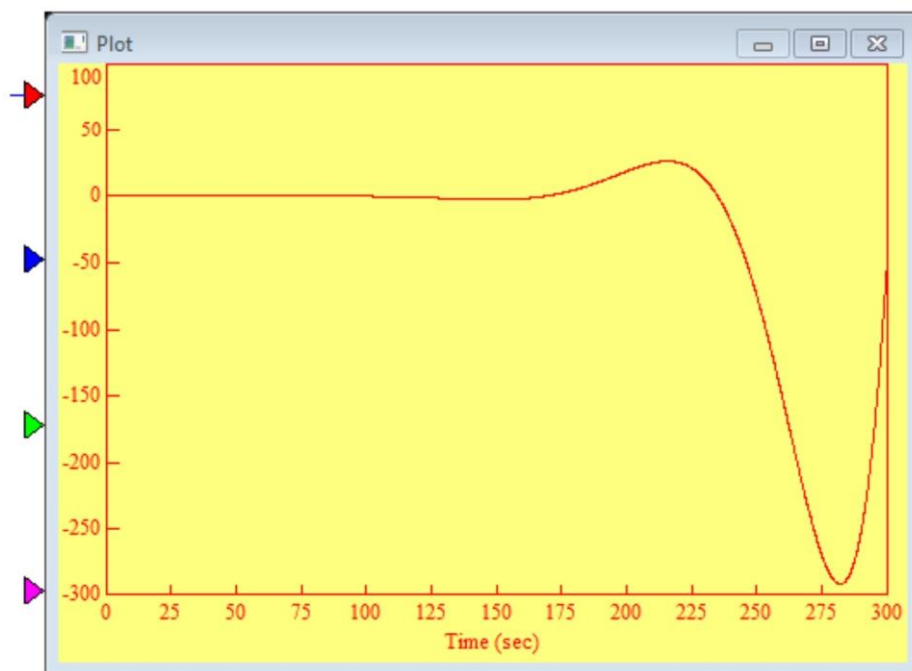


Рисунок 3.5 - Графік нестійкого перехідного процесу

Нестабільність обумовлена наявністю в ланцюзі зворотного зв'язку елемента з великою постійною часу (термопар). Тому необхідно коригувати критерій якості σ (перерегулювання). Ступінь стійкості системи оцінюється за допомогою перерегулювання. У промислових системах спостерігається

завищення рівня $\sigma < 20 \dots 30\%$. У нашому випадку (за умовою) завищена регуляція $\sigma = 0\%$.

Підібрати параметри регулятора можна різними методами. Ми обрали найпростіший - метод підбору. Отримали стійкий перехідний процес (рис. 3.6).

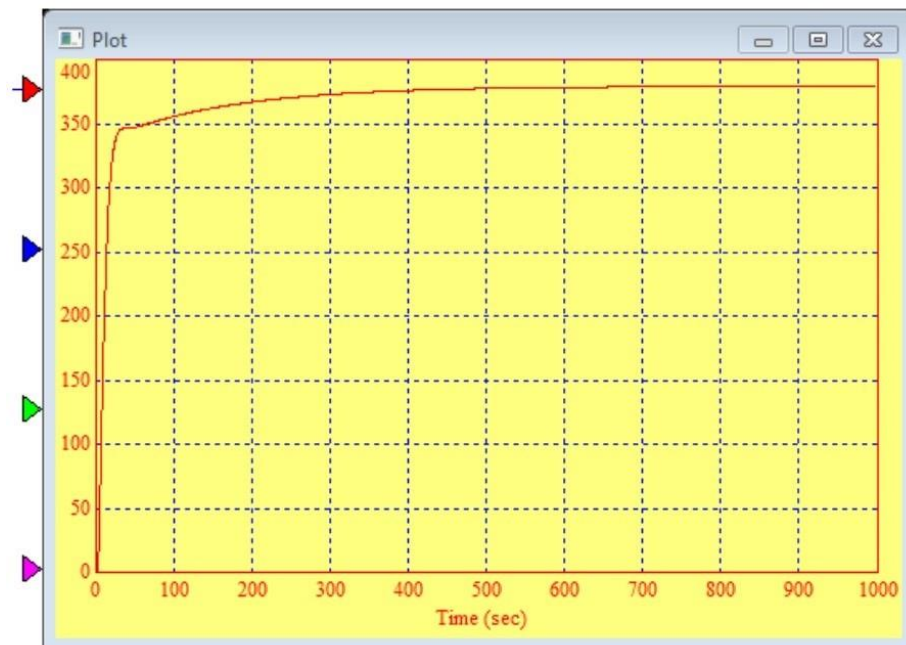


Рисунок 3.6 - Графік стійкого перехідного процесу

Система з новим коефіцієнтом передачі показана на рис. 3.7.

