

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 681.5:664.1:636.082.474

**ПОГОДЖЕНО**

Директор Інституту енергетики,  
автоматики і енергозбереження  
(назва Інституту)

В.В. Каплун

(підпис)

(ПШБ)

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

Завідувач кафедри автоматики  
та робототехнічних систем

ім. акад. Г.Г. Мартиненка  
(назва кафедри)

В.П. Лисенко

(підпис)

(ПШБ)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА**

**02.06.-КМР.176"С".2023.02.01.002.ПЗ**

на тему «**ДОСЛІДЖЕННЯ І ВДОСКОНАЛЕННЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВОЛОГІСТЮ ЗЕРНА В ШАХТНІЙ ЗЕРНОСУШАРЦІ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АРДУІНО**»

Спеціальність: 151– «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»  
(цифр і назва)

Магістерська програма: Комп'ютерно-інтегровані системи управління технологічними процесами у галузях АПК  
(назва)

Виконав

Косик В.А.

(підпис)

(ПШБ студента)

Керівник магістерської роботи

Болобог І.М., д.т.н., проф.

(підпис)

(ПШБ/науковий ступінь та вчене звання)

Рецензент

(підпис)

КИЇВ-2023

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри  
автоматики та робототехнічних  
систем ім. акад. І.І. Мартиненка

В.П. Лисенко

2023 р.

## ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ  
(бакалаврської, дипломної)

**Косенку Віталію Андрійовичу**

(прізвище ім'я по-батькові)

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

Магістерська програма: Комп'ютерно-інтегровані системи управління  
технологічними процесами у галузях АПК

Тема магістерської роботи «ДОСЛІДЖЕННЯ І ВДОСКОНАЛЕННЯ  
КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ  
ВОЛОГІСТЮ ЗЕРНА В ШАХТНІЙ ЗЕРНОСУШАРЦІ ІЗ  
ВИКОРИСТАННЯМ КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АРДУІНО»

затверджена наказом від

Термін подання студентом магістерської роботи 15.05.2023 року

**Вихідні дані до магістерської роботи:** завдання кафедри на виконання  
магістерської роботи; нормативні документи по проектуванню об'єктів  
автоматизації; матеріали дослідження та аналізу; наукова література з  
тематики магістерської роботи.

**Перелік питань, що підлягають дослідженню:**

1. Класифікація технологічних процесів сушіння та зберігання зерна в агропромисловому комплексі.
2. Дослідження об'єкта автоматизації.
3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань.
4. Розробка цифрової системи керування.
5. Розробка SCADA-системи.
6. Техніка безпеки та охорона праці.
7. Техніко-економічне обґрунтування.

**Дата видачі завдання**

**Керівник магістерської роботи**

(Підпис)

Болбот І.М.

(Прізвище та ініціали)

**Завдання прийняв до виконання**

(Підпис)

Косик В.А.

(Прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

# НУБІП України

Вступ .....	4
РОЗДІЛ 1. Класифікація технологічних процесів сушіння та зберігання зерна в агропромисловому комплексі .....	7
1.1. Основні положення управління процесами зберігання зерна .....	7
1.2. Способи та технологічні установки для сушіння зерна .....	11
1.3. Принципи роботи шахтних зерносушарок .....	13
РОЗДІЛ 2. Дослідження об'єкта автоматизації .....	16
2.1. Математична модель об'єкта за результатами теоретичних досліджень .....	16
2.2. Розроблення та дослідження імітаційної моделі об'єкта автоматизації із використанням програмних продуктів MATLAB .....	17
2.3. Вибір алгоритму керування об'єктом .....	27
РОЗДІЛ 3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань .....	30
3.1. Реалізація алгоритму керування .....	30
3.1.1. Вибір промислових пристроїв керування .....	31
3.1.2. Вибір первинного вимірювального перетворювача САК .....	33
3.1.3. Вибір виконавчого механізму САК .....	37
3.1.4. Вибір частотного перетворювача .....	41
РОЗДІЛ 4. Розробка цифрової системи керування .....	45
4.1. Вибір алгоритму управління та технічних засобів його реалізації .....	45
4.1.1. Визначення періоду квантування .....	45
4.1.2. Розрахунок цифрового регулятора .....	46
4.1.3. Технічна реалізація цифрового регулятора .....	49
4.2. Аналіз роботи САК та визначення показників якості керування .....	50
РОЗДІЛ 5. Розробка SCADA-системи .....	52
РОЗДІЛ 6. Техніка безпеки та охорона праці .....	61
Список використаної літератури .....	67

# НУБІП України

# НУБІП України

## ВСТУП

# НУБІП України

**Актуальність теми.** У багатьох галузях сільськогосподарського і

промислового виробництва доводиться стикатися з необхідністю зниження вологості різних виробів і матеріалів. Для сільського господарства,

переробної та харчової промисловості це пов'язано із загальним завданням підвищення свіжості сільськогосподарських продуктів, таких як зерно, фрукти та овочі, для чого в останні десятиліття було створено багато

технологій сушіння різних продуктів (зниження вмісту вологи в зернові та

олійні культури, вистоявання сушених овочів і фруктів до того моменту, коли цукри в них починають діяти як консерванти). Одночасно збільшується

використання цих технологій, формується суцільна промисловість і сільське господарство [1].

При використанні технології сушіння в будь-якому масштабі важливо реалізувати деякі техніко-економічні параметри, такі як мінімальна можлива енергоємність процесу, максимальна рівномірність сушіння та найкоротший час досягнення заданого рівня вологості. Ці параметри можуть бути забезпечені

шляхом вибору основного фізичного процесу, відповідної технології сушіння

та відповідного обладнання, придатного для конкретної ситуації дегідратації продукту, щоб можна було реалізувати вказаний процес [5].

Основне завдання сушіння зернових і олійних культур – знизити вологість продукту до такого значення, щоб його можна було безпечно

зберігати тривалий час, не боячись самонагрівання батареї. Проте сушіння –

це не просто спосіб зниження вологості зерна. При правильному виборі способу сушіння відбувається фізіологічне дозрівання зерна і поліпшується його якість.

При неправильному процесі сушіння, коли зерно нагрівається вище

допустимої температури, погіршується його якість, знижується схожість і енергія зерна, збільшується кількість тріщин у бобах і рисі, знижуються

хлібопекарські властивості отриманого при цьому борошна. Зерна зменшені.

Наприклад, після високотемпературної сушки кукурудза повністю втрачає схожість, але повністю зберігає свою кормову цінність. Погане відділення крохмалю в пересушеній кукурудзі. У процесі сушіння пшениці при високих температурах зерна «твердіють» і ускладнюють подрібнення.

Шкідники хлібного зерна - комахи, гризуни, птахи - переносять плісняви, бактерії, шкідливі домішки та патогенні мікроорганізми, які становлять велику загрозу для зерна. Цвіль добре розвивається в теплому вологому зерні. Коли комахи і цвіль знаходять сприятливе середовище і починають розмножуватися в зерні, вони самі виділяють тепло і вологу як побічні продукти свого харчування і дихання. Тепло і волога, що виділяються, підвищують вологість і температуру навколишнього зерна, збільшуючи площу псування зерна, яку часто називають «центром самонагрівання».

Токсини, що утворюються в процесі формування, зерна, пошкоджені шкідниками і цвіллю, забруднення і запах від шкідників зерна призводять до низької якості їх кормів, і тварини відмовляються їсти це зерно. Обробка та транспортування запліснявілого та пошкодженого зерна може негативно вплинути на безпеку праці та здоров'я працівників. Гриби можуть завдавати шкоди зерну як у полі, так і під час зберігання. Боротьба з мікотоксинами є глобальною проблемою, оскільки на мікотоксини припадає 25% втрат зерна [7].

У той час як зазначені вище фактори ризику зберігання зерна та вартість зернової сировини знизилися, ціни на енергоносії різко зросли, що призвело до подорожчання процесу сушіння. Іншими словами, зростає потреба в ретельному дотриманні технічних параметрів сушіння і при цьому економії енергоносіїв. Тому актуальним і своєчасним є дослідження питань енергетичного удосконалення технології сушіння зерна, підвищення ефективності використання електроенергії, перевірки доцільності параметрів і режимів роботи електрообладнання.

*Об'єктом дослідження* є процес сушіння зерна шляхом активного вентиляування атмосферним і гарячим повітрям.

**Предметом дослідження** є залежність енерговитрат від режиму роботи та параметрів електротермічного вентиляційного пристрою активного вентилявання зерна.

**Цілі та завдання дослідження.** Метою роботи є зниження енергетичних витрат на доведення зерна до вологого стану шляхом активного вентилявання та сушіння зерна атмосферним і нагрітим повітрям з використанням диференційованих режимів роботи електротехнічних пристроїв.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

- перспективні напрямки підвищення енергоефективності процесів сушіння зерна та режиму роботи опалювальних та вентиляційних установок;

- Демонстрація та оцінка енергетичної та технічної ефективності режимів роботи електровентиляційних установок, диференційованих за потужністю нагріву та повітропередачі;

- удосконалення математичної моделі процесу видалення вологи зерна у закріпленому шарі;

- Атестувати параметри електровентиляційного обладнання та режим його роботи.

**Метод дослідження** ґрунтується на основних положеннях теорії сушіння, теплообміну та масообміну з використанням комп'ютерних технологій математичного моделювання.

