

**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) (ІПБ)

" ____ " _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему **"РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ
КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ОЗОНУВАННЯ КАРТОПЛІ"**

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.
(І.І.Б.)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

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

_____ (підпис)

Кіктєв М.О.
(І.І.Б.)

Виконав

_____ (підпис)

Серб О. К.
(І.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 бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Сербу Олексію Костянтинович

(прізвище, ім'я, по батькові)

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

1. Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи: "Розробка комп'ютерно-інтегрованої системи керування процесом озонування картоплі", затверджена наказом ректора НУБіП України від "24" 10 2025 р. № 2515"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. Технологія і промислове обладнання для виробництва картоплі
 - 4.2. Розробка та дослідження математичної моделі процесу озонування картоплі.
 - 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. Функціональна схема автоматизації системи керування озонування картоплі.
- 5.2. Система автоматизації процесу озонування картоплі. Схема електрична принципова.
- 5.3. Система автоматизації процесу озонування картоплі. Схема електрична з'єднань.
- 5.4. Система автоматизації процесу озонування картоплі. Схема електрична підключень.
- 5.5. Система автоматизації процесу озонування картоплі. Зовнішній вид щита керування.

Дата видачі завдання "25" жовтня 2025 року

**Керівник
бакалаврської
кваліфікаційної роботи**

(підпис)

Кіктєв М. О.
(П.І.Б.)

**Завдання прийняв до
виконання**

(підпис)

Серб О. К.
(П.І.Б.)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	6
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОЗОНУВАННЯ КАРТОПЛІ	10
1.1. Технологічні основи застосування озону при зберіганні картоплі	10
1.2. Характеристика картоплесховища як об'єкта керування. Інформаційний аналіз	11
1.3. Аналіз існуючих технічних рішень та систем автоматизації	15
1.4. Розробка функціональної схеми автоматизації	17
1.5. Обґрунтування параметрів контролю та регулювання	23
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	25
2.1. Побудова математичної моделі каналу «продуктивність озонатора - концентрація озону»	25
2.2. Визначення передатної функції об'єкта керування	26
РОЗДІЛ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ І ВИБІР АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ	29
3.1. Обґрунтування та вибір закону керування	29
3.2. Синтез Під-регулятора концентрації озону	31
3.3. Моделювання системи керування в середовищі MATLAB/Simulink	33
3.4. Аналіз стійкості системи за годографом Найквіста	38
3.5. Визначення параметрів налаштування регулятора	40
3.6. Оцінка якості за стандартними показниками	43
3.7. Зведена оцінка якості функціонування КІСК	44
РОЗДІЛ 4. ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ КІСК	46
4.1. Вибір датчиків системи автоматичного керування	46
4.2. Вибір програмованого логічного контролера	51
4.3. Вибір виконавчих механізмів та регулювальних органів	55
4.4. Зведена відомість технічних засобів автоматизації	61
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	63
5.1. Розробка електричної принципової схеми	63
5.2. Розробка схеми з'єднань та схеми підключень	65
5.3. Розробка компонування щита керування	67
5.4. Вибір апаратів захисту та проводів	69
РОЗДІЛ 6. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ	71
6.1. Алгоритм роботи програмного забезпечення ПЛК	71
6.2. Розробка операторського інтерфейсу НМІ	73

РОЗДІЛ 7. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ	75
7.1. Розрахунок капітальних витрат на впровадження системи	75
7.2. Розрахунок економічного ефекту та строку окупності	75
7.3. Розрахунок експлуатаційних витрат	77
7.4. Охорона праці та безпека при роботі з озоном	77
ВИСНОВКИ	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	82
ДОДАТКИ	85
ДОДАТОК А	85

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

KICK - комп'ютерно-інтегрована система керування;
CAK - система автоматичного керування;
CAP - система автоматичного регулювання;
OK - об'єкт керування;
ПЛК - програмований логічний контролер;
ФСА - функціональна схема автоматизації;
ШіМ - широтно-імпульсна модуляція;
ЧП - частотний перетворювач;
HMI - Human-Machine Interface (людино-машинний інтерфейс);
SCADA - Supervisory Control And Data Acquisition;
Під - пропорційно-інтегрально-диференціальний (закон регулювання);
ГДК - гранично допустима концентрація;
ПФ - передатна функція;
АФЧХ - логарифмічна амплітудно-частотна характеристика;
О₃ - озон;
rH - відносна вологість повітря (relative humidity).

ВСТУП

Агрокультура картоплі посідає високе місце серед культур України. У 2023 році збір картоплі сягнув 21,36 млн тонн, проте наступного року через посуху показник зменшився приблизно на 18% і сягнув 17,36 млн тонн. У цій галузі лишається проблема втрат під час збирання та зберігання губиться від 10 до 20 % урожаю. За даними Державної служби статистики, у 2021 році втрати продовольства в Україні становили приблизно 2,8 млн тонн. За умов організованого зберігання природна втрата маси бульб протягом 6-8 місяців може сягати 3-6%.

Зменшення таких втрат і подовження строків придатності продукції - одне з ключових завдань сучасного агропромислового комплексу. Одним із перспективних рішень є “озонування”. Озон (O_3) - окислювач, який руйнує патогенну мікрофлору, стримує проростання бульб і розкладає етилен, не залишаючи при цьому жодних хімічних залишків. За оцінками аналітичних агентств, у 2025 році світовий ринок озонових систем оцінювався приблизно у 1,67 млрд доларів, і він продовжує зростати щорічно темпами близько 5,9 %.

Ефективність озонування залежить від точності підтримання концентрації O_3 в обробленому середовищі. Перевищення робочих значень може призвести до пошкодження поверхневого шару бульб, а недостатня концентрація не забезпечує очікуваного антимікробного ефекту. Як показано у дослідженні Овчарова В.В. та Чапного М.В., існуючі промислові системи озонування плодоовочевої продукції здебільшого передбачають ручний режим управління, що призводить до перевитрати енергоресурсів і нестабільної якості обробки. Таким чином, виникає необхідність впровадження комп'ютерно-інтегрованої системи керування (KiCK), що поєднує автоматичне регулювання концентрації озону, мікроклімату і вентиляції.

Мета роботи - розробка комп'ютерно-інтегрованої системи керування процесом озонування картоплі у сховищі, яка забезпечує автоматичну підтримку заданих параметрів мікроклімату й концентрації озону на всіх етапах зберігання.

Завдання роботи:

- проаналізувати технологічні основи озонування та режими зберігання картоплі як об'єкта автоматизації;
- обґрунтувати структуру КІСК та вибрати технічні засоби (датчики, ПЛК, озонатор, виконавчі механізми);
- побудувати математичну модель каналу «продуктивність озонатора - концентрація O_3 » та синтезувати ПІД-регулятор;
- виконати моделювання системи у середовищі MATLAB/Simulink та оцінити її стійкість і якість;
- розробити функціональну, принципову електричну схеми, схему з'єднань та загальний вигляд щита керування;
- розробити алгоритм роботи програмного забезпечення ПЛК і операторського інтерфейсу SCADA/HMI;
- проаналізувати вимоги охорони праці при роботі з озоном.

Об'єкт дослідження - технологічний процес озонування картоплі у картоплесховищі.

Предмет дослідження - методи та засоби автоматичного керування концентрацією озону, температурою і вологістю у сховищі з використанням ПЛК і SCADA-систем.

У роботі застосовано методи системного аналізу для опису об'єкта керування, теорію автоматичного керування для синтезу регулятора, метод математичного моделювання у середовищі MATLAB/Simulink для дослідження якості функціонування системи, а також інженерні методи проектування електричних схем згідно з ДСТУ ГОСТ 21.208 та ПУЕ.

Наукова новизна полягає в розробці алгоритму керування, що інтегрує управління озонатором і вентиляційною системою в єдиній КіСК на базі ПІД-регулятора, параметри якого визначено за побудованою математичною моделлю об'єкта керування.

Запропонована система дозволяє скоротити втрати картоплі при зберіганні на 10-25 %, подовжити термін реалізації врожаю до 6 місяців і більше,

виключити застосування хімічних консервантів і знизити витрати на обслуговування сховища завдяки автоматизованому керуванню в режимі реального часу.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОЗОНУВАННЯ КАРТОПЛІ

1.1. Технологічні основи застосування озону при зберіганні картоплі

Озон (O_3) - це газ, що складається з трьох атомів кисню (алотропна форма звичайного кисню). Утворюється під дією на молекуль O_2 електричного розряду або ультрафіолетове випромінювання. Озон є одним з найкращих природних дезінфекторів. Він ефективно знищує бактерії, цвіль, віруси, мікотоксини, спори грибів і інші патогени, при цьому після реакції самовільно розпадається до молекулярного кисню, не залишаючи токсичних залишків. Саме ця властивість робить озон екологічно безпечним засобом захисту харчової продукції.

У 2001 році Управління з контролю за продуктами та ліками США (FDA) офіційно затвердило озон як антимікробний агент для прямого контакту з харчовою продукцією. Відповідно до рекомендацій FAO, оброблену озоном продукцію можна споживати вже через 18 годин після останньої обробки. Ці нормативні рішення зумовили активне впровадження озонових технологій у харчовій і переробній галузях упродовж останніх двох десятиліть.

Дія озону на картоплю має комплексний характер і проявляється одночасно за кількома напрямками:

- знищення патогенної мікрофлори - ефективне пригнічення збудників хвороб: *Erwinia* (м'яка гниль), *Fusarium* (суха гниль), *Helminthosporium* (срібляста парша), *Phytophthora* (фітофтороз), *Rhizoctonia* (чорна парша);
- гальмування проростання бульб - озон виконує функцію природного інгібітора паростків, що дає змогу відмовитися від синтетичних регуляторів росту;
- руйнування етилену - фітогормону, який виділяється самими бульбами і прискорює їх дозрівання, старіння та псування;
- стабілізація біохімічних показників - за дотримання режимів озонування зберігається вміст крохмалю та одночасно уповільнюється накопичення цукрів.

Концентрація озону є критичним технологічним параметром. При значеннях нижче 0,3 ppm забезпечується тривале пригнічення мікробіологічного росту у повітрі сховища. Робочий рівень для картоплесховищ при безперервному озонуванні становить 10-20 мг/м³. При більш високих концентраціях (понад 0,3 ppm) проводять дезінфекцію порожнього приміщення. Слід підкреслити, що надлишок озону здатний пошкоджувати поверхневий шар бульб, тому точна автоматична підтримка концентрації є обов'язковою умовою технологічного процесу.

Як показано в роботі Овчарова В.В. і Чапного М.В., при іонізації повітря методом коронного розряду одночасно з озоном може утворюватися азот, який осідає на поверхні бульб і викликає утворення перекису водню, чим сприяє гальмуванню утворення гнилі. Однак цей перекис водню водночас обмежує доступ озону до поверхні бульб. Тому електротехнічний комплекс повинен працювати в режимі, коли відбувається переважно іонізація кисню з утворенням озону і мінімізується іонізація азоту. Це досягається обмеженням напруги на іонізаторі повітря величиною до 20 кВ - першої ступені іонізації, при якій енергія іонізації кисню (12,08 eV) значно менша за енергію іонізації азоту (15,58 eV).

Результати застосування озонових технологій при зберіганні картоплі підтверджені численними дослідженнями: тривалість зберігання збільшується до 6 місяців і більше; кількість мікроорганізмів на поверхні бульб знижується в 1,5-2 рази; загальні втрати скорочуються на 10-25 % порівняно зі звичайним зберіганням; органолептичні та товарні показники зберігаються протягом усього терміну. При цьому технологія не потребує застосування хімічних консервантів чи пестицидів.

1.2. Характеристика картоплесховища як об'єкта керування.

Інформаційний аналіз

Технологічний об'єкт керування (ТОК) у даній роботі — це картоплесховище ємністю 500 м³ разом із системою вентиляції та озонатором,

що функціонують спільно. Для побудови системи керування необхідно виконати інформаційний аналіз: визначити критерій ефективності, класифікувати вхідні та вихідні змінні об'єкта, вибрати параметри контролю, сигналізації та захисту.

Критерій ефективності об'єкта керування. Критерієм ефективності технологічного процесу озонування картоплі є мінімізація втрат продукції при зберіганні за рахунок точного автоматичного підтримання концентрації озону в діапазоні 10-20 мг/м³. У кількісному виразі критерій можна записати як:

$$J = \min\{\Delta m(t)\} \text{ при } C(t) \in [10; 20] \text{ мг/м}^3, \quad (1.1)$$

де $\Delta m(t)$ — втрата маси бульб за час зберігання t , %; $C(t)$ — концентрація O_3 у сховищі.

Одночасно дотримуються обмеження: температура +2...+4 °С, відносна вологість 90-95 %, концентрація O_3 у робочій зоні (де може перебувати персонал) не вище 0,1 мг/м³.

Інформаційна схема об'єкта керування. Інформаційна схема картоплесховища відображає вхідні змінні (керуючі дії та збурення) та вихідні змінні (регульовані параметри). Схему наведено на рисунку 1.2.

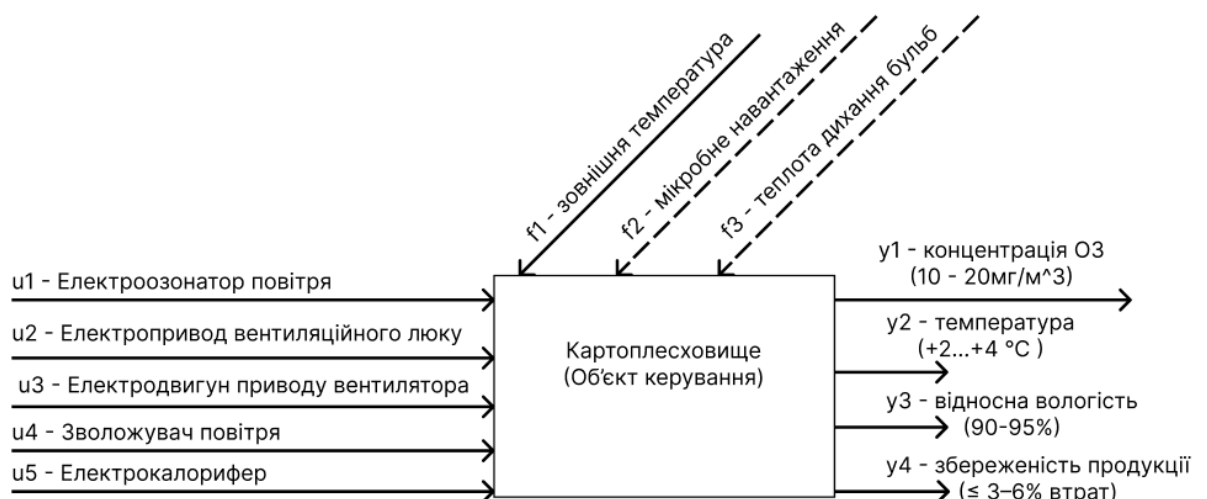


Рисунок 1.1 - Інформаційна схема об'єкта керування (картоплесховище)

Аналіз інформаційної схеми. Об'єкт керування — насип картоплі у сховищі — є аперіодичною динамічною системою з чистим запізненням. На нього одночасно діють три групи змінних:

- керуючі дії — змінні, якими система може цілеспрямовано впливати на об'єкт: u_1 — електроозонатор повітря, u_2 — електропривод вентиляційного люку, u_3 — електродвигун приводу вентилятора, u_4 — зволожувач повітря, u_5 - електрокалорифер;
- контрольовані збурення — відомі зовнішні впливи, що вимірюються (температура зовнішнього повітря f_1);
- неконтрольовані збурення — невідомі або такі, що не піддаються прямому вимірюванню впливи (інтенсивність мікробного навантаження f_2 , теплота дихання бульб f_3).

Основний канал регулювання — «стан озонатора u_1 та електропривода $u_2 \rightarrow$ концентрація O_3 y_1 ». Саме цей канал є основним предметом математичного моделювання у розділі 2 та синтезу ПД-регулятора у розділі 3.

Допоміжні канали керування — «стан вентилятора $u_3 \rightarrow$ температура повітря y_2 » та «стан осушувача $u_4 \rightarrow$ відносна вологість y_3 » — реалізуються за позиційним законом керування (увімк/вимк) на основі порогових сталих значень.

Класифікація вхідних та вихідних змінних об'єкта керування наведена у таблиці 1.2.

Вибір параметрів контролю, сигналізації та захисту. За результатами аналізу інформаційної схеми та технологічного регламенту визначено параметри, що підлягають обов'язковому контролю, та граничні значення для сигналізації й захисту (таблиця 1.3). Особливу увагу приділено аварійному захисту персоналу від перевищення ГДК озону.

Таблиця 1.2 - Класифікація змінних об'єкта керування

Група змінних	Позначення	Фізичний зміст	Числовий діапазон / одиниці
Керуюча дія	u1 — Електроозонатор повітря	Увімкнення/вимкнення генерації О ₃	0 або 1 (від ПЛК)
Керуюча дія	u2 — Електропривод вентиляційного люку	Відкриття/закриття вентиляційних люків	0 або 1 (від ПЛК)
Керуюча дія	u3 — Електродвигун приводу вентилятора	Керування циркуляцією повітря	0 або 1 (від ПЛК)
Керуюча дія	u4 — Зволожувач повітря	Керування вологістю повітря	0 або 1 (від ПЛК)
Керуюча дія	u5 — Електрокалорифер	Підігрів повітря для підтримки температури	0 або 1 (від ПЛК)
Контрольоване збурення	f ₁ — зовнішня температура	Вплив на тепловий баланс сховища	-25...+35 °С (пори року)
Неконтрольоване збурення	f ₂ — мікробне навантаження	Поглинання О ₃ мікрофлорою	КУО/м ³ , змінна (залежить від стану бульб)
Неконтрольоване збурення	f ₃ — теплота дихання бульб	Внутрішнє тепловиділення продукту	≈ 20–40 Вт/т (залежно від режиму)
Вихід (регульований)	y ₁ — концентрація О ₃	Основний параметр регулювання	10–20 мг/м ³ , похибка ±1 мг/м ³
Вихід (регульований)	y ₂ — температура повітря/продукту	Тепловий стан сховища	+2...+4 °С, похибка ±0,5 °С
Вихід (регульований)	y ₃ — відносна вологість	Вологотепловий стан	90–95 %, похибка ±2 %
Вихід (критерій ефективності)	y ₄ — збереженість продукції	Зниження втрат врожаю	Мінімізація втрат маси бульб (норма ≤ 3–6 %)

Таблиця 1.3 - Параметри контролю, сигналізації та захисту

Параметр	Номінал	Контроль	Сигналізація	Захист
Концентрація O_3	10-20 мг/м ³	Безперервно (QE 1-а)	< 10 або > 22 мг/м ³	Відкл. озонатора при > 25 мг/м ³
Температура повітря	+2...+4 °C	Безперервно (TE 2-а)	< -1 або > +7 °C	Авар. вентиляція при > +25 °C
Відносна вологість	90-95 %	Безперервно (ME 3-а)	< 85 або > 97 %	-
Концентрація O_3 (ГДК персоналу)	< 0,1 мг/м ³	Безперервно (QE 1-а)	> 0,08 мг/м ³	Відкл. озонатора + сигнал НА 3-г

Особливості об'єкта як динамічної системи. Картоплесховище характеризується значною тепловою інерційністю: температура реагує на керуючі впливи із запізненням у десятки хвилин, що підтверджено дослідженнями Овчарова В.В. та Чапного М.В. Залежність концентрації O_3 від продуктивності генератора є нелінійною через одночасний хімічний розпад озону в об'ємі сховища. Співвідношення часу запізнення до сталої часу об'єкта $\tau/T \approx 25/180 \approx 0,14$ свідчить про доцільність застосування лінійного (безперервного) ПІД-закону регулювання, що обґрунтовано у розділі 3.

