

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

В.о. завідувача кафедри
автоматики та робототехнічних систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. _____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

" ____ " _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

на тему **"РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО
КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЄЮ КАМЕРИ ЛАЗЕРНОЇ УСТАНОВКИ
YAWEI"**

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

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Дудник А.О.
(П.І.Б.)

Керівник кваліфікаційної бакалаврської роботи

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Дудник А.О.
(П.І.Б.)

Виконав

(підпис)

Ненно А.О.
(П.І.Б.)

КИЇВ - 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

автоматики та робототехнічних систем

ім. акад. І.І. Мартиненка

(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. _____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

" ____ " _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи студенту

Ненно Артему Олексійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

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

1. Тема кваліфікаційної бакалаврської роботи: "Розроблення системи автоматичного керування вентиляцією камери лазерної установки Yawei", затверджена наказом ректора НУБіП України від "24" 10 2025 р. № 2518"С"
2. Термін подання завершеної роботи на кафедру "31" травня 2026 р.
3. Вихідні дані до кваліфікаційної бакалаврської роботи:
 - 3.1. Завдання кафедри на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи.
 - 3.2. Нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації.
 - 3.3. Наукова література з тематики кваліфікаційної бакалаврської роботи.
4. Перелік питань, які необхідно розробити:
 - 4.1. Огляд та технологічна характеристика лазерної установки.
 - 4.2. Розробка та дослідження математичної моделі керування температурою в камері лазерної установки.
 - 4.3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань.
 - 4.4. Розробка цифрової системи керування.
 - 4.5. Схеми системи автоматизації.
 - 4.6. Техніко-економічне обґрунтування.

5. Перелік графічних документів:

- 5.1. Система автоматичного керування вентиляцією камери лазерної установки. Функціональна схема автоматизації.
- 5.2. Система автоматичного керування вентиляцією камери лазерної установки. Схема електрична принципова.
- 5.3. Система автоматичного керування вентиляцією камери лазерної установки. Схема електричних з'єднань.
- 5.4. Система автоматичного керування вентиляцією камери лазерної установки. Схема електричних підключень.
- 5.5. Система автоматичного керування вентиляцією камери лазерної установки. Зовнішній вигляд щита керування.

Дата видачі завдання "21" листопада 2025 року

**Керівник
кваліфікаційної
бакалаврської роботи**

(підпис)

Дудник А.О.
(П.І.Б.)

**Завдання прийняв до
виконання**

(підпис)

Ненно А.О.
(П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Дана бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена розробці системи автоматичного керування вентиляцією камери лазерної установки Yawei. В ній розглянуто технологічну характеристику лазерної установки, її принцип роботи, виконано інформаційний аналіз. Розроблено та досліджено математичну модель керування температурою в камері; проведено розрахунок та вибір регулятора; розроблено цифрову систему керування. Здійснено вибір електротехнічних пристроїв, таких як: автоматичні вимикачі, магнітний пускач та кабелі керуючої мережі. Спроектовано схеми системи автоматизації та виконано техніко-економічне обґрунтування.

Дипломна робота виконана на 70 сторінок, містить 9 таблиць та 26 рисунків. При підготовці роботи використано 32 літературні джерела.

Ключові слова: камера для лазерного різання металу; лазерна установка; вентиляція; температура; керування; ПІД-регулятор.

ABSTRACT

This bachelor's qualification work is devoted to the development of an automatic ventilation control system for the Yawei laser cutting machine chamber. It considers the technological characteristics of the laser machine, its operating principle, and performs information analysis. A mathematical model for controlling the temperature in the chamber has been developed and investigated; a controller has been calculated and selected; a digital control system has been developed. Electrical devices have been selected, such as: circuit breakers, magnetic starters, and control network cables. Automation system diagrams have been designed and a feasibility study has been performed.

The thesis is 70 pages long, contains 9 tables and 26 figures. 32 literary sources were used in the preparation of the work.

Keywords: chamber for laser cutting of metal; laser machine; ventilation; temperature; control; PID controller.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ. 10	
1.1. Загальні відомості про установку для лазерного різання металу	10
1.1.1. Загальний опис установки для лазерного різання металу	10
1.1.2. Принцип роботи установки для лазерного різання металу	11
1.2. Технічний і технологічний опис процесу	12
1.3. Інформаційний аналіз об'єкта керування	15
1.4. Розробка функціональної схеми автоматизації	16
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	19
2.1. Розробка та дослідження математичної моделі об'єкта керування.....	19
2.2. Побудова імітаційної моделі об'єкта автоматизації із використанням програмного забезпечення MATLAB SIMULINK	22
2.3. Аналіз статичних та динамічних характеристик. Визначення передатної функції об'єкта керування.....	24
РОЗДІЛ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ, ВИБІР ТА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ.....	26
3.1. Вибір та обґрунтування алгоритму керування об'єктом	26
3.2. Вибір технічних засобів автоматизації	29
3.2.1. Вибір первинного вимірювального перетворювача та визначення його передатної функції	30
3.2.2. Датчик концентрації пилу	31
3.2.3. Вибір виконавчого пристрою	33
3.3. Реалізація алгоритму керування.....	37
3.3.1. Визначення періоду дискретизації.....	37
3.3.2. Налаштування ПІД - регулятора	41
3.3.3. Дослідження системи	43
3.4. Вибір керуючого елементу.....	44
3.5. SCADA-система	46
РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА	49

4.1. Вибір електротехнічних пристроїв	49
4.1.1. Вибір автоматичних вимикачів	49
4.1.2. Вибір магнітних пускачів.....	53
4.1.3. Вибір проводів керуючої мережі.....	55
4.2. Розробка електричних схем автоматизації.....	59
4.2.1. Розробка електричної принципової схеми	59
4.2.2. Розробка схеми з'єднань	60
4.2.3. Розробка схеми підключень.....	60
4.2.4. Розробка загального виду щита керування	61
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	62
ВИСНОВКИ.....	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	67
ДОДАТКИ.....	71

ВСТУП

Сучасний етап розвитку глобального промислового виробництва характеризується стрімким впровадженням високотехнологічного обладнання, одне з яких установки лазерного різання металів. Розвиток технологій ЧПК та волоконних лазерів дозволив досягти безпрецедентної точності та швидкості обробки матеріалів, що, у свою чергу, висуває нові, значно жорсткіші вимоги до допоміжних систем, які забезпечують життєдіяльність та безпеку виробничого циклу. Однією з важливих систем є комплекс автоматичного керування вентиляцією та аспірацією робочої зони лазерної установки. У контексті експлуатації обладнання, питання ефективного відведення продуктів термічного розкладання матеріалів стає не просто питанням комфорту персоналу, а і головним чинником забезпечення стабільності технологічного процесу та збереження дороговартісної оптичної системи верстата.

Доцільність проведення наукових досліджень у цьому напрямку обґрунтовується насамперед необхідністю підвищення енергоефективності промислових об'єктів. Лазерна установка Yawei споживає значну кількість електроенергії, і додаткові витрати на постійну роботу потужних вентиляторів на максимальних обертах є економічно необґрунтованими. Окрім економічного аспекту, існує важлива технічна складова: недостатня вентиляція призводить до підвищення температури в камері та накопичення дрібнодисперсного пилу на захисних шибках різального елемента, що спричиняє їх перегрів, передчасний вихід з ладу та погіршення якості різку.

Актуальність теми зумовлена необхідністю зменшити витрати електроенергії, адже постійна робота вентиляторів на високих обертах є економічно необґрунтованою, тому, пошук оптимальної структури системи керування вентиляцією дозволить знайти баланс між мінімальним споживанням енергії та максимальним захистом обладнання, що є головним завданням для виробництва. Також, актуальність теми полягає в дотриманні сучасних стандартів охорони праці. Дрібнодисперсні частки, що утворюються при різанні

легованих сталей або алюмінію, мають високу канцерогенну активність і здатні накопичуватися в організмі людини. Автоматизація процесу видалення цих часток саме в момент їх утворення забезпечує створення безпечного мікроклімату в цеху.

Головна мета дослідження полягає у суттєвому поліпшенні функціонування та вдосконаленні існуючого об'єкта шляхом впровадження інтелектуальних алгоритмів автоматичного керування, які забезпечать динамічну підтримку заданих параметрів температури повітря в камері при мінімізації енергетичних витрат. Досягнення цієї мети вимагає комплексного підходу, що включає як теоретичні дослідження фізики повітряних потоків у замкненому просторі камери, так і практичне проектування схемної та програмної частин системи.

Важливим етапом роботи є розроблення спеціалізованого програмного забезпечення, яке буде реалізовувати алгоритм керування та забезпечувати зручний інтерфейс для оператора. Це завдання включає створення логіки обробки сигналів від датчиків тиску та концентрації часток, а також розробку контурів захисту двигуна вентилятора від перевантажень. Окрім цього, у межах проекту необхідно провести оцінку очікуваного економічного ефекту від впровадження розробленої системи, порівнюючи її з існуючими базовими рішеннями.

Об'єктом дослідження у даній роботі виступає безпосередньо технологічний процес зниження температури та видалення відпрацьованих газів та аерозолів з робочої зони лазерної установки Yawei, що розглядається як складна динамічна система з розподіленими параметрами. Предметом дослідження є співвідношення між експлуатаційними параметрами процесу різання, та відповідними показниками продуктивності вентиляційної системи, що виражаються через частоту обертів двигуна витяжки та концентрацію забруднюючих речовин. Дослідження цих взаємозв'язків дозволяє сформулювати закони керування, які ляжуть в основу розроблюваної системи автоматизації.

РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

1.1. Загальні відомості про установку для лазерного різання металу

1.1.1. Загальний опис установки для лазерного різання металу

Верстат для лазерного різання Yawei з ЧПК (рис. 1.1) представляє собою найсучаснішу на даний момент технологію лазерного різання: підсвічена траєкторія руху, електричний дозуючий клапан для точного керування тиском допоміжного газу, що використовується під час різання, тощо. Він втілює найпередовіші досягнення за своїм зовнішнім виглядом, структурою та конфігурацією, налаштуванням параметрів та оптимізацією продуктивності [1].



Рис. 1.1. Загальний вигляд установки лазерного різання металу Yawei

Верстат для лазерного різання складається з наступних частин:

- система керування: BECKHOFF;
- волоконні лазери IPG, які економлять електроенергію, газ і мають гарну якість променя;

- стандартизований охолоджувач, наданий компанією IPG або виготовлений на основі такого стандарту;
- візок висувного типу з ручним вивантаженням;
- пристрій для видалення пилю та диму;
- машина для видалення стружки;
- змінний робочий стіл та світлозахисна завіса [2].

1.1.2. Принцип роботи установки для лазерного різання металу

Принцип роботи верстата для лазерного різання:

- лазерне випромінювання, вироблене лазерним генератором, передається через різальний елемент крізь світлопровідне волокно, потім воно генерує лазерний промінь високої потужності через оптичну лінзу та фокусуючу лінзу всередині різального елемента для здійснення гарячого різання листового металу.

- Осі X, Y, Z можуть здійснювати пов'язані рухи. Різальний елемент встановлений на осі Z. Можна використовувати програмне забезпечення для перетворення файлів і графіків у програму для різання. Потім система керування ЧПК здійснює контроль осей X, Y, Z відповідно до програми різання, щоб виконати безконтактне гаряче різання для всіх видів контурів. Контроль над віссю Z гарантує постійну відстань між нижньою частиною різального елемента і верхньою поверхнею листового металу, щоб забезпечити гарну якість різання. Пневматична система керування забезпечує подачу допоміжного газу із заданим тиском відповідно до різних матеріалів і товщин;

- пиловловлювальний пристрій може: поглинати дим і пил, що утворюються в процесі різання; знижувати шкоду для оператора, а також зменшувати інтенсивність забруднення машини;

- змінний робочий стіл може забезпечити безперервне різання. Коли різання однієї пластини завершено, змінний стіл може негайно перенести іншу плиту в зону різання [2, 3].

1.2. Технічний і технологічний опис процесу

Лазерна різка є найбільш широко використовуваним методом обробки в індустрії лазерної обробки. Волоконний лазерний верстат для різання Yawei являє собою прецизійний волоконний лазерний верстат для різання з ЧПК зі стандартною конфігурацією, що включає німецький волоконний лазер IPG і різальний елемент Shanghai Jiaqiang. Верстат оснащений серводвигуном PHASEAC, оригінальною німецькою коробкою передач STOBBER, шестернею та рейковим механізмом, високоточною лінійною напрямною німецького виробництва Rexroth та іншими ефективними трансмісійними механізмами, керованими системою ЧПК BECKHOFF. Верстат є стабільним і надійним, має хороші динамічні характеристики та велику завантажувальну ємність, а також являє собою новий високотехнологічний продукт, що об'єднує лазерну різку, прецизійне обладнання та технологію ЧПК, володіючи високими швидкістю, точністю, ефективністю та прекрасним співвідношенням якості та ціни [2].

Розробка системи автоматичного керування вентиляцією для камери лазерної установки є необхідним, бо це зумовлено специфікою високоенергетичних процесів обробки матеріалів та вимогами до сучасної культури виробництва. У процесі функціонування волоконного лазера такої потужності відбувається інтенсивний вплив сфокусованого променя на поверхню металу. В цей час, відбувається миттєве розплавлення, випаровування та сублімація речовини. Цей фізико-хімічний процес призводить до викиду значної кількості дрібнодисперсного пилу, металевих аерозолів та газоподібних продуктів термічної деструкції. Якщо не забезпечити вентиляцію камери, це може становити серйозну загрозу як для здоров'я обслуговуючого персоналу, так і для стабільної роботи самого обладнання.

Лазерна установка являє собою високоточний комплекс для термічного розділення металів. В ньому робочим інструментом виступає сфокусоване випромінювання волоконного лазера. Конструктивно установка складається з масивної станини, координатної системи переміщення порталного типу, лазерного джерела та герметичної робочої камери. Процес різання відбувається

в зоні фокусування променя, де під дією високої щільності енергії метал миттєво плавиться або випаровується. Для видалення розплаву з каналу різі використовується допоміжний газ (кисень, азот або стиснене повітря), що подається під високим тиском через сопло різального елементу [4].

Система вентиляції такої установки зазвичай має багатозонну структуру. Робочий стіл розділений на окремі секції, витяжка з яких активується синхронно з рухом різального елементу. Це розроблено для того, щоб локалізувати зону відбору забрудненого повітря безпосередньо під місцем генерації відходів. Завдяки цьому значно підвищується енергоефективність системи порівняно із загальною вентиляцією всього об'єму камери. Керування цим процесом у реальному часі залежить від типу металу, його товщини та параметрів лазерного випромінювання.

Основним аргументом на користь автоматизації є необхідність динамічного реагування системи на зміну параметрів різання. Лазер працює з різними типами металів. Основні з них: вуглецева сталь, нержавіюча сталь, алюмінієві та мідні сплави, кожен з яких при взаємодії з лазером генерує специфічні за хімічним складом та об'ємом забруднювачі. Традиційна витяжка з постійною потужністю виявляється або недостатньо ефективною під час пікових навантажень, або надмірно енергоємною під час пауз чи обробки тонких листів. Впровадження інтелектуального керування може дати змогу системі зчитувати дані безпосередньо з контролера лазера або через датчики якості повітря, регулюючи оберти витяжного вентилятора за допомогою частотного перетворювача. Відповідно, при цьому забезпечується оптимальний повітряний потік у кожен конкретний момент часу.

Продукти горіння, що утворюються під час різання оцинкованої сталі або алюмінію, містять оксиди металів та інші сполуки, які мають канцерогенні та токсичні властивості. Дрібні частинки розміром менше 2.5 мікрон здатні проникати глибоко в дихальну систему людини, накопичуватися в легенях та потрапляти в кровотік. Найкращим варіантом було б, якби автоматична система розпочинала роботу ще до початку фактичного проколу металу та продовжувала

функціонувати протягом необхідного часу після завершення циклу для повного очищення внутрішнього об'єму камери, виключаючи людський фактор забування або нехтування правилами безпеки.

Важливо не забувати питання захисту прецизійних вузлів лазерної установки. Камера Yawei містить складні оптичні компоненти, лінійні напрямні та сенсори, які вкрай чутливі до запиленості. Незначне осадження продуктів згоряння на захисному склі лазерної елементу може призвести до поглинання енергії променя. Внаслідок цього, можливий перегрів оптики, погіршення якості різку та, зрештою, вихід з ладу дорогих комплектуючих. Ефективна циркуляція повітря та створення зон зниженого тиску безпосередньо під робочим столом запобігають розсіюванню диму всередині камери. Дим має спрямовуватись у фільтрувальну установку, і, завдяки цьому, може бути подовжений міжремонтний інтервал, а також зниження експлуатаційних витрат.

Економічна доцільність автоматизації базується на енергозбереженні та подовженні ресурсу фільтрів. Сучасні промислові витяжні установки споживають значну кількість електроенергії. Якщо вентилятор постійно працює на максимальних обертах, це призводить до невиправданих витрат, особливо при роботі установки в одну або дві зміни з технологічними перервами. Завдяки автоматичному керуванню, знижується споживання енергії на 30-50% залежно від завантаженості верстата. Також, плавність пуску та регулювання швидкості потоку зменшують абразивне зношування повітропроводів та запобігають передчасному забиванню дорогого змінного фільтруючого матеріалу великими частками, які при надмірній тязі підхоплюються з робочої зони.

Важливо підкреслити і технологічну перевагу автоматизованої системи у забезпеченні якості кінцевої продукції. При термічному різанні товстих металів накопичення теплової хмари та диму навколо зони різку впливає на стабільність допоміжного газу (кисню чи азоту). При цьому може викликатися турбулентність та будуть з'являтися нерівності на кромці деталей. Рівномірне та контрольоване видалення продуктів розпаду стабілізує мікроклімат у зоні

обробки. Тільки тоді, забезпечується висока точність та повторюваність результатів.

Пил, що утворюється при різанні металів, особливо алюмінію та магнієвих сплавів, є вибухопожежонебезпечним. Накопичення такого пилу в повітропроводах при недостатній швидкості потоку створює умови для займання від випадкової іскри. Автоматизована система з датчиками тиску та потоку може сигналізувати про критичне зниження тяги або автоматично вимикати верстат при виявленні загрози, запобігаючи аварійним ситуаціям.

1.3. Інформаційний аналіз об'єкта керування

Відповідно до методології системного аналізу, технологічний об'єкт керування (ТОК) розглядається як єдність технологічного процесу вентиляції та відповідного механічного обладнання (вентиляторів, заслінок, фільтрів). Метою інформаційного аналізу є визначення структури потоків даних, встановлення критеріїв ефективності та класифікація змінних, що впливають на стан системи.