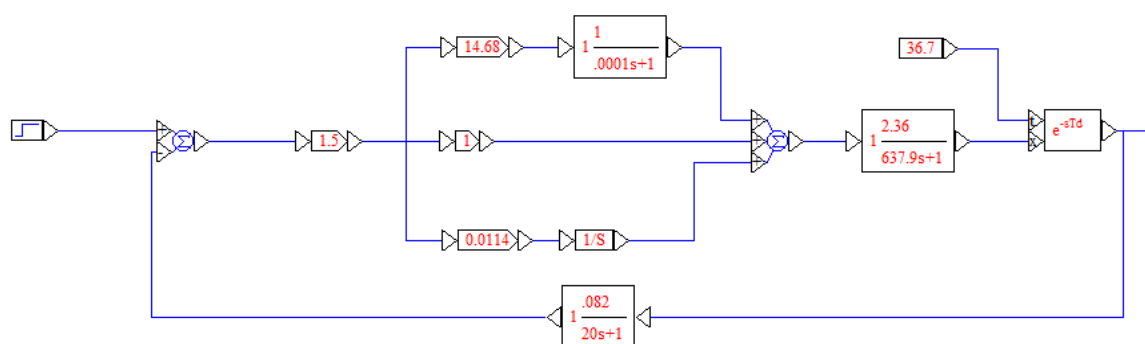


Рисунок 3.7 - Модель САР з коригованими параметрами

Загальний коефіцієнт передачі САР дорівнює $1/k_{oc} = 1/k_{дт} = 12,2$. Відповідно, для отримання $\Delta\theta = 380^\circ\text{C}$ на вхід повинен бути відправлений

сигнал з амплітудою $380/12,2 = 31,15$. Розглянемо параметри перехідного процесу (рис.3.8).



Рисунок 3.8 - Параметри перехідного процесу

Бачимо, що створена система цілком відповідає попереднім вимогам. Час регулювання складає 125 с або приблизно 2 хвилини з врахуванням відхилення 5%. Перерегулювання відсутнє. Параметри розраховані на нагрів об'єкта регулювання на $\Delta\theta = 380\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таким чином, моделювання виконано, створена система автоматичного регулювання з заданими параметрами. Моделювання роботи такої системи показує задовільні результати.

3.4 Вибір мікроконтролера, датчиків та виконавчих пристроїв

Вибір елементної бази для побудови автоматизованої системи регулювання температури у вакуумній установці має вирішальне значення для надійності, точності та стабільності роботи всієї системи. На цьому етапі розробки вже визначено основну структуру САР, передбачено реалізацію ПД-регулювання з цифровим контролером, входною температурною інформацією та

керуванням електронагрівальним елементом. Вибір відповідних апаратних компонентів базується як на технічних вимогах, так і на критеріях доступності та зручності реалізації на практиці. Було обрано мікроконтролер GD32F103C8T6, термопару типу K з підсилювачем MAX31855, симісторний регулятор потужності PULSER-X/D із зовнішнім керуванням 0-10В та OLED-дисплей на контролері SSD1306.

З огляду на логіку реалізації керування, мікроконтролер виступає центральною ланкою, що з'єднує вхідні й вихідні сигнали. Для виконання математичних операцій ПІД-регулятора, а також для опрацювання цифрового сигналу температурного датчика, потрібна обчислювальна потужність, надійна реалізація таймерів, а також простий і доступний інтерфейс розробки. Вибраний варіант — GD32F103C8T6 — є повністю сумісним із поширеним STM32F103C8T6 [13], має ту саму архітектуру ARM Cortex-M3, але виготовляється китайською компанією GigaDevice і часто застосовується як доступний замінник оригінальної STM32-серії. Приклад застосування процесора в мікроконтролері STM32 Nucleo наведено на рис.3.9.