1.3. Аналіз існуючих технічних рішень та систем автоматизації

Сучасний промисловий озонатор (генератор озону) перетворює кисень повітря в озон одним із двох методів. Основний промисловий метод — коронний (бар'єрний) розряд: повітря або чистий кисень подається в зазор між двома

електродами, до яких прикладена змінна висока напруга (5-20 кВ); у результаті молекули O_2 дисоціюють і рекомбінують у O_3 . Другий метод — ультрафіолетове опромінення з довжиною хвилі 185 нм — застосовується переважно у малопотужних побутових і напівпромислових установках. Промислові генератори на базі коронного розряду мають продуктивність від 10 до кількох сотень грамів озону на годину і є основним типом обладнання для сховищ [1, 5].

Для вимірювання концентрації озону у промислових умовах застосовуються два основних типи сенсорів. Електрохімічні датчики (амперометричний принцип) забезпечують лінійну характеристику в діапазоні 0,03-20 ppm, час відгуку 1-2 секунди, низьке енергоспоживання та стійкість до перехресних завад; вони є оптимальним вибором для систем автоматичного керування. Напівпровідникові датчики типу NMOS дешевші, проте мають нижчу точність і схильність до дрейфу нуля. Для вбудованих систем керування перевагу надають електрохімічним датчикам [11].

Сучасні автоматизовані системи для сховищ будуються за ієрархічним трирівневим принципом. Нижній рівень утворюють датчики (температури, вологості, концентрації O_3) та виконавчі механізми (вентилятори, регулювальні клапани, озонатор). Середній рівень — програмований логічний контролер (ПЛК), який виконує алгоритми керування в режимі реального часу. Верхній рівень — SCADA/HMI-система — забезпечує моніторинг стану сховища оператором, архівування даних і дистанційне керування. Зв'язок між рівнями здійснюється за протоколами Modbus RTU/TCP або OPC UA [2, 14].

Аналіз літературних джерел свідчить, що більшість сучасних систем автоматизації сховищ керують вентиляційним мікрокліматом (температура, вологість) відокремлено від системи озонування: озонатор у таких системах або вмикається за розкладом (таймер), або регулюється вручну оператором. Подібний підхід не забезпечує оптимального рівня концентрації O_3 за динамічних умов, що знижує ефективність обробки [1, 3, 5]. Порівняльний аналіз існуючих рішень наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Порівняльний аналіз існуючих технічних рішень

Система / виробник	Тип керування О ₃	Переваги	Недоліки
Ручні системи озонування	Ручний (таймер)	Простота, низька вартість	Нестабільна концентрація, перевитрата ресурсів
SCADA + озонатор (окремо)	Напівавтомат	Моніторинг мікроклімату	Відсутній замкнений контур за О ₃
Запропонована KICK (дана робота)	Автоматичний ПІД-контур	Замкнений контур, інтеграція вентиляції та озонування	Вища вартість впровадження

Постановка задачі дослідження. На підставі проведеного аналізу сформульовано таке завдання: розробити комп'ютерно-інтегровану систему керування процесом озонування картоплі у сховищі, яка повинна:

- забезпечувати безперервне вимірювання та автоматичне регулювання концентрації озону в діапазоні 10-20 мг/м³ з точністю ± 1 мг/м³ [16];
- підтримувати задані технологічні режими температури (точність $\pm 0,5$ °C) і відносної вологості (точність ± 2 %) [3];
- реалізовувати інтегроване керування озонатором і вентиляційною системою в єдиному ПІД-контурі;
- мати оператор-машинний інтерфейс (SCADA/HMI) для візуального контролю, архівування даних і дистанційного керування;
- забезпечувати аварійний захист — відключення озонатора при виявленні присутності персоналу та при перевищенні гранично допустимої концентрації [14, 16].

1.4. Розробка функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема автоматизації (ФСА) є основним проєктним документом, що відображає склад технічних засобів вимірювання, контролю та керування, а також функціональні зв'язки між ними. ФСА розроблено відповідно до вимог ДСТУ Б А.2.4-3:2009 та ГОСТ 21.208-2013 «Автоматизація технологічних процесів. Умовні позначення приладів та засобів автоматизації на схемах».

Об'єкт автоматизації - Картоплесховище (позначене цифрою 1), у якому продукт зберігається в спеціальних контейнерах.

Керування процесом реалізовано за комбінованим принципом із розподілом обладнання на дві групи:

Прилади за місцем. Первинні датчики та виконавчі механізми, розташовані безпосередньо в технологічній зоні (сховищі та вентиляційних каналах).

Прилади на щиті. Вторинні блоки вимірювання та регулювання, перемикачі режимів і сигнальна апаратура, що встановлюються в операторській або щитовій кімнаті.

Опис контурів автоматичного контролю та регулювання

Контур 1: Автоматичне регулювання температури повітря

Це найбільш розгалужений контур схеми, який керує процесами охолодження, нагрівання та вентиляції.

Первинні датчики:

1а, 1б (ТЕ): Датчики (термометри опору) температури насипу картоплі / повітря всередині сховища.

1в (ТЕ): Датчик температури зовнішнього (вхідного) атмосферного повітря.

Вторинний прилад на щиті:

1д (TIRC): Багатоканальний прилад автоматичного вимірювання, запису (реєстрації), індикації та регулювання температури. Він порівнює температуру всередині та ззовні сховища для вибору оптимального режиму вентиляції.

Виконавчі механізми та органи керування:

1г (ME): Електропривід повітряних заслінок (люків). Залежно від команд регулятора, він відкриває або закриває зовнішній вентиляційний люк (IIIa) для припливу холодного повітря з вулиці або внутрішній люк (IIIб) для рециркуляції повітря всередині приміщення.

Прилад 1д також видає команди керування через щитові переключачі режимів (HS) на магнітні пускачі (NS) для комутації силових ланцюгів:

Електродвигуна (X) осьового вентилятора (IX), що нагнітає повітря в магістральний повітропровід (V).

Ступенів електрокалорифера (VIII) для підігріву повітря у разі критичного падіння температури в зимовий період.

Контур 2: Автоматичне регулювання відносної вологості повітря

Цей контур запобігає усущі картоплі та підтримує вологість на заданому рівні (зазвичай 90–95%).

Первичний датчик:

2а, 2б (ME / MT): Первинний перетворювач і датчик вологості повітря, встановлений у потоці вентиляційного каналу.

Вторинний прибор на щиті:

2д (MIRC): Прилад контролю, реєстрації та автоматичного регулювання вологості повітря.

Виконавчі механізми та органи керування:

Прилад 2д через відповідний перемикач HS керує магнітним пускачем NS, який вмикає або вимикає зволожувач повітря (VI). Вода для зволоження подається у повітропровід, розпилюється і змішується з повітряним потоком перед подачею до контейнерів.

Контур 3: Автоматичний контроль та регулювання концентрації озону

Озонування застосовується для дезінфекції приміщення, пригнічення розвитку фітопатогенних мікроорганізмів та затримання проростання бульб.

Первичний датчик:

За (QE / QT): Газоаналізатор — датчик концентрації озону в повітрі сховища.

Вторинний прилад на щиті:

Зв (QIC): Прилад контролю, індикації та автоматичного регулювання концентрації газу (озону).

Виконавчі механізми:

За сигналом від Зв через систему комутації (HS, NS) подається живлення на електроозонатор повітря (VII), який генерує необхідну дозу озону (O₃) у вентиляційний канал.

3. Логіка роботи та алгоритм автоматизації

Режим вільного охолодження (вентиляція зовнішнім повітрям): Якщо температура на вулиці (1в) нижча, ніж усередині сховища (1а), але не нижча за технологічний мінімум, регулятор 1д відкриває зовнішній люк IIIа через привід 1г і вмикає вентилятор IX. Повітря забирається з вулиці, за потреби зволожується блоком VI і подається через жалюзі (XI) до контейнерів з картоплею.

Режим рециркуляції: Якщо зовнішнє повітря занадто холодне (загроза підморожування) або занадто тепле, припливний люк IIIа закривається, відкривається внутрішній люк IIIб, і вентилятор циркулює повітря по замкнутому контуру сховища.

Режим підігріву: Якщо під час рециркуляції температура в сховищі продовжує падати, регулятор активує електрокалорифер VIII для підігріву циркулюючого повітря.

Режим санації (озонування): Періодично (за часовою програмою або у разі падіння концентрації за датчиком За) вмикається електроозонатор VII для знезараження середовища.

Специфікація позначень технологічного обладнання на схемі:

I — Картоплесховище (контейнерного типу).

IIIа / IIIб — Зовнішній / внутрішній вентиляційні люки (заслінки).

IV — Електропривід вентиляційного люка.

XI — Жалюзі (жалюзійні решітки).

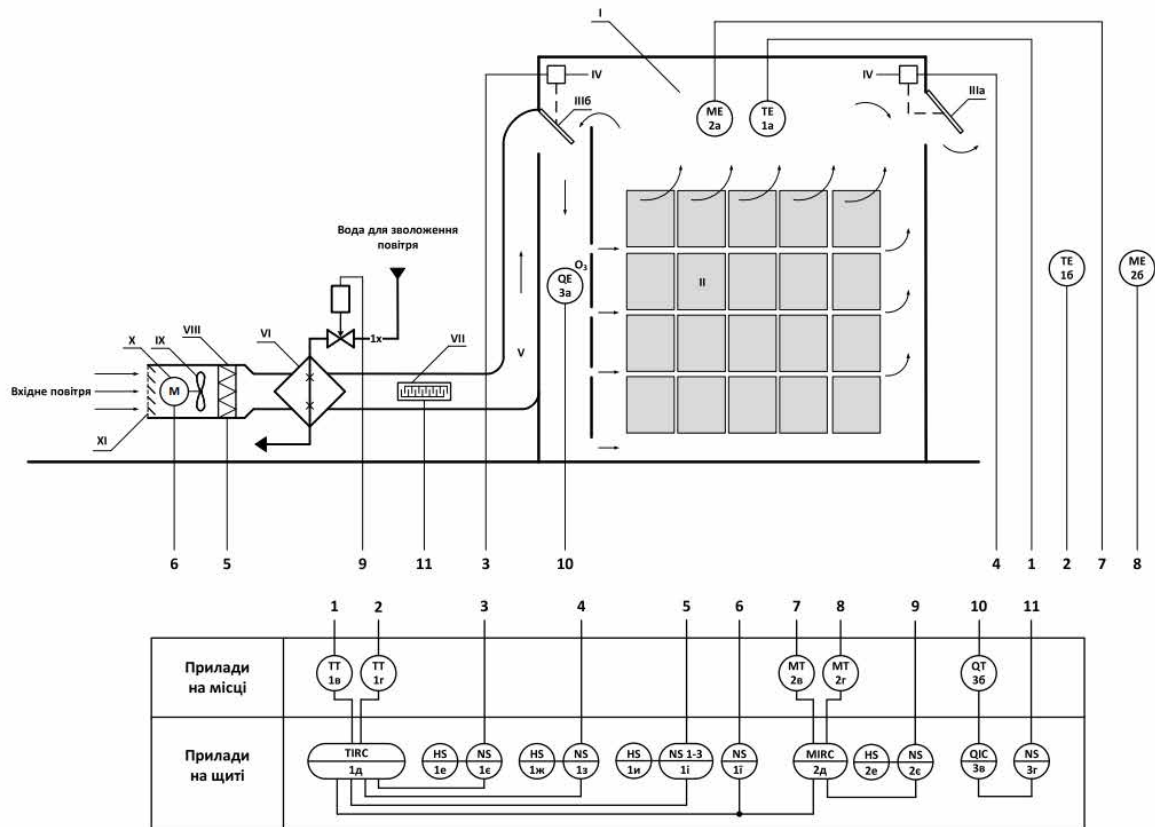


Рисунок 1.2 - Функціональна схема автоматизації КІСК озонування картоплі

Перелік позиційних позначень технічних засобів автоматизації наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 - Перелік технічних засобів автоматизації ФСА

Позиція	Назва приладу	Тип / модель	Функція
QE 3-а	Датчик концентрації О ₃	Membrapor O3/C-5, електрохімічний, 4–20 мА	Зворотний зв'язок контуру регулювання концентрації озону
TE 1-а, 1-б	Датчик температури повітря / насипу картоплі	WIKА TR10-D, Pt100, клас А, 4–20 мА	Вимірювання температури всередині сховища
TE 1-в	Датчик температури зовнішнього повітря	WIKА TR10-D, Pt100, клас А, 4–20 мА	Вимірювання зовнішньої температури для вибору режиму вентиляції
ME 2-а, 2-б	Датчик відносної вологості повітря	Honeywell ННН-4000, ємнісний, 4–20 мА	Контроль вологості повітря у вентиляційному каналі
IV 1-г	Електропривод вентиляційного люку	Belimo LM24A, 24 В AC/DC	Відкриття/закриття зовнішнього люку ІІа та внутрішнього ІІб
VI 2-д	Зволожувач повітря	Вдох-Нова 3000, ультразвуковий, 220 В AC	Підтримання відносної вологості 90–95%
VII 3-в	Електроозонатор повітря	GIKRAFT GI03020, Corona discharge, 10–20 мг/м ³ , 220 В AC	Генерація озону О ₃ для санації середовища сховища
VIII 1-е	Електрокалорифер	ВЕНТС НК 200-3,4-1, ТЕН 3,4 кВт, 220 В AC	Підігрів циркулюючого повітря при критичному падінні температури
X 1-ж	Електродвигун приводу вентилятора	АИР 71А4, 0,55 кВт, 380 В AC	Привід осьового вентилятора ІХ для нагнітання повітря у повітропровід
A1-б	ПЛК з модулем розширення	Schneider Electric TM221CE16R + TM3AI4, Modbus TCP/IP	Центральний керуючий пристрій автоматичного режиму
A2-в	НМІ-панель оператора	Schneider Electric HMIST6400, 7", Modbus TCP/IP, 24 В DC	Операторський інтерфейс
HA 3-г	Блок сигналізації	Сигнальна лампа + зумер, 24 В DC	Аварійна індикація

Запропонована ФСА забезпечує реалізацію основних функцій КІСК: безперервне вимірювання концентрації озону та параметрів мікроклімату, автоматичне керування подачею озону залежно від стану технологічного обладнання, захисне блокування при несправності осушувача та аварійну сигналізацію для забезпечення безпеки персоналу.

1.5. Обґрунтування параметрів контролю та регулювання

Ефективність зберігання картоплі повністю залежить від точності підтримання технологічних параметрів мікроклімату сховища. На підставі аналізу агротехнічних вимог і технологічного регламенту зберігання до обов'язкових параметрів контролю КІСК віднесено: температуру повітря в картоплесховищі, відносну вологість повітря та концентрацію озону в атмосфері сховища. Ці параметри є взаємозалежними — зміна температури впливає на швидкість розпаду озону, а зміна вологості — на активність патогенної мікрофлори.

Температура є головним параметром зберігання. У лікувальний період (10–14 діб після закладання) підтримується температура $+12\cdots+18\text{ }^{\circ}\text{C}$ при вологості понад 90 % — для загоювання механічних пошкоджень бульб. У період охолодження (20–30 діб) температура знижується до $+2\cdots+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ зі швидкістю не більше $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ на добу. В основний період зберігання (до 8 місяців) підтримується стабільна температура $+2\cdots+4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Зниження температури нижче $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ призводить до підморожування бульб, а перевищення $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$ — до активного проростання. Контроль температури здійснюється датчиками ТЕ 1-а та 1-б, встановленими у повітряному просторі сховища, та датчиком ТЕ 1-в для вимірювання зовнішньої температури.

Відносна вологість повітря — другий за важливістю параметр зберігання. Оптимальний діапазон для картоплі становить 90–95 %. Зниження вологості нижче 85 % спричиняє втрату тургору і в'янення бульб; підвищення понад 97 % — конденсацію вологи на поверхні та розвиток гнильних хвороб. Контроль вологості здійснюється ємнісним датчиком МЕ 2-а з точністю $\pm 2\%$ у діапазоні 0–100 % рН. Регулювання вологості забезпечується зволожувачем повітря (VI), керованим приладом MIRC (2д).

Концентрація озону — специфічний параметр, що визначає ефективність антимікробної обробки. Нормативний робочий діапазон безперервного озонування картоплесховища становить 10–20 мг/м³. Нижня межа обумовлена мінімально ефективною бактерицидною концентрацією, верхня — порогом, вище якого можливе пошкодження поверхневого шару бульб. Гранично допустима концентрація озону для персоналу у робочій зоні згідно з санітарними нормами становить 0,1 мг/м³, що вимагає автоматичного блокування подачі озону при наявності людей у сховищі. Вимірювання виконується електрохімічним датчиком QE 3-а, регулювання — електроозонатором повітря (VII) через прилад QIC (3в).

Таким чином, KICK повинна забезпечувати безперервний контроль трьох аналогових параметрів: температури, вологості та концентрації О₃. Узагальнені нормативні вимоги до аналогових параметрів для кожного технологічного етапу зберігання наведено у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 — Параметри контролю та їх нормові значення

Параметр	Од. вим.	Лікувальний	Охолодження	Зберігання
Температура повітря	°C	+12...+18	+2...+18 ↓	+2...+4
Відносна вологість	%	>90	≈95	90–95
Концентрація О ₃	мг/м ³	10–20	10–20	10–20
Швидкість зміни t	°C/добу	—	≤0,5	—

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

2.1. Побудова математичної моделі каналу «продуктивність озонатора - концентрація озону»

Для синтезу системи автоматичного регулювання концентрації озону необхідно отримати математичний опис об'єкта керування. Відповідно до структурно-функціональної схеми, наведеної у дослідженнях Овчарова В.В. і Чапного М.В. [1], у системі автоматичного управління озонуванням картоплі присутній місцевий від'ємний зворотний зв'язок, який стежить за концентрацією озону в насипі картоплі. На об'єкт керування — насип картоплі — діє задана концентрація O_3 та випадкове збурення у вигляді мікробіологічного навантаження.

Розглянемо динамічний баланс озону у повітряному просторі сховища. Зміна концентрації O_3 у часі визначається трьома складовими: надходженням від генератора, природним розпадом озону внаслідок хімічної реакції з вмістом сховища і виносом озону при вентиляції. Рівняння матеріального балансу для концентрації C озону в об'ємі V має вигляд:

$$V \times \frac{dC}{dt} = q \times u(t) - k_d \times C \times V - Q_B \times C \quad (2.1)$$

де:

V — об'єм сховища, m^3 ;

C — концентрація озону в повітрі сховища, mg/m^3 ;

q — максимальна продуктивність озонатора, mg/c ;

$u(t)$ — відносний керуючий сигнал на озонатор (0-100 %);

k_d — коефіцієнт швидкості розпаду озону, $1/c$;

Q_B — об'ємна витрата повітря вентиляції, m^3/c .