Критерієм ефективності для системи автоматичного керування вентиляцією камери лазерної установки Yawei є зменшення температури в камері та мінімізація концентрації шкідливих домішок у робочому просторі при одночасній оптимізації витрат електроенергії на привід витяжних вентиляторів. Економічна доцільність автоматизації полягає у забезпеченні нормативних умов праці та подовженні ресурсу дороговартісної лазерної оптики за рахунок динамічного регулювання обсягів повітря, що видаляється.

Інформаційна схема об'єкта керування включає наступні групи параметрів:

Вихідні регульовані змінні (Y): температура повітря та концентрація пилу та продуктів горіння в камері, швидкість повітряного потоку у витяжних повітропроводах, розрідження всередині камери для запобігання витоків диму в цех.

Вхідні керуючі дії (U): частота обертання двигуна витяжного вентилятора (через перетворювач частоти), кут відкриття електромагнітних або пневматичних заслінок відповідних зон робочого столу.

Контрольовані збурення (F): тип матеріалу (сталь, алюміній, мідь), потужність лазерного променя, швидкість переміщення різального елементу.

Неконтрольовані збурення (W): вологість навколишнього повітря, ступінь забруднення фільтруючих елементів у системі очищення, наявність сторонніх потоків повітря при відкритті дверей камери для завантаження заготовок.

Аналіз каналів керування показує, що найбільш динамічним та ефективним методом підтримання чистоти повітря є зміна об'єму витяжки залежно від поточної позиції лазера. Вентиляційна система камери має бути розділена на керовані зони (сегменти), що забезпечує адресне видалення забруднень.

Вибір параметрів контролю та захисту базується на необхідності запобігання аварійним ситуаціям. Зокрема, система повинна сигналізувати про критичне падіння розрідження в камері або про перегрів двигунів вентиляторів. Автоматичний захист має передбачати блокування роботи лазера у разі несправності системи витяжки, оскільки це призведе до миттєвого задимлення оптичного тракту [3, 5].

1.4. Розробка функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема автоматизації (ФСА) - це технічний документ, який визначає архітектуру побудови вузлів контролю та керування вентиляційним комплексом лазерної установки Yawei. В ній відображається взаємодія між технологічним обладнанням, вимірювальними приладами та засобами обробки інформації. Завдяки цій схемі можна зрозуміти цілісне уявлення про принципи регулювання параметрів повітряного середовища в робочій камері. В основу побудови схеми покладено принцип замкненого контуру регулювання з використанням засобів мікропроцесорної техніки. Це дозволяє забезпечити точність підтримки технологічних параметрів та безпеку експлуатації лазерного верстата [5].

ФСА детально розкриває оснащення об'єкта керування сучасними засобами автоматизації (рис. 1.2). При її розробці має бути обґрунтований вибір

кожної точки відбору імпульсу та кожного каналу передачі інформації. Схема необхідна на етапі проектування, також у подальших циклах життєдіяльності системи: під час монтажних робіт, програмування логічних контролерів і у процесі технічного обслуговування та діагностики несправностей. Схема дозволяє простежити шлях трансформації первинного фізичного сигналу (наприклад, рівня запиленості чи тиску) у складний керуючий вплив, що змінює частоту живлення електродвигуна вентиляційної установки [6].

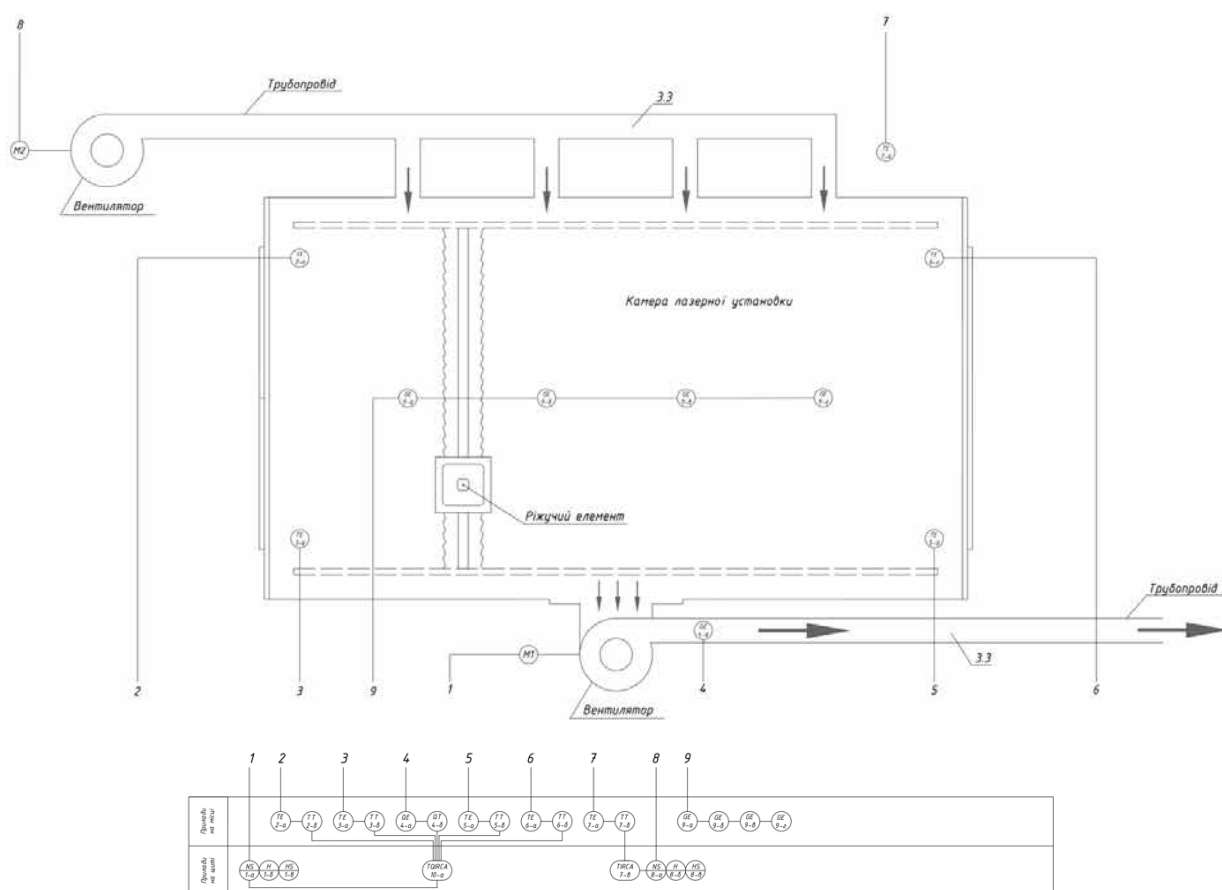


Рис. 1.2. Функціональна схема автоматизації

На функціональній схемі зображені наступні елементи:

TE - датчик температури;

GE - датчик руху;

QE - датчик концентрації пилу;

NS - магнітні пускачі для керування двигунами;

M1 - двигун, що приводить в дію механізм витяжної вентиляції

M2 - двигун, що приводить в дію механізм припливної вентиляції [7].

Технологічним об'єктом керування на схемі виступає кабіна лазерної установки, оснащена системою повітропроводів та аспіраційним блоком. Процес автоматизації охоплює декілька функціональних рівнів: отримання первинної інформації від датчиків, обробку сигналів у контролері та формування керуючих впливів на виконавчі механізми. На схемі умовними графічними позначеннями відображені всі точки відбору імпульсів, де встановлені первинні вимірювальні перетворювачі, що здійснюють безперервний моніторинг стану середовища (рис. 1.2).

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1. Розробка та дослідження математичної моделі об'єкта керування

При роботі установки для лазерної різки металу Yawei, при безпосередній різці металевих листів, всередині камери піднімається температура. Коли лазерний промінь фокусується на поверхні металу, він створює локальну зону з температурою, що значно перевищує 1500 °С, а при різанні тугоплавких сплавів або використанні кисню як допоміжного газу ця цифра може сягати й 3000 °С. Основна частина цього тепла витрачається на плавлення та випаровування металу, але значна частка енергії розсіюється в навколишній простір через розпечені іскри, краплі розплавленого шлаку та теплове випромінювання самої заготовки.

Повітря в камері нагрівається нерівномірно. Найгарячіші потоки знаходяться безпосередньо над зоною різки та під робочим столом, куди вилітає розплав. Лист металу, що лежить на столі, з часом починає працювати як масивний акумулятор тепла. Чим довше триває програма різання, тим сильніше нагрівається заготовка, особливо якщо в ній багато дрібних деталей, розташованих близько одна до одної. Це нагрівання призводить до термічного розширення матеріалу. На великих листах навіть незначне підвищення температури може спричинити лінійне подовження на частки міліметра, що критично для точних деталей, або взагалі призвести до деформації (вигинання) листа, через що різальний елемент може втратити фокус або вдаритися об край металу.

Вентиляція відіграє роль не лише очищувача повітря, а й терморегулятора камери. Вона постійно оновлює повітряний об'єм, заміщуючи гарячі гази прохолодним повітрям із приміщення цеху. Завдяки цьому середня температура повітря всередині kabіни станка Yawei зазвичай утримується в діапазоні 20-30 °С. Це дозволяє електроніці та датчикам працювати в штатному режимі без ризику перегріву. Одночасно з цим водяний чиллер підтримує температуру самого різального елемента та джерела в межах вузького діапазону (зазвичай 20-

25 °С, створюючи необхідний температурний градієнт, щоб оптика не постраждала від зовнішнього жару.

Побудуємо схеми балансів статки вмісту тепла в камері лазерного різання (рис. 2.1):

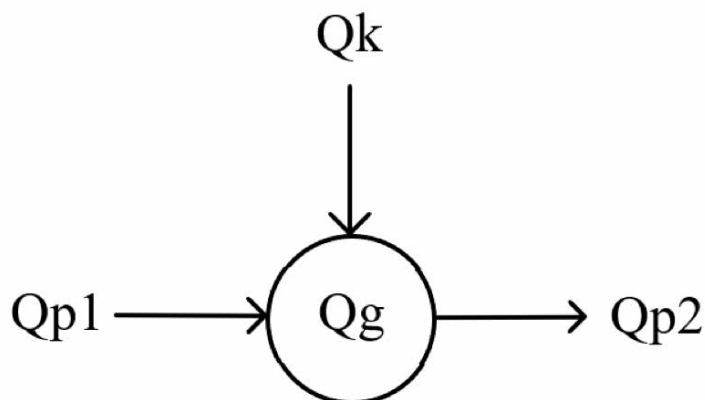


Рис. 2.1. Схема теплового балансу в камері лазерного різання

Виходячи із статичних балансів тепла отримані рівняння динаміки зміни вказаних параметрів в камері:

$$\frac{dQ_g}{d\tau} = Q_{p1} + Q_k + Q_a - Q_{p2} \quad (2.1)$$

де: Q_g - кількість теплоти, що міститься в повітрі камери; Q_{p1} - кількість теплоти, що надходить до камери з вентиляційним повітрям; Q_{p2} - кількість теплоти, що видаляється з камери з вентиляційним повітрям; Q_k - кількість теплоти, що утворюється при роботі лазерного елемента і потрапляє до повітря камери.

Розглянемо рівняння, які описують складові рівнянь балансу.

Кількість теплоти, що міститься в повітрі камери, Дж:

$$Q_g = V_k \cdot C_p \cdot \rho_p \cdot t_p \quad (2.2)$$

де: V_k - об'єм повітря в камері, м³; C_p - теплоємність повітря в камері, Дж/(кг·град.); ρ_p - густина повітря в камері, кг/м³; t_p - температура повітря в камері, °С; t_v - температура вентиляційного повітря, °С, $t_v = 20$ °С.

Кількість теплоти, що утворюється при роботі лазерного елемента і потрапляє до повітря камери, Вт:

$$Q_k = F_k \cdot \mu_k \quad (2.3)$$

де F_k - площа поверхні металевих листів, які знаходяться в камері, m^2 ; μ_k - коефіцієнт тепловиділення при роботі лазерного елемента, $Вт/м^2$.

Витрати вентиляційного повітря рахуємо з урахуванням виділеного двоокису вуглецю, $m^3/с$ і допустимого, за технологічним регламентом, вмісту двоокису вуглецю в камері лазерного різання, $C_B = 0,06\%$.

$$V_v = \frac{G_B}{C_B} \cdot 100\%, \quad (2.4)$$

де V_v - витрати вентиляційного повітря, $m^3/с$; C_B - концентрація CO_2 в повітрі в камері, %; G_B - кількість CO_2 , що виділяється при роботі лазерного елемента;

$$G_B = G'_B \cdot F_k, \quad (2.5)$$

де G'_B - кількість CO_2 , що виділяється з 1 m^2 металевих листів, $m^3/m^2/год$.

Після перетворення отримаємо рівняння витрат вентиляційного повітря $m^3/с$:

$$V_v = \frac{G'_B \cdot F_k}{C_B \cdot 3600} \cdot 100\% \quad (2.6)$$

Таким чином, підставляючи рівняння (2.3) - (2.6) в рівняння (2.1) і (2.2) можна отримати систему диференціальних рівнянь у вигляді:

$$V_k \cdot C_p \cdot \rho_p \cdot \frac{dt_p}{d\tau} = V_v \cdot \rho_p \cdot C_p \cdot (t_v - t_p) + F_k \cdot \mu_k + Q_d + W_a \cdot r_a, \quad (2.7)$$

$$V_k \cdot \rho_p \cdot \frac{dd_p}{d\tau} = V_v \cdot \rho_p \cdot (d_v - d_p) + W_a, \quad (2.8)$$

Після перетворення отримаємо систему рівнянь математичної моделі температури в камері лазерного різання, яку можна використати для імітаційного моделювання [8]:

$$\begin{cases} \frac{dt_p}{d\tau} = \frac{V_v \cdot \rho_p \cdot C_p \cdot (t_v - t_p) + F_k \cdot \mu_k + Q_d + W_a \cdot r_a}{V_k \cdot C_p \cdot \rho_p} \\ \frac{dd_p}{d\tau} = \frac{V_v \cdot \rho_p \cdot (d_v - d_p) + W_a}{V_k \cdot \rho_p} \end{cases} \quad (2.9)$$

2.2. Побудова імітаційної моделі об'єкта автоматизації із використанням програмного забезпечення MATLAB SIMULINK

Для розробки імітаційної моделі необхідно використати рівняння динаміки зміни температури в приміщенні камери для лазерного різання металу. Для цього визначимо об'єм камери, яка має розміри приведені на рис. 2.2.

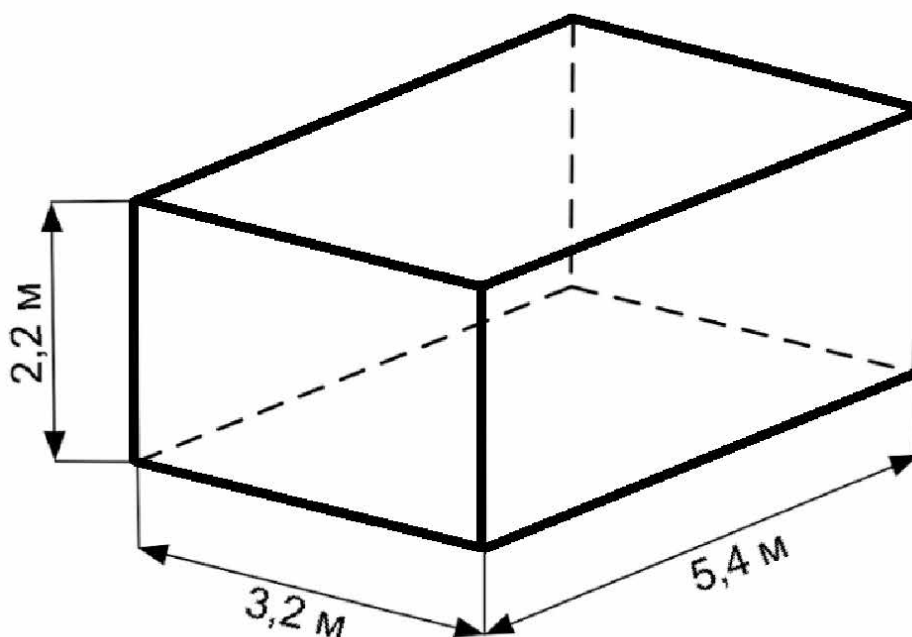


Рис. 2.2. Розміри камери для лазерного різання металу

Таким чином об'єм камери і відповідно повітря становить $V_k = 38,016 \text{ м}^3$. Загальна площа листів металу дорівнює $F_k = 13,23 \text{ м}^2$.

Густина і теплоємність вентиляційного повітря і повітря в камері змінюється незначно і тому ми його приймаємо: $\rho_v = 1,293 \text{ кг/м}^3$ і $C_p = 1050 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{град)}$. Барометричний тиск в камері приймемо $P_v = 750 \text{ мм.рт.ст.}$. Коефіцієнт тепловиділення листами металу при роботі лазера складе $\mu_k = 2,5 \text{ Вт/м}^2$. Об'єм вентиляційних каналів складе $V_t = 1,3 \text{ м}^3$ [9].

Під час проходження на підприємстві виробничої практики, з опитування оператора лазерної установки, визначено час чистого запізнення (τ). Він складає 10 с.

Далі побудуємо в середовищі пакету Simulink MATLAB імітаційну модель камери для лазерного різання металу [10], використавши для неї рівняння математичної моделі (рис. 2.3). Вхідними параметрами моделі будуть характеристики повітря, позначені (C_p , r_{op}), температура і витрати вентиляційного повітря (t_v , V_v), площа зайнята листом металу (F_k), коефіцієнт виділення тепла металу (m_k), об'єм повітря в камері (V_k). Також тут приведені параметри керування об'єктом: додатковий нагрів камери (Q_d) [8].

На виході моделі виводяться значення постійної часу об'єкту по каналу температури в камері (t_p).

Початковими значеннями збурення в моделі прийнято для температури (tp_0) 50 °С.