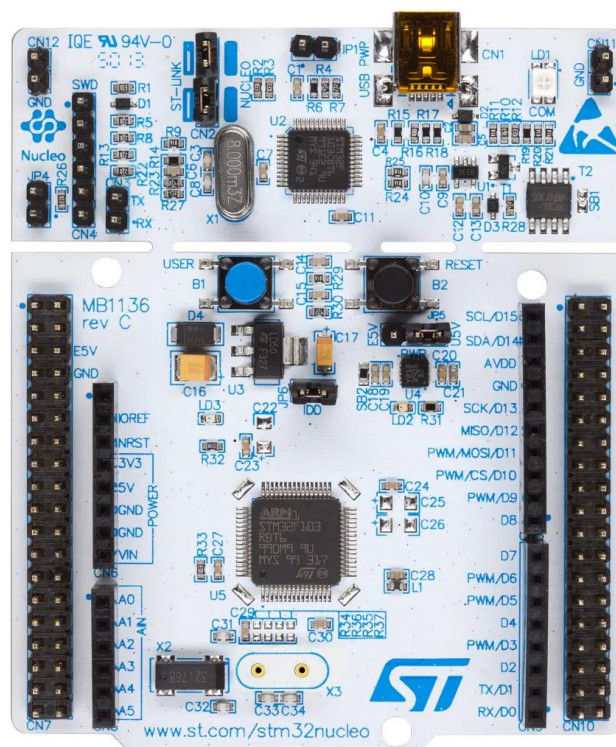


Рисунок 3.9 - Мікроконтролер серії STM32 Nucleo

Цей мікроконтролер забезпечує всі необхідні ресурси для реалізації системи: 32-бітне ядро з частотою до 72 МГц, 64 КБ флеш-пам'яті для коду, 20 КБ оперативної пам'яті для зберігання проміжних змінних, а також апаратні модулі SPI, таймери з ШІМ-виходами, кілька каналів АЦП і достатню кількість цифрових портів. У проєкті планується використовувати SPI для зв'язку з температурним модулем, а також цифрові виходи для керування реле та дисплеєм. Сумісність із Arduino IDE та STM32CubeMX спрощує реалізацію програмної частини, що є додатковою перевагою для прискорення розробки.

Вимірювання температури в системі з високим тепловим навантаженням потребує точного, надійного та стабільного сенсора. Вибір зупинився на термопарі типу К, яка є промисловим стандартом для температурного діапазону до 1000 °С, добре адаптована до вакуумних умов, має високу механічну стійкість і низький рівень інерційності. У складі системи використовується попередньо відкалібрований модуль MAX31855 — цифровий підсилювач термоЕРС із компенсацією холодного спаю (рис.3.10). Цей модуль дозволяє уникнути складностей аналогової обробки сигналу та передає дані у зручному цифровому форматі безпосередньо до мікроконтролера. [14]

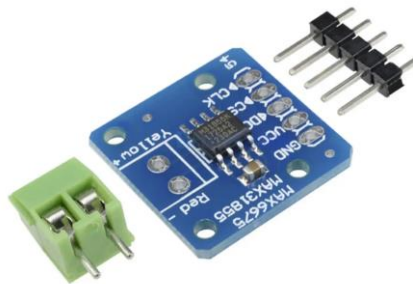


Рисунок 3.10 - Відкалібрований модуль MAX31855 термопар

На відміну від аналогових схем із підсилювачем на операційному підсилювачі, використання MAX31855 значно підвищує стабільність і лінійність вимірювання. Це особливо важливо у застосуваннях, де температура підкладки може змінюватись швидко і де допустимий діапазон похибки не перевищує ± 1 —

2 °C. Завдяки цифровій обробці температурний сигнал практично не спотворюється завадою живлення або паразитною ємністю, а передача даних здійснюється через SPI-інтерфейс, що дозволяє легко інтегрувати його в програмну структуру регулятора.

Симісторний регулятор потужності Pulser-X/D від шведської компанії REGIN (рис.3.11) є надійним і компактним рішенням для автоматичного керування електронагрівачами в промислових системах, зокрема в установках вакуумного покриття. Цей пристрій забезпечує точне регулювання потужності на основі зовнішнього аналогового сигналу 0–10 В, що дозволяє легко інтегрувати його в системи з ПД-регуляторами або мікроконтролерами. Монтаж на DIN-рейку спрощує встановлення в стандартні електрощити. [15]



Рисунок 3.11 - Симісторний регулятор потужності Pulser-X/D

Pulser-X/D підтримує підключення до однофазних або двофазних навантажень з напругою 230 В або 400 В відповідно. Максимальна потужність навантаження становить 3,6 кВт при 230 В та 6,4 кВт при 400 В. Пристрій автоматично адаптується до типу навантаження та динаміки об'єкта, перемикаючись між пропорційним і пропорційно-інтегральним режимами регулювання. Це дозволяє забезпечити стабільну температуру навіть при змінних умовах роботи.