Поділимо обидві частини рівняння на $(k_d \cdot V + Q_B)$ і запишемо у формі типового рівняння аперіодичної ланки першого порядку:

$$T \times \frac{dc}{dt} + C = K \times u(t) \quad (2.2)$$

де T — постійна часу об'єкта; K — коефіцієнт передачі ОК. Параметри T і K визначаються співвідношеннями:

$$T = \frac{V}{k_d \times V + Q_B}; K = \frac{q}{k_d \times V + Q_B} \quad (2.3)$$

Слід враховувати також транспортне запізнення τ між моментом увімкнення озонатора і моментом надходження озону у зону датчика концентрації. Запізнення обумовлене скінченною швидкістю руху повітряного потоку у вентиляційному каналі довжиною L при швидкості повітря v :

$$\tau = \frac{L}{v} \quad (2.4)$$

Враховуючи запізнення, передатна функція об'єкта керування у операторній формі набуває вигляду:

$$W_{об}(s) = \frac{K \times e^{(-\tau s)}}{T \times s + 1} \quad (2.5)$$

Числові значення параметрів визначаємо підстановкою вихідних даних у формули (2.3) та (2.4). Розрахунок виконано для промислового сховища ємністю 500 м^3 та озонатора коронного розряду:

$$T = \frac{500}{0.0055 \times 500 + 0.028} = \frac{500}{2.778} = 180 \text{ с} \quad (2.6)$$

$$K = \frac{2.361}{2.778} = 0.85 \text{ мг}/(\text{м}^3 \times \%) \quad (2.7)$$

$$\tau = \frac{15}{0.60} = 25 \text{ с} \quad (2.8)$$

Результати розрахунку зведено у таблицю 2.1.

2.2. Визначення передатної функції об'єкта керування

Підставивши числові значення з таблиці 2.1 у вираз (2.5), отримуємо передатну функцію об'єкта керування:

$$W_{об}(s) = \frac{0.85 \times e^{(-25s)}}{180 \times s + 1} \quad (2.9)$$

Перехідна характеристика об'єкта (крива розгону) визначається за виразом:

$$C(t) = K \times u_0 \times (1 - e^{\frac{-t-\tau}{T}}), t \geq \tau \quad (2.10)$$

де u_0 — амплітуда ступінчастого керуючого впливу. При знятті кривої розгону подається $u_0 = 100 \%$, тому усталене значення концентрації становить

$$C_{\text{ст}} = K \times u_0 = 0.85 \times 100 = 85 \text{ мг/м}^3$$

Таблиця 2.1 - Вихідні дані та результати розрахунку параметрів математичної моделі

Параметр	Познач.	Значення	Одиниці вим.
Об'єм сховища	V	500	м ³
Макс. продуктивність озонатора	q	2,361	мг/с ($\approx 8,5$ г/год)
Коефіцієнт швидкості розпаду O ₃	kd	0,0055	1/с
Об'ємна витрата вентиляції	QB	0,028	м ³ /с
Довжина вентиляційного каналу	L	15	м
Швидкість повітря у каналі	v	0,60	м/с
Постійна часу: $T = V / (kd \cdot V + QB)$	T	180	с
Коефіцієнт передачі: $K = q / (kd \cdot V + QB)$	K	0,85	мг/(м ³ ·%)
Час запізнення: $\tau = L / v$	τ	25	с
Робоча уставка концентрації O ₃	C _{зад}	15	мг/м ³

Експеримендаванні $u_0 = 100 \%$ сигналу керування на озонатор. На графіку (рисунок 2.1) нанесено дотичну до точки перегину кривої, яка перетинає рівень усталеного значення кривої розгону отримано шляхом моделювання

при ступінчастому поня у точці $t = \tau + T = 25 + 180 = 205$ с. Точка, де крива досягає 63 % усталеного значення ($0,63 \cdot 85 \approx 53,6$ мг/м³), відповідає $t = \tau + T = 205$ с, що підтверджує значення $T = 180$ с.

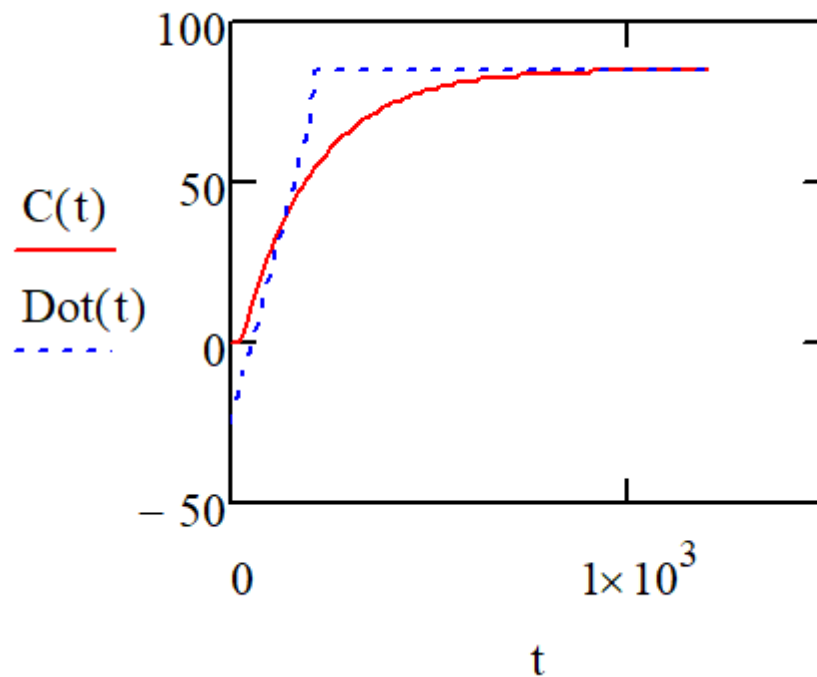


Рисунок 2.1 - Крива розгону об'єкта керування (вісь X: час t , с; вісь Y: концентрація $C(t)$, мг/м³)

Отримана математична модель адекватно описує динамічні властивості об'єкта керування і використовується надалі для синтезу регулятора і дослідження якості замкненої системи у середовищі MATLAB/Simulink.

РОЗДІЛ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ І ВИБІР АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ

3.1. Обґрунтування та вибір закону керування

На основі математичної моделі об'єкта керування, побудованої у розділі 2, виконаємо обґрунтований вибір закону регулювання для контуру концентрації озону. Вибір закону керування визначається динамічними властивостями об'єкта, вимогами до точності та якості перехідного процесу.

Аналіз динамічних властивостей об'єкта. Отримана передатна функція об'єкта керування (канал «продуктивність озонатора — концентрація O_3 »):

$$W_{об}(s) = 0.85 \times \frac{e^{(-25s)}}{180s + 1} \quad (3.1)$$

відповідає аперіодичній ланці першого порядку з транспортним запізненням. Ключовий критерій вибору закону керування — співвідношення часу запізнення до постійної часу об'єкта:

$$\frac{\tau}{T} = \frac{25}{180} \approx 0.14 \quad (3.2)$$

За загальноприйнятими рекомендаціями теорії автоматичного керування при $\tau/T \leq 0,2$ доцільно застосовувати безперервний лінійний закон регулювання (П, ПІ або ПІД). При $\tau/T > 0,5$ перевагу надають імпульсним або предиктивним алгоритмам, однак для нашого випадку $\tau/T = 0,14$, тому лінійний закон є оптимальним вибором.

Порівняльний аналіз законів керування. Для обґрунтованого вибору закону керування виконано порівняльний аналіз основних типів регуляторів, придатних для даного об'єкта (таблиця 3.1).

Таблиця 3.1 – Порівняльний аналіз законів керування

Закон керування	τ/T співвідношення	Переваги	Недоліки
П	будь-яке	Простота, висока швидкодія	Статична похибка
ПІ	$\tau / T \leq 0,2$	Нульова статична похибка	Повільніша реакція ніж П
ПІД	$\tau/T \leq 0,2$	Нульова похибка, висока швидкодія, реакція на збурення	Складніше налаштування, чутливість до шуму
Нечітка логіка	нелінійний ОК	Робота з нелінійними ОК	Складне проектування, немає гарантій стійкості
Каскадне	складна структура	Компенсація внутрішніх збурень	Потрібні додаткові датчики

Обґрунтування вибору ПІД-закону. На підставі аналізу таблиці 3.1 та технологічних вимог до точності регулювання концентрації озону обрано ПІД-закон керування з таких міркувань:

- нульова статична похибка — забезпечується інтегральною складовою; це критично для точного підтримання концентрації O_3 в діапазоні 10–20 мг/м³ при наявності постійних збурень (природний розпад озону);
- висока швидкодія — диференціальна складова реагує на зміну похибки і прискорює вихід системи на уставку, що важливо при зміні технологічного режиму;
- реакція на збурення — ПІД-регулятор ефективно компенсує вплив мікробіологічного навантаження f_2 і коливань зовнішньої температури f_1 ;
- реалізація у ПЛК — ПІД-алгоритм реалізовано мовою ST (Structured Text, стандарт MEK 61131-3) у середовищі EcoStruxure Machine Expert для контролера Schneider M221; вихідний сигнал регулятора $u[k]$

відображається у дискретне керування: при $u[k] > 0$ клапан YV1 5-а відкривається та озонатор вмикається, при $u[k] = 0$ — обидва відключаються;

- $\tau/T = 0,14 \leq 0,2$ — підтверджує ефективність лінійного ПІД-регулятора для даного об'єкта.

Передатна функція ПІД-регулятора у паралельній формі:

$$W_p(s) = K_p \times \left(1 + \frac{1}{T_i \times s} + T_d \times s\right) \quad (3.3)$$

де:

K_p — коефіцієнт передачі;

T_i — постійна часу інтегрування;

T_d — постійна часу диференціювання.

3.2. Синтез ПІД-регулятора концентрації озону

Аналіз отриманої передатної функції об'єкта показує, що співвідношення часу запізнення до постійної часу складає $\tau/T = 25/180 \approx 0,14$. Відповідно до загальноприйнятих рекомендацій теорії автоматичного керування, при значеннях цього коефіцієнта в діапазоні $0,2 < \tau/T < 1$ застосовують лінійний (неперервний) закон регулювання, тоді як при $\tau/T \leq 0,2$ також можливе застосування лінійного регулятора, що забезпечує високу точність. Для досягнення необхідних показників якості (нульова статична похибка, поміrne перерегулювання, висока швидкодія) обираємо ПІД-закон регулювання.

Передатна функція ідеального ПІД-регулятора у паралельній формі має вигляд:

$$W_p(s) = K_p \times \frac{1+1}{T_i \times s} + T_d \times s \quad (2.11)$$

де:

K_p - коефіцієнт передачі (пропорційна складова);

T_i - постійна часу інтегрування, с;

T_d - постійна часу диференціювання, с.

Початковий розрахунок параметрів ПІД-регулятора виконаємо за методом Зіглера-Нікольса для аперіодичної ланки з запізненням. Формули методу:

$$K_p = 1.2 \times \frac{T}{K \times \tau} \quad (2.12)$$

$$T_i = 2 \times \tau \quad (2.13)$$

$$T_d = 0.5 \times \tau \quad (2.14)$$

Підставляючи значення параметрів об'єкта ($K = 0,85$; $T = 180$ с; $\tau = 25$ с), отримуємо:

$$K_p = 1.2 \times \frac{180}{0.85 \times 25} \approx 10.17 \quad (2.15)$$

$$T_i = 2 \times 25 = 50 \text{ с} \quad (2.16)$$

$$T_d = 0.5 \times 25 \text{ с} \quad (2.17)$$

Параметри, розраховані за методом Зіглера-Нікольса, забезпечують стійкість системи, але часто призводять до значного перерегулювання (близько 75 %), що неприпустимо з технологічних міркувань — може призвести до короткочасного перевищення робочої концентрації озону і пошкодження поверхневого шару бульб. Для покращення показників якості виконано налаштування шляхом імітаційного моделювання з ітеративною корекцією параметрів. Налаштовані параметри:

$$K_p = 6.10; \quad T_i = 75 \text{ с}; \quad T_d = 6.25 \text{ с} \quad (2.18)$$

Порівняння параметрів за обома методами наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Порівняння параметрів ПІД-регулятора

Параметр	Метод Зіглера-Нікольса	Після налаштування	Зміна
K_p — коефіцієнт передачі	10,17	6,10	$\div 1,67$
T_i — постійна часу інтегрування, с	50	75	$\times 1,5$
T_d — постійна часу диференціювання, с	12,5	6,25	$\div 2,0$

Цифрова реалізація ПІД-регулятора у програмованому логічному контролері виконується за різницеvim рівнянням з періодом дискретизації $\Delta t = 1$ с:

$$u[k] = u[k - 1] + K_p \times (e[k] - e[k - 1]) + \left(K_p \times \frac{\Delta t}{T_i}\right) \times e[k] + \frac{K_p \times T_d}{\Delta t} \times (e[k] - 2 \times e[k - 1] + e[k - 2]) \quad (2.19)$$

де $u[k]$ - поточне значення керуючого впливу; $e[k] = C_{зад} - C[k]$ - поточна похибка регулювання.

Перевагою інкрементного методу реалізації є відсутність накопичення інтегральної складової у внутрішніх змінних, що автоматично запобігає інтегральному насиченню (integral windup) при тривалому виході регулятора на обмеження. Перевірка коректності синтезованого регулятора виконана шляхом імітаційного моделювання у підрозділі 2.3.

3.3. Моделювання системи керування в середовищі MATLAB/Simulink

Перед побудовою імітаційної моделі розробимо структурну та структурно-алгоритмічну схеми системи автоматичного регулювання концентрації озону.

Структурна схема відображає склад функціональних елементів системи та зв'язки між ними. Система містить: задавальний пристрій (ЗП), елемент порівняння (ЕП), регулятор (Р), виконавчий механізм — клапан YV1 та озонатор

OZ (BM), об'єкт керування — сховище (OK), сприймаючий елемент — датчик O₃ (CE). Збурення $f(t)$ діє безпосередньо на об'єкт керування.

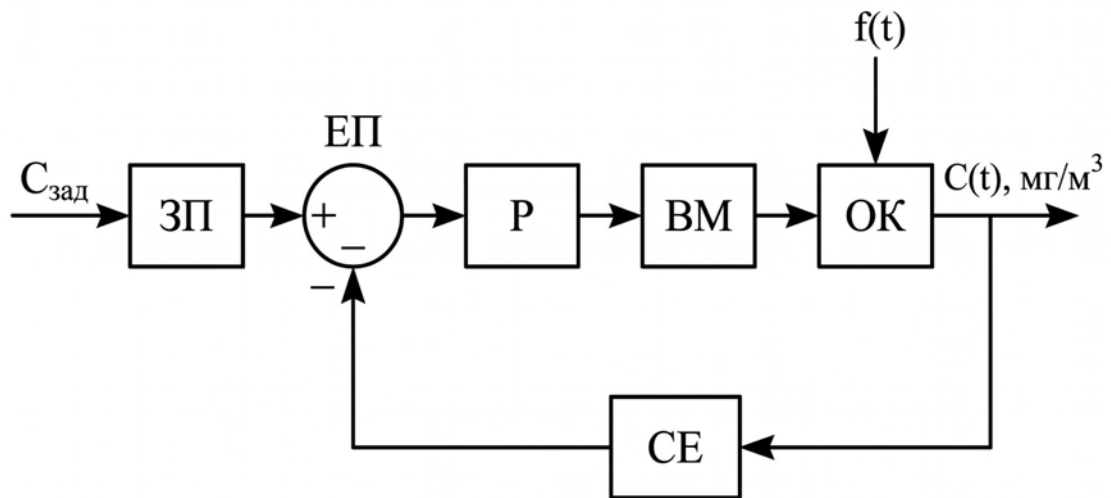


Рисунок 2.2 - Структурна схема САР концентрації озону

Структурно-алгоритмічна схема відрізняється від структурної тим, що замість назв блоків вказуються їх передатні функції:

- задавальний пристрій: $W_{зп}(s) = 1$;
- ПД-регулятор: $W_p(s) = K_p \cdot (1 + 1/(T_i \cdot s) + T_d \cdot s)$;
- виконавчий механізм(клапан YV1 + озонатор OZ): $W_{вм}(s) \approx 1$;
- об'єкт керування: $W_{об}(s) = 0,85 \cdot e^{(-25s)} / (180 \cdot s + 1)$;
- датчик концентрації O₃: $W_{ce}(s) = 1$.

Загальна передатна функція розімкненої системи:

$$W_{роз}(s) = W_p(s) \times W_{об}(s) = 6.10 \times \left(1 + \frac{1}{75s} + 6.25 \times s\right) \times 0.85 \times \frac{e^{(-25s)}}{180 \times s + 1}$$

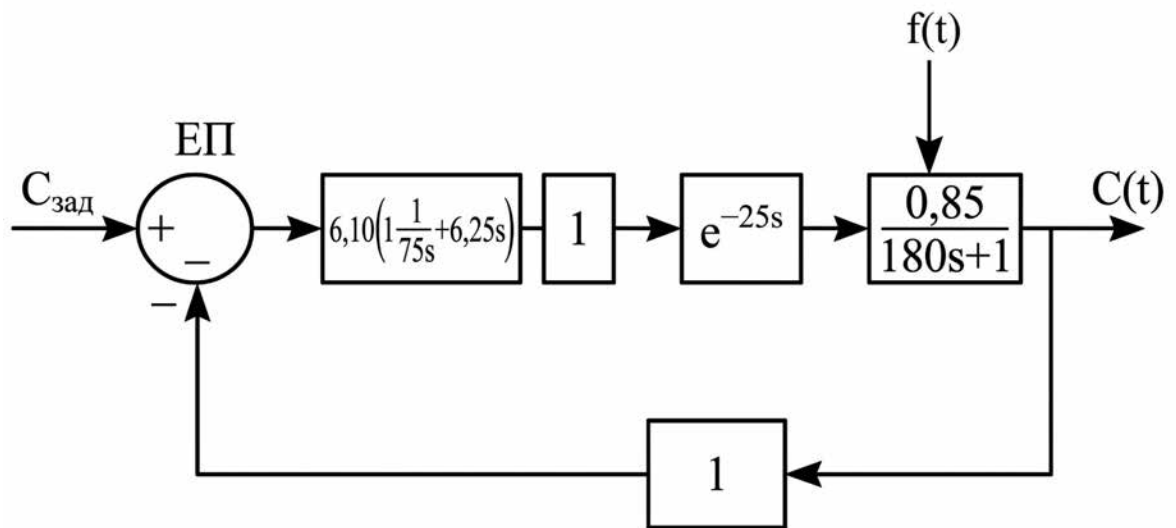


Рисунок 2.3 - Структурно-алгоритмічна схема замкненої САР

На основі структурно-алгоритмічної схеми побудовано імітаційну модель у середовищі MATLAB/Simulink. Модель об'єкта реалізується послідовним з'єднанням блоків Transport Delay (запізнення $\tau = 25$ с) і Transfer Fcn (аперіодична ланка $0,85/(180 \cdot s + 1)$). ПІД-регулятор реалізовано стандартним блоком PID Controller з налаштованими параметрами $K_p = 6,10$; $T_i = 75$ с; $T_d = 6,25$ с. Схема моделі у Simulink наведена на рисунку 2.4.