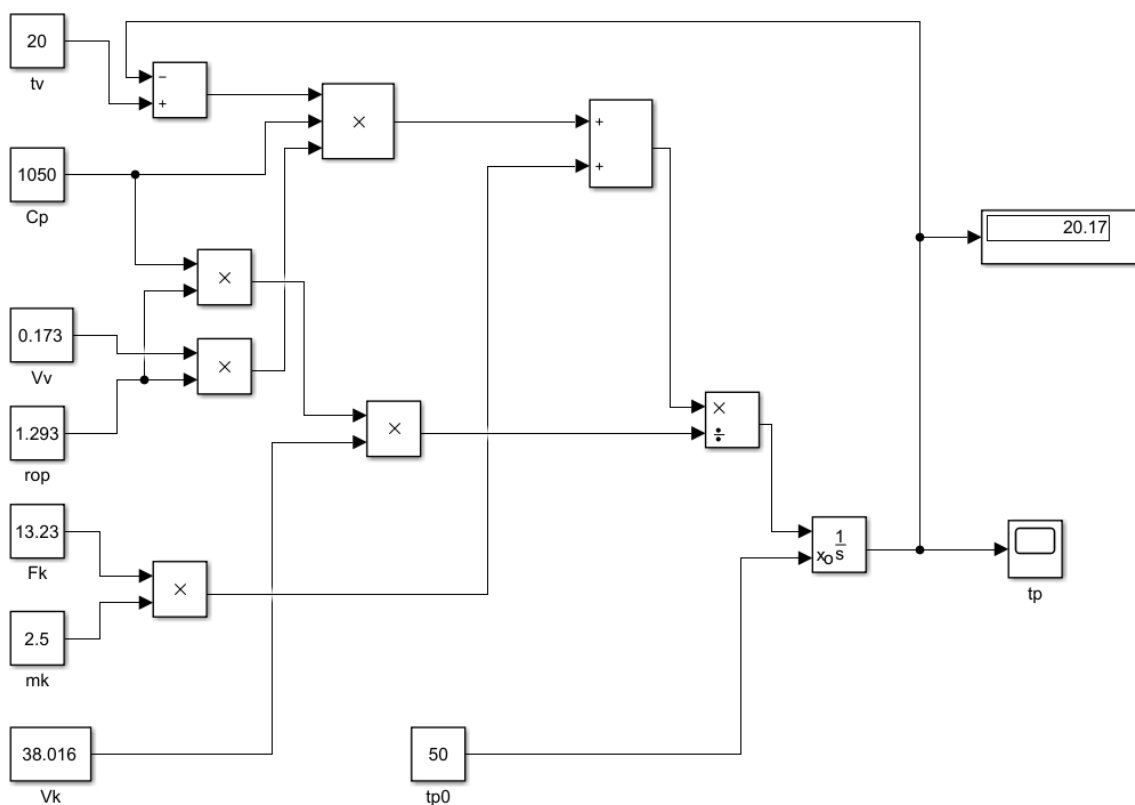


Рис. 2.3. Схема імітаційної моделі вентиляції камери лазерного різання побудована в Simulink MATLAB

На імітаційній моделі були проведені дослідження по визначенню необхідних значень регулюючих дій для забезпечення нормальної температури у камері лазерного різання: температури 20 °С. В результаті дослідження динаміки процесу було отримано розгінну криву промислового об'єкта по каналах температури (рис. 2.4).

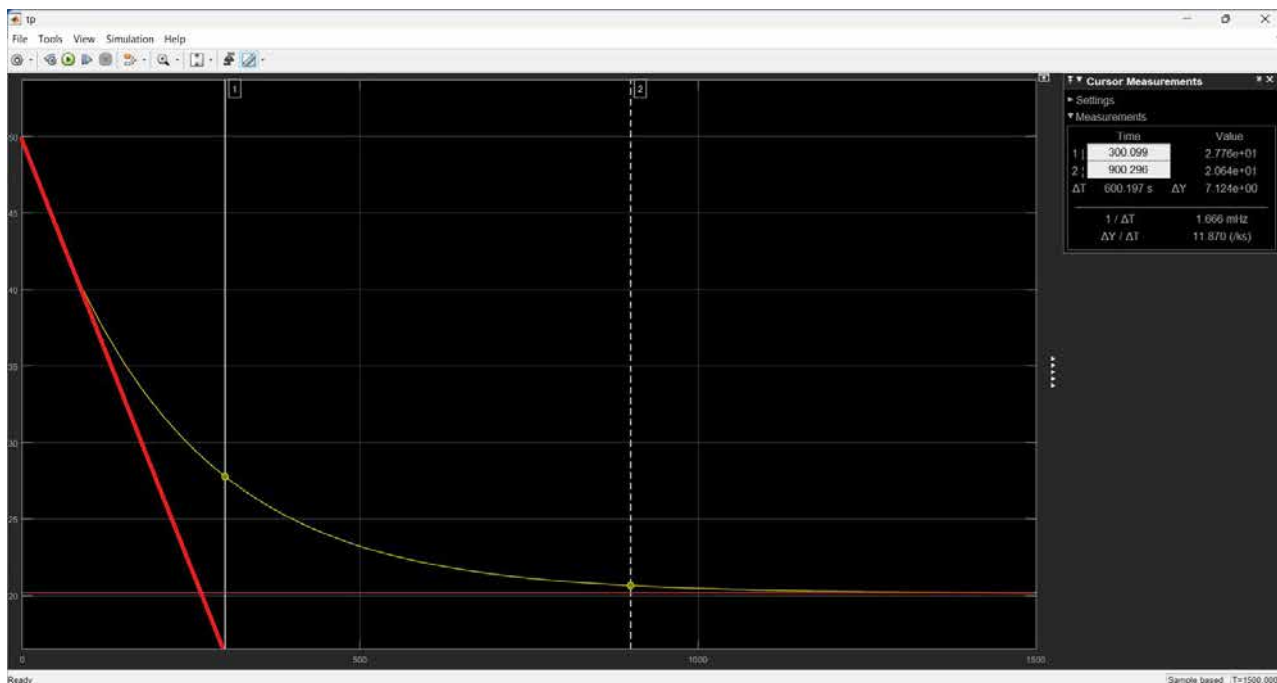


Рис. 2.4. Розгінна крива об'єкта керування в Simulink

2.3. Аналіз статичних та динамічних характеристик. Визначення передатної функції об'єкта керування

За допомогою динамічних властивостей об'єкта керування можна визначити алгоритм керування на етапі розробки. Дані криві були отримані при встановленні часу моделювання 1500 с. Час запізнення склав $\tau_w = 10$ секунд. Отримавши розгінну характеристику, можна визначити час регулювання - $T = 300$ с.

Для розрахунку передаточного коефіцієнту об'єкту визначили витрати вентиляційного повітря, 0,173 м³/с для підтримання температури близько 20 °С і

витрати вентиляційного повітря для підтримання температури 22 °С. Вони становлять 0,073 м³/с. Відповідно, передатний коефіцієнт буде рівний [8]:

$$K_w = \left| \frac{\Delta t}{\Delta \lambda} \right| = \frac{22 - 20.17}{0.173 - 0.073} = 0.1$$

За отриманими даними виводимо передатну функцію об'єкта керування:

$$W_{OK}(s) = \frac{0,1}{300s + 1} \cdot e^{-10s}$$

РОЗДІЛ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ, ВИБІР ТА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ

3.1. Вибір та обґрунтування алгоритму керування об'єктом

Вибір та наукове обґрунтування алгоритму керування необхідне тому, що цей процес перетворює теоретичну математичну модель об'єкта на практичну стратегію управління його динамічною поведінкою. Основна необхідність полягає у забезпеченні динамічної стійкості та надійності системи. Завдяки цьому можна уникнути виникнення небезпечних автоколивань [5].

Обґрунтування алгоритму дозволяє адаптувати систему до специфічних фізичних властивостей. При цьому необхідно враховувати її інерційність та транспортне запізнення, що виникає в повітропроводах. Це важливо для об'єктів, де показник відношення запізнення до сталої часу вимагає застосування складних законів регулювання. ПІД (пропорційно-інтегрально-диференціальний) алгоритм як раз підійде для цього, бо він здатний компенсувати запізнення реакції середовища.

Завдяки правильно обраному закону керування досягаються високі показники якості, зокрема, забезпечення нульової статичної похибки та мінімізації перерегулювання. Це захищає обладнання від пікових навантажень. З економічної точки зору, такий вибір сприяє енергоефективності, дозволяючи частотному перетворювачу споживати лише необхідну кількість електроенергії залежно від поточного режиму роботи. Завдяки цьому подовжується ресурс підшипників та запірної арматури.

Процес функціонування системи автоматичного керування (САК) вентиляцією камери лазера характеризується високими вимогами до стабільності повітряного потоку та оперативності видалення продуктів згоряння (металевого пилю, газів). Будь-які значні відхилення від заданих параметрів тиску або швидкості повітря можуть призвести до погіршення якості різку, забруднення оптичних елементів різального елемента або порушення норм техніки безпеки.

Для вибору оптимального закону регулювання необхідно враховувати два основні критерії:

- Точність в усталеному режимі: система повинна повністю усувати статичну помилку, спричинену зміною навантаження (наприклад, при зміні матеріалу різання або швидкості руху лазера).

- Динамічна якість: перехідний процес має бути швидким, з мінімальним перерегулюванням, щоб уникнути різких стрибків тиску в робочій зоні [11].

Основним інструментом для прийняття рішення є розрахунок безрозмірного критерію, що визначається як відношення часу запізнення (τ) до сталої часу об'єкта (T). Цей показник дозволяє класифікувати об'єкти за ступенем складності керування та обрати відповідний закон регулювання:

- Для об'єктів із незначною інерційністю ($\tau/T < 0,2$) найчастіше застосовують пропорційні (П) регулятори або позиційні схеми. Такі системи відрізняються простотою та високою швидкістю реакції, проте вони принципово не здатні повністю усунути статичну похибку під навантаженням.

- Для систем середньої складності ($0,2 < \tau/T < 0,5$) стандартом є використання пропорційно-інтегральних (ПІ) алгоритмів. Завдяки наявності інтегральної складової, такі регулятори поступово накопичують інформацію про відхилення та повністю нівелюють статичну помилку, забезпечуючи високу точність в усталеному режимі.

- Для складних об'єктів зі значним запізненням ($0,5 < \tau/T < 1,0$) найбільш доцільним є впровадження ПІД регуляторів. Диференціальна частина алгоритму реагує на тенденцію зміни помилки (швидкість її зростання), що дозволяє системі діяти «на випередження», суттєво покращуючи якість регулювання під час різких зовнішніх впливів.

Окрім часових характеристик, на вибір регулятора безпосередньо впливають цільові показники якості перехідного процесу. Якщо технологія вимагає абсолютної відсутності коливань, обирається аперіодичний характер регулювання, тоді як для досягнення максимально можливої швидкодії зазвичай

налаштовують систему на коливальний процес із допустимим 20%-им перерегулюванням [12].

Динамічний коефіцієнт регулювання дає змогу вибрати найкращий алгоритм для конкретного об'єкта керування.

Методика вибору найкращого алгоритму керування полягає у визначенні динамічного коефіцієнта регулювання.

$$R_D = y_1 / (K_0 y_{\max}), \quad (3.1)$$

де y_1 - максимальне динамічне відхилення; K_0 - коефіцієнт передачі об'єкта керування; $y_{\max}$ - максимально можливе значення збурення по навантаженням (береться у відсотках переміщення регульовального органа).

[5]:

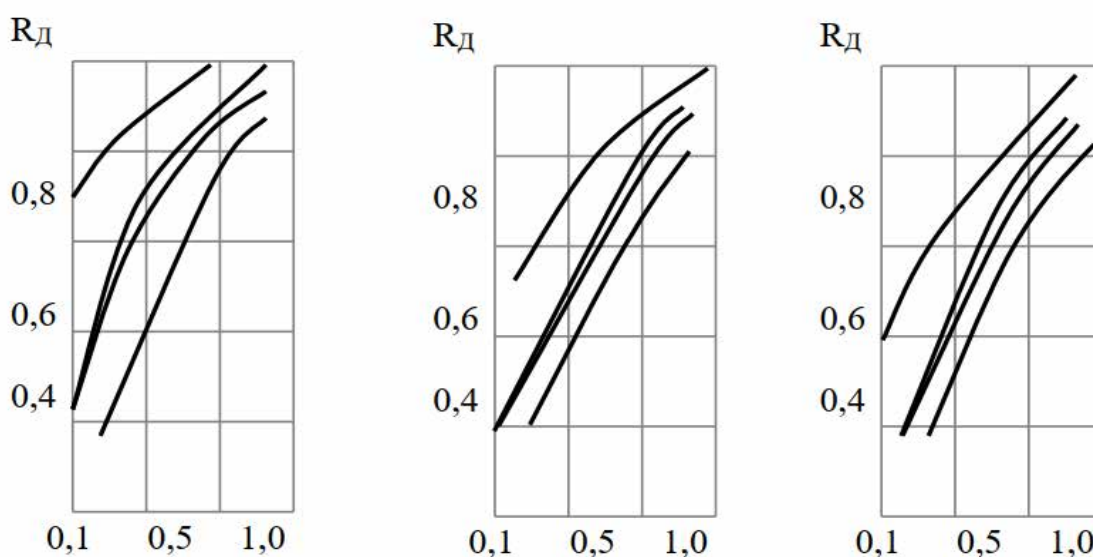


Рис. 3.1. Залежність динамічного коефіцієнта регулювання від динамічних властивостей об'єкта керування: а-для типового аперіодичного перехідного процесу; б-для коефіцієнта передачі об'єкта типового перехідного процесу з 20 %-вим перерегулюванням; в- для типового перехідного процесу з мінімальним інтегральним показником якості; 1-П-алгоритм керування, 2-І-алгоритм керування; 3-ПІ-алгоритм керування; 4-ПІД-алгоритм керування

3.2. Вибір технічних засобів автоматизації

Функціонально-структурна схема автоматизації є основним проектним документом, який інтегрує в собі технологічну архітектуру об'єкта та логічну послідовність процесів керування, що забезпечують його стабільну роботу. Вона виконує роль сполучної ланки між фізичним обладнанням та інтелектуальною частиною системи, наочно демонструючи, яким чином інформація від первинних перетворювачів потрапляє до керуючих пристроїв та трансформується у командні сигнали для виконавчих механізмів. На такій схемі технологічне устаткування зазвичай відображається у спрощеному вигляді тонкими лініями, що дозволяє зосередити основну увагу на розстановці засобів автоматизації та точках контролю параметрів.

Кожен елемент системи на схемі позначається спеціальними графічними символами, переважно колами, де всередині вказується буквенний код, що розкриває функціональне призначення приладу. Наприклад, перша літера коду вказує на фізичну величину, таку як тиск, температура або витрата, а наступні літери уточнюють дії приладу, зокрема його здатність до реєстрації даних, автоматичного регулювання або формування аварійної сигналізації. Особливістю схеми є розмежування місць встановлення обладнання, де наявність горизонтальної лінії всередині графічного позначення вказує на розміщення приладу на пульті або щиті керування, тоді як відсутність такої лінії свідчить про його монтаж безпосередньо на технологічному апараті.

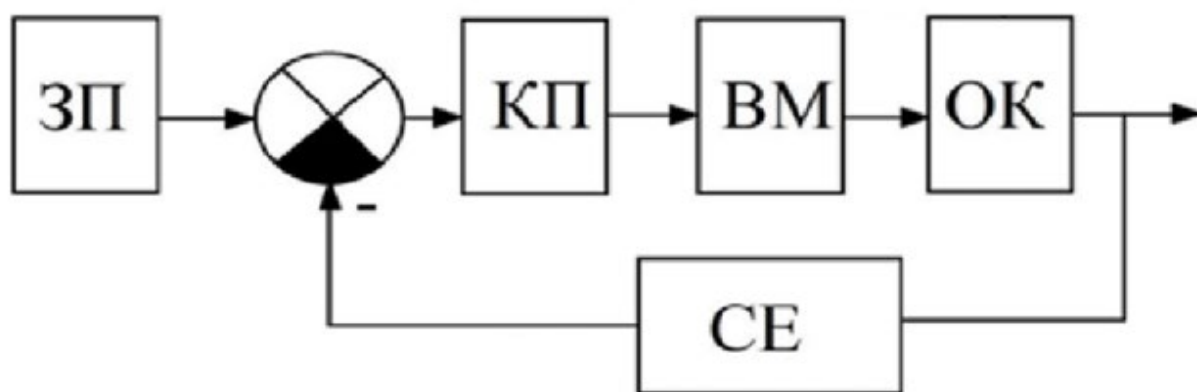


Рис. 3.2. Функціонально-структурна схема автоматизації

На функціонально-структурній схемі автоматизації зображені наступні елементи:

ЗП - задаючий пристрій;

КП - керуючий пристрій (регулятор);

ВМ - виконавчий механізм;

ОК - об'єкт керування;

СЕ - сприймаючий елемент.

Окрім вимірювальних каналів, схема детально описує структуру зворотного зв'язку, де виміряне значення порівнюється із заданою уставкою в регулюючому пристрої, після чого формується відповідний вплив на регулюючий орган, такий як клапан або заслінка [5].

3.2.1. Вибір первинного вимірювального перетворювача та визначення його передатної функції

Під час вибору первинного вимірювального перетворювача головною умовою є показник теплової інерції, який не має перевищувати десяту частину заданої [13]:

$$T_{CE} < 0.1 T_{об} \quad (3.2)$$

В якості первинного вимірювального перетворювача (ПВП) обираємо термоперетворювач опору ТСМ-6114 (табл. 3.1).

Таблиця. 3.1.

Технічні характеристики термоперетворювача опору ТСМ-6114

Градування	23 (Опір при 0 °C = 53 Ом)
Границі виміру	-50...+100, °C
Теплова інерція	25 секунд ($T_{CE} = 25$ секунд)

Передатна функція датчика:

$$W_{CE}(s) = \frac{K_{CE}}{T_{CE} \cdot s + 1} \quad (3.3)$$

$$K_{CE} = R_O \cdot \alpha \quad (3.4)$$

$\alpha = 4.3 \cdot 10^{-3}$ - мідь;

α - температурний коефіцієнт опору.

Обираємо мідь:

$$K_{CE} = 53 \cdot 4,3 \cdot 10^{-3} = 0,2279$$

Інерційна ланка датчика [14]:

$$W_{CE}(s) = \frac{0,2279}{25 \cdot s + 1}$$

3.2.2. Датчик концентрації пилу

Під час роботи установки для лазерного різання металу Yawei, при різанні металевих листів та металевих виробів, виділяється велика кількість дрібнодисперсного пилу, яке необхідно виводити назовні з камери. В іншому випадку, якщо не забезпечити активну вентиляцію камери, весь цей пил буде осідати на робочому обладнанні, що може призвести до його некоректної роботи, збоїв, або навіть до виводу з ладу самого лазера, що може обійтися фірмі в досить дороговартісний ремонт. Також, окрім засмічення самого обладнання, цей пил може потрапляти в легені людині при вдиханні, що також дуже негативно вплине на її здоров'я.