Регулювання потужності здійснюється методом широтно-імпульсної модуляції з періодом циклу 6, 60 або 120 секунд. Комутація навантаження

відбувається в момент проходження струму через нуль, що зменшує електромагнітні перешкоди та підвищує надійність пристрою. Крім того, Pulser-X/D має функцію нічного зниження температури на 0–10 K, що сприяє енергозбереженню в періоди зниженого навантаження.

Важливим компонентом системи є модуль відображення інформації. Застосування OLED-дисплея на контролері SSD1306 (рис.3.12), розміром 0,96 дюйма та роздільністю 128×64 пікселі, дозволяє відображати поточну температуру, задане значення, потужність нагрівача, стан реле та службову інформацію (наприклад, помилки або індикатори режиму). Цей дисплей підключається до мікроконтролера через інтерфейс I²C або SPI і має низьке енергоспоживання, чітке зображення та невеликі габарити, що особливо зручно в компактних системах або лабораторному обладнанні. [16]



Рисунок 3.12 - 0.96" inch OLED Display Screen Module I²C IIC 128x64

Крім відображення, система може бути оснащена простим елементом введення — кнопками або поворотним енкодером, що дозволяє змінювати параметри на місці: встановлювати температуру, змінювати тип регулювання або проводити калібрування. Завдяки використанню програмного меню в мікроконтролері, такий інтерфейс не потребує складної периферії, але значно покращує зручність експлуатації.

Таким чином, інтеграція обраних компонентів дозволяє створити повноцінну, промислово наближену систему автоматичного регулювання, побудовану на сучасній елементній базі.

Після визначення основних елементів системи керування важливо оцінити їхню функціональну та електричну сумісність, що безпосередньо впливає на надійність, точність і зручність у практичному застосуванні. Сумісність між мікроконтролером GD32F103C8T6 і модулем MAX31855 забезпечується стандартним SPI-інтерфейсом, що має чітко визначену структуру сигналів (SCK, CS, MISO). Мікроконтролер містить апаратну підтримку SPI, що дозволяє опитувати модуль із частотою до 1–2 Гц без помітного навантаження на ядро. Рекомендована частота обміну з MAX31855 становить до 5 МГц, а практична реалізація SPI в GD32F103 дозволяє досягти цієї межі без додаткових адаптерів.

Оскільки MAX31855 видає вже оброблене значення температури у вигляді 32-бітного цифрового слова з фіксованим форматом, подальша обробка даних у мікроконтролері істотно спрощується. Це дозволяє зосередитися на реалізації алгоритмів регулювання замість вирішення проблем із шумами чи температурною компенсацією. Крім того, цифровий інтерфейс усуває потребу в калібруванні аналогового каналу, що особливо важливо в навчальних або експериментальних установках.

Усі компоненти живляться від джерела постійного струму 5 В (або 3,3 В для логічних рівнів), що дозволяє об'єднати їх в єдину схему з живленням від стабілізованого блоку або USB. Це робить систему компактною та безпечною для користувача. Більше того, доступність усіх компонентів на українському ринку дозволяє реалізувати проєкт без складної логістики або залежності від закордонних постачальників.

Перевагою запропонованої конфігурації є її масштабованість. За потреби система може бути розширена шляхом підключення додаткових датчиків (наприклад, вакуумметра через АЦП або UART), виходів на інші нагрівачі або реалізації багатоконтурного регулювання. У разі підвищення вимог до точності, ПД-регулятор можна адаптувати з урахуванням зворотного зв'язку за температурною похідною або реалізувати адаптивну модифікацію з перебудовою коефіцієнтів у реальному часі.