## РОЗДІЛ 1

КЛАСИФІКАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ ТА  
ЗБЕРІГАННЯ ЗЕРНА В АГРОПРОМІСЛОВОМУ КОМПЛЕКСІ

## 1.1. Основні положення управління процесами зберігання зерна

Сушіння — основна технічна операція по доведенню зерна і насіння до стійкого стану, необхідного для тривалого зберігання. Зерно ще існує і дихає під час зберігання, хоча всі його життєдіяльності зведені до мінімуму. Під час дихання відбуваються хімічні перетворення, які в кінцевому підсумку призводять до споживання крохмалю. Сушіння та охолодження зерна забезпечує мінімальні втрати при зберіганні.

При зниженні вологості зерна знижується інтенсивність дихання зернової маси, пригнічується життєдіяльність мікроорганізмів і вікідників зерна. Прискорюється процес післязбирального дозрівання та сушіння свіжозібраного зерна, збалансована якість зерна за вологістю та стиглістю.

Межа вологості, якої має досягати висушене зерно, дуже важлива для забезпечення його збереження. Маловологі післязбиральні стиглі зерна зберігають слабе дихання. За умов сталості температури чим вищий вміст води в зерновій масі, тим швидше зростає енергія дихання, і цей процес не є рівномірним. Це пояснюється наявністю в зерні вільної води.

Завдяки низькому вмісту вологи в зерні вода, яку воно вбирає, знаходиться у зв'язаному стані, вона міцно утримується білками та крохмалем. При підвищенні вологості зернової маси волога знаходиться в клітинах зерна, а крохмаль і білок утримують вологу мало або зовсім не зберігають її. Вільна вода легко проходить через різні частини зерна і використовується клітинами для процесу гідролізу. З появою вільної води різко зростає і активність ферментів, які беруть участь у диханні.

Вологість зерна називається критичною, при якій у клітинах з'являється вільна волога і спостерігається різке підвищення інтенсивності процесів дихання в зерні. Наприклад, для пивоварного ячменю критична вологість становить 14,5%, сушінню підлягають усі зерна з вологістю понад 14,5%.

Основними причинами збереження зерна є:

1. Висока вологість зерна. Повторне зволоження зерна може відбуватися в процесі міграції вологи внаслідок зміни температури в складі, протікання в складі через відкриті люки, зернопроводи або при просочуванні ґрунтових вод у нижні шари зерна на складі.

2. Висока температура зернової маси.

3. Велика кількість сторонніх предметів і дрібних домішок. До дрібних домішок відносяться подрібнене зерно і дрібні шматочки землі, насіння бур'янів, незернисті частини рослин (соломка, колоски та ін.). Дрібні та сторонні забруднювачі особливо небезпечні, коли концентруються в окремих складських приміщеннях.

4. Нерівномірний розподіл температури в баку.

5. Неналежне прибирання складу перед завантаженням зерна.

6. Низький рівень моніторингу та діагностики зберігання зерна.

Загалом фактори ризику при зберіганні зерна можна розділити на три групи: фізичні, біологічні та хімічні. До фізичної групи належать вологість і температура зерна, його фізико-механічні властивості, зернові та інші домішки.

Біологічні фактори — це комахи, пліснява, токсини та ін. До хімічної групи відносять техногенне забруднення, порушення технології вирощування, переробки та зберігання зерна.

Основними факторами псування зерна є цвіль і комахи. Цвіль добре розвивається в теплому і вологому зерні. Комахам також потрібна висока температура середовища. Оптимальне значення температури зерна становить 15...38°C, але комахи можуть розвиватися і в досить холодному зерні [3]. У будь-який час зберігання зерна в діапазоні температур 15...38°C і вологості, що перевищує оптимальну для безпечного зберігання, існує висока ймовірність



розвитку плісняви, комах і хвороб. Слід зазначити, що кукурудза найбільше хворіє під час самозигрівання.

Оскільки цвіль і комахи добре розвиваються приблизно в однакових умовах зовнішнього середовища зерна, запліснявіле зерно стає привабливим об'єктом для комах, і навпаки, зерно з комахами починає пліснявіти. Деякі види комах живляться цвільлю і є переносниками спор цвілі. З цих причин невеликі плями цвілі та комах можуть швидко перетворитися на великі зони підвищеної температури, що містять плісняві кірки та грудочки, які видають неприємний запах.

Вологість зерна, за якої можна запобігти розвитку плісняви та комах, залежить від його температури, тривалості передбачуваного періоду зберігання, сорту посівів та первинної якості зерна (табл. 1.1).

Таблиця 1.1.

Рекомендовані максимальні значення вологості зерна (%) основних культур для різних періодів зберігання і використанням аерації

Культура	Тривалість зберігання, місяців		
	до 6	від 6 до 12	більше 12
Пшениця	14	13	13
Ячмінь, овес	14	12	12
Жито	13	12	12
Гречка	16	13	13
Насіння льону	9	7	7
Ріпак	10	8	8
Просо	10	9	9
Сорго	13,5	13	13
Соя	13	12	11
Соняшник	10	9	9
Соняшник олійний	10	8	8
Кукурудза	15	14	13

Інтенсивність розвитку плісняви та комах залежить від поєднання температури та вологості зерна (рис. 1.1). Наприклад, зерно з підвищеною вологістю може зберігатися певний час, якщо зберігати його в прохолодному місці.

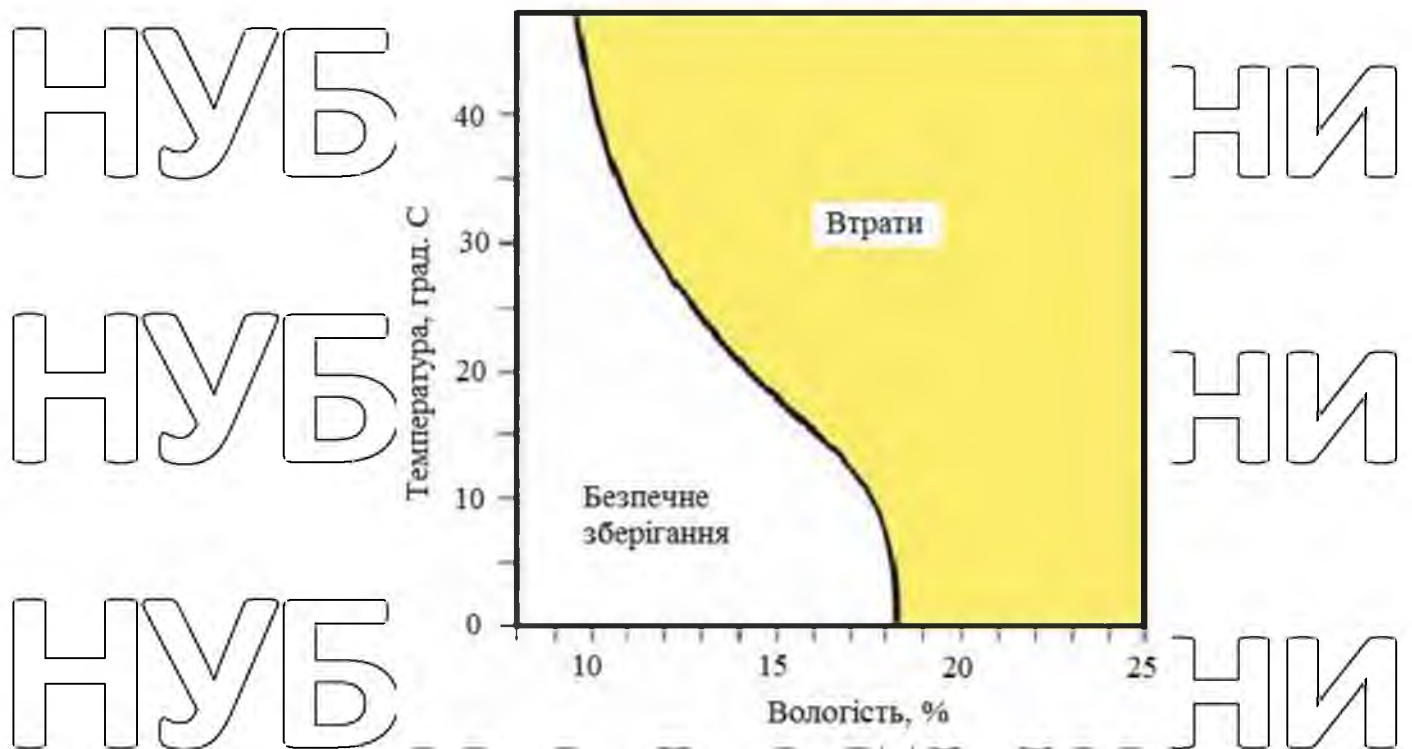


Рис. 1.1. Области безпечного зберігання і втрати якості зерна

Надзвичайно важливо розуміти рівні вологості зерна, рекомендовані для безпечного зберігання, як максимальну вологість зерна, а не як середнє значення загальної маси зерна. Якщо вологий стрижень зберігати поруч із сухим, частина вологи буде переходити з першого в другий, поки різниця вологи між стрижнями не становитиме 1-2%. Проте передача вологи від одного зерна до іншого — досить тривалий процес. Якщо в сховищі є вологі зерна, то їх зазвичай вносять у зернову масу пошарово або локальними осередками. Навіть якщо середня вологість зерна нижче безпечного рівня для зберігання, у клітинах з підвищеною вологістю може розвинутися цвіль.

## 1.2. Способи та технологічні установки для сушіння зерна

Основна волога в зерні тісно пов'язана з сухою речовиною, вона може бути випущена із зерна лише шляхом випаровування. Для подолання сили

зв'язку вологи з сухою речовиною і теплоти пароутворення необхідно витратити певну кількість енергії. Таке сушіння називають термічним.