Для керування роботи електродвигуном витяжної вентиляції установки лазерного різання металу Yawei, зміни його потужності під час роботи, використовується датчик концентрації пилу SICK DUSTHUNTER SB (рис. 3.3).



Рис. 3.3. Зовнішній вигляд датчика концентрації пилю SICK DUSTHUNTER SB

Таблиця 3.2.

Стандартні інтерфейси

Аналоговий вихід	Аналогові входи	Релейні виходи	Цифрові входи	Зв'язок
0/2/4...22 мА (гальванічно розв'язаний, активний); роздільна здатність 10 біт ● 1х на DUSTHUNTER SB50 для виведення концентрації пилю ● 3х на DUSTHUNTER SB100 для виведення концентрації розсіяного світла (відповідає некалібрований концентрації пилю), каліброваної концентрації пилю та масштабованої концентрації пилю	2 входи 0...20 мА (стандартні; без гальванічної розв'язки); роздільна здатність 10 біт	5 перекидних контактів (48 В, 1 А) для виведення сигналів стану: ● Робота/несправність ● Технічне обслуговування ● Контроль функціонування ● Запит на технічне обслуговування ● Граничне значення	4 входи для підключення безпотенційних контактів (наприклад, для підключення сервісного вимикача або запуску функціональної перевірки)	● USB 1.1 та RS232 (на клеммах) для запиту вимірюваних значень, налаштування параметрів та оновлення ПЗ ● RS485 для підключення датчика

Вимірювальна система працює за принципом вимірювання розсіяного світла (зворотна дисперсія). Лазерний діод випромінює частинки пилу в потоці модульоване світло (рис. 3.4) у видимому діапазоні (довжина хвилі приблизно 650 нм).

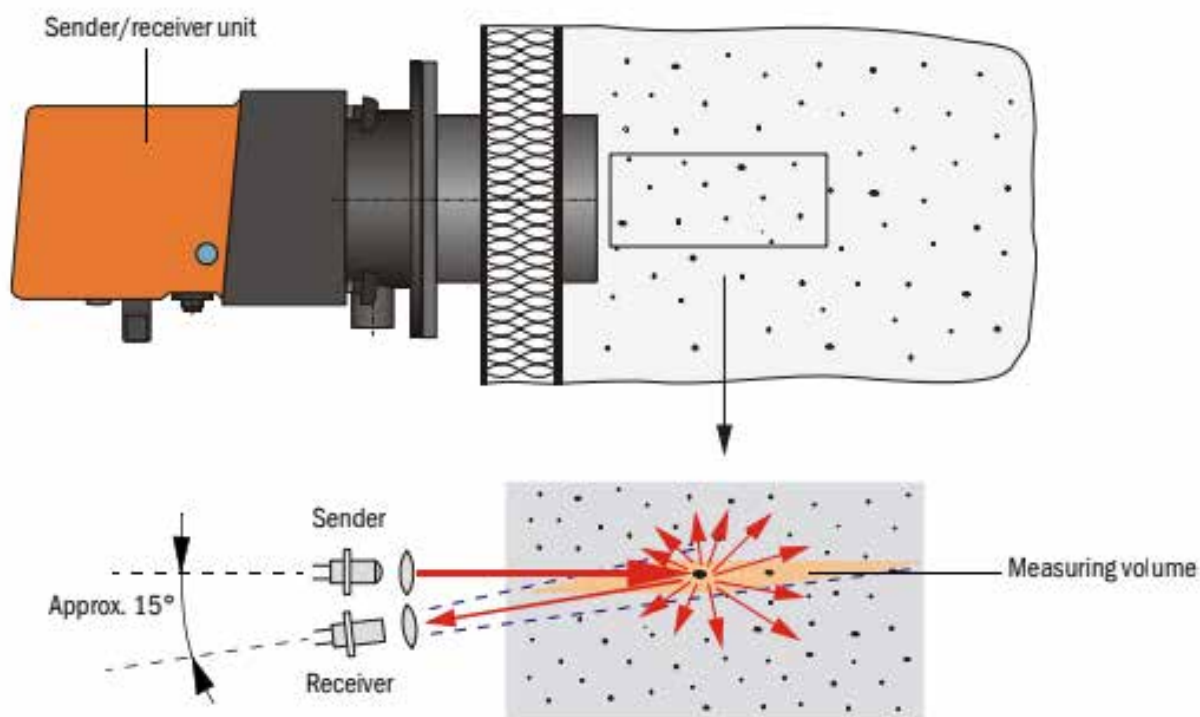


Рис. 3.4. Принцип роботи датчика

Високочутливий детектор реєструє світло, розсіяне частинками, електрично підсилює світло та подає його до вимірювального каналу мікропроцесора як центральної частини вимірювання, електроніка контролю та оцінки. Визначається вимірювальний об'єм в газозоді через перетин пучка відправника, що відправляється, і апертури прийому. Постійний моніторинг виходу відправника реєструє найменші зміни яскравості світловий промінь, який потім служить для визначення вимірювального сигналу [15].

3.2.3. Вибір виконавчого пристрою

Експлуатаційне середовище всередині камери лазерного верстата Yawei характеризується високою концентрацією агресивних чинників, що виникають внаслідок термічного розпилення металів. Під час процесу різання утворюється

значна кількість розпечених часток, дрібнодисперсного металевого диму та абразивного пилю, які мають високу електропровідність. Окрім механічного та хімічного впливу на обладнання, витяжна система змушена працювати в умовах змінного аеродинамічного опору, оскільки фільтрувальні блоки поступово накопичують відходи виробництва, що вимагає стабільно високого тиску повітряного потоку. Крім того, промисловий режим експлуатації передбачає багатозмінну роботу з мінімальними перервами, що створює серйозне теплове навантаження на всі приводні механізми.

Електродвигун моделі YE2-132S1-2 (рис. 3.5) має високий ступінь захисту корпусу IP55, що гарантує повну ізоляцію внутрішніх вузлів від потрапляння провідного пилю. Це необхідно для запобігання міжвитковим коротким замиканням та передчасному зносу підшипників у запиленому середовищі. Висока частота обертання (див. табл. 3.3) дозволяє системі вентиляції створювати потужну тягу, необхідну для миттєвого видалення продуктів згоряння з зони різання [2].

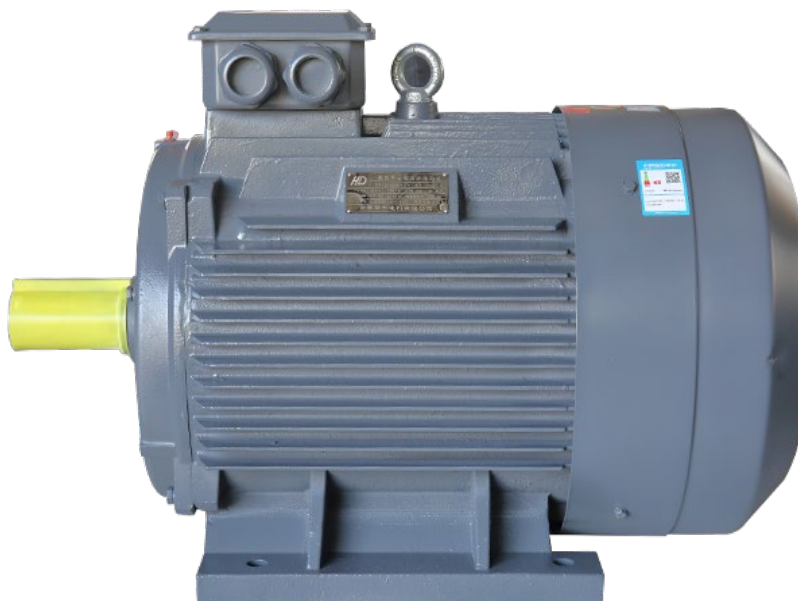


Рис. 3.5. Загальний вигляд електродвигуна YE2-132S1-2

Таблиця 3.3.

Технічні характеристики електродвигуна YE2-132S1-2

Параметр	Значення
Виробник	安徽华东电机有限公司
Модель	YE2-132S1-2
Тип двигуна	Трифазний асинхронний
Потужність	5,5 кВт
Напруга	380 В
Номинальний струм	10,9 А
Швидкість обертання	2905 об/хв
Частота мережі	50 Гц
ККД (Efficiency)	89,2%
Коефіцієнт потужності (cos φ)	0,88
Ступінь захисту	IP55 (пило- та вологозахисний)
Клас ізоляції	F (до 155°C)
Режим роботи	S1 (тривалий)
Схема підключення	Трикутник Δ
Вага	55 кг
Рівень шуму	67 дБ (А)
Стандарт	GB 18613-2012
Дата виробництва	04.11.2020
Номинальний момент $M_{ном}$	18,1 Н·м
Пусковий момент $M_{п}$	39,8 Н·м
Момент інерції ротора $J_{дв}$	0,0132 кг·м ²

Передатна функція $W_{дв}$ трифазного асинхронного електродвигуна задається у вигляді:

$$W_{дв} = \frac{K_{дв}}{T_{дв} \cdot s + 1} \quad (3.5)$$

де $K_{дв}$ - статичний коефіцієнт передачі двигуна, який визначає відношення встановленого значення кутової швидкості до амплітуди вхідного сигналу в сталому режимі,

$T_{дв}$ - електромеханічна стала часу.

$$K_{дв} = \frac{\frac{M_n}{U_n}}{\frac{M_n - M_{ном}}{\frac{\pi}{30} \cdot n_{ном}}}, \quad (3.6)$$

$$T_{дв} = \frac{\frac{J_{дв}}{M_n - M_{ном}}}{\frac{\pi}{30} \cdot n_{ном}}, \quad (3.7)$$

де - M_n пусковий момент електродвигуна, Н·м; U_n - номінальна напруга живлення електродвигуна, В; $N_{ном}$ - номінальна частота обертання електродвигуна, об/хв; $M_{ном}$ - номінальний момент електродвигуна, Н·м; $J_{дв}$ - момент інерції ротора, кг·м².

Розрахуємо коефіцієнти передатної функції:

$$K_{дв} = \frac{\frac{M_n}{U_n}}{\frac{M_n - M_{ном}}{\frac{P}{30} \cdot n_{ном}}} = \frac{\frac{39,8}{380}}{\frac{39,8 - 18,1}{\frac{5,5}{30} \cdot 2905}} = 2,57$$

$$T_{дв} = \frac{\frac{J_{дв}}{M_n - M_{ном}}}{\frac{P}{30} \cdot n_{ном}} = \frac{\frac{0,0132}{39,8 - 18,1}}{\frac{5,5}{30} \cdot 2905} = 0,32$$

Після проведення розрахунків, підставляємо отримані значення в передатну функцію, та отримуємо:

$$W_{дв} = \frac{2,57}{0,32 \cdot s + 1}$$

3.3. Реалізація алгоритму керування

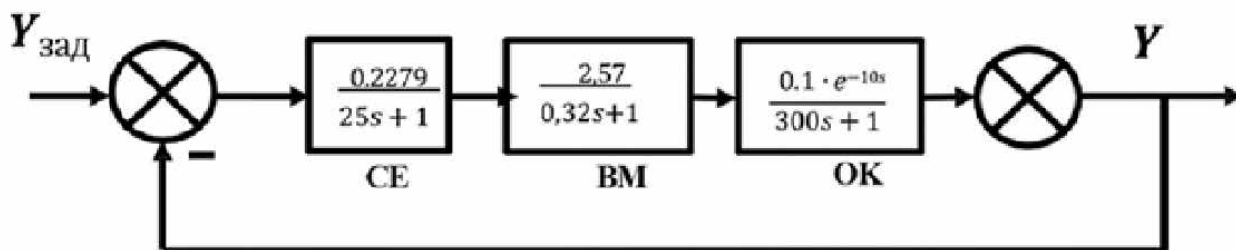


Рис. 3.6. Структурно - алгоритмічна схема САР

а) Розімкнутої системи ($f=0$):

$$\begin{aligned}
 W_{\text{роз}}(s) &= \frac{0,2279}{25 \cdot s + 1} \cdot \frac{2,57}{0,32 \cdot s + 1} \cdot \frac{0,1 \cdot e^{-10s}}{300 \cdot s + 1} = \\
 &= \frac{0,2279 \cdot 2,57 \cdot 0,1 \cdot e^{-10s}}{(25 \cdot 0,32 \cdot 300)s^3 + (25 \cdot 0,32 + 25 \cdot 300 + 0,32 \cdot 300)s^2 + (25 + 0,32 + 300)s + 1} = \\
 &= \frac{0,05857 \cdot e^{-10s}}{2400 \cdot s^3 + 7604 \cdot s^2 + 325,32 \cdot s + 1}
 \end{aligned}$$

б) Передатна функція замкнутої системи за керуванням ($f=0$):

$$\begin{aligned}
 W_{\text{зам}}(s) &= \frac{W_{\text{роз}}(s)}{1 + W_{\text{роз}}(s)} = \frac{K \cdot e^{-10s}}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + 1 + K \cdot e^{-10s}} = \\
 &= \frac{0,05857 \cdot e^{-10s}}{2400 \cdot s^3 + 7604 \cdot s^2 + 325,32 \cdot s + 1 + 0,05857 \cdot e^{-10s}}
 \end{aligned}$$

$$K = 0,05857$$

3.3.1. Визначення періоду дискретизації

Вибір частоти квантування у цифрових системах керування вимагає балансу між точністю роботи та потужністю обчислювального пристрою. Надмірне підвищення частоти не виправдано витрачає ресурси мікропроцесора, тоді як її зниження нижче критичного рівня призводить до викривлення сигналу та неможливості його відновлення. Загальноприйнятим стандартом є вибір частоти, що не менша за $2\omega_c$, де ω_c - це верхня межа істотних частот у спектрі. Оскільки впливом високочастотних компонентів з низькою амплітудою часто

нехтують, спектр обмежують. У випадку відсутності інтегровальних ланок у неперервній частині системи, параметр ω_c розраховується як корінь рівняння:

$$A(\omega) = A(0) \cdot \theta$$

де $A(\omega) = |W_{\text{зам.н.ч.}}(j\omega)|$ - амплітудно-частотна характеристика неперервної частини замкненої автоматичної системи;

θ - максимально допустима похибка квантування, яка повинна бути забезпечена на виході системи (у абсолютних величинах);

$A(0)$ - значення АЧХ неперервної частини замкненої системи за відсутності частоти ($\omega = 0$), що прямо впливає на величину статичної помилки регулювання [16, 17].

Оскільки частота квантування $\omega_s = \frac{2\pi}{T}$, і повинна виконуватись нерівність $\omega_c \leq 2\omega_s$, то допустимий період квантування визначатиметься за формулою:

$$T_{\text{ц}} \leq \frac{\pi}{\omega_c}$$

Нехай неперервна частина цифрової системи керування має передатну функцію:

$$W_{\text{роз.н.ч.}}(s) = \frac{0,05857 \cdot e^{-10s}}{2400 \cdot s^3 + 7604 \cdot s^2 + 325,32 \cdot s + 1}$$

Необхідно знайти допустимий період квантування, що забезпечує максимальну похибку відтворення первинного неперервного сигналу $\theta_{\text{зад}} = 1\%$.

Передатна функція неперервної частини замкненої системи:

$$W_{\text{зам.н.ч.}}(s) = \frac{0,05857 \cdot e^{-10s}}{2400 \cdot s^3 + 7604 \cdot s^2 + 325,32 \cdot s + 1 + 0,05857 \cdot e^{-10s}}$$

Амплітудно-фазова частотна характеристика (АФЧХ) неперервної частини замкненої системи:

$$\begin{aligned} W_{\text{зам.н.ч.}}(j\omega) &= \frac{0,05857 \cdot e^{-10 \cdot (j\omega)}}{2400 \cdot (j\omega)^3 + 7604 \cdot (j\omega)^2 + 325,32 \cdot (j\omega) + 1 + 0,05857 \cdot e^{-10 \cdot (j\omega)}} = \\ &= \frac{0,05857 \cdot e^{-10 \cdot (j\omega)}}{-j \cdot 2400 \cdot \omega^3 - 7604 \cdot \omega^2 + j \cdot 325,32 \cdot \omega + 1 + 0,05857 \cdot (\cos 10\omega - j \cdot \sin 10\omega)} = \\ &= \frac{0,05857 \cdot e^{-10 \cdot (j\omega)}}{(1 + 0,05857 \cdot \cos 10\omega - 7604 \cdot \omega^2) + j \cdot (325,32 \cdot \omega - 0,05857 \cdot \sin 10\omega - 2400 \cdot \omega^3)} \end{aligned}$$

Амплітудно-частотну характеристику знайдемо як модуль АФЧХ цієї системи:

$$A(\omega) = |W_{\text{зам.н.ч.}}(j\omega)| = \frac{0,05857}{\sqrt{(1 + 0,05857 \cdot \cos 10\omega - 7604 \cdot \omega^2)^2 + (325,32 \cdot \omega - 0,05857 \cdot \sin 10\omega - 2400 \cdot \omega^3)^2}}$$

Знайдемо значення амплітудно-частотної характеристики неперервної частини замкненої автоматичної системи при нульовій частоті $A(0)$.

$$\begin{aligned} A(0) &= \frac{0,05857}{\sqrt{(1 + 0,05857 \cdot \cos(10 \cdot 0) - 7604 \cdot 0^2)^2 + (325,32 \cdot 0 - 0,05857 \cdot \sin(10 \cdot 0) - 2400 \cdot 0^3)^2}} \\ &= -\frac{0,05857}{1 + 0,05857} = 0,0553 \end{aligned}$$

Визначаємо праву частину рівняння:

$$A(0) \cdot \theta = 0,0553 \cdot 0,01 = 0,000553$$

Складаємо рівняння:

$$\begin{aligned} \frac{0,05857}{\sqrt{(1 + 0,05857 \cdot \cos 10\omega - 7604 \cdot \omega^2)^2 + (325,32 \cdot \omega - 0,05857 \cdot \sin 10\omega - 2400 \cdot \omega^3)^2}} &= \\ &= 0,000553 \end{aligned}$$

та розв'язуємо його в пакеті MathCad.