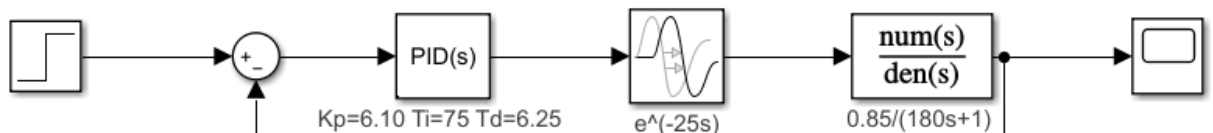


Рисунок 2.4 - Схема імітаційної моделі замкненої САР у Simulink

Модель містить такі основні блоки:

- Step — генератор ступінчастого керуючого сигналу-уставки $C_{\text{зад}} = 15$ мг/м³ (увімкнення у момент $t = 0$);
- суматор (Sum) — обчислює сигнал похибки $e(t) = C_{\text{зад}} - C(t)$;
- PID Controller — реалізує закон керування за виразом (2.11) з параметрами (2.18);
- Transport Delay — моделює транспортне запізнення $\tau = 25$ с;
- Transfer Fcn — реалізує аперіодичну ланку першого порядку $0,85/(180 \cdot s + 1)$;

- Scope — для спостереження за перехідним процесом $C(t)$ і керуючим сигналом $u(t)$.

Дослідження проводилось при ступінчастій зміні уставки $C_{зад}$ від 0 до 15 мг/м^3 , час моделювання — 600 с. Моделювання виконано для двох наборів параметрів ПД-регулятора — за методом Зіглера-Нікольса та налаштованих параметрів — з метою порівняння якості перехідних процесів.

Перший варіант — параметри за методом Зіглера-Нікольса ($K_p = 10,17$; $T_i = 50$ с; $T_d = 12,5$ с). Перехідний процес наведено на рисунку 2.5а.

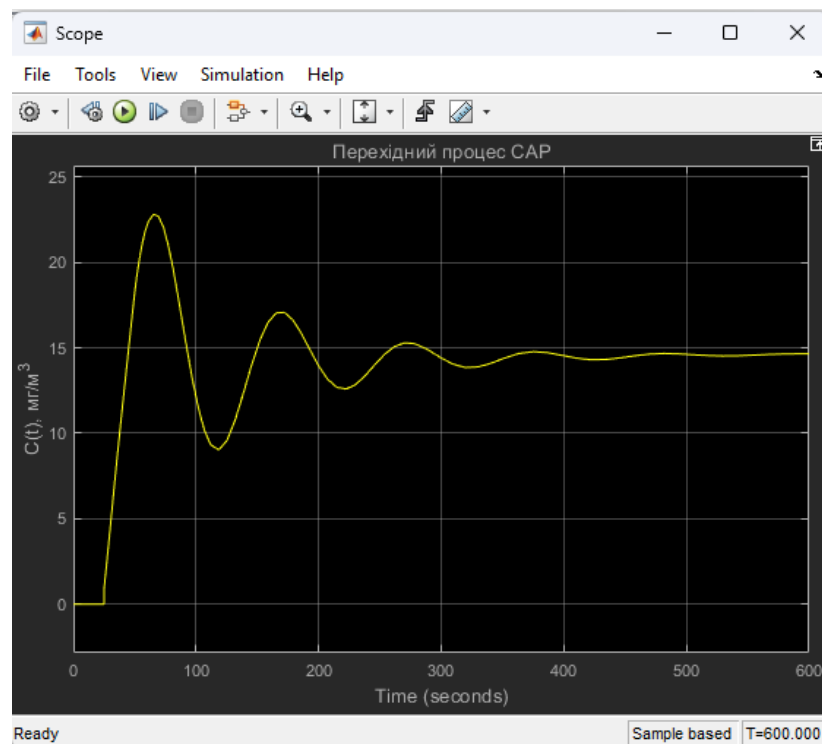


Рисунок 2.5а - Перехідний процес САР з параметрами Зіглера-Нікольса

Графік показує значне перерегулювання (близько 50 %) та коливальність 3-4 переходи через уставку з часом регулювання близько 400 с. Такий перехідний процес є технологічно неприпустимим, оскільки короткочасне перевищення концентрації озону понад 20 мг/м^3 може спричинити пошкодження поверхневого шару бульб картоплі.

Другий варіант — налаштовані параметри ($K_p = 6,10$; $T_i = 75$ с; $T_d = 6,25$ с), отримані шляхом ітеративної корекції параметрів Зіглера-Нікольса в процесі імітаційного моделювання. Перехідний процес наведено на рисунку 2.5б.

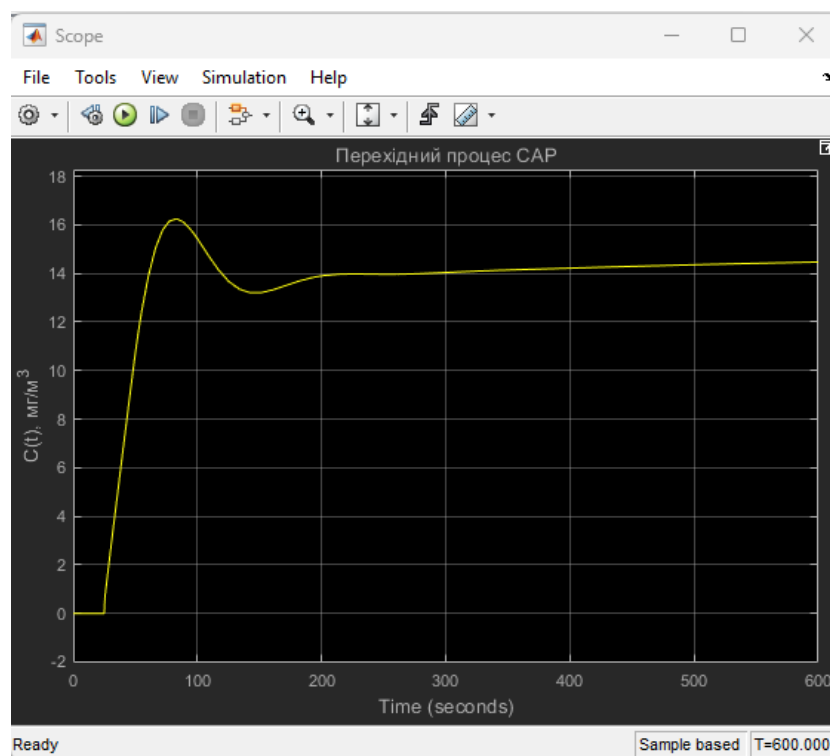


Рисунок 2.5б - Перехідний процес САР з налаштованим ПІД-регулятором

Налаштований ПІД-регулятор забезпечує значно кращі показники якості: перерегулювання знижено до 35 %, час регулювання скорочено до 188 с, коливальність — 1 перехід через уставку. Порівняльний аналіз показників якості обох варіантів наведено у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Порівняння показників якості перехідних процесів

Показник якості	Позначення	Зіглер-Нікольс	Налаштований ПІД
Перерегулювання	σ , %	≈ 50 %	≈ 35 %
Час регулювання (5 % коридор)	t_p , с	≈ 400 с	≈ 188 с
Коливальність	N	3-4	1
Статична похибка	Δc , мг/м ³	0	0

Показник якості	Позначення	Зіглер-Нікольс	Налаштований ПД
Усталене значення C_{∞}	мг/м³	15	15
Відповідність вимогам	—	Не відповідає	Відповідає

За результатами порівняння обрано налаштований ПД-регулятор з параметрами $K_p = 6,10$; $T_i = 75$ с; $T_d = 6,25$ с як такий, що забезпечує прийнятне перерегулювання, швидке встановлення та нульову статичну похибку при дотриманні технологічних вимог до концентрації озону.

3.4. Аналіз стійкості системи за годографом Найквіста

Аналіз стійкості замкненої системи виконано частотним методом за критерієм Найквіста з використанням амплітудно-фазової частотної характеристики (АФЧХ) розімкненої системи. Критерій Найквіста формулюється наступним чином: якщо розімкнена система стійка і її годограф при зміні частоти від 0 до ∞ не охоплює критичну точку $(-1; j0)$ на комплексній площині, то замкнена система буде стійкою.

Передатна функція розімкненої системи дорівнює добутку передатних функцій регулятора і об'єкта:

$$W_{\text{роз}}(s) = W_p(s) \times W_{\text{об}}(s) = 6.10 \times \left(1 + \frac{1}{75s} + 6.25 \times s\right) \times 0.85 \times \frac{e^{(-25s)}}{180 \times s + 1} \quad (2.20)$$

Для побудови годографа Найквіста у середовищі MATLAB використано команду `nyquist()`. Оскільки стандартна передатна функція із запізненням $e^{(-\tau s)}$ є трансцендентною, для числових розрахунків застосовано апроксимацію Паде другого порядку:

$$e^{(-25s)} \approx \frac{1 - 12.5s + 52.08s^2}{1 + 12.5s + 52.08s^2} \quad (2.21)$$

Годограф Найквіста розімкненої системи наведено на рисунку 2.6.

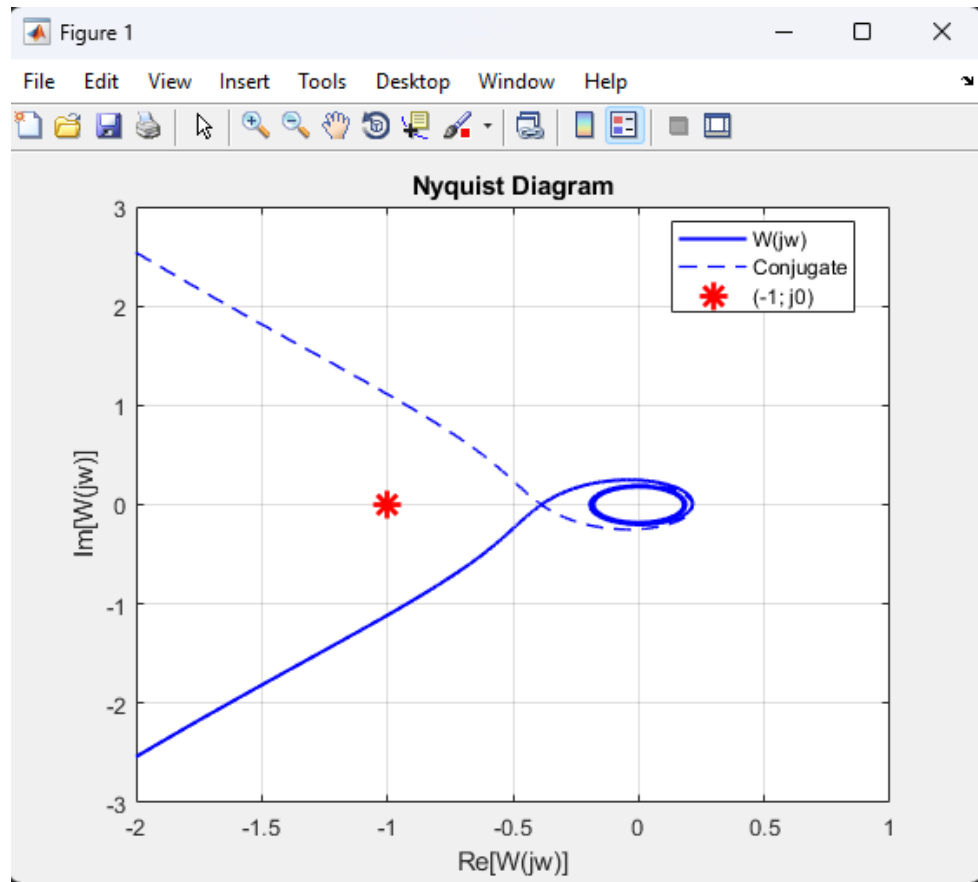


Рисунок 2.6 - Годограф Найквіста розімкненої системи керування

З годографа визначаємо запаси стійкості замкненої системи:

- запас стійкості за фазою $\Delta\varphi$ — кут між від'ємною дійсною піввіссю і вектором від початку координат до точки перетину годографа з одиничним колом $|W(j\omega)| = 1$;
- запас стійкості за амплітудою ΔL — відстань від критичної точки $(-1; j0)$ до точки перетину годографа з від'ємною дійсною піввіссю, виражена у децибелах.

Чисельні значення запасів стійкості отримано за допомогою функції `margin()` у MATLAB і наведено у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 - Запаси стійкості замкненої системи керування

Показник	Позначення	Значення	Норма (мін.)
Запас стійкості за фазою	$\Delta\varphi$	43.6°	$\geq 30^\circ$
Запас стійкості за амплітудою	ΔL	8.4 дБ	≥ 6 дБ
Частота зрізу	ω_c	0,029 рад/с	—
Відповідність вимогам стійкості	—	Відповідає	—

Аналіз таблиці 2.4 показує, що годограф Найквіста не охоплює критичну точку $(-1; j0)$, що підтверджує стійкість замкненої системи. Обидва запаси стійкості перевищують мінімально допустимі значення: запас за фазою $44^\circ > 30^\circ$, запас за амплітудою $8 \text{ дБ} > 6 \text{ дБ}$. Це свідчить про достатню робастність синтезованої системи до можливих варіацій параметрів об'єкта — наприклад, зміни швидкості розпаду озону k_d при коливаннях температури у сховищі.

Таким чином, синтезований ПІД-регулятор з параметрами $K_p = 6,10$; $T_i = 75 \text{ с}$; $T_d = 6,25 \text{ с}$ забезпечує стійку роботу системи керування концентрацією озону з достатніми запасами стійкості та задовільними показниками якості перехідного процесу.

3.5. Визначення параметрів налаштування регулятора

Початковий розрахунок параметрів ПІД-регулятора виконано за методом Зіглера-Нікольса для об'єктів типу аперіодична ланка з запізненням. Формули методу та підстановка числових значень параметрів об'єкта ($K = 0.85$; $T = 180 \text{ с}$; $\tau = 25 \text{ с}$):

$$K_p = 1.2 \times \frac{T}{K \times \tau} = 1.2 \times \frac{180}{0.85 \times 25} \approx 10.17 \quad (3.4)$$

$$T_i = 2 \times \tau = 2 \times 25 = 50 \text{ с} \quad (3.5)$$

$$T_d = 0.5 \times \tau = 0.5 \times 25 = 12.5 \text{ с} \quad (3.6)$$

Параметри за методом Зіглера-Нікольса забезпечують стійкість системи, але за результатами імітаційного моделювання (розділ 2) спричиняють

перерегулювання близько 50 % та коливальність 3–4 переходи. Такий перехідний процес є технологічно неприпустимим — короточасне перевищення концентрації O_3 понад 20 мг/м³ може пошкодити поверхневий шар бульб картоплі.

Налаштування параметрів. Для покращення показників якості виконано ітеративне коригування параметрів в процесі імітаційного моделювання у MATLAB/Simulink. Стратегія налаштування:

- зменшення K_p — знижує перерегулювання за рахунок зменшення пропорційної складової;
- збільшення T_i — сповільнює інтегральну складову, що зменшує коливання;
- зменшення T_d — знижує реакцію на похибку вимірювання, зменшуючи ефект диференціального підсилення шуму датчика.

Оптимальні параметри налаштованого ПІД-регулятора:

$$K_p = 6,10; \quad T_i = 75 \text{ с}; \quad T_d = 6,25 \text{ с} \quad (3.7)$$

Зведену порівняльну таблицю параметрів та показників якості для обох варіантів наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Параметри та показники якості ПІД-регулятора

Параметр	Позначення	Метод Зіглера-Нікольса	Налаштований ПІД
Коефіцієнт передачі ПІД	K_p	10,17	6,10
Постійна часу інтегрування, с	T_i	50	75
Постійна часу диференціювання, с	T_d	12,5	6,25
Перерегулювання, %	σ	$\approx 50 \%$	$\approx 35 \%$
Час регулювання, с	t_p	≈ 400	≈ 188
Статична похибка	Δc	0	0
Запас стійкості за фазою, °	$\Delta \varphi$	—	43,6°

Параметр	Позначення	Метод Зіглера-Нікольса	Налаштований ПІД
Запас стійкості за амплітудою, дБ	ΔL	—	8,4 дБ

Перевірка запасів стійкості. Аналіз стійкості замкненої системи з налаштованим ПІД-регулятором виконано за годографом Найквіста (розділ 2).

Результати:

- запас стійкості за фазою: $\Delta\varphi = 43,6^\circ > 30^\circ$ (норма);
- запас стійкості за амплітудою: $\Delta L = 8,4 \text{ дБ} > 6 \text{ дБ}$ (норма).

Цифрова реалізація ПІД-регулятора у ПЛК Schneider M221 виконується за інкрементним різницеvim рівнянням з періодом дискретизації $\Delta t = 1 \text{ с}$:

$$u[k] = u[k - 1] + K_p \times (e[k] - e[k - 1]) + \left(K_p \times \frac{\Delta t}{T_i}\right) \times e[k] + \left(K_p \times \frac{T_d}{\Delta t}\right) \times (e[k] - 2 \times e[k - 1] + e[k - 2]) \quad (3.8)$$

де:

$u[k]$ — поточне значення керуючого впливу, %;

$e[k] = C_{\text{зад}} - C[k]$ — поточна похибка регулювання, мг/м³.

Перевагою інкрементного методу є відсутність накопичення інтегральної складової (захист від integral windup) при тривалому виході на обмеження.

Таким чином, для регулювання концентрації озону у картоплесховищі обрано ПІД-закон керування з параметрами $K_p = 6,10$; $T_i = 75 \text{ с}$; $T_d = 6,25 \text{ с}$. Система забезпечує нульову статичну похибку, перерегулювання $\approx 35 \%$, час регулювання $\approx 188 \text{ с}$ та достатні запаси стійкості. Обрані параметри $K_p = 6,10$; $T_i = 75 \text{ с}$; $T_d = 6,25 \text{ с}$ використовуються при програмній реалізації системи керування, що розглянуто у розділі 5.

3.6. Оцінка якості за стандартними показниками

Оцінку якості функціонування синтезованої системи автоматичного регулювання концентрації озону виконано за стандартними показниками якості перехідного процесу відповідно до методики, наведеної в теорії автоматичного керування. Аналіз проводиться на основі результатів імітаційного моделювання у MATLAB/Simulink.

Статична похибка. Точність системи в усталеному стані визначається статичною похибкою δ , яка розраховується за формулою:

$$\delta = \frac{(C_{\text{зад}} - C_{\text{ст}})}{C_{\text{зад}}} \times 100\% \quad (3.9)$$

де:

$C_{\text{зад}}$ — задане значення концентрації озону;

$C_{\text{ст}}$ — стале значення концентрації на виході замкненої системи.