За основною класифікаційною ознакою – способом підведення тепла – сушарки бувають: конвекційні (матеріал, що сушиться, омивається струменем попередньо підігрітого осушувача); кондуктивний або контактний (безпосередній контакт матеріалу, що висихає, з нагрітою поверхнею); сублімація (видалення вологи в замороженому стані під вакуумом); випромінювання (сушіння під впливом інфрачервоного випромінювання); Високочастотний (видалення вологи під дією електричного поля високої частоти) [3,4,7].

Конвекційні сушарки поділяються на низькотемпературні та високотемпературні сушильні установки.

Залежно від режиму роботи - безперервної та періодичної дії.

Залежно від стану зернового шару - з щільним нерухомим, рухомим, киплячим і зваженим шаром.

Залежно від типу нагріву адсорбента - з прямим і непрямим нагріванням. У сушарках прямого нагріву осушувачем є суміш атмосферного повітря і димових газів; До якості палива до таких сушарок пред'являються особливі вимоги. Для сушарок з непрямим нагріванням осушувачем є чисте атмосферне повітря, яке нагрівається в теплообміннику теплогенератора.

За принципом дії - прямоточні та протиточні (циркуляційні). У прямоточних сушарках зерно проходить через сушильну шахту один раз, можливе зниження його вологості залежить від обраного типу сушіння. Для прямоточних сушарок потрібні партії зерна з однаковою початковою вологістю, різниця у вологості окремих партій зерна не повинна перевищувати 2-3%. На відміну від сушарок безперервної дії, в циркуляційних сушарках частина зерна, що виходить із сушарки, змішується із сирим зерном і повертається в сушарку. Це дає можливість висушити зерно з початково високою вологістю до сухого стану, виключаючи зайві витрати на вантажно-розвантажувальні роботи. Крім того, не потрібно дозувати зерна за вологістю.

Залежно від конструктивних особливостей розрізняють зерносушарки для різних видів сировини, кліматичних умов, продуктивності: шахтні, барабанні, тунельні, модульні, колонні, конвеєрні, карусельні, мобільні та ін.

В Україні зерносушарки найбільш поширені на підприємствах хлібопекарської промисловості.

Стационарні сушарки безперервної дії є основним технічним засобом сушіння у великих господарствах на елеваторах, тому що: вони дають можливість регулювати поточне виробництво; забезпечують високу швидкість висихання; Виключити можливість холостого ходу сушарки через періодичне завантаження та вивантаження зерна.

Усі зерносушарки шахтного типу мають такі переваги: сушать будь-який сипучий урожай; забезпечити рівномірне висихання матеріалу; Більшість сучасних зерносушарок рециркулюють нагріте повітря в сушарку (рециркуляція холодоагенту), що дає можливість сушити дуже вологе зерно; мають «середні» інвестиційні витрати та низькі експлуатаційні витрати.

Блоки оснащені системами теплоізоляції та аспірації. Шахтні сушарки в мінімальній комплектації складаються з елементів, які дають можливість почати сушку відразу після установки механізмів.

Крім C3DI-16, DSP50 добре зарекомендували себе ґрунтоземні шахтні зерносушарки Law, Strahl (включаючи суббренди Mulmix і Kika), Ravaro, Buhler, Stela, Petkus, а також двозонні Satig і Scolari. Україна

### 1.3. Принцип роботи шахтних зерносушарок

Одним із найпоширеніших є такий спосіб сушіння зерна, при якому сушіння зерна здійснюється в щільному шарі самопливу з невеликим рухом. За таким принципом працюють шахтні сушарки з розташованими в шаховому порядку коробами введення і виведення. У таких зерносушарках зерно рухається зверху вниз, поєдновано проходячи через певну кількість живильних

і вихідних коробів теплоносія, які при надходженні з одного боку десиканту утворюють прямий або перехресний обдув рухомого потоку. зерно з шахти в живильну камеру, проходить зерновий пласт і виходить через вихідний ящик на протилежній стороні відведення. Десикант виконує одночасно роль теплоносія і вологи. Температура осушувача не повинна опускатися нижче зазначених меж, тому що при зниженні температури відносна вологість підвищується, а вологість – зменшується.

Ящик являє собою канал з відкритим дном, через який десикант надходить і виходить із зернового шару (рис. 1.2). Під нижньою відкритою стороною ящика зерно знаходиться під кутом природного укладу. Один кінець кожної коробки відкритий, інший закритий. Коробка приводу відкрита з боку входу осушувача і закрита з боку його виходу з шахти. Вихідна коробка, навпаки, закрита з боку входу і відкрита з боку виходу осушувача з шахти.

Ящик виготовлений з листової оцинкованої сталі товщиною 1,5...2 мм.

Шахтні прямоочні зерносушарки працюють у безперервному режимі. Зерно рухається в шахті як сумільна маса зі швидкістю, яка визначається роботою механізму періодичного або безперервного випуску. Необхідний рівень зерна в сушарці контролюється датчиками мінімального рівня LS(2) і

максимального рівня LS(1), встановленими в бункерах суперсушарки (рис. 1.3).

Датчики рівня контролюють роботу пристрою розвантаження партії: при досягненні мінімального рівня електродвигун вагона-розвантажувача M1 зупиняється, при досягненні максимального рівня і подачі сигналу керування електродвигун вагона-розвантажувача зупиняється. увімкнений. знову.

Сушильний агрегат складається з двох паралельно встановлених камер - шахт. Між ними знаходиться розподільна камера, яка горизонтальними перегородками розділена на три зони. Кожен із сегментів з'єднаний з відповідними каналами (рис. 1.4).

У дві верхні зони подається осушувач, а в нижню – охолоджене повітря. Це ділить кожен шахту на три зони. Дві верхні використовуються для нагрівання і сушіння, нижні – для охолодження. При цьому в першій зоні

сушіння видаляється поверхнева волога, температура регулюється за допомогою насадки термоблока. Капілярна волога випаровується у другій зоні сушіння, тут температура нижня, яка регулюється заслітками в каналі подачі.

Зернові бункери розташовані над шахтами. Шахти і бункери кріпляться до металевих швелерів, закріплених на фундаменті.

Вивідні пристрої розташовані в нижній частині сушильних відділень. Засувки шківового типу забезпечують рівномірне вивантаження зерна. У двох шахтах таких стволів 16, кожна з дверей періодично відкривається

електроприводом, який отримує команду від приладу керування. Казенна частина закривається поворотною пружиною. Під його вагою розташовані розвантажувальні воронки.

Температура десиканту є найважливішим параметром сушіння, вона тісно пов'язана з температурою нагрівання зерна. При високій температурі

може значно знижуватися схожість насінневого зерна, також руйнуються деякі види харчових білків зерна, погіршуються хлібопекарські властивості борошна.

Ступінь термічного ураження зерна залежить від вихідної якості вологи, температури і тривалості витримки в сушарці. При цьому необхідно чітко розрізнити допустимі температури нагрівання зерна і сушильної речовини

(повітря). Температура зерна безпосередньо в сушарці не вимірюється з прийнятною точністю через динаміку процесів сушіння, хоча датчики температури зерна розміщені в кількох зонах зерносушарки. Тому на практиці температуру осушувача вимірюють перед входом у яму та після виходу з неї.

При обґрунтуванні безпечних температур сушіння необхідно враховувати, що насіннева маса може містити зерна з різною термостійкістю. Безпечні температури для окремих частин насіння можуть перевищувати значення температури для менш термостійких частин зерна.

Оператори зерносушарок, у яких температура зерна не досягає температури десиканту, повинні дотримуватися рекомендацій виробника зерносушарки, з якою вони працюють. Наприклад, деякі виробники

рекомендують для шахтних зерносушарок свого виробництва значення температури, наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2.

Максимальні значення температур сушильного агента і зерна  
в шахтних зерносушарках

Культура	Кінцева вологість, %	Макс. темпер. повітря, °С	Макс. темпер. зерна, °С
Кормова пшениця, ячмінь, овес	15-16 15	125 85 при поч. волог. ≤ 20%	55-60 45
Насіння пшениці, ячменя, вівсу	15 15	75 при поч. волог. > 20% 85 при поч. волог. ≤ 20%	45 45
Ячмінь для пивоваріння	15 12 12	75 при поч. волог. > 20% 70 при поч. волог. ≤ 20% 65 при поч. волог. > 20%	45 45 45
Просо продовольче	15	90	45
Ріпак та гірчиця	7-9	80-85 залежно від моделі сушарки	50

## РОЗДІЛ 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

Для розробки системи автоматичного керування необхідно ретельно вивчити та проаналізувати динамічні властивості об'єкта керування (далі ОК).

Зерносушарка це такий ОК, характеризується великою кількістю вхідних і вихідних значень. На якість сушіння зерна впливає такий фактор, як температура сушильного агента.

**2.1. Математична модель об'єкта за результатами теоретичних досліджень**

Стабілізація температури осушувача здійснюється за рахунок витрати палива, що подається в повітрянагрівач, або за допомогою регулювання швидкості припливу повітря з навколишнього середовища. Враховуючи конструкцію шахтної зерносушарки, рекомендується вибрати другий спосіб використання відпрацьованого осушувача.

Повітрянагрівачі на рідкому або газоподібному паливі з камерою згоряння мають складний процес теплообміну, що відбувається в умовах рухомого і випромінюючого середовища у взаємному зв'язку окремих процесів (рух середовища, дифузія, горіння, зміна агрегатного стану), властивості та склад середовища тощо).

Через складність вихідної системи рівнянь, що описують всю сукупність процесів теплообміну, для визначення динамічних властивостей повітрянагрівачів можна використовувати спрощене рівняння тепломасового балансу. Аналітичний метод визначення динамічних характеристик дозволяє усереднити рушійні сили взаємодіючих середовищ і прийняти умову лінійності зміни параметрів процесу по всій довжині теплообмінника.