$$\omega := -1$$

Given

$$\frac{0.05857}{\sqrt{(1 + 0.05857 \cdot \cos(10 \cdot \omega) - 7604 \cdot \omega^2)^2 + (325.32 \cdot \omega - 2400 \cdot \omega^3 - 0.05857 \cdot \sin(10 \cdot \omega))^2}} = 0.000553$$

$$\text{Find}(\omega) = 0.115$$

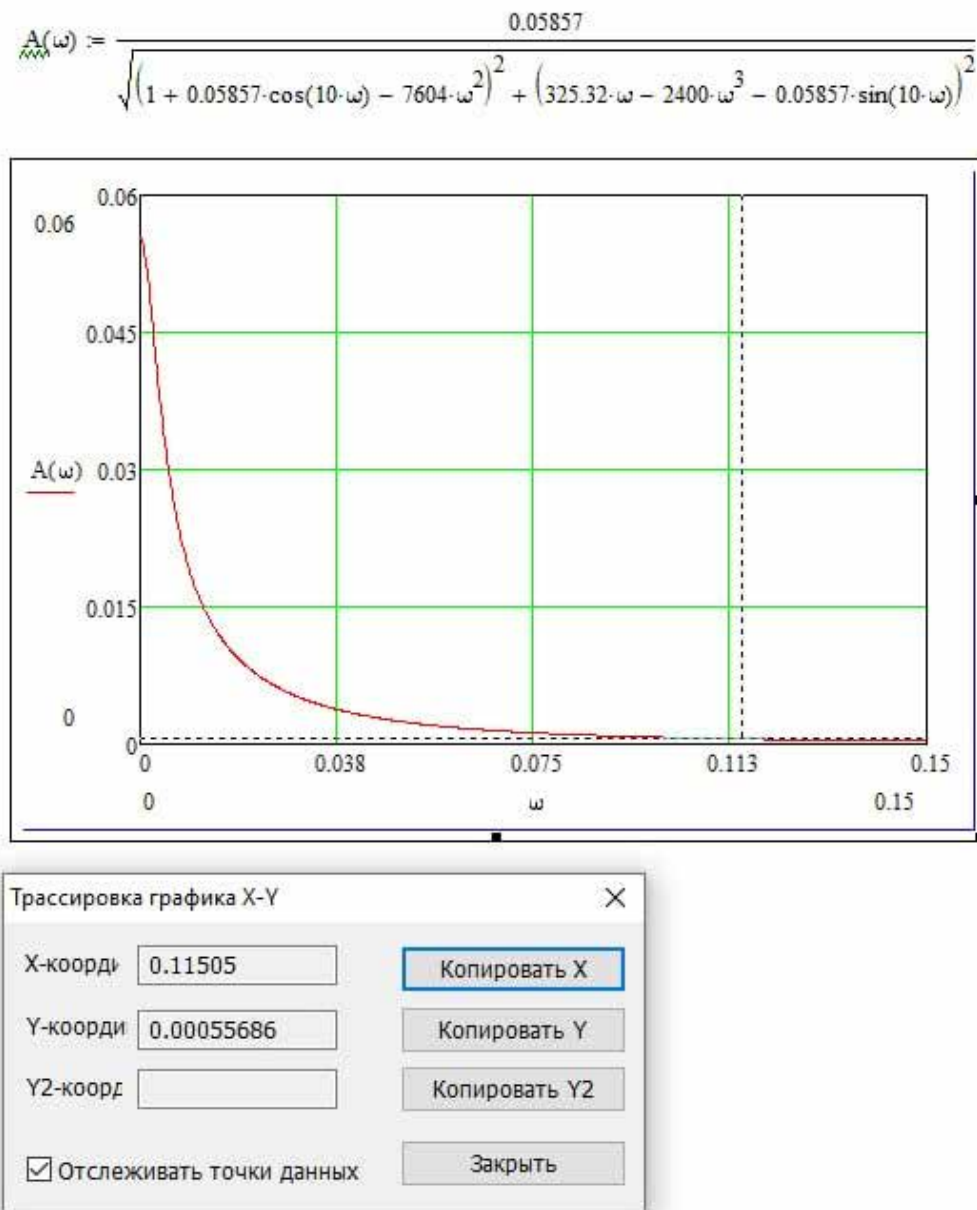


Рис. 3.7. Амплітудно-частотна характеристика неперервної частини системи

Найбільша суттєва частота:

$$\omega_c = 0.115.$$

Максимально допустимий період квантування, що забезпечує максимальну похибку $\theta_{\text{зад}} = 1\%$.

$$T_c = \frac{\pi}{\omega_c} = \frac{3.14}{0.115} = 27,318 \approx 27 \text{ с.}$$

3.3.2. Налаштування ПІД-регулятора

Визначення параметрів ПІД-регулятора. Незмінна частина складається з об'єкта керування з передатною функцією $W_O(s) = \frac{0,1 \cdot e^{-10s}}{300s+1}$ та виконавчого механізму з передатною функцією $W_{BM}(s) = \frac{2,57}{0,32s+1}$ та сприймаючого елементу з передатною функцією $W_{CE}(s) = \frac{0,2279}{25s+1}$.

Передатна функція незмінної частини:

$$W_{нч}(s) = \frac{0,05857 \cdot e^{-10s}}{(25s+1)(0,32s+1)(300s+1)} = \frac{0,05857}{(25s+1)(0,32s+1)(300s+1)(10s+1)}$$

У випадку ПІД-регулятора компенсуються дві постійні часу $T_1 = 300$ с та $T_2 = 0,32$ с. Сумарна некомпенсована постійна часу тут є сумою часу запізнення та постійної часу сприймаючого елемента $T_\mu = \tau_0 + T_{CE} = 10 + 25 = 35$ с.

Параметри налаштування регулятора:

$$K_p = \frac{T_1 + T_2}{K2T_\mu} = \frac{300 + 0,32}{0,1 \cdot 2 \cdot 35} = 42,9;$$

$$K_i = \frac{1}{K2T_\mu} = \frac{1}{0,1 \cdot 2 \cdot 35} = 0,14;$$

$$K_d = \frac{T_1 * T_2}{K2T_\mu} = \frac{300 * 0,32}{0,1 \cdot 2 \cdot 35} = 13,7.$$

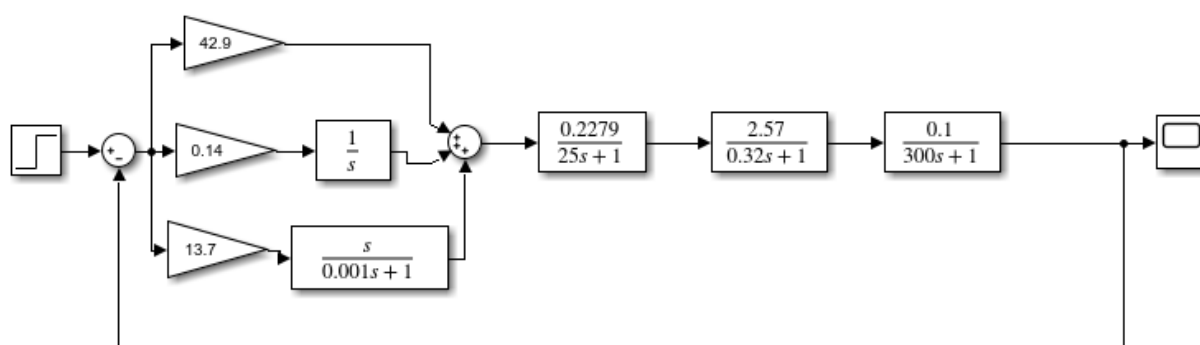


Рис.3.8. Імітаційна модель аналогової системи керування

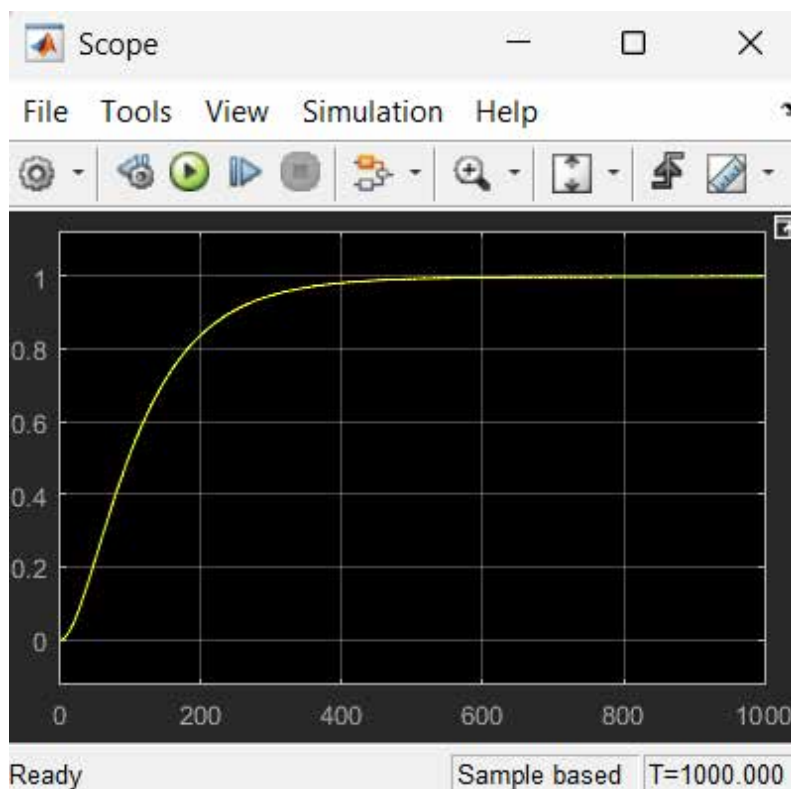


Рис. 3.9. Перехідні характеристики системи з ПІД-регулятором об'єкта інерційних ланок

Показники якості скоректованої системи:

- статична похибка $\delta = \frac{y_{зад} - y_{уст}}{y_{зад}} \cdot 100\% = \frac{1-1}{1} \cdot 100 = 0\%$;
- час регулювання $t_p = 400$ с ;
- перерегулювання $\sigma = \frac{y_{max} - y_{уст}}{y_{уст}} \cdot 100\% = \frac{1-1}{1} \cdot 100 = 0\%$;
- коливальність $n = 0$.

Для дослідження скоректованої системи з цифровим ПІД-регулятором будується її відповідна модель у Simulink, після чого здійснюється отримання графіків перехідних процесів. Розрахунок дискретної передатної функції регулятора виконується з урахуванням специфіки обраного алгоритму управління [18]:

$$\text{для ПІД-регулятора: } W_{рег}(z) = K_p + \frac{K_i T(z+1)}{2(z-1)} + \frac{K_d(z-1)}{Tz};$$

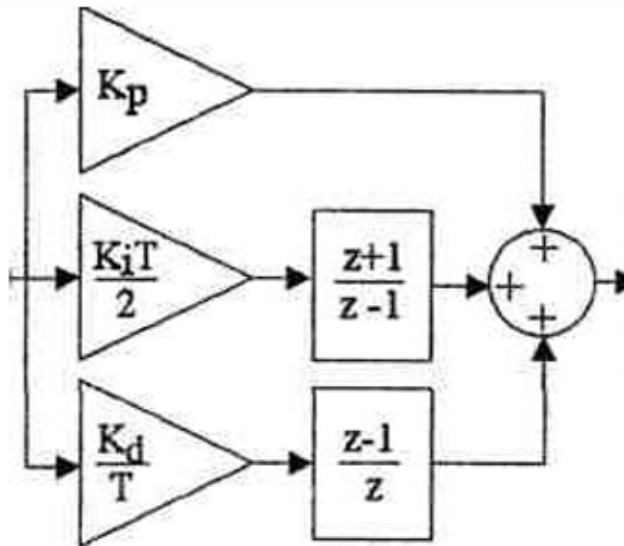


Рис. 3.10. Структурна алгоритмічна схема цифрового ПІД-регулятора

Визначаємо параметри підсилювачів (Gain) Simulink-моделі у відповідності з параметрами регулятора:

$$K_p = 42,9$$

$$\frac{K_i \cdot T}{2} = \frac{0,14 \cdot 27}{2} = 1,89$$

$$\frac{K_d}{T} = \frac{13,7}{27} = 0,507$$

3.3.3. Дослідження системи

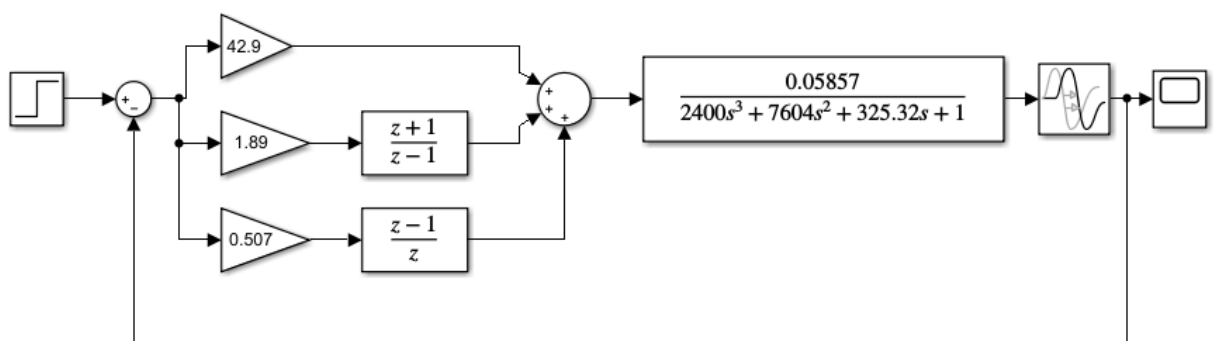


Рис. 3.11. Simulink-модель САР з цифровим ПІД-регулятором

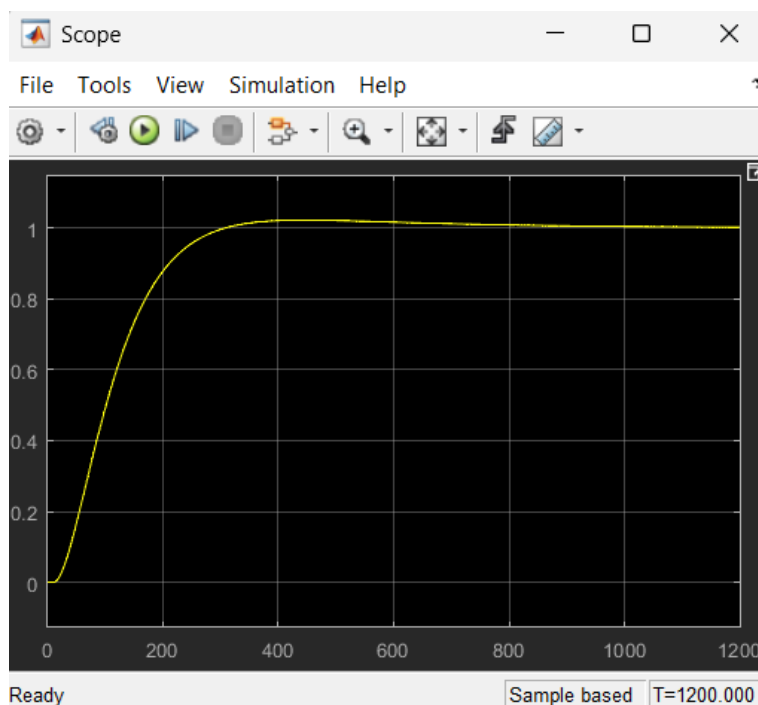


Рис. 3.12. Перехідна характеристика цифрової скоректованої системи

Показники якості скоректованої системи:

- статична похибка $\delta = \frac{y_{\text{зад}} - y_{\text{уст}}}{y_{\text{зад}}} \cdot 100\% = \frac{1-1}{1} \cdot 100 = 0\%$;
- час регулювання $t_p = 300$ с ;
- перерегулювання $\sigma = \frac{y_{\text{max}} - y_{\text{уст}}}{y_{\text{уст}}} \cdot 100\% = \frac{1.022-1}{1} \cdot 100 = 0\%$;
- коливальність $n = 0$.

Висновок: порівняльний аналіз отриманих результатів із вимогами технічного завдання засвідчує, що обраний період квантування є достатнім. Дискретизація сигналу чинить мінімальний вплив на показники якості функціонування системи, які залишаються в межах допустимих норм.

3.4. Вибір керуючого елементу

Для керування складними технологічними процесами, такими як температурний режим у камері лазерного верстата, де потрібно багато каналів вводу-виводу (мінімум 10 аналогових), стандартні одноканальні ПІД-регулятори зазвичай не підходять. Тому, обираємо регулятор, що спеціалізується на багатоконтурному керуванні (рис. 3.13) [19].



Рис. 3.13. Зовнішній вигляд регулятора Eurotherm Mini8

Контролер Mini8 забезпечує високоефективне керування, яке зазвичай доступне лише в ПІД-регулятори Eurotherm для монтажу на панелі. Його модульна конструкція забезпечує його введення/виведення та набір функцій, який потрібно вибрати для широкого спектру застосувань від простого до складного.

Набір функцій можна порівняти з панеллю Eurotherm серії 3000 контролери, включаючи високоефективне ПІД-регулювання та SP функції програмування разом із низкою функцій, таких як математика, Логічні та часові блоки.

При використанні в установці збору даних висока цільність контролера аналоговий вхід/вивід можна об'єднати з безпаперовою системою Eurotherm серії 6000 продукти графічного запису для забезпечення неперевершеного локального та мережевого доступу до вашого процесу [20].

Таблиця. 3.4.

Основні технічні характеристики Eurotherm Mini8

Характеристика	Опис / Значення
Кількість контурів PID	16 незалежних контурів керування
Аналогові входи	32 ізольованих каналів
Типи аналогових входів	Термопари (J, K, T, N, R, S, B, L, PLII), RTD (Pt100, Pt1000), мВ, мА, Вольти
Аналогові виходи	До 16 (4-20 мА, 0-10 В) або дискретні/логічні для керування SSR
Період опитування	250 мс для всіх каналів (стандартно)
Зв'язок (комунікації)	Ethernet (Modbus TCP), RS485 (Modbus RTU), DeviceNet, Profibus
Функції керування	PID, Ramp & Soak (профілі), каскадне керування, пропорційне охолодження/нагрівання
Напруга живлення	24 В постійного струму (DC) або 100-240 В змінного струму (AC)
Гальванічна ізоляція	Повна ізоляція між каналами та від живлення (захист від завад)
Програмне забезпечення	Eurotherm iTools (конфігурація через USB або Ethernet)
Тип архітектури	Модульна, монтаж на DIN-рейку

3.5. SCADA-система

Для забезпечення ефективного моніторингу та управління технологічним процесом регулювання температури в камері лазерного різання металу, передбачено впровадження SCADA-системи (Supervisory Control and Data Acquisition).