Таким чином, запропоноване апаратне рішення забезпечує необхідну функціональність, гнучкість та надійність, а також дозволяє реалізувати інженерно обґрунтовану та економічно доцільну систему автоматичного регулювання температури у вакуумній установці. У поєднанні з правильною схемотехнікою, програмним забезпеченням і системою захисту, ця система є готовим рішенням для дослідницького, навчального або малосерійного промислового застосування.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

В процесі експлуатації вакуумної установки для нанесення покриттів важливо забезпечити належний рівень безпеки як для обслуговуючого персоналу, так і для навколишнього середовища. Оскільки система працює з високими температурами, вакуумом, електричними струмами високої потужності й іноді з матеріалами, які можуть бути хімічно активними або токсичними, комплексний підхід до охорони праці є невід'ємною частиною проектування та функціонування всієї установки.

Одним із головних факторів ризику для працівників є наявність високої температури у зонах нагріву підкладок та джерела покриття. У фазі випаровування температура окремих елементів може перевищувати 1000°C, що створює загрозу термічних опіків. Тому усі термічно активні компоненти повинні бути ізольовані або розташовані в герметичних зонах, доступ до яких блокується під час роботи установки. З огляду на теплову інерційність системи, навіть після завершення технологічного циклу корпус деяких елементів залишається гарячим протягом тривалого часу, що потребує відповідного маркування та попереджувальних систем сигналізації.

Іншою важливою небезпекою є наявність вакуумного середовища, яке створюється за допомогою потужних насосів. У випадку розгерметизації камери або пошкодження трубопроводів можливий раптовий перепад тиску, що може спричинити фізичні травми або викид небезпечних частинок. Тому вакуумна система повинна бути оснащена датчиками перевищення граничних значень тиску з автоматичним відключенням насосів і аварійним зниженням напруги. Особлива увага приділяється герметичності з'єднань та регулярному технічному огляду вакуумного обладнання.

Електричні небезпеки також становлять суттєвий ризик, з огляду на використання високовольтних джерел живлення для нагрівачів і випарювачів.

Всі елементи електроживлення мають бути заземлені згідно з вимогами нормативної документації. Система автоматичного контролю напруги та струму повинна миттєво реагувати на перевантаження, короткі замикання або витік струму. Для забезпечення електробезпеки також передбачено блокування відкривання камер або доступу до високовольтних частин у разі поданої напруги. В приміщенні, де експлуатується установка, має бути організована система екранування від електромагнітних завад, особливо якщо використовується інверторне або імпульсне живлення.

Окрім безпосередньої охорони праці персоналу, необхідно враховувати вплив процесу на навколишнє середовище. У процесі випаровування та нанесення покриттів можливе виділення залишкових парів металів або інших матеріалів. Для недопущення забруднення повітря така установка повинна бути обладнана системою фільтрації відкачаних газів, а у випадку використання хімічно активних речовин — також нейтралізаторами шкідливих сполук. Усі відходи, включно з відпрацьованими фільтрами, збираються, класифікуються і передаються на утилізацію згідно з діючими екологічними нормами.

Контроль мікроклімату в приміщенні, де експлуатується вакуумна установка, є ще одним важливим аспектом охорони праці. Температура, вологість та вентиляція повинні підтримуватись на стабільному рівні, який не створює додаткового навантаження на організм оператора. Робота обладнання, що генерує тепло та шум, вимагає наявності ефективної системи вентиляції та, за необхідності, локальної витяжки. Крім того, в зоні розміщення установки повинні застосовуватись засоби шумозниження, оскільки робота вакуумних насосів, особливо механічних або турбомолекулярних, може супроводжуватись тривалим шумовим тиском понад допустимі значення.

Окрему увагу слід приділити ергономіці робочого місця оператора. Органи керування мають бути розташовані на зручній висоті, доступ до панелі управління — безперешкодним, інтерфейс — інтуїтивно зрозумілим, із використанням чітких візуальних і звукових сигналів. Це значно знижує ризик помилок при експлуатації та дозволяє оператору своєчасно реагувати на

нестандартні ситуації. У випадках, коли установка працює у напіваавтоматичному або ручному режимі, доцільно передбачити двоступеневу активацію критичних функцій, що унеможлиблює випадкове вмикання нагріву або вакууму.

Згідно з вимогами техніки безпеки, обслуговуючий персонал повинен проходити регулярний інструктаж та навчання, особливо з урахуванням специфіки конкретної моделі установки. Перевірка знань, практичні тренування у відпрацюванні дій у разі аварій, ознайомлення з технічною документацією обладнання — усе це є частиною комплексної програми з охорони праці. В приміщенні повинна бути наявна чітка інструкція з безпечної експлуатації, а також плани евакуації у разі надзвичайної ситуації.