Для сільськогосподарських повітрянагрівачів динамічні характеристики є функціями температури теплоносія в часі, коли змінюється споживання палива або електроенергії.

До повітрянагрівачів прямого нагріву відносяться повітрянагрівачі, в яких теплоносії отримують шляхом змішування димових газів з повітрям.

Тепло, отримане від згоряння розпиленого палива, частково передається випромінюванням і конвекцією через стінки камери згоряння, а інша частина передається шляхом прямого змішування газів згоряння з потоком повітря. [1]

Теплопередача через стінки камери згоряння визначає інерційність об'єкта і його динамічні властивості. Тому завдання отримання динамічних властивостей об'єкта зводиться в основному до визначення кількості тепла, переданого через стінку і збереженого в ній під час перехідного режиму.



## 2.2. Розроблення та дослідження імітаційної моделі об'єкта автоматизації із використанням програмних продуктів MATLAB

Зерно має значну вологість. Для кращих умов зберігання і транспортування необхідно знизити вміст води в зерні.

За словами Сакун В.А. Сухими вважають зерна, якщо їх вологість менше 14%, середньої сухості 14 - 16%, вологими 16 - 17% і для зерна вівса і кукурудзи 16 - 18% і вологими, коли вологість перевищує 17% і для овес і зерна кукурудзи 18%.

Існує багато способів зниження води, але в цьому випадку воду із зерна слід видаляти випаровуванням, тобто висушуванням. Поширеним способом сушіння зерна в промислових зерносушарках є конвекційне сушіння, тобто. X. сушіння в потоці десиканта - нагрітого повітря і регулюється витяжним механізмом.

Процес сушіння полягає в підведенні тепла до зерна, що висушується, що призводить до випаровування води. Для видалення випарованої води, насиченої водою, що дифундує з поверхні зерна, використовують повітря або суміш продуктів згоряння повітря і палива.

З цієї причини сушіння є процесом дифузії, з одного боку, і термічним процесом, з іншого. Це складний технологічний процес, який змінює властивості зерна.

Процес сушіння зернових продуктів починається з випаровування води з поверхні зерна. Зі зменшенням води на поверхні починається дифузія води від центру зерна до його поверхні. Зі зменшенням вмісту води в процесі сушіння температура на поверхні і всередині поступово підвищується.

Коли середня вологість зерна досягне рівноважного значення, тобто стане рівною гігротермічній вологості навколишнього повітря, сушіння зерна закінчується. Температура зерна в цей момент наближається до температури сикативу - повітря.

У результаті вивчення процесу сушіння можна отримати набір кінетичних кривих. Крива кінетики сушіння — це зміна середньої вологості зерна в процесі сушіння. Крива кінетики нагрівання матеріалу — це зміна середньої температури зерна в процесі сушіння. [1]

Сушка ділиться на два етапи. На першому етапі відбувається видалення вологи, що можна розглядати як випаровування вологи з відкритої поверхні.

На другому етапі видалається зв'язана волога. Протягом цього часу тиск водяної пари на поверхні матеріалу стає функцією температури матеріалу та його об'єму на поверхні. За табличними даними отримано рівняння залежності тиску насиченої водяної пари від температури, мм. рт. ст.:

$$P_{нас} = 5.343124 + 0.027872 \cdot t + 0.032135 \cdot t^2 - 3.40325 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 + 7.719212 \cdot 10^{-6} \cdot t^4 \quad (2.1)$$

Це рівняння ми можемо використати для визначення вмісту вологи пароводяної суміші (кг водяної пари/кг сухого повітря):

$$dn = 0.622 \cdot \frac{\phi \cdot P_{нас}}{P_b - \phi \cdot P_{нас}} \quad (2.2)$$

де: 0,622 — відношення мольних мас водяної пари і повітря,  $\phi$  — це відносна вологість повітря,  $P_b$  — це загальний (барометричний) тиск парогазової суміші.

Процес сушіння зерна у статичному режимі в зображенні матеріальних і енергетичних балансів. Мат. модель сушіння у вигляді «чорного ящика» зображена на рис. 2.1.

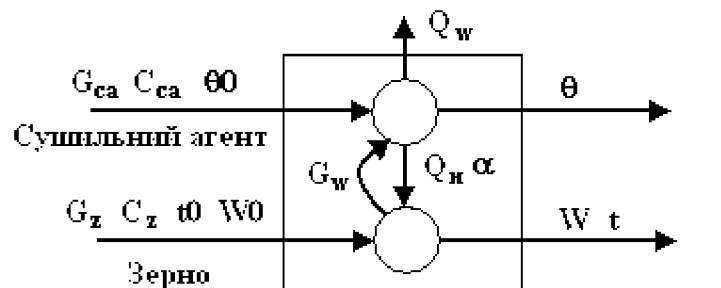


Рис. 2.1. Структурна схема процесу сушіння зерна

У структурній схемі процесу сушіння:  $G_{ca}$ ,  $G_z$  — витрати сикативу і зерна,  $C_{ca}$ ,  $C_z$  — теплоємність сухого повітря і зерна,  $t_0$  і  $\theta_0$  — початкові значення

температури зерна і сикативу,  $t$  і  $\theta$  – температури тих самих продуктів на виході із сушарки,  $W_0$  та  $W$  – початкова та кінцева вологість зерна,  $G_w$  – випарена вологість зерна,  $Q_H$  і  $Q_w$  – витрати тепла на нагрівання зерна та випаровування води,  $\alpha$  – теплопередача від повітря до зерна. Давайте наведемо рівняння енергетичного балансу для осушувача, гарячого повітря та зерна. Ми вважаємо, що тепло від нагрітого повітря використовується для нагрівання зерна та випаровування води:

$$\begin{aligned} G_{ca} \cdot C_{ca} - Q_w - Q_H - Q_{ca\text{вих}} &= 0 \\ G_z \cdot C_z + Q_H - Q_{z\text{вих}} &= 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Матеріальний баланс по зерну:

$$G_z - G_w - G_{z\text{вих}} = 0, \quad (2.4)$$

де:  $Q_{ca\text{вих}}$ ,  $Q_{z\text{вих}}$ ,  $G_{z\text{вих}}$  – витрати тепла зерна і сушильного агенту, а також маса зернової продукції на виході з сушарки.

Перший період займає невелику частину часу сушіння зерна, то ми звернемо увагу на сушіння основного другого періоду. В цей період зменшення вологості пов'язане з переміщенням води всередині матеріалу. Рушійною силою цього періоду сушіння є різниця між вологовмістом зерна  $W$  і рівноважним вологовмістом  $W_p$ . Швидкість сушіння тоді матиме наступний вигляд:

$$-\frac{dW}{d\tau} = K(W - W_p) \quad (2.5)$$

де  $K$  – коефіцієнт сушіння, який характеризує процес вологообміну.

Коефіцієнт  $K$  знаходиться експериментально. Якщо на другому етапі швидкість сушіння представити прямою, то коефіцієнт сушіння буде розраховуватися так:

$$K = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{\frac{1}{\beta} + \frac{4 \cdot R}{\pi^2 a_m}} \quad (2.6)$$

де:  $R$  – визначальний геометричний розмір тіла (зерна), що висушується, м;  $\beta$  – коефіцієнт зовнішнього вологообміну, м/с;  $a_m$  – коефіцієнт провідності масопередачі, м<sup>2</sup>/с.

Коефіцієнт масопередачі подібний до теплопровідності і в основному залежить від форми зв'язку води з матеріалом і температури матеріалу і визначає внутрішній транспорт води.

Вважаємо, що процес нагрівання частинок (зерен) матеріалу є безградієнтним, об'єм води рівномірний і відсутні втрати в навколишнє середовище. Створимо рівняння теплового балансу, щоб визначити залежність між швидкостями нагрівання та сушіння. Для періодичного процесу сушіння це рівняння, де температура та вміст води змінюються з часом:

$$\frac{d\bar{\theta}}{d\tau} G'c - \frac{d\bar{W}}{d\tau} rG'_0 = \alpha \cdot F(t - \bar{\theta}) \quad (2.7)$$

Для безперервного процесу вологовміст і температура зерна змінюється за довжиною сушарки:

$$\frac{d\bar{\theta}}{dx} G \cdot c - \frac{d\bar{W}}{dx} rG_0 = \alpha \cdot F(t - \bar{\theta}) \quad (2.8)$$

де  $\bar{\theta}$  – середня температура зерна;  $\bar{W}$  – середній вологовміст зерна;  $c$  – це питома теплоємність зерна;  $r$  – це теплота пароутворення;  $t$  – це температура сушильного агента;  $G$  і  $G_0$  – це витрати вологого і сухого зерна;  $\alpha$  – це коефіцієнт теплообміну;  $F$  – це площа поверхні матеріалу;  $\tau$  – це час;  $x$  – це координата (у напрямку руху зерна).

Розглянемо процес сушіння в зерно-сушарці безперервної дії. Математична модель сушарки спрощена і не враховує першу стадію сушіння, стадію нагрівання зерна. Коефіцієнт теплопередачі від сикативу до зерна також вважається сталою величиною. Значення змінних у рівняннях для визначення коефіцієнта сушіння  $K$  та рівноважної вологості  $W_p$  використовували за

даними вчених, які досліджували процес сушіння зерна, наприклад Єсакова В.Ю.