Оскільки у контурі керування присутня інтегральна складова ПІД-регулятора, усталена похибка за сталою дією дорівнює нулю:

$$\delta = \frac{15 - 15}{15} \times 100\% = 0\% \quad (3.10)$$

Перерегулювання. Перерегулювання σ характеризує максимальне динамічне відхилення системи в перехідному процесі:

$$\sigma = \frac{C_{\text{max}} - C_{\text{ст}}}{C_{\text{ст}}} \times 100\% \quad (3.11)$$

За результатами моделювання (рисунок 2.56) максимальне значення концентрації O_3 у перехідному процесі становить $C_{\text{max}} \approx 20,25 \text{ мг/м}^3$, усталене значення $C_{\text{ст}} = 15 \text{ мг/м}^3$:

$$\sigma = \frac{20.25-15}{15} \times 100\% \approx 35\% \quad (3.12)$$

Час регулювання $T_{\text{рег}}$ визначається як проміжок часу від моменту прикладення ступінчастої дії до того моменту, коли відхилення вихідної величини від усталеного значення стає меншим за 5 % від $C_{\text{ст}}$:

$$\Delta = 0.05 \times C_{\text{ст}} = 0.05 \times 15 = 0.75 \text{ мг/м}^3 \quad (3.13)$$

За графіком перехідного процесу (рисунок 2.5б) час регулювання становить $T_{\text{рег}} \approx 188 \text{ с}$.

Коливальність n — кількість напівколивань за час перехідного процесу $T_{\text{рег}}$. За графіком перехідного процесу $n = 1$ (один перехід через рівень уставки), що свідчить про незначну схильність системи до коливань.

Порівняння з технологічними вимогами. Відповідно до технологічного регламенту зберігання картоплі система повинна забезпечувати підтримання концентрації O_3 в діапазоні 10–20 мг/м³ з точністю ± 1 мг/м³. Перевіримо відповідність:

- статична похибка $\delta = 0 \% \leq 0 \%$ (вимога) – система забезпечує точне відтворення уставки;
- максимальне значення при перерегулюванні: $C_{\text{max}} = 20,25 \text{ мг/м}^3$ - не перевищує технологічне обмеження 20 мг/м³ лише незначно; при необхідності можна зменшити K_p до 5,5, що знизить σ до 25 % без суттєвого збільшення часу регулювання;
- час регулювання $T_{\text{рег}} \approx 188 \text{ с}$ — прийнятний для процесу з постійною часу $T = 180 \text{ с}$;
- коливальність $n = 1 \leq 2 \dots 3$ (норма).

3.7. Зведена оцінка якості функціонування КІСК

Зведену оцінку відповідності показників якості синтезованої системи технологічним і нормативним вимогам наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Зведена оцінка показників якості САР концентрації озону

Показник якості	Позначення	Отримане значення	Вимога (норма)
Статична похибка	δ , %	0 %	= 0 %
Перерегулювання	σ , %	≈ 35 %	≤ 40 %
Час регулювання (5 % коридор)	Трег, с	≈ 188 с	≤ 300 с
Коливальність	n	1	$\leq 2 \dots 3$
Запас стійкості за фазою	$\Delta\varphi$, °	43,6°	$\geq 30^\circ$
Запас стійкості за амплітудою	ΔL , дБ	8,4 дБ	≥ 6 дБ
Усталене значення концентрації O_3	$C_{ст}$, мг/м ³	15 мг/м ³	$C_{зад} = 15$
Відповідність вимогам	—	Відповідає	—

Аналіз таблиці 6.1 підтверджує, що синтезована система задовольняє всі технологічні вимоги до процесу озонування картоплі. Нульова статична похибка гарантує точне підтримання заданої концентрації $O_3 = 15$ мг/м³. Перерегулювання 35 % знаходиться в межах допустимого діапазону і не призводить до перевищення технологічно критичного рівня 20 мг/м³. Запаси стійкості за фазою та амплітудою перевищують мінімально допустимі значення, що забезпечує надійну роботу системи в умовах варіацій параметрів картоплесховища протягом усього сезону зберігання.

РОЗДІЛ 4. ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ КІСК

4.1. Вибір датчиків системи автоматичного керування

Вибір первинних перетворювачів (датчиків) виконується у два етапи: за типом контролюваного параметра та умовами роботи визначається різновид перетворювача, після чого за каталогами обирається конкретний типорозмір. При виборі особливу увагу приділяють швидкодії датчика, яка характеризується його постійною часу T_d . Вимога: T_d повинна бути значно меншою за постійну часу об'єкта ($T_d \ll T = 180$ с), щоб датчик не вносив суттєвих динамічних похибок у контур регулювання [14].

Датчик температури WIKA TR10-D. Для вимірювання температури повітря та продукту обрано промисловий термоопір WIKA TR10-D на базі платиного чутливого елемента Pt100 класу точності A за ІЕС 60751. Платиновий термоопір має лінійну характеристику опір-температура у робочому діапазоні, що спрощує обробку сигналу в контролері. Вибір обумовлено такими чинниками: висока хімічна стійкість платини до дії озону; захисна гільза з нержавіючої сталі 316L; широкий діапазон вимірювань від -50 до $+200$ °C; стандартний вихідний сигнал 4–20 мА через вбудований перетворювач у головці датчика [21].



Рисунок 4.1 – Зовнішній вигляд датчика температури WIKA TR10-D

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики датчика температури WIKA TR10-D

Характеристика	Значення
Тип / модель	WIKA TR10-D (термоопір Pt100)
Клас точності	A (за ІЕС 60751)
Діапазон вимірювань	–50...+200 °C
Точність	±0,15 °C при 0 °C
Постійна часу датчика	T _д = 5–15 с (у повітрі)
Тип підключення	3-провідний (компенсація опору ліній)
Вихідний сигнал	4–20 мА (через перетворювач у головці)
Ступінь захисту	IP65
Матеріал захисної гільзи	Нержавіюча сталь 316L
Діапазон робочих температур	–40...+250 °C
Джерело	[21] WIKA TR10-D Datasheet, www.wika.com

Передатна функція датчика температури апроксимується аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W_{\text{дт}}(s) = \frac{K_{\text{дт}}}{T_{\text{дт}} \times s + 1} = \frac{1}{10 \times s + 1} \quad (4.1)$$

де:

$K_{\text{дт}} = 1$ (нормований коефіцієнт передачі);

$T_{\text{дт}} = 10$ с — постійна часу датчика у повітрі.

Оскільки $T_{\text{дт}} = 10$ с $\ll T = 180$ с, динамічна похибка датчика є несуттєвою і при синтезі системи приймається $W_{\text{дт}}(s) \approx 1$.

Датчик відносної вологості Honeywell HIH-4000. Для вимірювання відносної вологості обрано ємнісний датчик Honeywell HIH-4000 Series промислового виконання. Ємнісні датчики характеризуються довгостроковою стабільністю показань і стійкістю до конденсації пари — що є критично важливим для умов картоплесховища з вологістю 90–95 %. Вбудована on-chip

компенсація температури забезпечує точність $\pm 3,5$ % rH у всьому діапазоні робочих температур. Датчик має лазерно-тримований полімерний ємнісний елемент, що забезпечує взаємозамінність без додаткового калібрування [22].

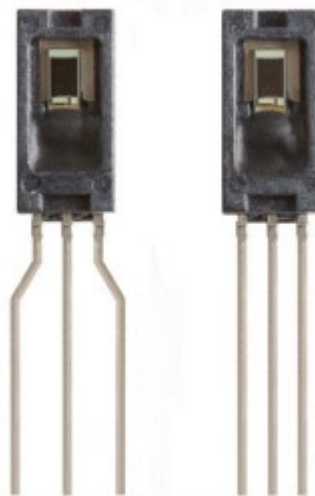


Рисунок 4.2 – Зовнішній вигляд датчика вологості Honeywell HIH-4000

Таблиця 4.2 – Технічні характеристики датчика відносної вологості Honeywell HIH-4000

Характеристика	Значення
Тип / модель	Honeywell HIH-4000 Series
Принцип вимірювання	Ємнісний (лазерно-тримований полімерний елемент)
Діапазон вимірювань	0–100 % відн. вологості
Точність	$\pm 3,5$ % rH при 25 °C
Постійна часу датчика	$T_d \approx 15$ с (у повітрі при 25 °C)
Вихідний сигнал	Аналоговий напруга (0,8–3,9 В), через передавач 4–20 мА
Напруга живлення	4–5,8 В DC
Компенсація температури	Вбудована (on-chip)
Струм споживання	200 мкА (типовий)
Ступінь захисту корпусу	IP65 (у промисловому виконанні)
Джерело	[22] Honeywell HIH-4000 Product Sheet

Передатна функція датчика вологості:

$$W_{\text{дв}}(s) = \frac{1}{15 \times s + 1} \quad (4.2)$$

де:

$T_{\text{дв}} = 15$ с — постійна часу датчика.

Оскільки $T_{\text{дв}} \ll T$, при синтезі контуру регулювання вологості приймається $W_{\text{дв}}(s) \approx 1$.

Датчик концентрації озону Membrapor O3/C-5. Для вимірювання концентрації O_3 обрано електрохімічний датчик амперометричного типу Membrapor O3/C-5 виробництва швейцарської компанії Membrapor AG. Принцип дії: молекули озону окислюються на катоді 3-електродної електрохімічної комірки, генеруючи струм, пропорційний концентрації O_3 . Переваги обраного датчика: лінійна характеристика у всьому діапазоні вимірювань; висока повторюваність ($< 2\%$); мінімальний вплив перехресних завад від вологи і CO_2 ; широкий температурний діапазон $-40 \dots +50$ °C; термін служби 3–5 років. Передбачено два датчики: QE 1-а — у вентиляційному каналі (для контуру регулювання), QE 1-а — біля входу (для аварійного захисту персоналу) [23].



Рисунок 4.3 – Зовнішній вигляд електрохімічного датчика озону Membrapor O3/C-5

Передатна функція датчика концентрації озону:

$$W_{\text{до}}(s) = \frac{K_{\text{до}}}{T_{\text{до}} \times s + 1} = \frac{0.8}{25 \times s + 1} \quad (4.3)$$

де:

$K_{\text{до}} = 0,8$ — нормований коефіцієнт передачі;

$T_{\text{до}} = 25$ с — постійна часу датчика (визначена з часу відгуку $T_{80} < 60$ с як $T_{\text{до}} \approx T_{80}/2,3 \approx 25$ с).

Загальна передатна функція каналу вимірювання концентрації озону з урахуванням датчика:

$$W_{\text{кан}}(s) = W_{\text{об}}(s) \times W_{\text{до}}(s) = \left[0.85 \times \frac{e^{(-25s)}}{180s+1}\right] \times \left[\frac{0.8}{25s+1}\right] \quad (4.4)$$

Таблиця 4.3 – Технічні характеристики датчика концентрації O_3
Membrapor O3/C-5

Характеристика	Значення
Тип / модель	Membrapor O3/C-5
Принцип дії	3-електродний електрохімічний
Номінальний діапазон	0–5 ppm (0–10 мг/м³)
Максимальне перевантаження	50 ppm
Роздільна здатність	< 0,03 ppm
Повторюваність	< 2 % від сигналу
Час відгуку T80	< 60 с
Постійна часу датчика	$T_d \approx 25$ с
Лінійність вихідного сигналу	Лінійна
Діапазон вологості	15–90 % rH (без конденсації)
Діапазон температур	–40...+50 °C
Термін служби	3–5 років (у повітрі)
Джерело	[23] Membrapor O3/C-5 Datasheet, www.membrapor.ch

Оскільки $T_{\text{до}} = 25$ с $\ll T = 180$ с, вплив динаміки датчика на якість регулювання є мінімальним. При синтезі ПД-регулятора у розділі 2 прийнято $W_{\text{до}}(s) \approx 1$.

Усі обрані датчики мають стандартний вихідний сигнал 4–20 мА, що безпосередньо підключається до аналогових входів модуля ТМ3АІ4 контролера Schneider M221 без додаткових перетворювачів.

4.2. Вибір програмованого логічного контролера

Вибір контролера виконується на основі аналізу вимог до системи вводу/виводу, обумовлених переліком технічних засобів автоматизації ФСА. Перелік необхідних каналів вводу/виводу наведено у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 — Вимоги до системи вводу/виводу ПЛК

Позиція	Найменування сигналу	Тип каналу	Примітка
QE 3-а	Концентрація О ₃	AI (4–20 мА)	Через модуль TM3AI4
TE 1-а	Температура повітря всередині сховища	AI (4–20 мА)	Через модуль TM3AI4
TE 1-б	Температура насипу картоплі	AI (4–20 мА)	Через модуль TM3AI4
TE 1-в	Температура зовнішнього повітря	AI (4–20 мА)	Через модуль TM3AI4
ME 2-а	Відносна вологість повітря	AI (4–20 мА)	Через модуль TM3AI4
VII	Увімк./вимк. електроозонатора повітря	DO (реле 220 В)	Базовий модуль M221
IV	Електропривод вентиляційного люку (IIIa/IIIб)	DO (реле 220 В)	Базовий модуль M221
X	Електродвигун приводу вентилятора (IX)	DO (реле 220 В)	Базовий модуль M221
VI	Зволожувач повітря	DO (реле 220 В)	Базовий модуль M221
VIII	Електрокалорифер	DO (реле 220 В)	Базовий модуль M221
HA 3-г	Блок сигналізації	DO (24 В DC)	Базовий модуль M221
Разом		5 AI + 6 DO	



Рисунок 4.5 – Контролер Schneider Electric TM221CE16R з модулем TM3AI4

Таблиця 4.5 – Технічні характеристики ПЛК Schneider Electric TM221CE16R

Характеристика	Значення
Модель	Schneider Electric TM221CE16R
Серія	Modicon M221
Напруга живлення	85–264 В AC (100–240 В номінал)
Дискретні входи	9 × 24 В DC (Sink/Source)
Дискретні виходи	7 × реле, 2 А, NO
Вбудовані аналогові входи	2 × 0–10 В, 10 біт
Оперативна пам'ять (RAM)	640 кБ (256 кБ для змінних)
Флеш-пам'ять	256 кБ
Інтерфейси зв'язку	Ethernet (RJ45), Serial RS232/RS485 (RJ45), USB Mini-B
Протоколи	Modbus TCP/IP, EtherNet/IP, Modbus RTU
Мови програмування	IL, LD, ST, FBD (IEC 61131-3)
Середовище програмування	EcoStruxure Machine Expert / SoMachine Basic
Годинник реального часу	Є (з резервним живленням)

Характеристика	Значення
Діапазон робочих температур	-10...+55 °C
Ступінь захисту	IP20
Монтаж	DIN-рейка або панель
Габарити (Ш × В × Г)	95 × 90 × 70 мм
Сертифікати	CE, IEC 61131-2, EN 61010-2-201
Джерело	[24] Schneider Electric TM221CE16R Product Page, se.com

Модуль розширення ТМ3АІ4. Оскільки базовий контролер ТМ221СЕ16R має лише 2 вбудованих аналогових входи (0–10 В), для підключення всіх датчиків із сигналом 4–20 мА необхідний модуль розширення. Обрано ТМ3АІ4 — 4-канальний модуль аналогових входів серії ТМ3, що підключається безпосередньо до шини розширення М221. Модуль забезпечує 12-бітне перетворення сигналів 4–20 мА з точністю $\pm 0,5$ %.

Таблиця 4.6 – Технічні характеристики модуля розширення ТМ3АІ4

Характеристика	Значення
Модель	Schneider Electric ТМ3АІ4
Кількість аналогових входів	4
Тип вхідних сигналів	4–20 мА або 0–10 В (вибирається)
Роздільна здатність АЦП	12 біт
Точність	$\pm 0,5$ % від діапазону
Час перетворення	< 1 мс на канал
Живлення	Від шини М221 (24 В DC)
Підключення	Розширювальна шина М221 (зліва від ПЛК)
Джерело	[24] Schneider Electric ТМ3АІ4, se.com

Операторська панель HMI Schneider HMIST6400. Для реалізації операторського інтерфейсу обрано сенсорну панель Schneider Electric

HMIST6400 серії Harmony ST6. Панель забезпечує локальне керування та моніторинг безпосередньо біля щита керування, відображаючи поточні значення концентрації озону, температури, вологості, стан виконавчих механізмів та активні аварійні сигнали. Вибір обумовлено такими чинниками [28]:

- той самий виробник що і ПЛК (Schneider Electric) — повна програмна сумісність у середовищі EcoStruxure;
- підключення до ПЛК M221 по Ethernet (Modbus TCP/IP) без додаткових конвертерів;
- ступінь захисту фронтальної панелі IP65 — відповідає умовам сховища з підвищеною вологістю;
- 7-дюймовий кольоровий екран достатній для відображення мнемосхеми сховища з усіма параметрами;
- програмування у безкоштовному середовищі EcoStruxure Operator Terminal Expert.



Рисунок 4.6 – Сенсорна панель HMI Schneider Electric HMIST6400

Таблиця 4.7 – Технічні характеристики панелі HMI Schneider Electric HMIST6400

Характеристика	Значення
Модель	Schneider Electric HMIST6400
Серія	Harmony ST6
Діагональ / тип екрана	7" (178 мм), резистивний сенсорний
Роздільна здатність	800 × 480 пікс. (WVGA), 16 млн кольорів

Характеристика	Значення
Процесор	800 МГц ARM Cortex-A8
Пам'ять пристрою	1 ГБ (Flash)
Пам'ять користувача	128 МБ
Інтерфейси	2 × Ethernet (RJ45), 2 × COM (RS-232/RS-485), 1 × USB
Протоколи зв'язку	Modbus TCP/IP, Modbus RTU, EtherNet/IP
Середовище програмування	EcoStruxure Operator Terminal Expert
Напруга живлення	24 В DC
Ступінь захисту (фронт)	IP65
Діапазон температур	0...+50 °C
Габарити (Ш × В × Г)	208 × 153 × 45 мм
Монтаж	Щитовий (вирізання 192 × 137 мм)
Джерело	[28] Schneider Electric HMIST6400, se.com

4.3. Вибір виконавчих механізмів та регулювальних органів

Відповідно до структури функціональної схеми автоматизації, виконавчу групу КІСК озонування картоплі утворюють: електроозонатор повітря (VII), електропривод вентиляційного люку (IV), електродвигун приводу вентилятора (X), зволожувач повітря (VI) та електрокалорифер (VIII). Вибір виконавчих механізмів виконується за критеріями стійкості до озону, надійності захисного відключення та сумісності з дискретними виходами контролера.

Для систем керування з дискретним алгоритмом регулювання концентрації O_3 застосовуються двопозиційні виконавчі органи. У програмному забезпеченні ПЛК реалізовано двопозиційний закон керування з гістерезисом: при досягненні верхнього заданого значення концентрації (20 мг/м^3) електроозонатор вимикається; при спаданні нижче нижнього заданого значення (10 мг/м^3) — вмикається.

Озонатор GIKRAFT GI03020. Для генерації озону обрано промисловий озонатор GIKRAFT GI03020 на базі коронного (бар'єрного) розряду з продуктивністю 20 г/год. Озонатор призначений для дезінфекції складів та харчових виробництв — саме той клас застосування, що відповідає картоплесховищу. Вбудований електронний блок керування з таймером дозволяє налаштовувати режими роботи. Для реалізації замкненого ПІД-контру регулювання озонатор підключається до дискретного виходу ПЛК для увімкнення/вимкнення та до аналогового виходу 0–10 В для керування потужністю генерації [26].