Важливо, що під час проєктування системи автоматизації установки інженери повинні закладати засоби профілактичного контролю. Це можуть бути періодичні тести системи керування, автоматична діагностика стану датчиків і виконавчих механізмів, а також програмні модулі, що фіксують відхилення в роботі від номінальних параметрів. Такий підхід дозволяє попередити потенційні відмови до того, як вони переростуть у критичну ситуацію.

Таким чином, охорона праці в умовах експлуатації вакуумної установки є комплексною системою, що поєднує технічні, організаційні та навчальні заходи. Вона охоплює усі етапи — від конструювання й вибору елементної бази до безпосередньої експлуатації та технічного обслуговування. Пріоритетним завданням залишається забезпечення нульового рівня травматизму, надійного функціонування обладнання в умовах потенційно небезпечного середовища, а також мінімізація шкідливого впливу на довкілля за рахунок впровадження сучасних засобів екологічного моніторингу та фільтрації.

В контексті охорони праці та захисту навколишнього середовища особливу роль відіграє дотримання вимог чинної нормативної бази. Виробнича діяльність із використанням вакуумного обладнання підпорядковується положенням національних стандартів, таких як ДСТУ, Правила охорони праці в електроустановках, НПАОП з техніки безпеки та Санітарні норми і правила

щодо мікроклімату виробничих приміщень. Також важливим є дотримання міжнародних норм, зокрема вимог директив ЄС щодо електромагнітної сумісності, безпеки машин та управління ризиками, якщо установка постачається або використовується в європейському середовищі. Сертифікація обладнання на відповідність технічним регламентам, зокрема маркуванням CE, є показником його придатності до експлуатації у безпечних умовах.

Крім технічних стандартів, застосовується система екологічної сертифікації, яка передбачає оцінку впливу на навколишнє середовище протягом усього життєвого циклу обладнання. Сучасні вакуумні установки розробляються з урахуванням принципів екодизайну: мінімізація споживання енергії, можливість повторного використання або утилізації компонентів, зниження викидів шкідливих речовин у повітря та наявність систем рекуперації. В умовах промислової експлуатації впроваджуються технології моніторингу викидів у вентиляційні системи, автоматичного обліку споживання електроенергії та температурного навантаження, що дає змогу не лише оптимізувати роботу установки, а й виконувати вимоги природоохоронного законодавства.

Загальна екологічна відповідальність виробництва полягає в інтеграції систем охорони довкілля у структуру технологічного процесу. Це досягається шляхом поєднання автоматизованих засобів контролю, екологічної експертизи проєктних рішень та регулярного аудиту умов експлуатації. Таким чином, охорона праці та екологічна безпека не є зовнішніми, допоміжними компонентами, а невіддільною частиною функціонування сучасного високотехнологічного обладнання.

РОЗДІЛ 5

ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Автоматизація технологічних процесів, зокрема процесу нанесення покриттів у вакуумних установках, є важливим фактором підвищення економічної ефективності виробництва. Її доцільність визначається не лише технічними перевагами у вигляді стабільності параметрів і підвищення якості продукції, а й здатністю забезпечити прямий і опосередкований економічний ефект. В умовах високої конкуренції на ринку і зростаючих вимог до енергоефективності, автоматизоване керування стає не опцією, а необхідністю для збереження конкурентоспроможності.

Основними джерелами економічної вигоди від автоматизації виступають зменшення витрат на енергоресурси, скорочення відсотка бракованої продукції, зниження трудових витрат, зменшення витрат на ремонт та обслуговування обладнання, а також підвищення загальної продуктивності. Завдяки точному контролю температурного режиму під час нанесення покриття вдається знизити перевитрати електроенергії, які зазвичай виникають при ручному або недостатньо точному регулюванні. Окрім цього, автоматизація дозволяє зменшити кількість зупинок, пов'язаних із перегрівом або аварійними ситуаціями, що в свою чергу знижує втрати, пов'язані з простоем обладнання.