Таким чином, рівняння рівноважної вологоємності в частках вмісту сухої речовини має вигляд:

$$W_p = 0,01 \cdot \left[ \frac{|\ln(1 - \varphi)|}{5,47 \cdot 10^{-6} \cdot (t + 273)} \right]^{0,435} \quad (2.9)$$

Значення відносної вологості повітря знаходимо з рівняння:

$$\varphi = \frac{(P_b - P_{нас}) \cdot dn}{0,0622 \cdot P_{нас}} \quad (2.10)$$

Коефіцієнт сушіння, 1/с, знаходимо з рівняння:

$$K = \frac{5,55 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 0,00796 \cdot t}{3600} \quad (2.11)$$

Перетворимо статичне рівняння процесу сушіння в динамічне і створимо систему диференціальних рівнянь для температури зерна, сикативу (повітря) в градусах С і вологості зерна в частках. Наведемо рівняння:

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{G_z \cdot \sigma \cdot \alpha}{G_{ca} \cdot C_{ca}} \cdot (\theta - t), \quad (2.12)$$

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{\sigma \cdot \alpha}{C_{ca}} \cdot (t - \theta) + \frac{r \cdot 10^{-2}}{C_z \cdot (1 + 0,2\%)} \cdot \frac{d0,2\%}{d}; \quad (2.13)$$

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{2,47 \cdot 47 \cdot 10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{град)}}{1050 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{град)}} \cdot (68^\circ \text{С}) + \frac{25000 \text{ Дж/кг}}{16,7 \text{ кг/с} \cdot (1 + 0,2\%)} \cdot \frac{d0,2\%}{d0,52 \text{ с}}$$

$$\frac{dW}{d\tau} = -K \cdot (W - W_p), \quad (2.14)$$

де  $\sigma$  – це питома поверхня зерна  $\text{м}^2/\text{кг}$ ;  $\alpha$  – це коефіцієнт теплообміну від повітря до зерна,  $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{град}$ ;  $r$  – це теплота пароутворення,  $\text{Дж/кг}$ .

Вихідними даними математичної моделі сушіння зерна є: витрата зерна на сушіння  $G_z = 16,7$  кг/с або 60 т/год, температура зерна  $\theta = 15$  град.С, його теплоємність  $C_z = 3000$  Дж/(кг град.) і початкова вологість  $W_0 = 0,25$ . Гаряче повітря осушувача подається в кількості  $G_{ca} = 25$  кг/с з температурою  $\theta_0 = 95$  градусів С і теплоємністю  $C_{sa} = 1050$  Дж/(кг градусів). Прийнято питома поверхня зерна  $\sigma = 2,47$  м<sup>2</sup>/кг, вологість пароводяної суміші в сушарні  $d_n = 0,012$  кг пари/кг сухого повітря, теплота пароутворення  $r = 2500 \cdot 10^3$  Дж/кг, барометричний тиск  $P_b = 750$  мм рт.ст., коефіцієнт тепловіддачі від повітря до зерна  $\alpha = 10$  Вт/(м<sup>2</sup> град.). [1]

Розробимо модель в середовищі Simulink MATLAB. Оскільки модель досить громіздка, розділимо її на дві частини. В основній частині (рис. 2.2.) складаємо рівняння, які являють собою систему диференціальних рівнянь і розраховуємо температуру зерна, температуру повітря та вологість зерна.

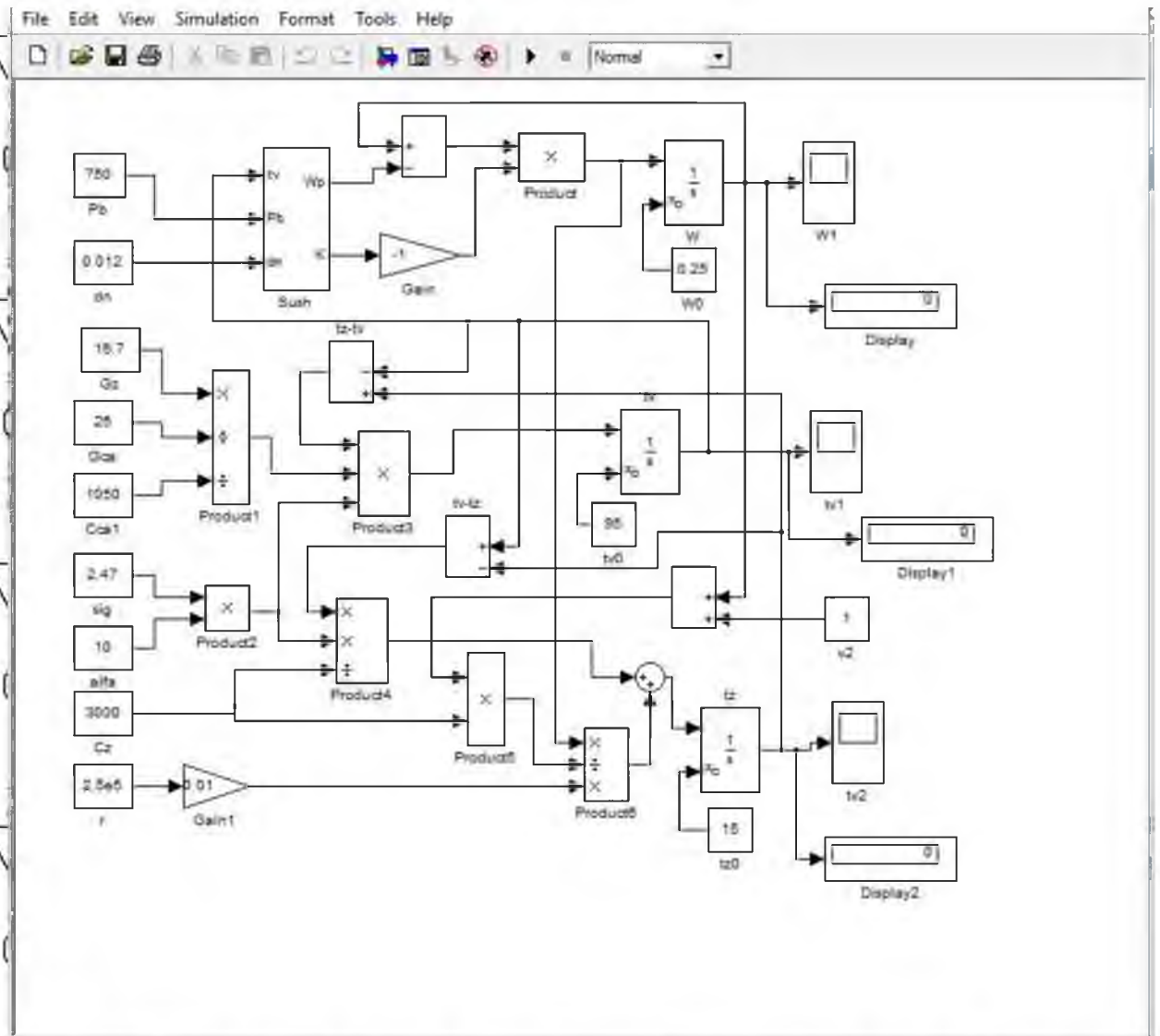


Рис. 2.2 Імітаційна модель зерносушарки в середовищі Matlab Simulink

Створимо підсистему допоміжних рівнянь, які обчислюють тиск насиченої водяної пари, відносну вологість, рівноважний вміст вологи та коефіцієнт висихання (рис. 2.3).