SCADA-система - диспетчерське управління та збір даних) - це програмно-апаратний комплекс, призначений для автоматизації процесів моніторингу та управління об'єктами в режимі реального часу. У сучасній промисловості SCADA є верхнім рівнем ієрархічної системи автоматизації, що забезпечує зв'язок між польовим обладнанням (датчиками, контролерами, виконавчими механізмами) та оператором.

SCADA-система виконує роль інтелектуального інтерфейсу, що перетворює потоки технічних даних на зрозумілу для людини інформацію. Її впровадження дозволяє вирішити наступні завдання:

Візуалізація технологічного процесу: Створення графічних мнемосхем, що в реальному часі відображають стан виробничих ліній, фізичні параметри (температуру, тиск, швидкість) та положення робочих органів обладнання.

Збір та архівування даних: Систематичний запис і накопичення технологічних параметрів у базі даних. Це забезпечує можливість ретроспективного аналізу, створення звітів про роботу обладнання та виявлення причин нештатних ситуацій.

Аварійна сигналізація та оповіщення: Автоматичне відстеження відхилень від заданих технологічних умов. У разі виходу параметрів за межі допусків SCADA-система реєструє подію, оповіщає персонал та вживає превентивних заходів для мінімізації наслідків.

Дистанційне управління та налаштування: Оператор отримує можливість коригувати уставки, змінювати режими роботи контролерів та керувати виконавчими механізмами з єдиного диспетчерського пункту, що мінімізує необхідність фізичного доступу до кожного окремого пристрою.

Діагностика та сервіс: Моніторинг технічного стану обладнання, що дозволяє впроваджувати стратегію обслуговування за фактичним станом, попереджуючи критичні відмови та простої виробництва.

Місце SCADA в структурі автоматизації

В ієрархічній архітектурі SCADA-система взаємодіє з промисловими контролерами (ПЛК), які знаходяться на рівні нижче. ПЛК виконують безпосередню обробку сигналів від датчиків та реалізацію алгоритмів управління (ПД-регулювання, логічні послідовності), забезпечуючи автономність системи. SCADA, своєю чергою, через промислові протоколи передачі даних (такі як Modbus, OPC UA, Profinet) отримує інформацію від контролерів та передає їм командні впливи від оператора [21].

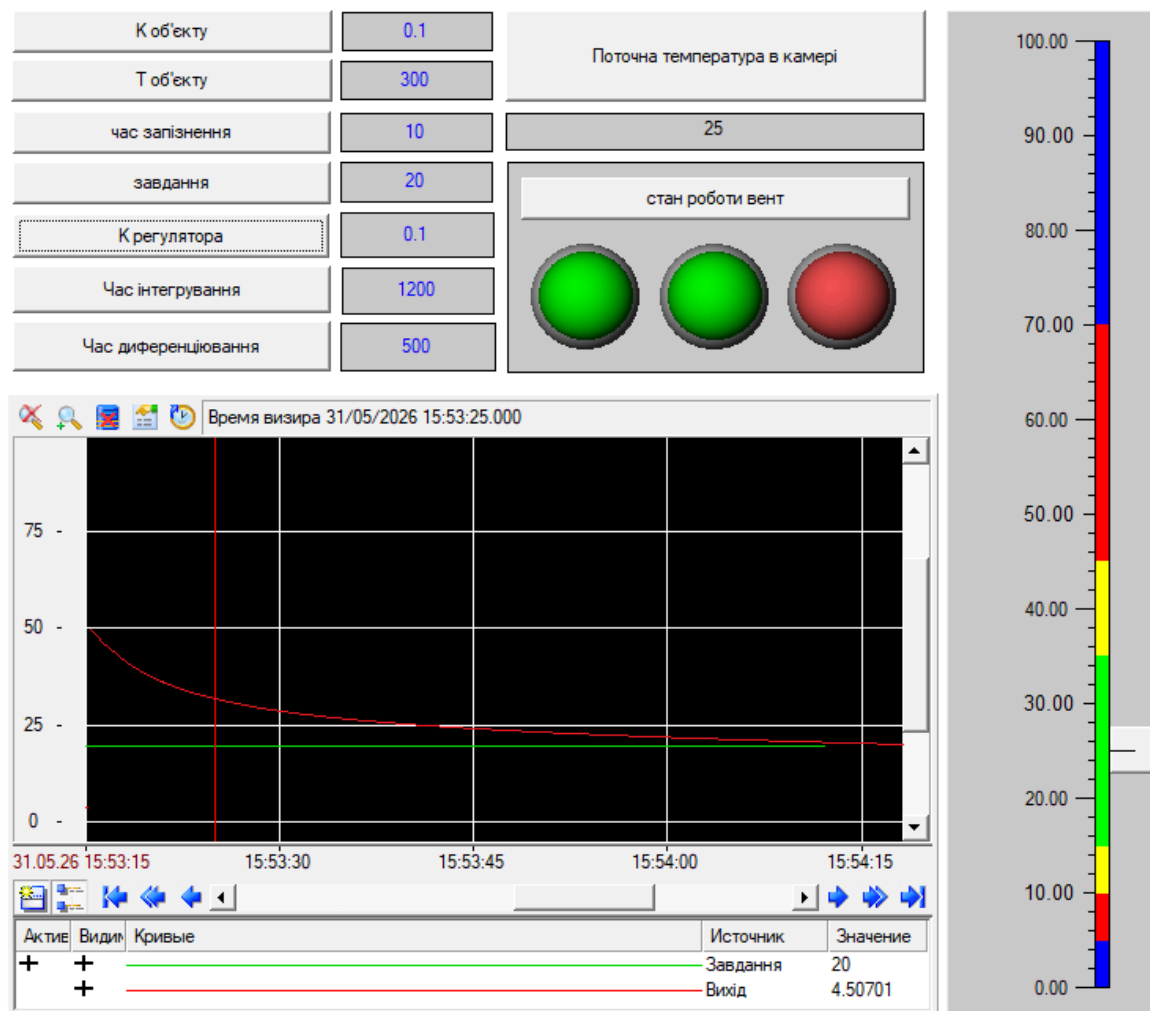


Рис. 3.14. SCADA-система керування температурою в камері для лазерного різання металу Yawei

РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

4.1. Вибір електротехнічних пристроїв

Обираючи електротехнічні пристрої, потрібно дотримуватися взаємоузгодженості технічних характеристик усіх елементів системи.

Електродвигун характеризується такими показниками, як: номінальна потужність, робоча напруга, сила струму та частота обертання валу.

Вибір кабельної продукції виконується розрахунком поперечного перерізу жил, який повинен витримувати тривалі струмові навантаження без перевищення допустимої температури нагріву ізоляції. При виборі типу захисної оболонки, її стійкість до механічних пошкоджень, вологи або хімічно активних речовин, враховуються умови монтажу та навколишнє середовище.

Вибір магнітних пускачів базується на номінальному струмі навантаження та категорії застосування, яка визначає здатність апарата комутувати пускові струми. Часто пускачі комплектують тепловими реле, параметри яких налаштовуються відповідно до захисних характеристик двигуна для запобігання перегріву. Захист усієї мережі від аварійних режимів (перевантаження та короткі замикання) забезпечують автоматичні вимикачі. Їхні параметри визначаються номінальним струмом та характеристикою спрацювання електромагнітного розчіплювача, яка має бути узгоджена з пусковими струмами обладнання, щоб уникнути хибних вимкнень [22].

4.1.1. Вибір автоматичних вимикачів

Для вибору автоматичного вимикача для електродвигуна моделі YE2-132S1-2 головним показником є номінальний струм, який становить $I_n = 10.6$ А. Щоб уникнути помилкових спрацювань при тривалій роботі під навантаженням, струм розчіплювача автоматичного вимикача повинен бути на 20-25% більшим за робочий струм двигуна. Оскільки електродвигун трифазний, автоматичний вимикач має бути триполюсним. Найкраще підходить автоматичний вимикач на

16 А, з характеристикою типу D, оскільки асинхронні двигуни в момент старту споживають струм, що в 5-8 разів перевищує номінальний.

Вибір автоматичного вимикача здійснюють, виконуючи такі умови:

- тип, серія,
- його номінальна напруга

$$U_{н.ав} \geq U_{м} , \quad (4.1)$$

де $U_{н.ав}$ - номінальна напруга автоматичного вимикача, В; $U_{м}$ - номінальна напруга мережі, В.

$$400 \text{ В} \geq 380 \text{ В}$$

- його номінальний струм:

$$I_{н.ав} \geq I_{н.дв} , \quad (4.2)$$

де $I_{н.ав}$ - номінальний струм автоматичного вимикача, А; $I_{н.дв}$ - номінальний струм електродвигуна, А;

$$16 \text{ А} \geq 10.6 \text{ А}$$

- номінальним струм теплового розчіплювача:

$$I_{нр} \geq 1,25 \cdot I_{н.дв} , \quad (4.3)$$

де $I_{нр}$ - номінальний струм теплового розчіплювача, А; 1,25 - коефіцієнт, враховуючий роздріб по струму спрацювання теплового розчіплювача [23];

При виборі автоматичного вимикача керуємося такими даними::

$$U_{н.м.}=380\text{В.}$$

$$I_{н.}=I_{н.дв.}=10,6 \text{ А.}$$

$$I_{н.р.}=10,6 \cdot 1,25=13,25 \text{ А.}$$

Обираємо автоматичний вимикач іС60N 3Р 16А D (виробник: Schneider Electric) (рис. 4.1) [24]. Технічні характеристики зазначені в таблиці 4.1.



Рис. 4.1. Автоматичний вимикач iC60N 3P 16A D Schneider Electric

Таблиця 4.1.

Технічні характеристики автоматичного вимикача iC60N 3P 16A D

Здатність відключення, кА:	6
Кількість полюсів:	3
Номінальний струм, А:	16
Серія виробів:	Acti9 - iC60N
Характеристика спрацювання:	D

Для перевірки обраного автоматичного вимикача здійснюють оцінку технічної придатності. Оцінка технічної придатності автоматичного вимикача виконується за такими умовами: перевіряється дотримання норм ПУЕ щодо співвідношення номіналу вимикача та пропускної здатності кабелю, забезпечується достатня чутливість для виявлення однофазних КЗ, враховується максимальна вимикальна здатність апарата, а також перевіряється здатність вимикача пропускати пускові струми без аварійного відключення. Всі умови виконані, відповідно, автоматичний вимикач вибраний вірно.

Для вибору автоматичного вимикача для захисту регулятора, визначимо його номінальний струм:

$$I_{\text{ном}} = \frac{P}{U} \quad (4.4)$$

$$I_{\text{ном}} = \frac{15}{24} = 0,625 \text{ A}$$

Обираємо автоматичний вимикач iC60N 1P 1A B (виробник: Schneider Electric) (рис. 4.2) [25]. Технічні характеристики зазначені в таблиці 4.2.



Рис. 4.2. Автоматичний вимикач iC60N 1P 1A B Schneider Electric

Таблиця 4.2.

Технічні характеристики: Schneider Electric iC60N 1P 1A B

Характеристика	Значення
Серія продукту	Acti9 (iC60N)
Кількість полюсів	1P (однополюсний)
Номінальний струм	1 A
Крива спрацювання	B
Номінальна напруга	230/400 В AC
Номінальна вимикальна здатність	6000 A (згідно EN 60898-1)
Клас обмеження енергії	3 (висока селективність)

Продовження таблиці 4.2.

Характеристика	Значення
Тип розчіплювача	Термомагнітний
Ступінь захисту (IP)	IP20
Тип монтажу	На DIN-рейку (35 мм)
Діапазон робочих температур	-35...70 °C

4.1.2. Вибір магнітних пускачів

Для правильного вибору магнітного пускача для трифазного асинхронного електродвигуна необхідно враховувати його основні технічні характеристики.

При виборі магнітного пускача першочергово визначають номінальний робочий струм електродвигуна, який обчислюється на основі його номінальної активної потужності, лінійної напруги мережі, коефіцієнта корисної дії та коефіцієнта потужності за класичною формулою трифазного змінного струму [22].

Його розраховують через номінальну потужність двигуна. Формула для трифазної мережі змінного струму:

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos\phi} \quad (4.9)$$

де: P_n - номінальна активна потужність двигуна на валу (Вт), U_n - номінальна лінійна напруга мережі (В) - 380 В, η - коефіцієнт корисної дії (ККД) у відносних одиницях, $\cos\phi$ - коефіцієнт потужності.

$$I_n = \frac{5500}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0.892 \cdot 0.88} = 10,64 \text{ А}$$

Магнітний пускач обирається за категорією застосування АС-3 (пуск електродвигунів із короткозамкненим ротором та вимкнення працюючих двигунів). Головна умова тривалої та надійної роботи контактів:

$$I_{\text{конт}} \geq K_{\text{запас}} \cdot I_n \quad (4.10)$$

Де $K_{\text{запас}}$ - коефіцієнт запасу, який залежить від умов експлуатації; $K_{\text{запас}} = 1.1 \dots 1.2$ - для легких умов пуску (вентилятори, насоси).

$$I_{\text{конт}} \geq 1.2 \cdot 10.6 \text{ А} = 12.72 \text{ А}$$

З стандартного ряду номінальних струмів магнітних пускачів обираємо найближче більше значення - 18 А.

При прямому пуску асинхронного двигуна виникає короткочасний стрибок струму, зумовлений перехідними процесами в обмотках:

$$I_{\text{пуск}} = I_n \cdot k_i \quad (4.11)$$

Де k_i - кратність пускового струму (для двигунів такої потужності та класу енергоефективності YE2/IE2 вона зазвичай становить: $k_i = 6.5 \dots 7.5$).

Розрахунок пускового кидка струму:

$$I_{\text{пуск}} = 10.6 \text{ А} \cdot 7 = 74.2 \text{ А}$$

Контакти пускача в момент замикання повинні витримувати цей струм без зварювання (прикипання). Контактори категорії АС-3 розраховані на короткочасне перевантаження при замиканні в межах $8 \cdot 10 I_{\text{конт}}$.

Теплове реле захищає двигун від перевантаження (коли струм тривалий час перевищує номінальний, викликаючи критичний перегрів обмоток). Струм не спрацювання реле повинен точно дорівнювати номінальному струму двигуна:

$$I_{\text{уст}} = I_n = 10.6 \text{ А}$$

Формула вибору діапазону регулювання теплового реле ($I_{\text{мін}} \dots I_{\text{макс}}$):

$$I_{\text{мін}} \leq I_{\text{уст}} \leq I_{\text{макс}} \quad (4.12)$$

Зазвичай обирають реле так, щоб необхідне значення знаходилося приблизно посередині шкали захисного пристрою, наприклад, теплове реле з діапазоном 9 ... 13 А [23].

Виходячи з розрахунків, обираємо магнітний пускач Schneider Electric S3P E 1NO 18A AC3 ~220В 50 ГЦ (рис. 4.3) [26].



Рис. 4.3. Зовнішній вигляд магнітного пускача Schneider Electric S3P E 1NO 18A
AC3 ~220В 50 ГЦ

Таблиця. 4.3.

Технічні характеристики магнітного пускача

Параметр	Значення / Характеристика
Кількість полюсів	3Р (3 силові полюси)
Категорія застосування	AC-3 / AC-3e
Номінальний робочий струм	18 А (при напрузі ≤ 440 В в AC-3)
Номінальна робоча напруга	До 690 В змінного струму
Потужність двигуна (3-фази)	7.5 кВт при 380/400 В
Напруга котушки керування	~220 В змінного струму (50/60 Гц)
Додаткові контакти	1 NO (нормально відкритий)

4.1.3. Вибір проводів керуючої мережі

Розрахунок номінального струму навантаження. Необхідно визначити, який струм буде протікати через кабель у нормальному режимі роботи.

Для трифазного двигуна змінного струму:

$$I_p = \frac{P_{nom}}{\sqrt{3} \cdot U_L \cdot \cos \varphi \cdot \eta} \quad (4.13)$$

де: I_p - розрахунковий (номінальний) струм, А; P_{nom} - номінальна потужність двигуна на валу, Вт; U_l - лінійна напруга мережі, В (380 В); $\cos\varphi$ - коефіцієнт потужності двигуна; η - коефіцієнт корисної дії.

$$I_p = \frac{5500}{1.732 \cdot 380 \cdot 0.88 \cdot 0.882} \approx 10.76 \text{ А}$$

Вибір перерізу за умовою допустимого нагрівання. Провідник під час протікання струму нагрівається. Кабель обирають так, щоб його тривало допустимий струм був більшим або дорівнював розрахунковому струму навантаження.

Умова вибору:

$$I_{dop} \geq I_p \quad (4.14)$$

де I_{dop} - тривало допустимий струм для обраного перерізу кабелю (А). Це значення не розраховується, а береться з таблиць ПУЕ (Правила улаштування електроустановок) залежно від матеріалу жил (мідь/алюміній), типу ізоляції та способу прокладання (в повітрі, в трубі, в землі).

$$36 \text{ А} \geq 10,6 \text{ А}$$

Перевірка обраного перерізу за втратою напруги. Будь-який кабель має власний опір. Якщо лінія довга, напруга на клеммах двигуна буде меншою, ніж на джерелі живлення. Для промислових електродвигунів допустима втрата напруги зазвичай становить не більше 5% [22].

Формула для розрахунку втрати напруги (у відсотках):

$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{3} \cdot I_p \cdot L \cdot (R_0 \cos\varphi + X_0 \sin\varphi)}{U_{nom}} \cdot 100\% \quad (4.15)$$

де: L - довжина кабельної лінії, км; R_0 - питомий активний опір кабелю, Ом/км (береться з довідників для обраного перерізу); X_0 - питомий індуктивний опір кабелю, Ом/км (зазвичай для перерізів до 16 мм² ним нехтують і вважають $X_0 \approx 0$); U_{nom} - номінальна напруга, В.

$$\Delta U\% = \frac{P_{nom} \cdot L}{C \cdot S} \quad (4.16)$$

$$\Delta U\% = \frac{5,5 \cdot 20}{77 \cdot 4} = 0,35 \%$$

Обираємо трижильний кабель - ВВГнг-LS 3х.

Згідно з Правилами улаштування електроустановок (ПУЕ), для чотирижильного мідного кабелю, прокладеного відкрито (в повітрі/в кабельному лотку), мінімальний стандартний переріз за умовою механічної міцності становить 4 мм² [23].