Для ілюстрації наведемо умовний розрахунок економічного ефекту від впровадження автоматизованої системи регулювання температури в установці вакуумного нанесення покриттів. Припустимо, що без автоматизації середнє споживання електроенергії під час одного технологічного циклу становить 8 кВт·год, а після впровадження ПД-регулювання — 6,5 кВт·год завдяки точнішому підтриманню температури та усуненню перевитрат. За умови виконання 500 циклів на місяць це дає економію:

$$\Delta E = (8 - 6,5) \times 500 = 750 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{міс}$$

При тарифі на електроенергію 4,32 грн/кВт·год маємо місячну економію:

$$C_e = 750 \times 4,32 = 3600 \text{ грн} / \text{міс}$$

Річна економія складе:

$$C_r = 3600 \times 12 = 43\,200 \text{ грн}$$

Крім того, зниження кількості бракованих деталей на 5% дозволяє заощадити матеріали й час на їх переробку. Якщо вартість матеріалів для одного виробу складає 200 грн, а за місяць виготовляється 1000 одиниць продукції, то економія від зниження браку (5% від 1000 = 50 одиниць) становить:

$$C_b = 50 \times 200 = 10\,000 \text{ грн} / \text{міс}$$

Загальна місячна економія:

$$C_o = C_e + C_b = 3600 + 10\,000 = 13\,600 \text{ грн} / \text{міс}$$

Таким чином, навіть без урахування трудових витрат і підвищення довговічності обладнання, сукупна річна економія від впровадження автоматизації складає:

$$C_{ro} = 13\,600 \times 12 = 163\,200 \text{ грн}$$

При вартості автоматизованої системи регулювання, включно з контролером, сенсорами, монтажем та програмуванням, у межах 80 000 грн, термін окупності складе:

$$T_o = 80\,000 / 13\,600 \approx 5,9 \text{ місяців}$$

Тобто, система окупається менш ніж за півроку, після чого починає приносити чистий прибуток. Враховуючи можливе збільшення обсягів виробництва або зростання тарифів на енергію, ця перевага лише зростає.

Окрім безпосередніх фінансових вигод, автоматизація технологічного процесу нанесення покриттів у вакуумній установці створює низку непрямих економічних переваг, які також суттєво впливають на загальну ефективність виробництва. Одним із ключових чинників є стабілізація якості продукції. Завдяки постійному контролю температурного режиму забезпечується однаковість характеристик покриття на всіх виробках, що підвищує загальний технічний рівень продукції. Це, у свою чергу, сприяє зміцненню репутації підприємства як надійного виробника, що прямо впливає на рівень довіри з боку замовників і партнерів.

Наявність стабільного та передбачуваного процесу також сприяє зниженню витрат, пов'язаних із рекламаціями. Виробник, чия продукція характеризується стабільними показниками якості, має менше ризиків повернення бракованої продукції або необхідності у проведенні додаткового технічного обслуговування після реалізації. Це знижує витрати на сервісне обслуговування та підвищує загальний рівень задоволеності клієнтів.

Іншим важливим аспектом є зменшення ризиків пов'язаних із людським фактором. Автоматизована система не піддається втомі, відволіканню чи неуважності, що особливо важливо у технологіях, де критичною є точність температурного режиму. Таким чином, скорочується ймовірність виникнення аварійних ситуацій, які можуть призводити до зупинки виробництва та фінансових втрат. Це також дозволяє мінімізувати витрати на навчання персоналу або компенсацію наслідків помилок, що в умовах змінного кадрового складу є значущим фактором економічної стабільності.

Не менш важливою є можливість оптимізації виробничого графіка. Завдяки підвищеній точності та повторюваності процесу нанесення покриття можна зменшити тривалість окремих етапів технологічного циклу або скоротити

технологічні простой, що сприяє зростанню продуктивності в цілому. При масштабному виробництві навіть незначне скорочення часу на один цикл дає відчутний результат у річному вимірі.

Також варто відзначити, що впровадження систем автоматизації відкриває можливості для подальшого розвитку підприємства в напрямку цифровізації. Автоматизовані процеси легше інтегруються в систему моніторингу та диспетчеризації, дозволяють здійснювати збір і аналітику виробничих даних у реальному часі, що дає змогу приймати ефективніші управлінські рішення. Це створює основу для побудови систем предиктивного обслуговування, коли обладнання обслуговується не за графіком, а на основі реального стану, що також сприяє економії коштів.