НУБІП України

НУБІП України

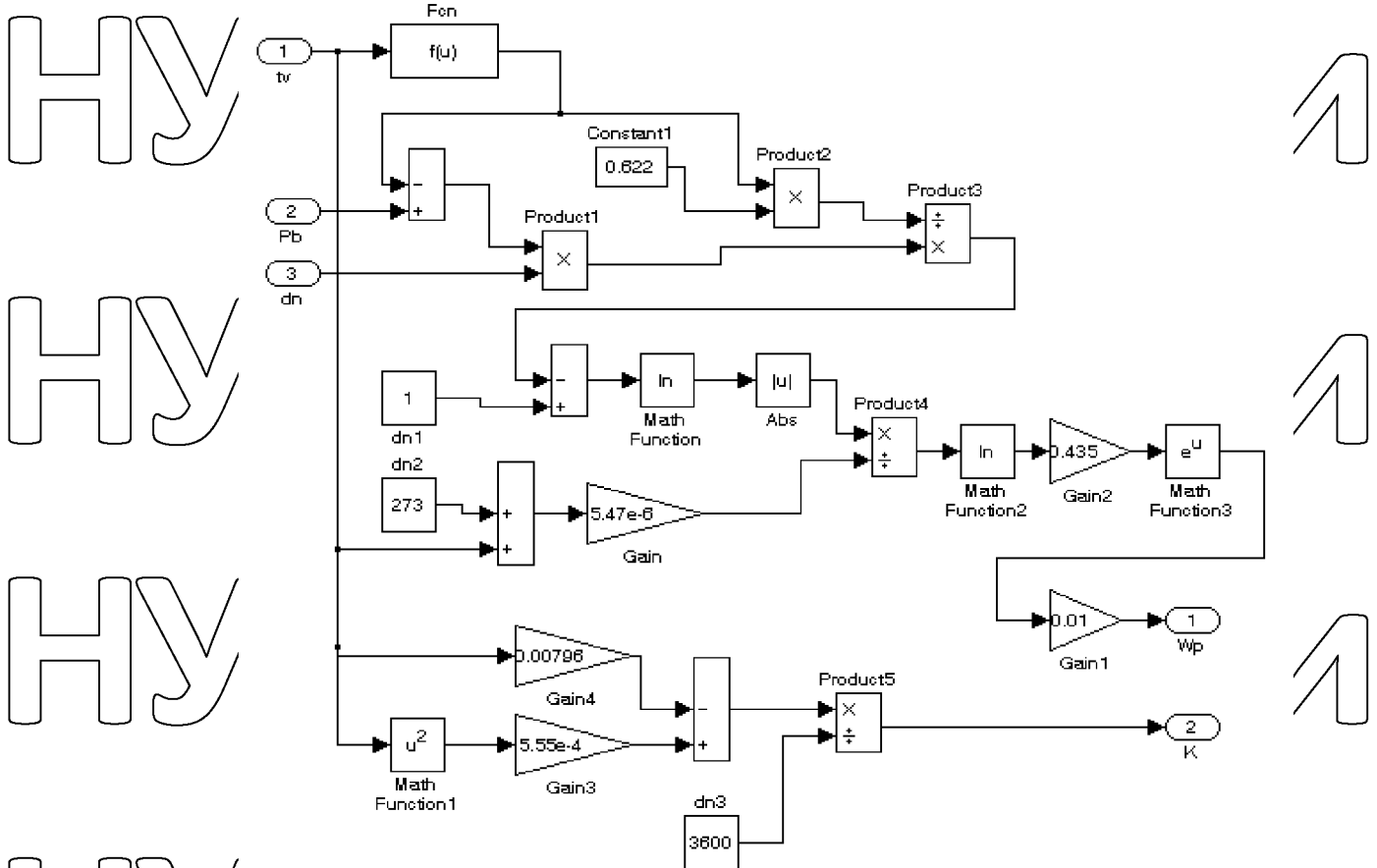


Рис. 2.3 Імітаційна модель підсистеми моделі сушарки в середовищі Matlab Simulink

Підсистема створюється шляхом вибору частини моделі та використання пункту меню **Edit**  $\Rightarrow$  **Create Subsystem**. Позначимо входи та виходи підсистеми позначеннями змінних моделі. Щоб ввести поліном, який обчислює тиск насиченої пари, ми використовуємо блок **Fcn** із бібліотеки **Functions & Tables**. Вхідні дані вводяться за допомогою **Constant** блоків, а результати, значення температури зерна повітря та вологості зерна, відображаються на віртуальному осцилографі **Scope**. Давайте встановимо час сушіння (моделювання) на 1500 секунд. Для цього введіть кількість секунд у параметрах моделювання **Simulation**  $\rightarrow$  **Simulation Parameters** у вікні **Stop time**.

У результаті виконаної операції отримуємо криві прискорення температур зерна (рис. 2.4) і сикативу під час сушіння (рис. 2.5), а також криву зміни вологості зерна (рис. 2.6).



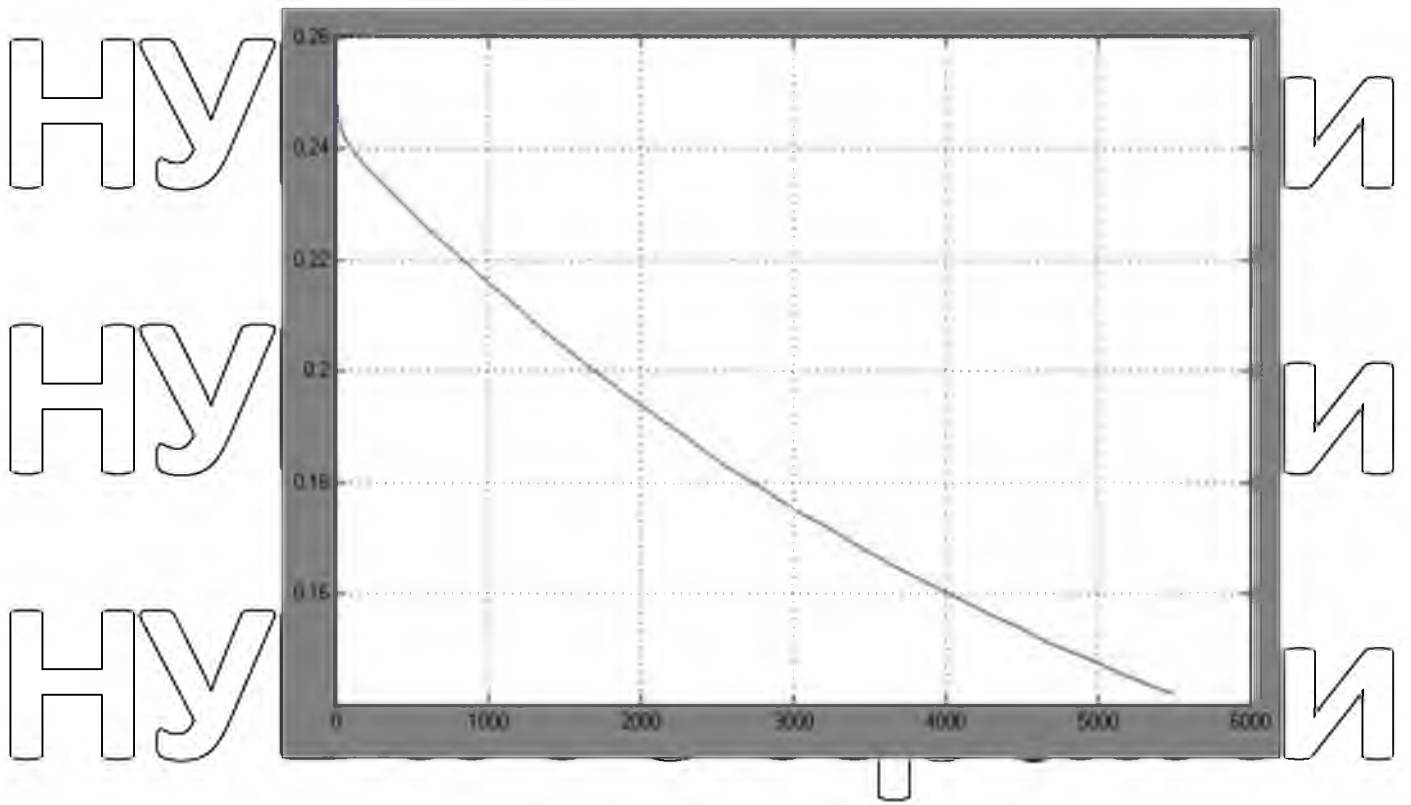


Рис. 2.6. Зміна вологості зерна під час сушіння

Знайдемо передаточну функцію ОК

Для цього потрібно визначити постійну часу  $T$  з графіка (рис 2.7)

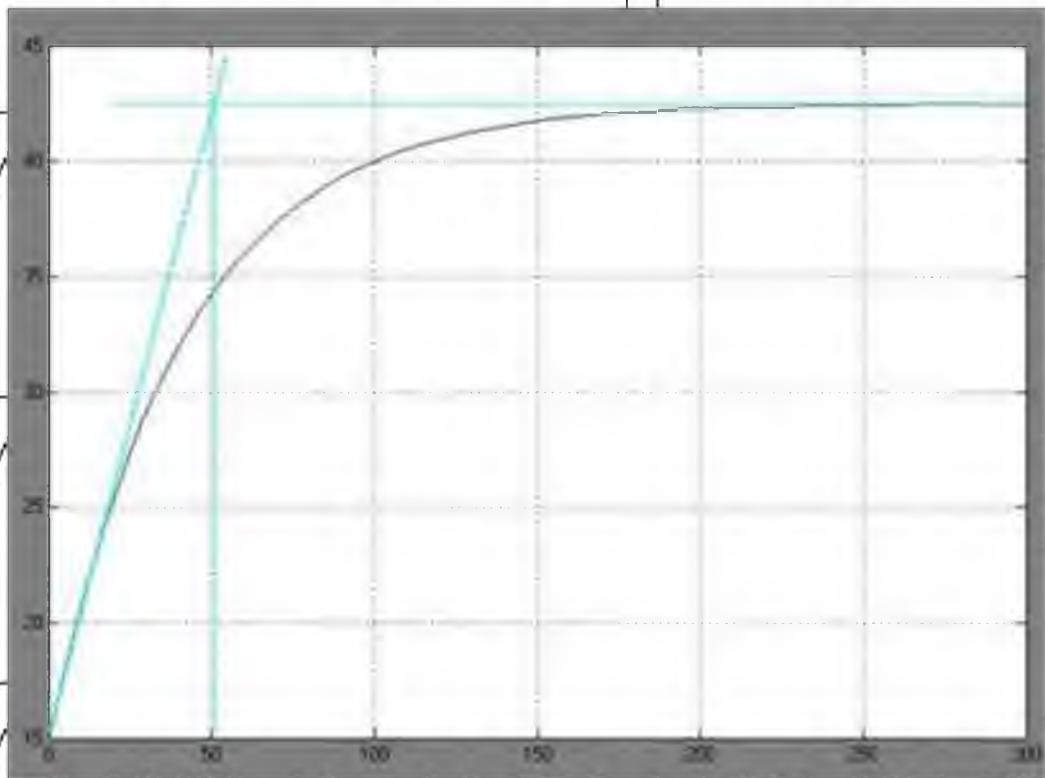


Рис 2.7. Розгінна характеристики ОК

З графіка видно, що постійна часу  $T_{об} = 51c$

Час запізнення для каналу регулювання складає, с:

$$\tau_3 = \frac{V_{труб}}{V_{с.а.}} \quad (2.15)$$

Де  $V_{труб}$ , м<sup>3</sup> – об'єм трубопроводу, по якому надходить сушильний агент,  
 $V_{с.а.}$ , м<sup>3</sup>/с – об'єм сушильного агента.

$$V_{труб} = \pi R^2 L = S * L \quad (2.16)$$

де R- радіус трубопроводу, L – довжина трубопроводу.