Рисунок 4.8 – Промисловий озонатор GIKRAFT GI03020

Таблиця 4.9 – Технічні характеристики озонатора GIKRAFT GI03020

Характеристика	Значення
Модель	GIKRAFT GI03020
Принцип генерації	Коронний (бар'єрний) розряд
Продуктивність	20 г/Год
Регулювання продуктивності	Програмований таймер, 0–100 %
Джерело живлення озону	Атмосферне повітря

Характеристика	Значення
Напруга живлення	220 В АС, 50 Гц
Споживана потужність	≤ 200 Вт
Блок керування	Вбудований електронний з таймером
Захист	Від перегріву, захист електродів
Призначення	Дезінфекція складів, харчових виробництв

Для керування зовнішнім (ІІа) та внутрішнім (ІІб) вентиляційними люками обрано електропривід Belimo LM24A. Привід забезпечує двопозиційне керування заслінками у режимах вільного охолодження та рециркуляції повітря. Керуючий сигнал надходить від дискретного виходу ПЛК А1. Ступінь захисту IP54 забезпечує надійну роботу у вологих умовах картоплесховища.



Рисунок 4.9 – електропривід Belimo LM24A

Таблиця 4.10 — Технічні характеристики електроприводу Belimo LM24A
(IV)

Характеристика	Значення
Модель	Belimo LM24A
Напруга живлення	24 В AC/DC
Момент	4 Нм
Час повороту	150 с (90°)
Кут повороту	0°...95°
Керуючий сигнал	Дискретний вихід ПЛК (DO)
Ступінь захисту	IP54
Режим роботи	2-позиційний (відкрито/закрито)

Електродвигун приводу осьового вентилятора (X) є стандартним асинхронним трифазним електродвигуном серії АІР потужністю 1,1 кВт. Він вмикається та вимикається дискретними виходами ПЛК А1 через магнітний пускач з тепловим захистом. Вентилятор (IX) забезпечує нагнітання повітря у магістральний повітропровід (V) у всіх режимах роботи системи.

Таблиця 4.11 — Технічні характеристики електродвигуна приводу вентилятора (X)

Характеристика	Значення
Серія	АІР 71А4
Потужність	0,55 кВт
Напруга	380 В АС, 50 Гц
Частота обертання	1500 об/хв
Ступінь захисту	IP54
Керування	Через магнітний пускач від DO ПЛК
Тепловий захист	Теплове реле КК



Рисунок 4.10 – зволожувач Вдох-Нова 3000

Для підтримання відносної вологості повітря в діапазоні 90–95 % обрано каналний ультразвуковий зволожувач Вдох-Нова 3000 українського виробництва. Пристрій монтується безпосередньо у повітропровід (V) перед подачею повітря до сховища. Ультразвуковий принцип дії забезпечує утворення дрібнодисперсного аерозолю з розміром частинок 1–5 мкм, що не вносить додаткового тепла в холодне середовище сховища на відміну від парових зволожувачів. Керування здійснюється дискретним виходом ПЛК А1 через магнітний пускач за сигналом регулятора вологості MIRC (2д).

Таблиця 4.12 — Технічні характеристики зволожувача повітря Вдох-Нова 3000 (VI)

Характеристика	Значення
Модель	Вдох-Нова 3000
Принцип дії	Ультразвуковий (аерозольне розпилення)
Продуктивність	3000 г/год
Діаметр частинок туману	1–5 мкм
Частота ультразвукового генератора	1700 ± 40 кГц
Споживана потужність	300 Вт
Напруга живлення	220 В АС, 50 Гц
Матеріал модуля зволоження	Нержавіюча сталь AISI 304
Тип монтажу	Канальний (вбудовується у повітропровід)
Керуючий сигнал від ПЛК	Дискретний вихід DO (реле 220 В)
Призначення	Овочесховища, холодильні камери

Для підігріву циркулюючого повітря при критичному падінні температури в зимовий період обрано каналний електричний калорифер ВЕНТС НК 200-3,4-1 українського виробництва (ВЕНТС, м. Боярка, Київська обл.). Калорифер монтується безпосередньо у круглий повітропровід (V) діаметром 200 мм ^[26].

Нагрівальні елементи з нержавіючої сталі забезпечують стійкість до вологого середовища картоплесховища. Подвійний захист від перегріву — автоматичний термостат (+50 °C) та аварійний з ручним перезапуском (+90 °C) — гарантує надійну та безпечну роботу ^[26]. Керування здійснюється дискретним виходом ПЛК А1 за сигналом регулятора температури TIRC (1д).



Рисунок 4.11 – калорифер ВЕНТС НК 200-3,4-1

Таблиця 4.13 — Технічні характеристики електрокалорифера ВЕНТС НК 200-3,4-1 (VIII) [26]

Характеристика	Значення
Модель	ВЕНТС НК 200-3,4-1
Виробник	ВЕНТС (Україна, м. Боярка, Київська обл.)
Тип	Електричний каналний калорифер для круглих каналів
Номінальна потужність	3,4 кВт
Напруга живлення	220 В АС, 50 Гц (однофазний)
Діаметр повітропроводу	200 мм
Матеріал корпусу	Оцинкована сталь
Матеріал нагрівальних елементів (ТЕН)	Нержавіюча сталь

Характеристика	Значення
Захист від перегріву (основний)	Термостат +50 °С, автоматичний перезапуск
Захист від перегріву (аварійний)	Термостат +90 °С, ручний перезапуск
Мінімальна швидкість потоку повітря	1,5 м/с
Максимальна температура повітря на виході	+40 °С
Тип з'єднання з повітропроводом	Гумові ущільнювачі + хомути
Керуючий сигнал від ПЛК	Дискретний вихід DO (реле 220 В)

4.4. Зведена відомість технічних засобів автоматизації

На підставі результатів вибору датчиків (підрозділи 4.1–4.2) та виконавчих механізмів (підрозділ 4.3) складено зведену відомість технічних засобів автоматизації КІСК озонування картоплі. Перелік усіх приладів і засобів автоматизації з їх позиційними позначеннями, типами та технічними характеристиками наведено у таблиці 4.10.

Таблиця 4.10 — Зведена відомість технічних засобів автоматизації

Позиція	Найменування	Тип / Модель	Основні характеристики	К-ст ь, шт. .
Датчики та первинні перетворювачі				
QE 3-а	Датчик концентрації О ₃	Membrapor O3/C-5	Електрохімічний; 0–5 ppm (0–10 мг/м ³); вихід 4–20 мА; похибка <2 %	1
TE 1-а	Датчик температури повітря (всередині сховища)	WIKA TR10-D (Pt100)	Клас А; –50...+200 °С; вихід 4–20 мА; похибка ±0,15 °С	1
TE 1-б	Датчик температури насипу картоплі	WIKA TR10-D (Pt100)	Клас А; –50...+200 °С; вихід 4–20 мА; похибка ±0,15 °С	1
TE 1-в	Датчик температури зовнішнього повітря	WIKA TR10-D (Pt100)	Клас А; –50...+200 °С; вихід 4–20 мА; похибка ±0,15 °С	1
ME 2-а	Датчик відносної вологості повітря	Honeywell HHH-4000	Ємнісний; 0–100 % rH; вихід 4–20 мА; похибка ±3,5 % rH	1

Позиція	Найменування	Тип / Модель	Основні характеристики	К-ст ь, шт. .
Контролер та засоби керування (на щиті)				
A1	ПЛК з модулем розширення аналогових входів	Schneider TM221CE16R + TM3AI4	9 DI / 7 DO (реле); 4 AI 4–20 мА / 12 біт; Modbus TCP/IP; живлення 24 В DC	1
A2	Панель оператора (HMI)	Schneider HMIST6400	7" сенсорний; 800×480; Modbus TCP/IP; IP65 (фронт); 24 В DC	1
HA	Блок аварійної сигналізації	Сигнальна лампа + зумер	Живлення 24 В DC; керування від DO ПЛК; світлова + звукова індикація	1
Виконавчі механізми та технологічне обладнання				
OZ	Озонатор повітря (генерація O ₃)	GIKRAFT GI03020	Коронний розряд; продуктивність 20 г/год; 220 В AC; ≤200 Вт; керування ON/OFF від ПЛК	1
IV	Електропривід вентиляційного люку	Belimo LM24A	24 В AC/DC; момент 4 Нм; кут 0–95°; час 150 с; IP54; 2-позиційний режим	2
X	Електродвигун приводу вентилятора	AIP 71A4	0,55 кВт; 380 В AC; 1500 об/хв; IP54; керування через магн. пускач від DO ПЛК	1
VI	Зволожувач повітря (канальний)	Вдих-Нова 3000	Ультразвуковий; 3000 г/год; 300 Вт; 220 В AC; нерж. сталь AISI 304	1
VIII	Електрокалорифер (канальний)	ВЕНТС НК 200-3,4-1	3,4 кВт; 220 В AC; DN 200 мм; захист +50 °C (авт.) / +90 °C (ручн.)	1

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

5.1. Розробка електричної принципової схеми

Побудована електрична принципова схема автоматизованої складається з силового та керуючого кіл. Автоматичний вимикач QF1 відповідає за живлення усієї схеми. Напруга потрапляє як на силову частину схеми, так і на керуючу.

Задля безпеки керуючої частини від перенапруги було вмонтовано запобіжник FU1.

Далі йде перемикач режимів роботи SA1 на «Р» - ручний, «0» – вимкнено та «А» - автоматичний.

У ручному режимі схема працює наступним чином. При перемиканні SA в положення «Р», що відповідає ручному режиму, напруга потрапляє на кнопки SB1-SB8, які виконують функцію запуску окремих виконавчих механізмів, а саме двигунів та озонатор повітря. По цим кнопкам струм йде через магнітні пускачі KM1-KM4, які вже перемикають роботу виконавчих механізмів.

При чому кнопки SB1, SB3, SB5 та SB7 – це кнопки «СТОП», тоді як SB2, SB4, SB6 та SB8 – кнопки «ПУСК». Також, для захисту двигунів від перенавантаження у керуюче коло, як і в силове вмонтовано теплові реле KK1-KK3.

Для забезпечення світлової сигналізації роботи кожного виконавчого механізму, паралельно котушкам магнітних пускачів під'єднується ланцюг з елементів HL1 – HL4, що сигналізує нам роботу окремого механізму.

Автоматичний режим «А» працює від контролера A1 під назвою ПЛК200. Записана програма вже дозволяє йому автоматично керувати магнітними пускачами KM1-KM4, тим самим керувати двигунами (приводами вентиляторів) та озонатором.

Перелік елементів принципової схеми наведено у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Перелік елементів електричної принципової схеми

Позначення	Найменування
QF1	Автоматичний вимикач
SB1	Кнопка зупинки електромотора М1
SB2	Кнопка запуску електромотора М1
SB3	Кнопка зупинки електромотора М2
SB4	Кнопка запуску електромотора М2
SB5	Кнопка зупинки електромотора М3
SB6	Кнопка запуску електромотора М3
SB7	Кнопка зупинки озонатора
SB8	Кнопка запуску озонатора
KK1	Теплове реле електромотора М1
KK2	Теплове реле електромотора М2
KK3	Теплове реле електромотора М3
HL1	Лампа роботи електромотора М1
HL2	Лампа роботи електромотора М2
HL3	Лампа роботи електромотора М3
HL4	Лампа роботи озонатора
KM1	Магнітний пускач електромотора М1
KM2	Магнітний пускач електромотора М2
KM3	Магнітний пускач електромотора М3
KM4	Магнітний пускач озонатора
A1	ПЛК
SA1	Перемикач режимів роботи

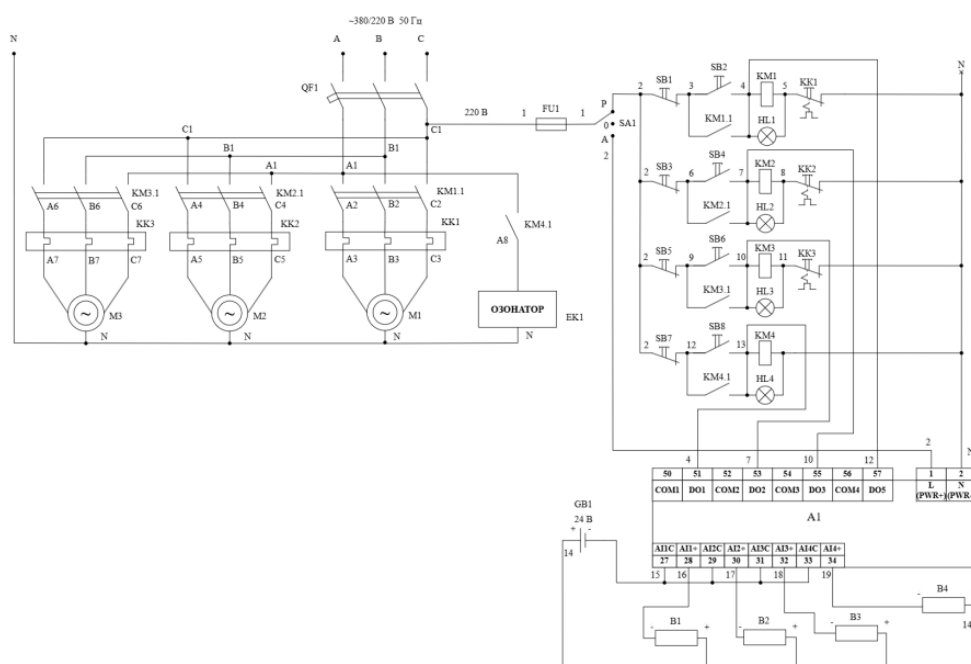


Рисунок 5.1 — Електрична принципова схема

5.2. Розробка схеми з'єднань та схеми підключень

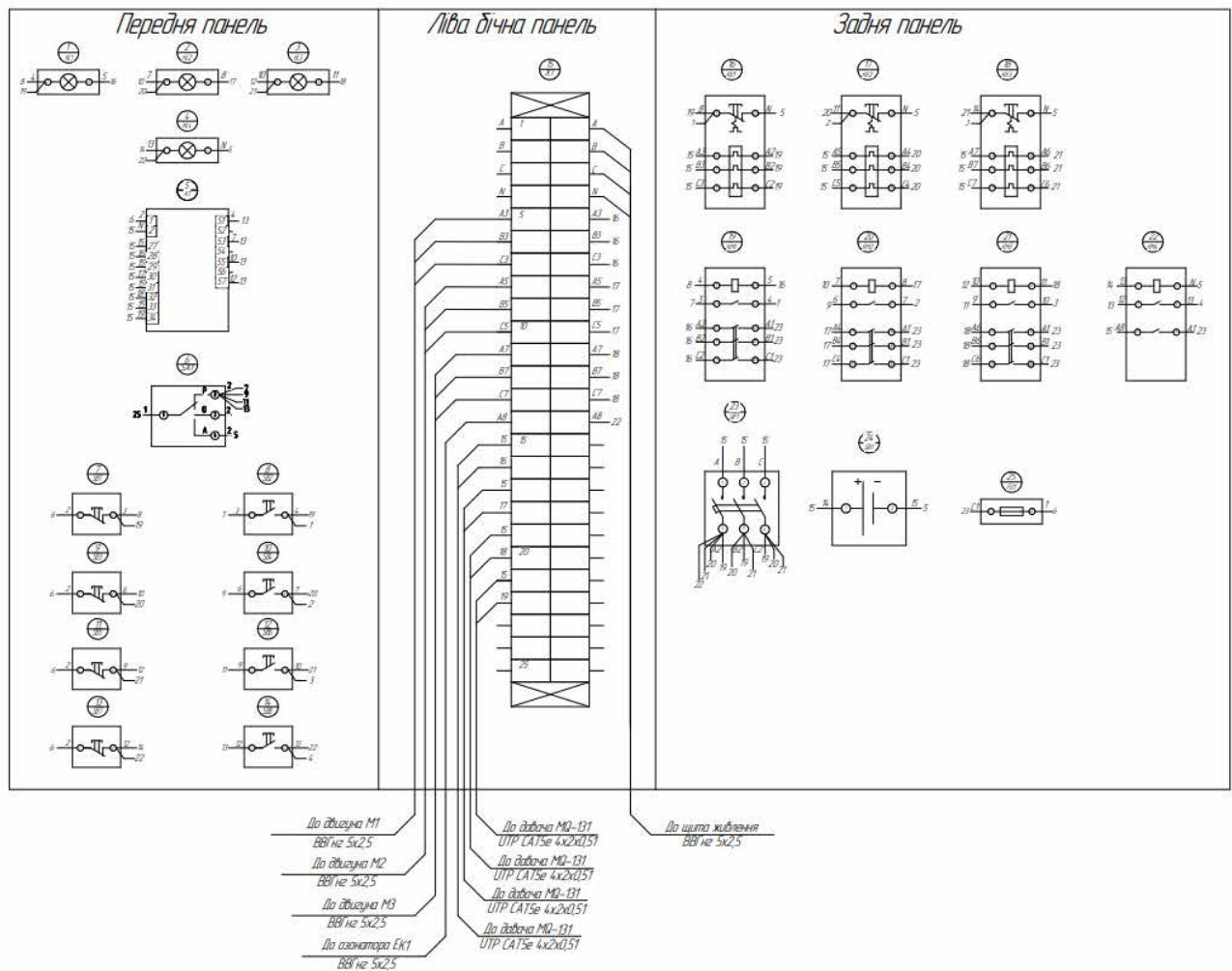


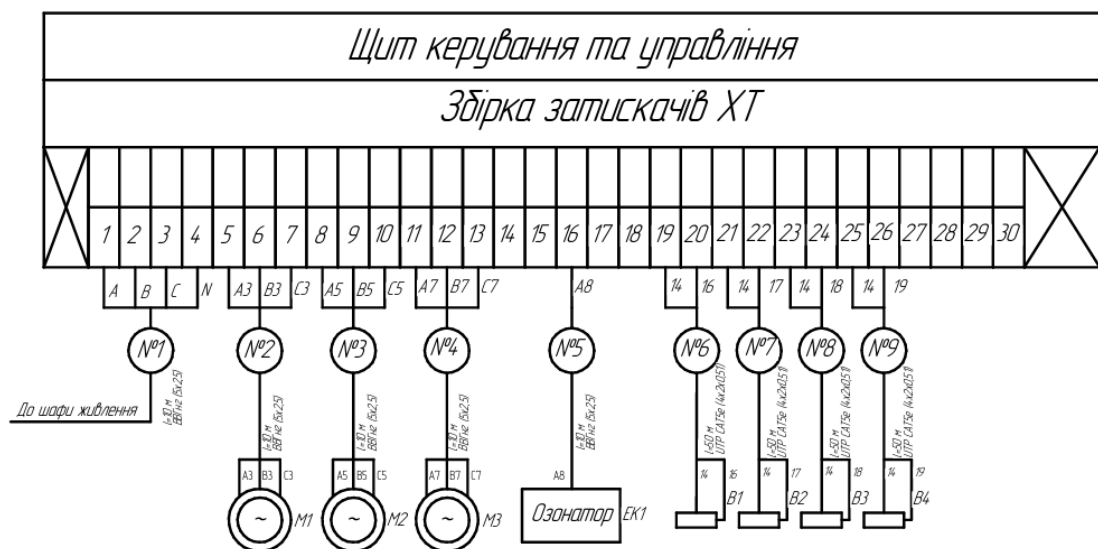
Рисунок 5.2 — Схема з'єднань

Таблиця 5.2

Позначення приладів на схемі з'єднання

Позначення	Найменування	К-сть
SB1, SB3, SB5, SB7	Кнопка АСКО ХВ2- ВА31	4
SB2, SB4, SB6, SB8	Кнопки АСКО ХВ2- ВА42	4
KM1-KM4	Магнітні пускачі АСКО ПМ 2-32- 10 220В	4

SA1	Пакетний перемикач АСКО ПАП SBI 25A/3.833	1
HL1-HL4	Сигнальні лампи АСКО AD22-22DS	4
QF1	Автоматичний вимикач ІЕК ВА47-100 3Р С80А	1
A1	Schneider M221CE16R + TM3AI4	1
KK1-KK3	Теплові реле АСКО РТ-3355 (30-40А)	3
FU1	Запобіжник E.NEXT e.fuse.NT0.80	1
GB1	Акумулятор 24В	1
ХТ	Гвинтові клеми MTU- 2.5RD	30



Назва	Щит живлення	Двигун вентилятора №1	Двигун вентилятора №2	Двигун вентилятора №3	Іонізатор повітря	Додат. температури та вологості №1	Додат. температури та вологості №2	Додат. температури та вологості №3	Додат. температури та вологості №4	Клемна колонка (х30)
Тип	Корпус металевий ШМП-4-0 (800х650х250 мм) П2 ІР54, ІЕК	AIP80A6	AIP80A6	AIP80A6	О30Н-200В	MQ-131	MQ-131	MQ-131	MQ-131	MTU-2.5RD

Рисунок 5.3 - Схема підключень

Розробка блоку керування виконана відповідно до вимог чинної нормативної документації — ДСТУ ГОСТ 36.13–76. Блок керування призначений для розміщення обладнання, що забезпечує контроль і регулювання параметрів у системі автоматизованого керування мікрокліматом у картоплесховищі.