Враховуючи всі наведені аргументи, можна зробити висновок, що автоматизація процесу нанесення покриттів у вакуумних установках є інвестицією з високою рентабельністю. Вона забезпечує як прямі економічні вигоди у вигляді зниження витрат і підвищення продуктивності, так і стратегічні переваги, що впливають на позицію підприємства на ринку в довгостроковій перспективі. Таким чином, впровадження автоматизованої системи є обґрунтованим з техніко-економічної точки зору кроком у напрямку підвищення ефективності та стійкості виробничої діяльності.

ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи розроблена система автоматизованого управління технологічним процесом отримання сумішей під час виробництва продовольчих товарів. Виконані такі задачі:

1. Проведені аналіз предметної області та розгляд існуючих математичних моделей, які виявили необхідність автоматичної підтримки температури підкладки для стабільного процесу вакуумного нанесення покриттів.

2. По вхідним даним визначені параметри об'єкту регулювання. Побудована модель САР та розраховані її основні параметри.

3. При перевірці моделі САР виявлено, що система нестійка. Проведений підбір нових параметрів регулятора. Моделювання показало стійкість системи та відповідність вимогам.

4. Запропоновані технічні засоби для реалізації системи, а саме - мікроконтролер, відкалібрований модуль термопари, світлодіодний дисплей та симісторний регулятор потужності.

5. Розроблені міри по охороні праці та навколишнього середовища, а також здійснений розрахунок економічної ефективності системи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Вакуумне напилення. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Вакуумне_напилення.
2. Характеристика та використання технології вакуумного напилення. URL: <http://ua.superbheating.com/info/characteristics-and-uses-of-vacuum-plating-tec-86091931.html>.
3. Що таке вакуумне покриття. URL: <https://ua.ikstechnology.com/news/what-is-the-vacuum-coating-46341170.html>.
4. Принцип вакуумного покриття. URL: <https://www.rsmtarget.com/uk/news/principle-of-vacuum-coating/>.
5. Технологічні передові: різноманітні покриття, що наносяться випаровуванням і напиленням. URL: <https://ua.inpowervacchina.com/news/technological-frontiers-various-evaporation-c-80633243.html>.
6. Я. Яворський, Р. Яворський. Конструктивні особливості вакуумних мікропічок для осадження тонких плівок і наноструктур. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/7948/2/ConfAPTEPF_2012_Iavorskii_Ia-Konstruktyvni_osoblyvosti_30-32.pdf
7. Характеристики обладнання для нанесення покриття вакуумним срібним вертикальним напиленням. URL: <https://ua.superbheater.com/info/features-of-vacuum-silver-vertical-sputtering-86678906.html>
8. І. І. Білик, С. О. Руденький. Технологія нанесення покриттів та їх властивості / Навчальний посібник. URL: <https://dspace.kntu.kr.ua/items/ee00d3fa-4235-4f2a-a6e9-33cdd183e10c>.
9. Контроль і керування хіміко-технологічними процесами: У 2 кн. Кн. 2. Керування хіміко-технологічними процесами : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навчаються за напрямом: «Хімічна технологія та інженерія» / М. В. Лукінюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 336 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/09a4f19e-ffe1-41a3-8691-b6334d603ee2/content>

10. Функціональні матеріали та покриття : навчальний посібник / [М. О. Азарєнков, В. М. Береснєв, С. В. Литовченко та ін.]. – Х. : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2013. – 202 с. URL: <http://physics-technology.karazin.ua/resources/8199ea6884950ee8ea92c5bcfbbeb6776.pdf>

11. Обладнання та технологія вакуумно-конденсаційного нанесення покриття : лаб. практикум : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій» спец. 131 «Прикладна механіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: І. В. Смирнов, А. В. Чорний. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 61 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/1821acb3-1298-48ec-b7d9-db16da903814/content>

12. VisSim. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/VisSim>

13. STM32 Nucleo-64 development board with STM32F103RB MCU, supports Arduino and ST morpho connectivity. URL: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-f103rb.html>

14. MAX31855 датчик к-термопары з компенсацією температури холодного спаю. URL: <https://internet-magazin-melkoj-elektroniki-i-tovarov-dlya.prom.ua/ua/p1415433670-max31855-datchik-termopary.html>

15. PULSER-X/D симісторний регулятор потужності із зовнішнім керуванням 0-10В URL: <https://iq-climat.com.ua/ua/p1389609895-pulser-simistornyj-regulyator.html>

16. Дисплей OLED 0.96" 128x64 модуль SSD1306 I2C. URL: <https://prom.ua/p618578953-displej-oled-096.html>