$$V_{труб} = 1 \cdot 10 = 10 \text{ м}^3 \quad (2.17)$$

$$V_{с.а.} = \frac{G_{с.а.}}{\rho} \quad (2.18)$$

де  $\rho$  – густина гарячого повітря при температурі 90 °С.

$$V_{с.а.} = 25 / 1.293 = 19.33 \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.19)$$

Тоді час запізнення:

$$\tau_3 = \frac{10}{19.33} = 0.52 \text{ с} \quad (2.20)$$

Коефіцієнт передачі

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (2.21)$$

де  $\Delta x$  - зміна кількості осушувача,  $\Delta y$  – зміна температури, до якої потрібно нагрівати зернові продукти.

$$\Delta y = y_1 - y_2 \quad (2.22)$$

$$\Delta x = x_1 - x_2 \quad (2.23)$$

де  $y_1$  – температура нагрітого зерна при початковій температурі 15 оС і кількості десиканту  $x_1 = 25$  кг/с,  $y_2$  – температура нагрітого зерна при початковій температурі 15 °С і кількості десиканту  $x_1 = 20$  кг/с.

$$K = \frac{42,27 - 38,53}{25 - 20} = 0,75^{\circ}\text{C} \cdot \text{с}/\text{кг}, \quad (2.24)$$

Тепер передатна функція об'єкта:

$$W(p) = \frac{0,75}{51p + 1} e^{-0,52p}, \quad (2.25)$$

### 2.3. Вибір алгоритму керування об'єктом

Динамічні властивості ОК дають змогу визначити алгоритм керування на етапі проектування. Для цього зробимо аналіз залежності між постійною часу та часом затримки ОК. Залежність вибору закону регулювання наведені в таблиці 2.1

Таблиця 2.1

Залежності вибору закону

Закон керування	Позиційний	Лінійний	Імпульсний
$\tau/T$	$< 0,2$	$0,2 < \tau/T < 1$	$> 1$

Після проведених розрахунків ми отримали таке співвідношення

$$\frac{\tau}{T} = \frac{0,52}{51} = 0,01 < 0,2 \quad (2.26)$$

На підставі даних, наведених у таблиці №1, можна вибрати закон керування положенням. Але (оскільки алгоритм позиційного регулювання характеризується значною амплітудою власних коливань, особливо для такого інерційного об'єкта, як сушарка, де регулювання температури вимагає високої точності, високої швидкості регулювання та відсутності перерегулювання, доцільно вибрати лінійний закон регулювання.

Визначаємо динамічний коригуючий коефіцієнт  $R_d$ .

Оскільки об'єкт керування є статичним, а перехідний процес аперіодичним, то значення динамічного коефіцієнта розраховується за формулою (2.27).

$$R_d = \frac{y_1}{K_0 * y_{max}} \quad (2.27)$$

де  $y_1$  – це максимальне динамічне відхилення;  $K_0$  – це коефіцієнт передачі ОК;  
 $y_{max}$  – максимально можливе значення збурення по навантаженню (беремо у відсотках переміщення регульовального органу).

$$R_d = \frac{0,75}{5,5} = 0,03 \quad (2.28)$$

Далі отримуємо алгоритм керування на основі графічних залежностей (рис. 2.8). За діаграмою прискорювальної характеристики виділимо залежність динамічного коефіцієнта керування від динамічних властивостей об'єкта керування для типового перехідного процесу.

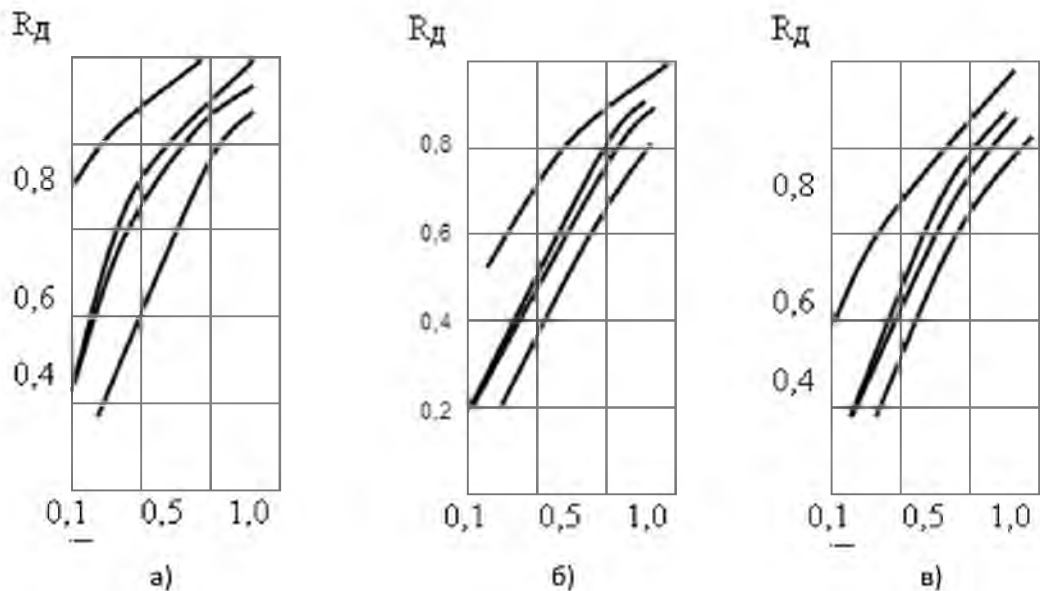


Рис. 2.8. Залежність динамічного коефіцієнта регулювання від динамічних властивостей об'єкта керування:

а – для типового аперіодичного перехідного процесу; б – для коефіцієнта передачі об'єкта типового перехідного процесу з перерегулюванням на 20%; в – для типового перехідного процесу з мінімальним інтегральним показником якості; 1-П алгоритм керування, 2-І алгоритм керування; 3-ПІ алгоритм керування; 4 Алгоритм ПІД-регулювання.

Відносний час регулювання

Алгоритм керування	Об'єкт	Відносний час регулювання		
		Аперіодичний	Із 20%-вим перерегулюванням	Із мінімальним інтегральним критерієм
Пропорційний	Статичний	4,5	6,5	9,0
	Астатичний	6,0	8,0	–
Пропорційно-інтегральний	Статичний	8,0	12,0	16,0
	Астатичний	14,0	16,0	18,0
Пропорційно-інтегрально-диференційний	Статичний	5,5	7,0	10,0
	Астатичний	9,0	12,0	13,0

За графіком кривої прискорення виділимо залежність динамічного коефіцієнта керування від динамічних властивостей об'єкта керування для типового перехідного процесу з 20% перерегулюванням.

Ми перевіряємо, чи забезпечує цей алгоритм керування заданий час відгуку, визначаючи  $\psi$  з даних, наведених у таблиці 2

$$t = \psi \tau = 5,5 * 0,52 = 2,86 \text{ с.} \quad (2.29)$$

де  $\psi$  – це відносний час регулювання, який дорівнює 5,5 для ПІД алгоритму керування.

З розрахунків ми бачимо, що вибраний алгоритм керування здатний дати нам заданий час регулювання, так як виконується умова  $t < T_{ок}$ , тобто  $2,86 < 51$  с.

## РОЗДІЛ 3

ВИБІР РЕГУЛЯТОРА ТА ОБРУНТУВАННЯ  
ПАРАМЕТРІВ ЙОГО НАЛАШТУВАНЬ

## 3.1. Реалізація алгоритму керування

Відповідно до функціональної схеми автоматизації система управління складається з:

- програмне логічне керування (ПЛК), яке отримує інформацію про температуру та висоту зерна від датчиків температури в трьох зонах сушарки та від датчиків температури зерна (верхнього та нижнього рівня) та формує керуючі сигнали для перетворювача частоти та регулятора потужності;

- Модуль розширення аналогового входу для підключення аналогових датчиків температури до ПЛК;

- частотний перетворювач, який за алгоритмом PID безпосередньо керує частотою обертання вала електродвигуна, що приводить в рух відцентровий вентилятор, і змінює потік повітря;

- Електродвигуни для приводу зернових транспортерів, електродвигуни для приводу повітряних клапанів.

### 3.1.1. Вибір промислових пристроїв керування

Для нашого проекту ми вибрали обладнання щоб керувати технологічним обладнанням, це програмний логічний контролер **Arduino Mega 2560 Rev3**

(рис. 3.1).



Рис. 3.1. Програмний логічний контролер **Arduino Mega 2560 Rev3**

Arduino Mega 2560 Rev3 – відкритий мікроконтролерний пристрій, який широко використовується для розробки різних електронних пристроїв і проектів. Це один із найпотужніших і розширюваних пристроїв серії Arduino, який має більше контактів і функцій, ніж більшість інших пристроїв Arduino.

Arduino Mega 2560 Rev3 має 54 цифрових входи/виходи, 16 аналогових входів і 4 порти UART для зв'язку з іншими пристроями. Він також має 256 кілобайт флеш-пам'яті для зберігання програмного коду та 8 кілобайт оперативної пам'яті для зберігання даних. Крім того, його можна

розширювати за допомогою різних модулів і доповнень, що дозволяє створювати більш складні та функціональні пристрої.

Основні технічні характеристики ПЛК Arduino Mega 2560 Rev3

наведені в таблиці 3.1.

НУБІП Україна

НУБІП Україна

НУБІП Україна

НУБІП Україна

НУБІП Україна

НУБІП Україна

НУБІП Україна



Таблиця 3.1.