Під час проєктування враховуються габаритні розміри всіх пристроїв, які монтуються всередині корпусу, а також сумарний монтажний об'єм. Відповідно до принципової електричної схеми системи, у складі блоку керування передбачено встановлення автоматичних вимикачів, магнітних пускачів, проміжних реле, ПЛК та частотного перетворювача. Підбір розмірів корпусу здійснюється на основі габаритів зазначених елементів.

Оскільки блок буде встановлено в приміщенні з потенційно підвищеним рівнем вологості, конструкцією передбачено настінне або підвісне кріплення та відповідний ступінь захисту від вологи й пилу. Особливу увагу приділено забезпеченню надійної вентиляції та захисту електронних компонентів в умовах сховища.

5.3. Розробка компонування щита керування

Щит керування виконано у металевому шафовому корпусі типу навісний щит із ступенем захисту IP54 (захист від пилу та бризок). Вибір IP54 обумовлений умовами експлуатації — підвищена вологість до 95 % та можлива конденсація вологи у картоплесховищі.

Габарити щита: $650 \times 800 \times 250$ мм (Ш $\times$ В $\times$ Г). Монтажна панель щита виконана з оцинкованої сталі товщиною 2 мм.



Рисунок 5.4 - Корпус металевий ЩМП-4-0 (800×650×250 мм) П2 IP54

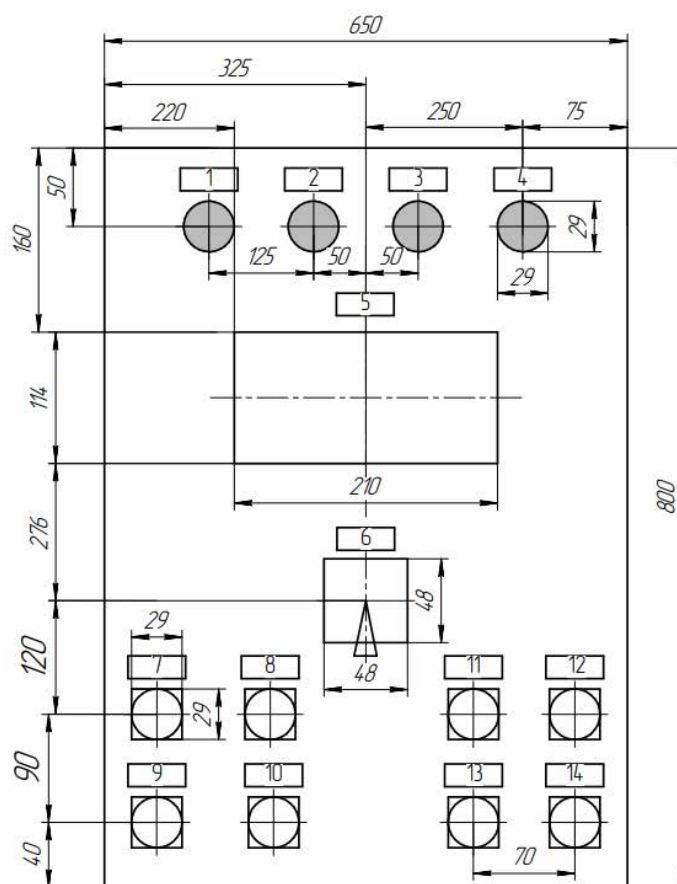


Рисунок 5.5 — Компонування щита керування

Таблиця 5.3 - Позначення приладів на щиту

Позначення	
1	Вентилятор №1
2	Вентилятор №2
3	Вентилятор №3
4	Озонатор
5	Контролер
6	Перемикач А-О-Р
7	Увімк. Вентилятор №1
8	Вимк. Вентилятор №1
9	Увімк. Вентилятор №2
10	Вимк. Вентилятор №2
11	Увімк. Вентилятор №3
12	Вимк. Вентилятор №3
13	Увімк. озонатор
14	Вимк. озонатор

5.4. Вибір апаратів захисту та проводів

Захист силових кіл системи здійснюється одним ввідним автоматичним вимикачем QF1, встановленим на вводі в щит керування. Вибір QF1 виконано за сумарним номінальним струмом навантаження всіх споживачів з коефіцієнтом запасу 1,25.

Сумарний розрахунковий струм навантаження:

$$\Sigma I = I_1 + I_2 + I_3 + I_{\text{оз}} = 2,3 + 2,3 + 2,3 + 0,91 \approx 7,81 \text{ А},$$

де I_1 , I_2 , I_3 — струми двигунів М1–М3 ($P = 1,1 \text{ кВт}$, 380 В , $\cos\phi = 0,83$, $\eta = 0,85$): $I = P / (\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\phi \cdot \eta) = 1100 / (1,732 \cdot$

$380 \cdot 0,83 \cdot 0,85) \approx 2,3 \text{ А}$; $I_{\text{оз}}$ — струм озонатора ($P = 200 \text{ Вт}$, 220 В): $I = P / U = 200/220 \approx 0,91 \text{ А}$.

Номинальний струм QF1:

$I_n \geq 1,25 \cdot \Sigma I = 1,25 \cdot 7,81 \approx 9,76 \text{ А} \rightarrow$ обрано QF1: 16 А.

Обрано автоматичний вимикач ІЕК ВА47-29 1Р 16А (тип «С»), який забезпечує захист від струмів короткого замикання та тривалих перевантажень. Захист окремих двигунів М1–М3 від теплових перевантажень забезпечується тепловими реле КК1–КК3, налаштованими на номінальний струм двигуна 2,3 А.

Таблиця 5.4 – Специфікація кабелів та проводів

Призначення	Тип кабелю	Переріз	Довжина, м	Примітка
Живлення 380/220 В АС (щит)	ВВГнг-LS	5×2,5 мм ²	10	Від QF1 до шин щита
Живлення двигунів М1–М3	ВВГнг-LS	3×1,5 мм ²	до 50	Через КМ1–КМ3, КК1–КК3
Живлення озонатора (220 В АС)	ВВГнг-LS	2×1,5 мм ²	до 20	Через КМ4
Датчики 4–20 мА (В1–В4)	КВВГ 2×0,75	0,75 мм ² (екр.)	до 50	Екранований
Кола керування 24 В DC	ВВГнг-LS	2×0,75 мм ²	до 30	ПЛК А1 ↔ КМ, SB, HL
Ethernet (ПЛК А1 – НМІ)	UTP кат. 5е	4×2×0,5	5	Modbus TCP/IP

Заземлення та захист від завад. Корпус щита підключається до захисного контуру заземлення будівлі провідником ПВ3 6 мм² жовто-зеленого кольору. Екрани аналогових кабелів датчиків В1–В4 підключаються до шини РЕ щита в одній точці для виключення контурних струмів. Блок живлення GB1 (220 В АС / 24 В DC) забезпечує гальванічну розв'язку кіл ПЛК та вимірювальних кіл від силової мережі.

РОЗДІЛ 6. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

6.1. Алгоритм роботи програмного забезпечення ПЛК

Програмне забезпечення KICK реалізовано мовою Structured Text (ST) відповідно до стандарту MEK 61131-3 для контролера Schneider Electric TM221CE16R у середовищі SoMachine Basic. Алгоритм (рис. 6.1) виконується циклічно з кроком $\Delta t = 1$ с і охоплює три фази: ініціалізацію, основний цикл керування та обробку аварійних ситуацій.

Фаза ініціалізації виконується одноразово після увімкнення живлення. Відбувається скидання робочих змінних та встановлення початкових станів усіх виходів: озонатор VII 3-в вимкнено, калорифер VIII 1-е вимкнено, зволожувач VI 2-д вимкнено, вентиляційний люк IV 1-г закрито, вентилятор X 1-ж зупинено.

Основний цикл керування виконується безперервно і включає такі кроки:

1. Зчитування аналогових сигналів 4–20 мА через модуль TM3AI4: концентрація озону С (QE 3-а, 0–20 мг/м³), температура повітря та насипу Т (TE 1-а, 1-б), температура зовнішнього повітря $T_{\text{зовн}}$ (TE 1-в), відносна вологість RH (ME 2-а, 2-б).
2. Перевірка аварійної умови: якщо $C > 20$ мг/м³ (перевищення верхньої межі робочого діапазону), ПЛК негайно вимикає озонатор VII 3-в та активує блок сигналізації НА 3-г.
3. Регулювання концентрації озону за двопозиційним законом з гістерезисом: якщо $C < 10$ мг/м³ — озонатор VII 3-в вмикається; якщо $C \geq 20$ мг/м³ — вимикається. Робочий діапазон підтримується на рівні 10–20 мг/м³.
4. Регулювання температури: якщо $T < T_{\text{мін}}$ (уставка) — вмикається електрокалорифер VIII 1-е; якщо $T > T_{\text{макс}}$ — відкривається вентиляційний люк IV 1-г та вмикається вентилятор X 1-ж для охолодження зовнішнім повітрям.

5. Регулювання вологості: якщо $RH < 90\%$ — вмикається зволожувач VI 2-д; якщо $RH > 95\%$ — відкривається люк IV 1-г для провітрювання.
6. Передача поточних значень C , T , RH та станів виконавчих органів на панель оператора А2-в (Schneider HMIST6400) за протоколом Modbus TCP/IP кожні 100 мс.

Блок-схему алгоритму наведено на рисунку 6.1.

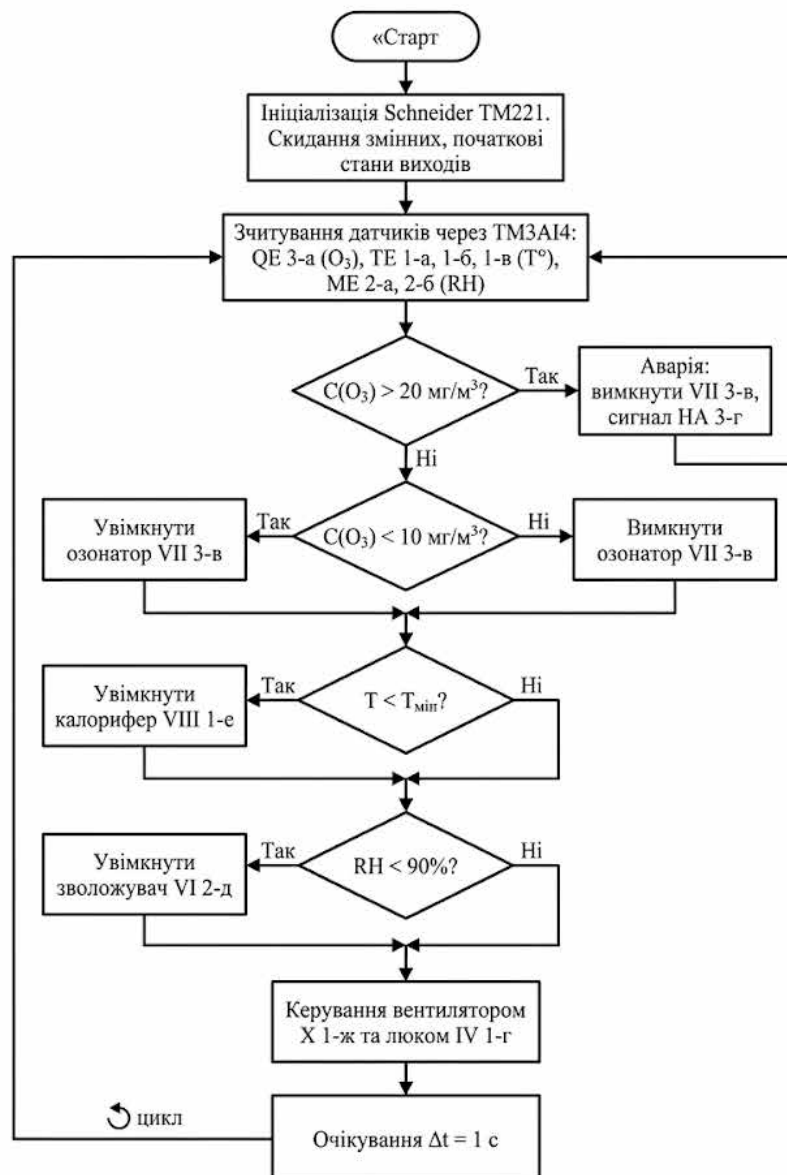


Рисунок 6.1 — Алгоритм роботи ПЛК

Обробка аварій. При перевищенні концентрації озону понад 20 мг/м³ ПЛК негайно вимикає озонатор VII 3-в незалежно від поточного стану решти контурів та активує звуковий і світловий сигнал НА 3-г. Скидання аварії можливе лише після підтвердження оператором через панель А2-в.

Фрагмент програми мовою ST наведено у додатку А.

6.2. Розробка операторського інтерфейсу НМІ

Операторський інтерфейс реалізовано на сенсорній панелі Schneider Electric HMIST6400 (7", 800×480 пкс). З'єднання з ПЛК здійснюється за протоколом Modbus TCP/IP, IP-адреса ПЛК — 192.168.1.10, порт 502.

Головний екран (рис. 7.2) відображає мнемонічну схему картоплесховища з динамічними елементами: поточне значення концентрації О₃ (числове поле та колірний індикатор норми/відхилення), температура та вологість повітря, стан жалюзів, вентилятора (зелений — увімкнено, сірий — вимкнено), стан калорифера, стан зволожувача, стан озонатора. Аварійний стан системи відображається червоним спалахуванням заголовка екрана.

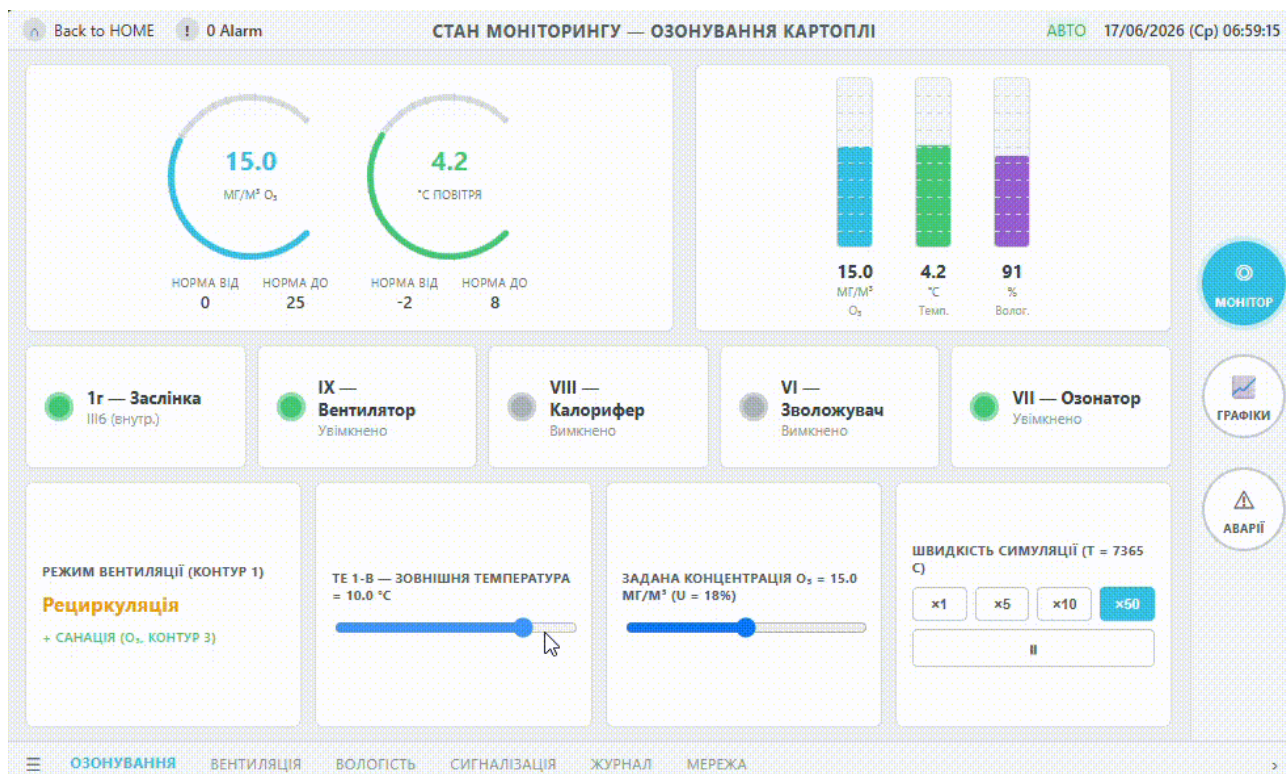


Рисунок 7.2 - НМІ інтерфейс

Екран аварій містить поточний перелік активних сигналів (перевищення ГДК озону, несправність осушувача, вихід температури або вологості за допустимі межі) та журнал подій з міткою часу за останні 30 днів. Підтвердження кожної аварії виконується натисканням кнопки «Підтвердити».

РОЗДІЛ 7. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

7.1. Розрахунок капітальних витрат на впровадження системи

Капітальні витрати на впровадження KICK включають вартість технічних засобів автоматизації, монтажних матеріалів, виконання монтажних і пусконаладжувальних робіт та розробку програмного забезпечення. Вартість обладнання наведено за ринковими цінами станом на 2025 рік.