Шукаємо за таблицями ПУЕ тривало допустимий струм (I_{dop}) для мідного кабелю перерізом 4 мм²:

$$I_{dop} = 36 \text{ A}$$

Перевіряємо умову тривалого нагрівання струмом навантаження:

$$36 \text{ A} \geq 10,6 \text{ A}$$

Умова виконується. Переріз жил кабелю 4 мм² задовольняє вимогу за нагріванням (рис. 4.4) [27].

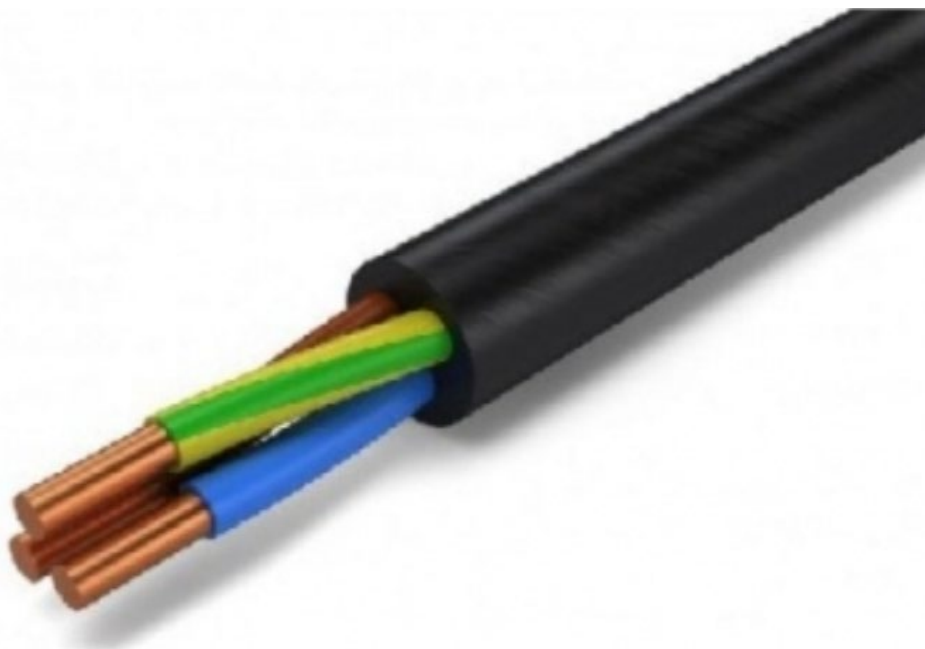


Рис. 4.4. Силовий кабель ВВГнг-LS 3х4

Для вибору кабелю на вхід живлення, врахуємо потужність двигуна та ПЧВ.

$$I_{vvod} = \frac{P_{comp}}{\sqrt{3} * U_l * \cos\phi} = \frac{5500+370}{1.732 * 380 * 0.85} \approx 11 A \quad (4.18)$$

Вибір перерізу ввідного кабелю за навантаженням.

Ввідні кабелі закладаються із запасом. Марка кабелю - ВВГнг-LS (мідний, не поширює горіння, зі зниженим виділенням диму). Оскільки потрібні 3 фази та заземлення (РЕ), нам потрібен 4-жильний кабель - ВВГнг-LS 4х...

В таблиці ПУЕ тривалого струму для 4-жильних мідних кабелів у повітрі (коробах/лотках): Кабель 4х4 мм² I_{dop} = 36 А.

$$I_{dop} \geq I_{vvod} \quad (4.19)$$

$$36 A \geq 11 A$$

Для ввідної шафи керування обрано силовий чотирижильний мідний кабель ВВГнг-LS 4х4 (три фази та заземлення перерізом 4 мм² кожна, рис. 4.6) [28]. Даний переріз повністю задовольняє вимоги за тривалим струмовим навантаженням $36 A \geq 11 A$) та забезпечує мінімальні втрати напруги ($\Delta U = 0.73\%$).

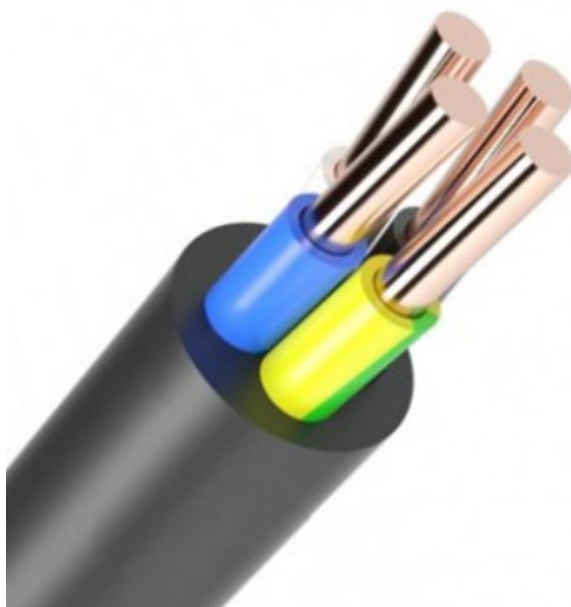


Рис. 4.6. Силовий кабель ВВГнг-LS 4х4

Для вибору кабеля для датчика, визначаємо його струм живлення за формулою:

$$I_p = \frac{P}{U} \quad (4.17)$$

$$I_p = \frac{15}{24} = 0.625 \text{ A}$$

Оскільки обладнання працює в промислових умовах, вибираємо силовий кабель із мідними жилами, у ПВХ-ізоляції, який не поширює горіння та має знижене димовиділення - марка ВВГнг-LS 2х1,5 (рис. 4.5) [29].



Рис. 4.5. Силовий кабель ВВГнг-LS 2х1,5

4.2. Розробка електричних схем автоматизації

4.2.1. Розробка електричної принципової схеми

Принципова електрична схема - це документ, який описує повний склад та логіку взаємодії всіх компонентів у певному електронному пристрої. Її основне призначення полягає у забезпеченні повного розуміння того, як саме протікає

струм, як формуються електричні сигнали та як ці сигнали перетворюються для виконання заданої функції приладу. Вона використовується розробниками під час проектування, бо дозволяє детально спланувати роботу схеми ще до її фізичного втілення на платі, допомагаючи уникнути помилок у розрахунках, перевірити правильність з'єднань та оптимізувати параметри компонентів. Така схема слугує технічною інструкцією для фахівців, які займаються збиранням та монтажем обладнання, адже вона вказує номінали та типи кожного елемента, що виключає двозначність при виборі деталей [30].

4.2.2. Розробка схеми з'єднань

Схема з'єднань відображає реальний спосіб підключення всіх вузлів. На ній фіксуються пристрої, плати, роз'єми та клеми, а також усі лінії зв'язку між ними. Пристрої на такій схемі позначаються у вигляді прямокутників або контурів, що повторюють їхні зовнішні обриси, тоді як всередині цих форм можуть бути розміщені як умовні позначення, так і скорочені варіанти принципів схем. На схемі обов'язково розташування виводів на кресленні має відповідати їхньому реальному місцю на компоненті. На відміну від принципової схеми, де головним є логіка взаємодії, тут обов'язково вказуються номери проводів та способи їхньої фіксації. У випадках, коли графічне зображення кожного з'єднання перевантажує документ, стандарт дозволяє замінювати частину позначень спеціальними таблицями, де прописані характеристики ланцюгів та адреси підключень. Загалом розташування елементів на схемі з'єднань має відповідати їхньому реальному розміщенню всередині приладу, хоча від цього правила можна відступити, якщо пристрій надто складний або його конфігурація є змінною [31, с. 122].

4.2.3. Розробка схеми підключень

Електрична схема підключення призначена для відображення зовнішніх зв'язків виробу з іншим обладнанням. Основне її завдання - показати, як і якими саме кабелями чи проводами пристрій приєднується до зовнішньої мережі. Виріб

на такій схемі зазвичай позначається прямокутником або спрощеним контуром, всередині якого розміщуються графічні символи вхідних та вихідних елементів, таких як роз'єми, затискачі чи клеми. Розташування цих елементів на схемі має бути максимально відповідати їхньому реальному фізичному розміщенню на корпусі виробу, а їхні позиційні позначення збігалися з тими, що були присвоєні на принциповій схемі.

Усі проводи, кабелі, джгути та електричні шнури зображуються окремими лініями, біля яких наводяться технічні дані: марка, переріз, колірне маркування та кількість жил. Додатково біля роз'ємів допускається зазначати їхні назви або посилання на технічні документи, що регулюють їх застосування [31, с. 130].

4.2.4. Розробка загального виду щита керування

Загальний вигляд щита керування - це креслення, яке показує, як саме має бути облаштований електричний щит. Це візуальна інструкція, яка демонструє зовнішній вигляд корпусу та розташування всього обладнання всередині і зовні. Схема відображає вигляд лицьової панелі, де розміщені всі органи керування, такі як кнопки, перемикачі, світлові індикатори, екрани та дисплеї контролерів. Також, на ній зображено вигляд щита зсередини, де вказано місця встановлення монтажних рейок, автоматів захисту, пускачів, реле, клемних колодок та кабель-каналів. Загальний вигляд потрібен для того, щоб ще до початку збирання можна було зрозуміти, чи помістяться всі необхідні компоненти в корпус, чи буде зручно оператору керувати системою та чи зможе монтажник легко підключити всі кабелі [32, с. 33].

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Економічна ефективність автоматизації вимірюється ступенем зменшення витрат на виробництво та експлуатацію.

Загальна характеристика ефективності

Економічна ефективність впровадження системи автоматичного керування (САК) вентиляцією лазерної установки Yawei складається з наступних ефектів:

- Енергетичний ефект: скорочення витрат електроенергії за рахунок використання частотного перетворювача, який регулює оберти витяжного вентилятора залежно від інтенсивності виділення диму/газу, замість постійної роботи вентилятора на повну потужність. Крім того, в зимовий період зменшуються втрати нагрітого повітря з цеху.
- Трудовий ефект: скорочення часу оператора на ручне керування вентиляцією та покращення санітарно-гігієнічних умов праці.
- Технологічний ефект: своєчасне і автоматичне видалення продуктів горіння зменшує осідання нагару на оптичних лінзах лазера, що подовжує їхній ресурс і зменшує кількість браку.

Основний критерій економічної ефективності - це термін окупності капітальних витрат [5].

Капітальні витрати (K_a) на автоматизацію визначаються за формулою:

$$K_a = K_z + K_m + K_6 + K_o - K_p \quad (5.1)$$

де K_z - вартість засобів автоматики (давачі, контролер, частотний перетворювач);

K_m - витрати на монтаж і налагодження.

У нашому випадку реконструкція будівель (K_6) не потрібна, тому цей показник дорівнює нулю.

Зводимо всі витрати на впровадження САК вентиляцією в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1.

Інвестиції у впровадження САК вентиляцією

№ п/п	Інвестиційні витрати	Сума, грн.
1	Вартість обладнання (ПЛК, давачі диму/температури, частотний перетворювач, щит): Eurotherm Mini8 ТСМ-6114	45291 302
2	Розробка програмного забезпечення та проєктної документації	20000
3	Кабельно-провідникова продукція, електротехнічні пристрої, та витратні матеріали Авт. вим. іС60N 3P 16A D Schneider Electric Авт. вим. іС60N 1P 1A B Schneider Electric Магн. пускач Schneider Electric S3P E 1NO 18A AC3 ~220В 50 ГЦ Кабель ВВГнг-Іs 3х4 (10 м) Кабель ВВГнг-Іs 4х4 (20 м) Кабель ВВГнг-Іs 2х1,5 (10 м)	1400 359 1368 1440 3780 440
4	Вартість монтажу та пусконаладжувальних робіт	20000
5	Непередбачувані витрати	15000
Разом (K _a):		109380

Річні експлуатаційні витрати виробництва складаються з амортизаційних відрахувань (B_a), витрат на поточний ремонт (B_r), зарплати персоналу (B_3) та вартості електроенергії (B_e):

$$B_a = B_a + B_p + B_3 + B_e + B_{\pi} \quad (5.2)$$

Економічний ефект досягається переважно за рахунок різниці в споживанні електроенергії (B_e) неавтоматизованою (B_n) та автоматизованою (B_a) системами.

Потужність двигуна вентилятора - 5 кВт. При ручному керуванні вентилятор працює постійно (8 годин/зміну * 250 днів = 2000 годин). Споживання: 10 000 кВт·год. При автоматичному керуванні середнє споживання знижується на 30% (до 6 000 кВт·год).

Таблиця. 5.2.

Порівняння річних експлуатаційних витрат

Стаття витрат	До автоматизації (B_n), грн	Після автоматизації (B_a), грн	Економія (Різниця), грн
Електроенергія (за тарифом 14 грн/кВт·год)	140000	98000	42000
Заміна захисного скла та лінз лазера (технологічний ефект)	25000	15000	10000
Амортизація та обслуговування системи вентиляції	5000	6500	- 1500
Збереження тепла в цеху взимку (менше викидів повітря)	12000	7000	5000
Разом експлуатаційні витрати:	182000	126500	55500

Прибуток за рахунок зміни річних експлуатаційних витрат становить:

$$E = B_n - B_a = 182000 - 126500 = 55500 \text{ грн/рік.} \quad (5.3)$$

Термін окупності капітальних витрат на автоматизацію ($T_{ок}$) розраховується як відношення капітальних інвестицій до річної економії [5]:

$$T_{ок} = \frac{K_a}{B_n - B_a} = \frac{109380}{55500} \approx 1.97 \text{ року} \quad (5.4)$$

Розрахунковий термін окупності проекту автоматизації вентиляції лазерної установки Yawei становить майже 2 роки (23,9 місяців).

ВИСНОВКИ

В даній бакалаврській кваліфікаційній роботі я розробив систему автоматичного керування вентиляцією камери лазерної установки Yawei. Мета, з якою це було розроблено - знизити температуру в середині камери лазерної установки під час її роботи; підвищити ефективність роботи лазерної установки; уникнути забруднення дрібнодисперсним пилом камери, обладнання та приміщення виробництва, де знаходиться дана установка, який виділяється внаслідок лазерного різання металу, який також може завдати шкоди здоров'ю, внаслідок його потрапляння в легені людини, яка дихає цим повітрям.

При виконанні роботи було розглянуто технологічну характеристику лазерної установки Yawei, її призначення, описано принцип роботи. Також була розроблена функціональна схема автоматизації лазерної установки Yawei, де було зображено основні елементи, такі як: датчики температури та вологості, двигуни та вентилятори, та інші конструктивні елементи (ріжучий елемент, трубопровід та щит керування).

Розробка математичної моделі керування температурою в камері лазерної установки та її дослідження дозволило ідентифікувати динамічні характеристики об'єкта - сталу часу, коефіцієнт передачі та транспортне запізнення. Це дозволило синтезувати загальну передатну функцію замкненого контуру керування, інтегрувавши в неї параметри вимірювальних пристроїв та виконавчих елементів.

На основі розрахованої передатної функції, було здійснено вибір ПД-регулятора. Виконавши розрахунок, обрано модель регулятора Eurotherm Mini8. Для здійснення вимірювання, контролю та реєстрації параметрів було обрано технічні засоби автоматизації, а саме термоперетворювач опору TCM-6114 та датчик пилу Sick Dusthunter Sb.

В електротехнічній частині проекту було здійснено вибір автоматичних вимикачів, магнітного пускача; та розроблено схеми системи автоматизації, такі

як: схема електрична принципова, схема електричних з'єднань, електричних підключень та зовнішній вигляд щита керування.

При обрахунку техніко-економічної частини визначено всі необхідні витрати на впровадження САК вентиляції лазерної установки Yawei, зроблено порівняння річних експлуатаційних витрат та встановлено, що розрахунковий термін окупності проекту автоматизації становить майже 2 роки (23,9 місяців). З огляду на те, що нормативний термін окупності для подібних систем промислової автоматики допускається до 5-7 років, запропоноване рішення є економічно доцільним та інвестиційно привабливим.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Верстати з ЧПК Yawei в Україні | Abplanalp. Abplanalp Україна - офіційний постачальник ЧПК-обладнання. URL: <https://abplanalp.ua/yawei> (дата звернення: 24.05.2026).
2. Лазерний верстат з ЧПК Yawei HLB-2040 | Abplanalp. Abplanalp Україна - офіційний постачальник ЧПК-обладнання. URL: <https://abplanalp.ua/lazernyj-verstat-z-chpk-yawei-hlb-2040> (дата звернення: 24.05.2026).
3. Лазерна різка металу в Україні - Лазерна різка металу: типи, плюси, призначення та технологія. ПБКП "Матриця". URL: <https://www.metmatrix.net/lazerna-rizka-metalu-perevagi-materiali-vidi-sfera-zastosuvannja/> (дата звернення: 24.05.2026).
4. Лазерна різка металу в Україні - порізка на верстаті з ЧПК. ПБКП "Матриця". URL: <https://www.metmatrix.net/services/laser-cutting/> (дата звернення: 24.05.2026).
5. Основні методи та методики підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра / В.П. Лисенко., А. О. Дудник, В.О. Мірошник, А. А. Руденський, Н.А. Заєць - Київ : Компринт, 2023. - 303 с.
6. Схема автоматизації функціональна. Wiki ТНТУ. URL: https://wiki.tntu.edu.ua/Схема_автоматизації_функціональна (дата звернення: 26.05.2026).
7. ДСТУ БА.2.4-16:2008. Автоматизація технологічних процесів. Умовні графічні зображення приладів і засобів автоматизації в схемах. На заміну ГОСТ 21.404-85; чинний від 2010-01-01. Вид. офіц. 2008, 10 с.
8. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів/ В.Лисенко, Є.Чернищенко, В.Решетюк, В.Мірошник, Н.Заєць, І.Цигульов - К.: Аграр Медіа Груп, 2016. - 476 с.
9. Остапенко Ю.О. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування. - К.: Задруга, 1999. - 424 с.