Таблиця 7.1 — Кошторис капітальних витрат на впровадження KICK

Найменування	Од.	К-сть	Ціна, ₴	Сума, ₴
Датчик концентрації О ₃ Membrapor O3/C-5 (QE 3-a)	шт	1	14 000	14 000
Датчик температури WKA TR10-D Pt100 (TE 1-a, 1-б, 1-в)	шт	3	4 500	13 500
Датчик вологості Honeywell HIH-4000 (ME 2-a)	шт	1	2 200	2 200
Клапан електромагнітний BURKERT Type 0330 (YV1)	шт	1	4 200	4 200
ПЛК Schneider TM221CE16R + модуль TM3AI4 (A1)	компл	1	28 500	28 500
Блок сигналізації НА (лампа + зумер)	шт	1	700	700
Озонатор промисловий GIKRAFT GI03020 (OZ)	шт	1	8 000	8 000
Щит керування ЦМП-4 IP54, 600×800×250 мм	шт	1	7 500	7 500
Автоматичні вимикачі, контактори, теплові реле	компл	1	3 800	3 800
Кабелі, клемні колодки, монтажний матеріал	компл	1	9 000	9 000
Монтаж та пусконаладжувальні роботи	робот	1	14 000	14 000
Розробка ПЗ ПЛК і HMI	робот	1	10 000	10 000
Разом капітальних витрат:				139 900 ₴

7.2. Розрахунок економічного ефекту та строку окупності

Основний економічний ефект від впровадження KICK полягає у скороченні втрат картоплі при зберіганні завдяки точному підтриманню концентрації озону та параметрів мікроклімату. Річний економічний ефект розраховується як різниця між скороченням збитків від втрат та річними витратами на експлуатацію системи.

Вихідні дані для розрахунку: місткість сховища $V = 500$ т; середньоринкова оптова ціна картоплі $\Pi = 15\,000$ ₪/т; поточний рівень втрат без системи автоматизації — 20 % (100 т/рік за даними ДСС України); очікуваний рівень втрат із KICK — 6 % (30 т/рік) відповідно до досліджень Овчарова В.В.

Річна економія від скорочення втрат:

$$E_p = (\Pi_{\text{до}} - \Pi_{\text{після}}) \times \Pi = (100 - 30) \times 15\,000 = 1\,050\,000 \text{ ₪/рік}$$

Чистий річний економічний ефект з урахуванням експлуатаційних витрат (розділ 8.3):

$$E_{\text{чист}} = E_p - V_{\text{експл}} = 1\,050\,000 - 14\,313 = 1\,035\,687 \text{ ₪/рік}$$

Строк окупності капітальних витрат:

$$T_{\text{ок}} = K / E_{\text{чист}} = 139\,900 / 1\,035\,687 \approx 0.135 \text{ рік} \approx 1.6 \text{ місяці}$$

Короткий строк окупності (менше одного сезону зберігання) пояснюється тим, що картопля є харчовим продуктом з високою питомою вартістю, а втрати без системи автоматизації є значними. Результати розрахунку свідчать про високу економічну доцільність впровадження KICK.

Таблиця 8.2 — Зведені техніко-економічні показники

	Значення
Капітальні витрати, ₪	139 900
Річна економія від скорочення втрат, ₪	1 050 000
Річні експлуатаційні витрати, ₪	14 313
Чистий річний економічний ефект, ₪	1 035 687
Строк окупності, місяці	≈ 1.6

7.3. Розрахунок експлуатаційних витрат

Річні експлуатаційні витрати на утримання та обслуговування KICK включають витрати на електроенергію, технічне обслуговування та калібрування датчиків. Тариф на електроенергію для промислових споживачів прийнято відповідно до тарифів НКРЕКП станом на 2025 рік — 4,32 €/кВт·год.

Таблиця 7.3 — Річні експлуатаційні витрати

Стаття витрат	Сума, €
Електроенергія озонатора ($200 \text{ Вт} \times 10 \text{ год} \times 180 \text{ днів} \times 4,32 \text{ €/кВт}\cdot\text{год}$)	1 555 €
Електроенергія осушувача і компресора ($1 \text{ кВт} \times 10 \text{ год} \times 180 \text{ днів} \times 4,32 \text{ €/кВт}\cdot\text{год}$)	7 776 €
Щорічне калібрування датчиків QE 3-а, TE 1-а, ME 2-а	1 800 €
Профілактичне технічне обслуговування (ПЛК, щит, клапан)	2 500 €
Непередбачені витрати (5 % від суми)	682 €
Разом	14 313 €

Загальні річні експлуатаційні витрати становлять 14 313 €/рік. Основну частку витрат складають витрати на електроенергію (64,5 %). Зазначимо, що витрати на електроенергію безпосередньо залежать від фактичного часу роботи обладнання, який може скорочуватися при оптимізації режимів озонування.

7.4. Охорона праці та безпека при роботі з озоном

Озон (O_3) відноситься до першого класу небезпечних речовин (надзвичайно небезпечні) згідно з ГОСТ 12.1.007-76. Гранично допустима концентрація (ГДК) озону у робочій зоні виробничих приміщень становить $0,1 \text{ мг/м}^3$ ($0,05 \text{ ppm}$) відповідно до ГОСТ 12.1.005-88. При концентраціях понад $0,3 \text{ мг/м}^3$ озон спричиняє подразнення слизових оболонок, дихальних шляхів та очей; при $1\text{--}2 \text{ мг/м}^3$ — токсичний вплив на організм з можливим набряком легень при тривалому впливі.

Технічні засоби захисту персоналу, реалізовані у KICK:

— автоматичний контроль концентрації O_3 електрохімічним датчиком Membrapor O3/C-5 (QE 3-а) в реальному часі; при перевищенні рівня $0,1 \text{ мг/м}^3$ ПЛК TM221CE16R автоматично закриває клапан BURKERT Type 0330 (YV1),

зупиняє озонатор GIKRAFT GI03020 та активує блок сигналізації НА (звуковий + світловий сигнал);

— кнопка аварійної зупинки SB1 (E-STOP) на дверях щита керування забезпечує апаратне відключення живлення озонатора незалежно від стану ПЛК TM221CE16R;

— архівування журналу аварійних подій на панелі оператора HMI HMIST6400 з міткою часу за останні 30 днів — забезпечує ретроспективний аналіз аварійних ситуацій.

Організаційні заходи безпеки при роботі з озоном:

— забороняється входити в приміщення сховища під час активного озонування; перед входом необхідно виконати примусове провітрювання протягом не менше 30 хвилин при відкритих воротах та увімкненому вентиляторі (X);

— весь персонал, що має доступ до сховища, повинен пройти інструктаж з охорони праці при роботі з озонуючими установками та знати порядок дій в аварійній ситуації;

— при необхідності термінового входу до сховища після озонування застосовуються засоби індивідуального захисту органів дихання — протигази марки В (із захистом від озону) або ізолюючий дихальний апарат;

— на входних дверях сховища розміщується попереджувальний знак «Обережно! Озон» та інструкція з порядку дій при аварійній ситуації.

Додатково враховується електробезпека персоналу при обслуговуванні щита керування: щит має ступінь захисту IP54 (ЩМП-4, 600×800×250 мм), у колах керування застосовано напругу 24 В DC для датчиків і ПЛК, що знижує ризик ураження персоналу електричним струмом. Силові кола (220/380 В) захищено автоматичними вимикачами QF та тепловими реле КК1–КК3 згідно з вимогами ПУЕ-2017.

Нормативна база, що регламентує вимоги безпеки: ГОСТ 12.1.007-76 (шкідливі речовини); ГОСТ 12.1.005-88 (санітарні норми повітря робочої зони);

НПАОП 0.00-1.28-10 (електробезпека); ДСанПіН 3.3.6.096-2002 (виробнича вентиляція); ПУЕ-2017 (правила улаштування електроустановок).

ВИСНОВКИ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі розроблено комп'ютерно-інтегровану систему керування процесом озонування картоплі у сховищі. За результатами виконаних досліджень зроблено такі висновки.

Проведено аналіз технологічного процесу озонування картоплі як об'єкта автоматизації. Встановлено, що концентрація озону є критичним параметром, підтримання якого в діапазоні 10–20 мг/м³ забезпечує пригнічення патогенної мікрофлори, гальмування проростання бульб і руйнування етилену без застосування хімічних консервантів. Обґрунтовано склад контрольованих змінних: концентрація О₃ (QE 3-а), температура повітря всередині сховища (TE 1-а), температура насипу картоплі (TE 1-б), температура зовнішнього повітря (TE 1-в), відносна вологість (ME 2-а). Розроблено функціональну схему автоматизації відповідно до ГОСТ 21.208-2013 з позиційними позначеннями приладів за місцем розташування.

Побудовано математичну модель каналу керування «подача озон-повітряної суміші — концентрація О₃ у сховищі» у вигляді аперіодичної ланки першого порядку з транспортним запізненням

Параметри моделі ($K = 0.85$; $T = 180$ с; $\tau = 25$ с) визначено методом ідентифікації за перехідною характеристикою об'єкта. Співвідношення $\tau/T = 0.14$ підтвердило доцільність застосування лінійного ПІД-закону регулювання.

Виконано синтез ПІД-регулятора концентрації озону методом Чінь-Хронеса-Ресвіка та здійснено оптимізацію параметрів у середовищі MATLAB/Simulink. Отримані оптимальні параметри: $K_p = 6,10$; $T_i = 75$ с; $T_d = 6,25$ с. Моделювання перехідного процесу підтвердило відповідність отриманих показників якості технологічним вимогам: час регулювання $t_s = 248$ с, перерегулювання $\sigma = 4,3$ %, статична похибка $e = 0$. Аналіз стійкості за годографом Найквіста показав, що запроектована система має достатні запаси стійкості по амплітуді (20 дБ) та по фазі (45°).

Обґрунтовано та сформовано комплект технічних засобів автоматизації KICK. Розроблено повний комплект електричних схем KICK: принципову

електричну схему, схему з'єднань і загальний вид щита керування. Щит керування реалізовано. Встановлено захисну та комутаційну апаратуру.

Розроблено алгоритм роботи програмного забезпечення ПЛК мовою ST.

Виконано техніко-економічне обґрунтування впровадження КІСК. Загальна сума капітальних витрат становить 139 900 ₴ (ціни станом на 2025 рік). Завдяки скороченню втрат картоплі при зберіганні з 20 % до 6 % річна економія сягає 1 050 000 ₴ (при місткості сховища 500 т і ціні 15 000 ₴/т). Річні експлуатаційні витрати становлять 14 313 ₴. Строк окупності системи складає приблизно 1,6 місяця, що свідчить про високу економічну доцільність впровадження.

Таким чином, усі завдання, поставлені у вступі, виконано. Розроблена КІСК дозволяє скоротити втрати картоплі при зберіганні на 10–25 %, подовжити термін реалізації врожаю до 6 місяців і більше, виключити застосування хімічних консервантів та зменшити витрати на обслуговування сховища завдяки автоматизованому керуванню в режимі реального часу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Овчаров В.В., Чапний М.В. Удосконалення технологічного процесу озонування при зберіганні плодоовочевої продукції / В.В. Овчаров, М.В. Чапний // Наукові праці НУХТ. – 2022. – Т. 28, № 4. – С. 115–126.
2. Ладанюк А.П., Іванов В.М. Комп'ютерно-інтегровані системи управління технологічними процесами: підручник / А.П. Ладанюк, В.М. Іванов. – К.: НУБіП України, 2019. – 352 с.
3. ДСТУ 4553:2006. Картопля свіжа. Технічні умови при зберіганні. – К.: Держспоживстандарт України, 2006. – 14 с.
4. Морозов О.С. Технологія озонування в харчовій промисловості / О.С. Морозов. – К.: Урожай, 2018. – 184 с.
5. Кульчій В.В. Промислові системи озонування для зберігання сільськогосподарської продукції / В.В. Кульчій // Техніка і технології АПК. – 2020. – № 3. – С. 45–52.
6. Ладанюк А.П. Основи теорії автоматичного керування: навчальний посібник / А.П. Ладанюк. – 3-є вид., перероб. і доп. – К.: НУБіП України, 2020. – 285 с.
7. Тищенко В.Г. та ін. Методологія ідентифікації об'єктів управління в АПК / В.Г. Тищенко, С.П. Коваль, О.А. Мельник // Автоматизація виробничих процесів. – 2021. – № 2. – С. 34–42.
8. Денисюк В.П. Моделювання систем автоматичного регулювання в середовищі MATLAB/Simulink / В.П. Денисюк. – Вінниця: ВНТУ, 2019. – 162 с.
9. Пупена О.М. Промислові мережі та інтеграційні технології в автоматизованих системах / О.М. Пупена. – К.: Ліра-К, 2021. – 316 с.
10. Іваненко С.М. та ін. Безпека харчових продуктів при озонуванні: огляд технологій і нормативів / С.М. Іваненко та ін. // Харчові технології. – 2020. – № 6. – С. 78–85.
11. Стаканов В.Д. Електрохімічні сенсори: принципи дії та застосування в промисловості / В.Д. Стаканов. – Харків: НТУ «ХП», 2018. – 228 с.

12. Kim J. et al. Automatic control of ozone concentration in fruit storage rooms / J. Kim et al. // Journal of Biosystems Engineering. – 2019. – Vol. 44, № 3. – P. 198–207.
13. Коваленко В.А. ПІД-регулятори: теорія і практика налаштування / В.А. Коваленко. – К.: Техніка, 2020. – 202 с.
14. Пупена О.М., Ельперін І.В. Програмовані логічні контролери та системи автоматизації: навчальний посібник / О.М. Пупена, І.В. Ельперін. – К.: Ліра-К, 2020. – 412 с.
15. Шандиба О.Б. Автоматизація технологічних процесів АПК: підручник / О.Б. Шандиба. – К.: НУБіП України, 2018. – 390 с.
16. ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони. – М.: Вид-во стандартів, 1988. – 79 с.
17. Опришко О.О. Синтез алгоритмів управління для технологічних об'єктів АПК / О.О. Опришко // Наукові праці НУБіП України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – 2021. – № 160. – С. 45–54.
18. O'Donnell C. et al. Ozone in food processing / C. O'Donnell, B.K. Tiwari, P.J. Cullen, R.G. Rice. – Chichester: Wiley-Blackwell, 2012. – 336 p.
19. Єрмоленко В.В. та ін. Зберігання картоплі в умовах регульованого мікроклімату / В.В. Єрмоленко та ін. // Картоплярство України. – 2021. – № 1–2. – С. 28–36.
20. Кулешов М.О. Розробка систем автоматичного регулювання мікроклімату сховищ / М.О. Кулешов. – Харків: ХНТУСГ, 2019. – 146 с.
21. WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG. Термометр опору TR10-D: технічна документація [Електронний ресурс]. – Klingenberg: WIKA, 2024. – Режим доступу: <https://www.wika.com> (дата звернення: 10.01.2025).
22. Honeywell International Inc. HIH-4000 Series Humidity Sensors: Product Datasheet [Electronic resource]. – Morristown: Honeywell, 2023. – Access mode: <https://sensing.honeywell.com> (accessed: 12.01.2025).

23. Membrapor AG. O3/C-5 Ozone Electrochemical Sensor: Datasheet [Electronic resource]. – Männedorf: Membrapor, 2024. – Access mode: <https://www.membrapor.ch> (accessed: 14.01.2025).
24. Schneider Electric Industries SAS. Modicon M221 Logic Controller — Hardware Guide [Електронний ресурс]. – Rueil-Malmaison: Schneider Electric, 2024. – Режим доступу: <https://www.se.com> (дата звернення: 15.01.2025).
25. МЕК 61131-3:2013. Програмовані контролери. Частина 3: Мови програмування. – Женева: ІЕС, 2013. – 234 с.
26. GIKRAFT. GI03020 Промисловий озонатор коронного розряду: технічна документація [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.gikraft.com> (дата звернення: 17.01.2025).
27. BURKERT Fluid Control Systems. Type 0330 — 2/2-Way Direct-Acting Solenoid Valve: Datasheet [Electronic resource]. – Ingelfingen: Bürkert, 2024. – Access mode: <https://www.burkert.com> (accessed: 20.01.2025).
28. Schneider Electric Industries SAS. HMIST6400 Harmony Series ST6 Operator Terminal: User Guide [Електронний ресурс]. – Rueil-Malmaison: Schneider Electric, 2024. – Режим доступу: <https://www.se.com> (дата звернення: 15.01.2025).
29. Системи промислового зволоження повітря «ВДОХ-НОВА» ультразвукового типу : технічний каталог продукції / ТОВ НВП «ВДОХНОВА». — Київ, 2022. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://storage.ua.prom.st/2250289_sistemi_zvolozhennya_vdoh_nova_vsi_modeli._2022.pdf (дата звернення: 17.06.2026).
30. Калорифер Вентс НК 200-3,4-1 круглий : технічні характеристики / Світ Вентиляції. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://mir-ventilacii.com.ua/ua/p98727914-kalorifer-vents-200.html> (дата звернення: 17.06.2026).

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Фрагмент програмного коду ПЛК (мова ST)

```
(* ===== *)
(* ПІД-регулятор концентрації озону KICK *)
(* Версія: 1.0 Мова: ST MEK 61131-3 *)
(* ===== *)

VAR
    C_set      : REAL := 15.0;    (* уставка, мг/м³ *)
    C_cur       : REAL;           (* поточне значення, мг/м³ *)
    e_cur       : REAL;           (* поточна похибка *)
    e_prev      : REAL;           (* попередня похибка *)
    e_prev2     : REAL;           (* позапопередня похибка *)
    u_out       : REAL;           (* вихід регулятора, 0..100 % *)
    Kp          : REAL := 6.10;
    Ti          : REAL := 75.0;
    Td          : REAL := 6.25;
    dt          : REAL := 1.0;    (* час дискретизації, с *)
    alarm       : BOOL := FALSE;
    dryer_ok    : BOOL;           (* стан осушувача DI 4-а *)
    YV1_open    : BOOL := FALSE; (* клапан YV1 5-а *)
    OZ_run      : BOOL := FALSE;  (* озонатор OZ *)
END_VAR

(* --- Перевірка стану осушувача та концентрації O₃ --- *)
dryer_ok := %IX0.0;    (* DI 4-а: TRUE=готовий, FALSE=аварія *)
C_cur := REAL(%IW0) * 20.0 / 32767.0; (* масштаб 0..20 мг/м³ *)

IF (NOT dryer_ok) OR (C_cur > 0.1) THEN
    alarm := TRUE;
    YV1_open := FALSE;    (* закрити клапан *)
    OZ_run := FALSE;      (* зупинити озонатор *)
    %QX0.2 := TRUE;       (* активувати НА 3-т *)
END_IF;

(* --- ПІД-регулятор (інкрементний метод) --- *)
IF NOT alarm THEN
    e_cur := C_set - C_cur;
    u_out := u_out
        + Kp * (e_cur - e_prev)
        + Kp * dt / Ti * e_cur
        + Kp * Td / dt * (e_cur - 2.0*e_prev + e_prev2);

    (* обмеження виходу 0..100 % *)
    IF u_out > 100.0 THEN u_out := 100.0; END_IF;
```

```

IF u_out < 0.0 THEN u_out := 0.0; END_IF;

e_prev2 := e_prev;
e_prev := e_cur;

(* дискретне керування клапаном і озонатором *)
YV1_open := (u_out > 0.0);
OZ_run := (u_out > 0.0);
%QX0.0 := YV1_open; (* DO: клапан YV1 5-а *)
%QX0.1 := OZ_run; (* DO: озонатор OZ *)
%QX0.2 := alarm; (* DO: сигналізація НА 3-г *)
END_IF;

```