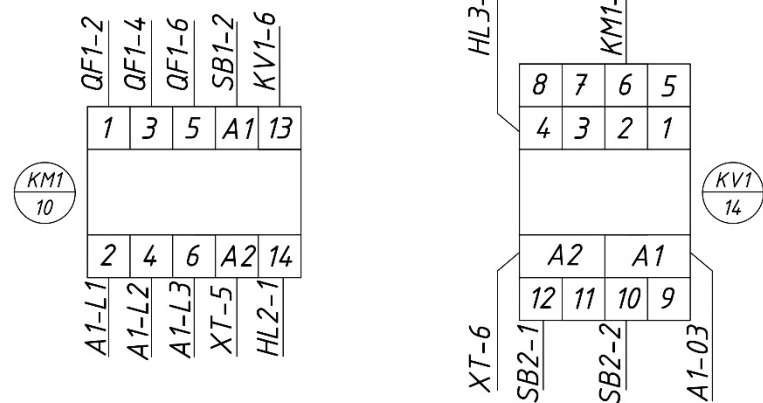
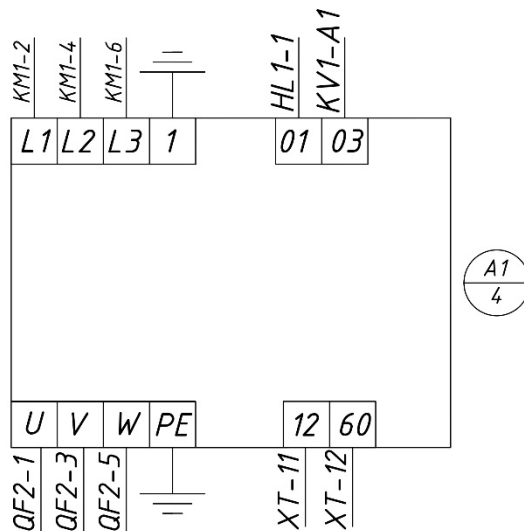
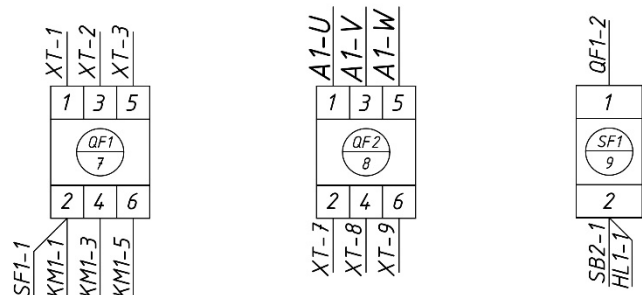
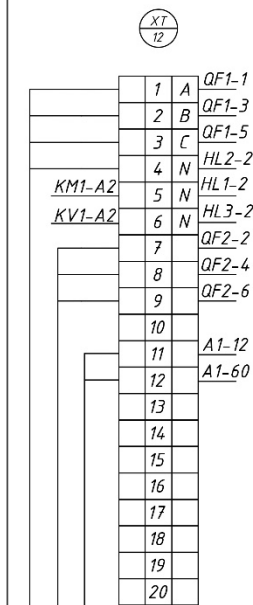
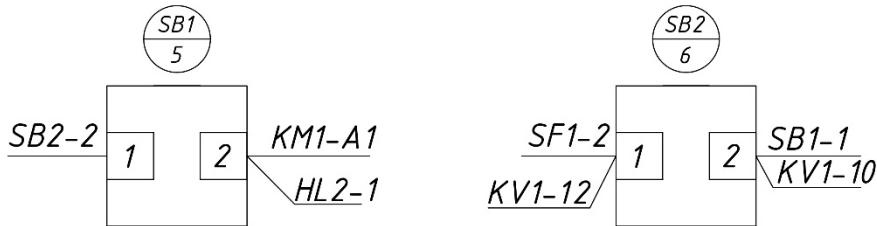
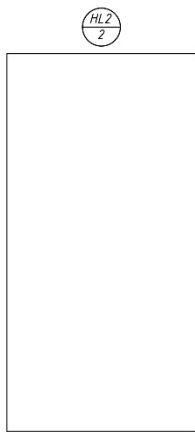
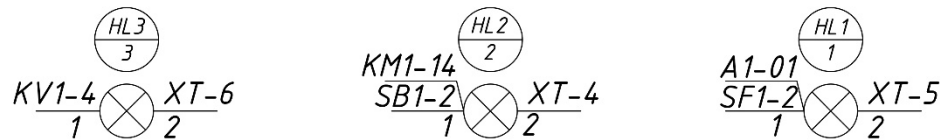
10. Лисенко В.П., Мірошник В.О., Штепа В.М. Комп'ютерно-інтегровані технології. Основи MatLab. Навчальний посібник., К.: Вид.центр НУБіП України, 2010. 80 с.
11. Robert Sevenich "Instrumentation and Process Control" Encyclopedia of Dairy Sciences (Third edition), Elsevier, 2022, Pages 336-355 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818766-1.00330-5>:
12. Olivier Bethoux "PID controller design" Encyclopedia of Electrical and Electronic Power Engineering Elsevier, 2023, Pages 261-267, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821204-2.00102-1>
13. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. - К.:Либідь, 2007. - 656 с.
14. Теорія автоматичного управління: Навчальний посібник : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В.П. Бунь. - Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. - 144 с.
15. Датчик концентрації пилу - SICK | Sensor Intelligence. URL: https://www.sick.com/media/docs/4/54/654/operating_instructions_dusthunter_sb_en_im0037654.pdf (дата звернення: 30.05.2026)..
16. Теорія автоматичного керування. Сучасна теорія керування: Лабораторний практикум : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: А. О. Данькевич, В. С. Цапар - Електронні текстові дані (1 файл: 1,21 Мбайт). - Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. - 30 с.
17. Гавриляк М.С. Основи автоматики та систем управління / М.С. Гавриляк - Чернівці: Чернівець. нац. ун-тет, 2022, с. 211
18. Цифрові системи керування. Навчальний посібник / Головінський Б.Л., Шуруб Ю.В., Дудник А.О., Лисенко В.П. - К.: Видавничий центр НУБіП України, 2016. - 110 с.

19. Mini8 Loop Controller | Eurotherm. Eurotherm. URL: <https://www.eurotherm.com/products/temperature-controllers/multi-loop-temperature-controllers/mini8-loop-controller/> (date of access: 26.05.2026).
20. Eurotherm Controls, Indicators, Alarms, SCRs, SSCs & Zelio SSRs | Eurotherm Online. URL: [https://eurothermonline.com/media/instrument-manuals/Mini8™%20Controller%20Installation%20and%20Wiring%20Guide%20\(HA028497%20Issue%207\)%20\(907KB\).pdf](https://eurothermonline.com/media/instrument-manuals/Mini8™%20Controller%20Installation%20and%20Wiring%20Guide%20(HA028497%20Issue%207)%20(907KB).pdf) (дата звернення: 26.05.2026).
21. Що таке SCADA - система. Статті компанії «АВТОМАТИК СЕРВІС УКРАЇНА» URL: https://asu-tp.shop/ua/a491259-что-такое-scada.html?srsId=AfmBOorVogfitQAG3S76sKU2D3b4cBTG4_156shk4YBWjyQBJg5lMwL5 (дата звернення: 26.05.2026).
22. Мурзін В.К. Загальна електротехніка. - Полтава: Кременчук, 2001. - 323 с.
23. Селепина, Й.Р. Якимчук Н.М. Теоретичні основи електротехніки - Луцьк : Луцький НТУ, 2015.-273 с.
24. Автоматичний вимикач iC60N 3P 16A D. Schneider Electric. URL: <http://www.se.com/ua/uk/product/A9F75316/автоматичний-вимикач-ic60n-3p-16a-d/> (дата звернення: 24.05.2026).
25. Автоматичний вимикач iC60N 1P 1A B. Schneider Electric. URL: <https://www.se.com/ua/uk/product/A9F73101/автоматичний-вимикач-ic60n-1p-1a-b/>
26. Контактор 3P E 1NO 18A AC3 ~220В 50 Гц. Schneider Electric. URL: <http://www.se.com/ua/uk/product/LC1E1810M5/контактор-3p-e-1no-18a-ac3-220в-50-гц/> (дата звернення: 24.05.2026).
27. VSE-E.COM - Силовий кабель ВВГнг-ls 3*4. URL: <https://vse-e.com/ua/kabel-vvgngd-3h4-vvgng-ls-34> (дата звернення: 26.05.2026).
28. VSE-E.COM - Силовий кабель ВВГнг-ls 4*4. URL: <https://vse-e.com/ua/kabel-vvgngd-4h4> (дата звернення: 26.05.2026).
29. VSE-E.COM - Силовий кабель ВВГнг-ls 2*1,5. URL: <https://vse-e.com/ua/kabel-vvgngd-2h15>. (дата звернення: 26.05.2026).

30. Схема електрична принципова - Wiki ТНТУ. Wiki ТНТУ. URL: https://wiki.tntu.edu.ua/Схема_електрична_принципова (дата звернення: 26.05.2026).

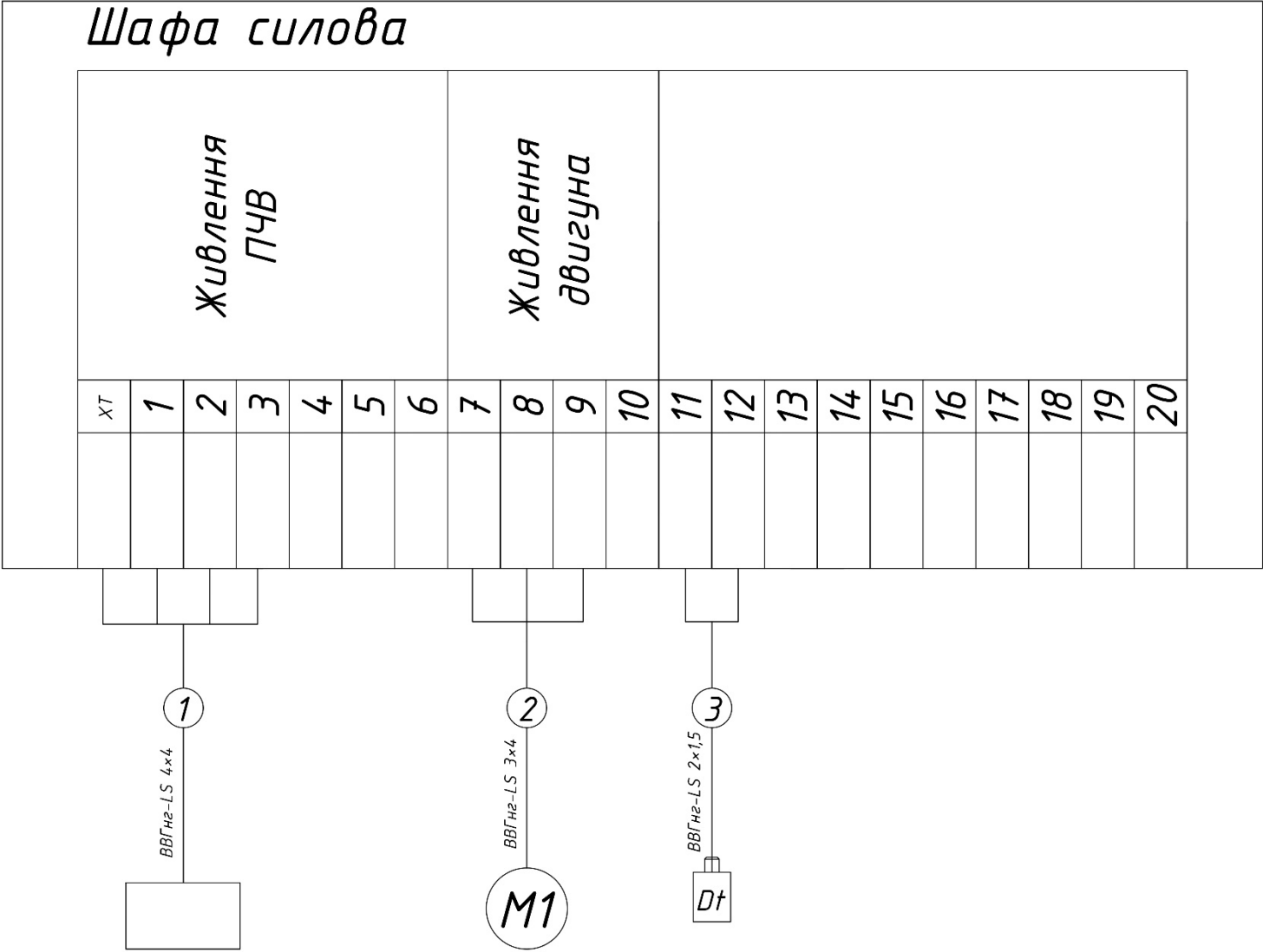
31. Конспект лекцій за курсом „Конструювання та проектування приладів енергетичної електроніки” для студентів ЗДІА спеціальності 7.0908.03, 8.0908.03 «Електронні системи» /Укладач: О.Г. Воронін, В.І. Тараканов - Запоріжжя, 2006р.- 140с.

32. Проектування систем автоматизації : конспект лекцій для студентів спеціальності «Автоматизація технологічних процесів» / уклад. Ю. Є. Кисельов, В. П. Бунь, Т. Г. Баган. Київ : НТУУ «КПІ», 2002. 52 с.



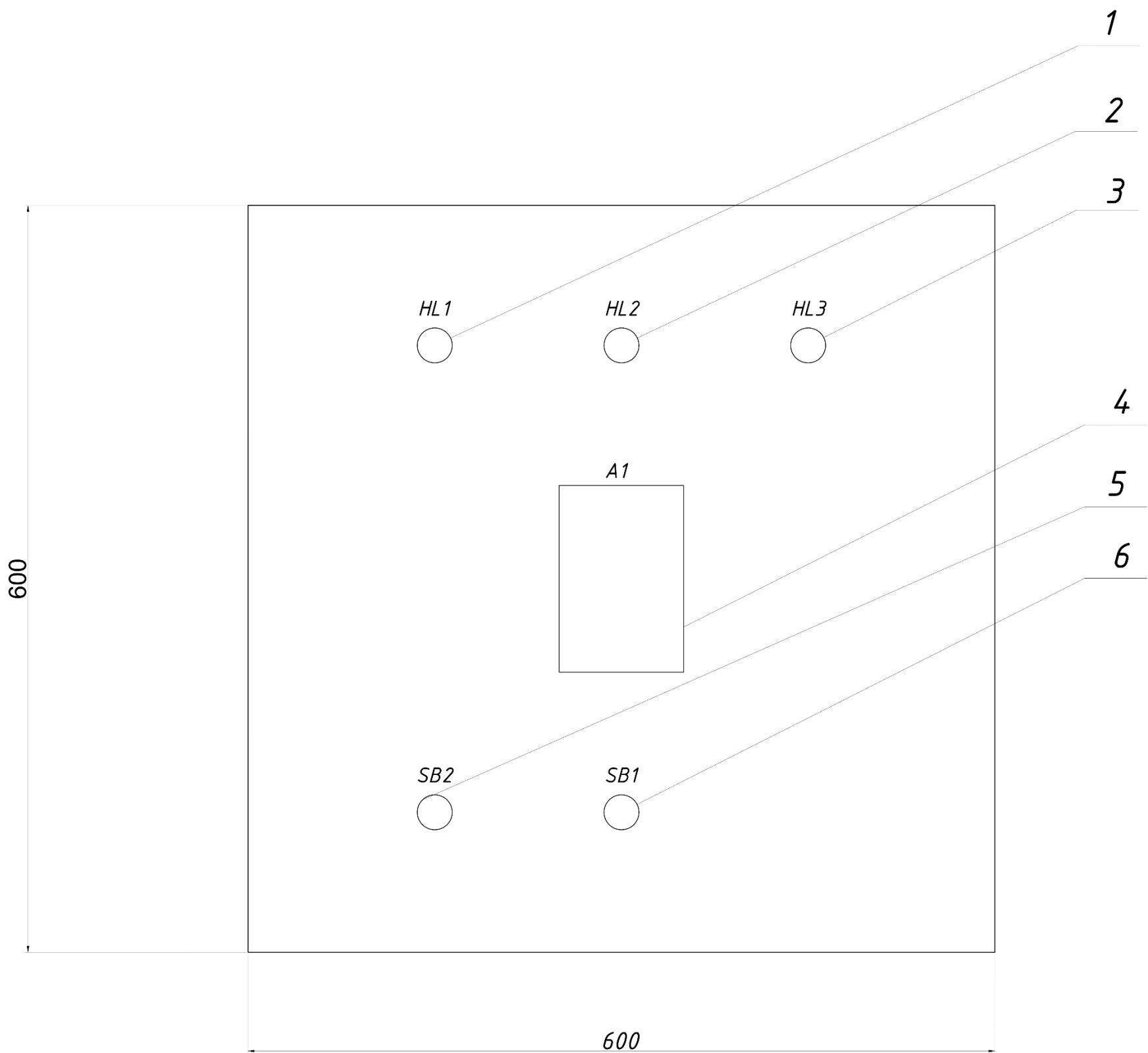
до мережі 400В
до двигуна
до датчика

Відповідальна організація	Технічне узгодження	Розробник документа	Документ затверджено	Масштаб
Кафедра АРС	Дудник А.О.	Ненно А.О.	Дудник А.О.	
Власник документа		Статус документа		
НБУП України ННІ Енергетики, автоматики та енергозбереження		Схема електричних з'єднань		
Назва, додаткова назва		Розподільна система автоматичного керування вентиляцією камери лазерної установки Уямеї		
Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш	
1	30.05.2026	Ukr	2	



№	1	2	3
Назва обладнання	Живлення	Двигун	Датчик температури
Тип обладнання	400 В 50 Гц	YE2-132S1-2	TSM-6114

Відповідальна організація	Технічне узгодження	Розробник документа	Документ затверджено	Масштаб
Кафедра АРС	Дудник А.О.	Ненно А.О.	Дудник А.О.	
Власник документа		Вид документа	Статус документа	
НУБП України ННІ Енергетики, автоматики та енергозбереження		Схема електричних підключень	опублікований	
		Назва, додаткова назва		
		Розподільня системи автоматичного живлення вентиляторів камери лазерної установки Улемі		
Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш	
1	30.05.2026	Ukr	3	



Поз.	Позначення	Найменування	Кільк.	Примітки
1	HL1	Лампа сигнальна "Живлення"	1	
2	HL2	Лампа сигнальна "Двигун ввімкнено"	1	
3	HL3	Лампа сигнальна "Аварія"	1	
4	A1	Перетворювач частоти ПЧВ	1	400В
5	SB1	Кнопка "Пуск" АА21	1	
6	SB2	Кнопка "Стоп" АА41	1	

Відповідальна організація Кафедра АРС	Технічне узгодження Дудник А.О.	Розробник документа Ненно А.О.	Документ затверджено Дудник А.О.	Масштаб 1 : 2
Власник документа НУБІП України ННІ Енергетики, автоматики та енергозбереження		Вид документа Загальний вигляд щита керування	Статус документа опублікований	
		Назва, додаткова назва Розподільник системи автоматичного керування вентиляцією камери лазерної установки Уямеї		
		Інд. змін. 1	Дата видання 30.05.2026	Мова Ukr