## Технічні характеристики Arduino Mega 2560 Rev3

Напруга живлення	7-12 В постійного струму
Допустимі межі напруги живлення	6-20 В
Кількість дискретних входів/виходів	54
Аналогові входи	16
Пам'ять	Вбудована 256 кБ
Напруга живлення датчиків	1,2...3,0 В
Струм дискретного входу	40 мА
Струм дискретних виходів	3,3 В 50 мА
Швидкість передачі даних	UART (серійний порт): швидкість передачі даних може становити до 115200 біт на секунду. I2C (TWI): швидкість передачі даних становить до 400 кілобіт на секунду. SPI: швидкість передачі даних може бути до 50 мегабіт на секунду.
Робоча температура навк. середовища	-10...+55°C

### 3.1.2. Вибір первинного вимірювального перетворювача САК

До основного передавача (ПВІТ) висувуються такі вимоги:

- Лінійність і чіткість статичної характеристики (допустима нелінійність не повинна перевищувати 0,1...3,0%);

- висока чутливість;

- стабільність властивостей у часі;

- швидкість дії;

- стійкість до хімічних впливів контролюючого та навколишнього

середовища (первинний перетворювач у захисному корпусі);

- мінімальний негативний вплив на контрольні параметри та простота монтажу та обслуговування.

Передавач, що міститься в контролері, вибирається в два етапи:

- на першому етапі визначається тип перетворювача на основі типу контролюваного параметра об'єкта керування та умов його роботи;

- На другому етапі, підбравши всі елементи регулятора за каталогами, знайти його типорозмір.

Рекомендується підбирати ПВП таким чином, щоб межі його вимірювання охоплювали діапазон змін контролюваної ним величини і були максимально наближені до нього, не забуваючи про необхідну

перевантажувальну здатність ПВП і можливість підключення до обраного електронного блоку керування регулятора. Особливу увагу слід звернути на швидкість (інерційність) ПВП, яка характеризується її постійною часу.

Беручи до уваги вимоги до діапазону вимірювання та інерційності, а також особливості підключення датчиків температури до ПЛК, було обрано термоперетворювач опору загальнопромислового зразка TSMU-2212-50M, технічні характеристики якого наведені в Таблиця 3.2.

Таблиця 3.2.

Основні технічні характеристики термоперетворювача опору TSMU-2212

Діапазон вимірюваних температур, °C	-25...+50
Номинальна статична характеристика (НСХ)	50M
Клас допуску	B
Показник теплової інерції, с	8 (при Ø гільзи 6мм)
Ступінь захисту від пилу та вологи	IP55
Матеріал захисної арматури	Ст. 12X18H10T
Діапазон умовного тиску, МПа	0,4...4,0
Стійкість до вібрації	Група виж. N3
Кліматичне виконання	УЗ

Теплопередавачі з рівномірним вихідним сигналом типу TSMU використовуються для безперервного перетворення температури навколишнього середовища (газів, парів, рідин і сипучих матеріалів) в пропорційний струмовий сигнал 0-5 або 4-20 мА протягом тривалого часу.

передача на відстань. Датчик складається з вбудованого в головку передавача з вихідним сигналом 0-5 або 4-20 мА і термодатчика (рис. 3.3).

Вимірювана змінна температура лінійно перетворюється термочутливим елементом у пропорційну зміну омичного опору, який, у свою чергу, перетворюється в вихідний струмовий сигнал передавача.

Термоперетворювач ТСМУ-2212 відповідає вимогам ДСТУ 2858-94.



Рис. 3.3. Термоперетворювач опору з уніфікованим вихідним сигналом ТСМУ-2212

Датчик із роз'ємом	Коло	Конт.	а	б
	-Uп	4		
+Uп	1			

Датчик із штуцером	Коло	Конт.	а	б
	-Uп	-Uп		
+Uп	+Uп			

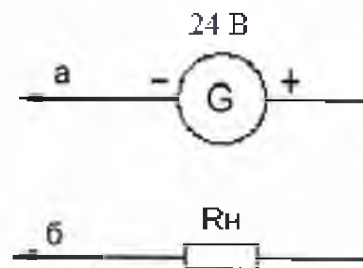


Рис. 3.4. Схема зовнішніх з'єднань датчиків типу ТСМУ із вихідним сигналом 4-20 мА

Для отримання передатної функції ПВН скористаємось його номінальною статичною характеристикою (рис. 3.5)

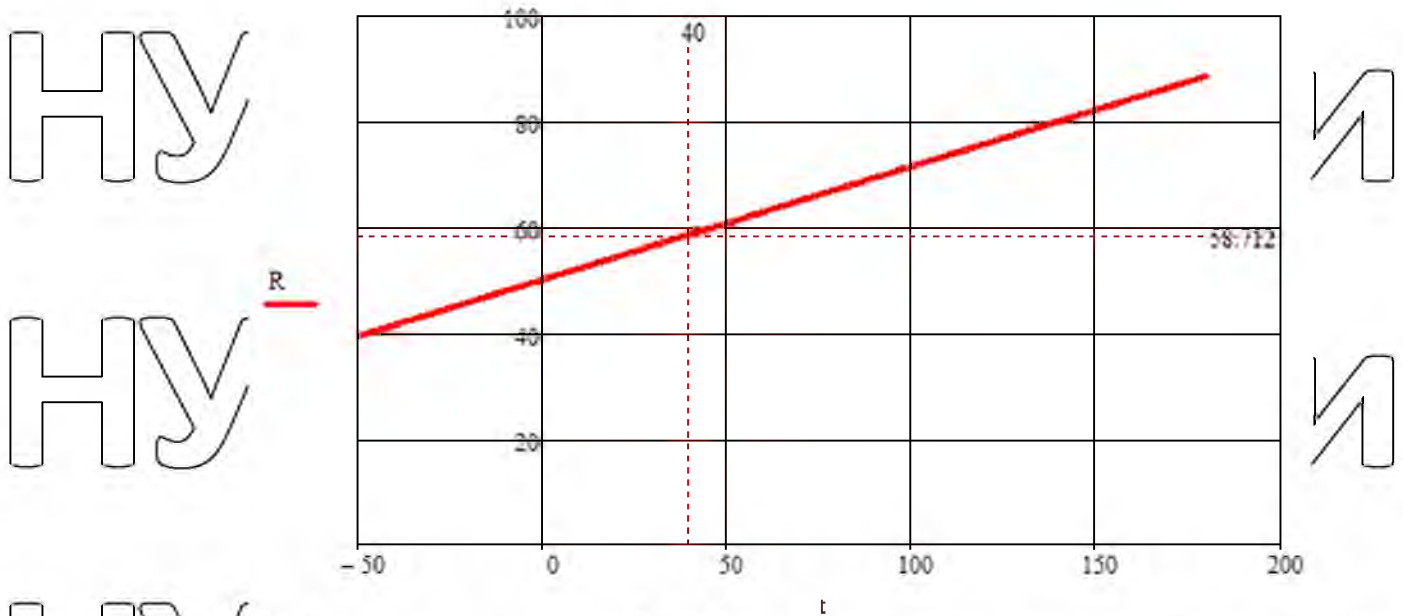


Рис. 3.5. Номінальна статична характеристика термоперетворювача опору ТСМУ-2212 (50М)

За динамічними властивостями теплоперетворювач є інерційною

ланкою, передайна функція якого виглядає так:  $W_{пвп}(s) = \frac{k_{пвп}}{T_{пвп} \cdot s + 1}$

Коефіцієнт передачі  $k_{пвп}$  (чутливість), визначається за формулою

$$k_{пвп} = \frac{\Delta I}{\Delta T} = \frac{20 - 4}{50 - (-25)} = 0,217 \frac{mA}{^{\circ}C}, \quad (3.1)$$

де  $\Delta T$  – це різниця значень вимірюваних датчиком температур,  $^{\circ}C$  (таблиця 3.2);

$\Delta I$  – це різниця струмів, що дорівнює значенням температур в робочому діапазоні, mA.

Беручи до уваги, що показник теплової інерції сприймаючого елемента складає  $T_{пвп} = 8$  с (таблиця 3.2), передайна функція датчика ТСМУ-2212

$$W_{пвп}(s) = \frac{k_{пвп}}{T_{пвп} \cdot s + 1} = \frac{0,217}{8 \cdot s + 1}$$

### 3.1.3. Вибір виконавчого механізму САК

Для вибору типу і розміру вентилятора при активному провітрюванні необхідно знати розрахункові значення повітрообміну, необхідного для видалення надлишкової вологи з шару зерна, і температуру, а також загальний тиск.

Вентилятор повинен забезпечувати потік повітря  $400 \frac{m^3}{год}$  з поступовим зниженням до  $100 \frac{m^3}{год}$ . Враховуючи, що в повністю завантажену сушарку міститься 40 тонн зерна пшениці, отримуємо, що вентилятор має

подачу повітря в діапазоні від  $4000 \frac{m^3}{год}$  (при витраті повітря  $100 \frac{m^3}{год}$ ) до  $16000 \frac{m^3}{год}$  (при витраті повітря  $400 \frac{m^3}{год}$ ).

Крім того, необхідно враховувати, що повітродувка повинна забезпечувати необхідний тиск для проходження повітря через щільний шар зернової маси. Відомо, що радіальні вентилятори (відцентрові вентилятори) можуть створювати значно більший статичний тиск (до  $2000-2500$  Па), ніж осьові ( $30-300$  Па).

Враховуючи вищевикладене, для використання в даній системі керування було обрано відцентровий (радіальний) вентилятор В-Ц4-70-8 (рис. 3.6), призначений для роботи в стаціонарних системах вентиляції, особливо зернових.





Рис. 3.6. Зовнішній вигляд вентилятора В-Ц4-70-8

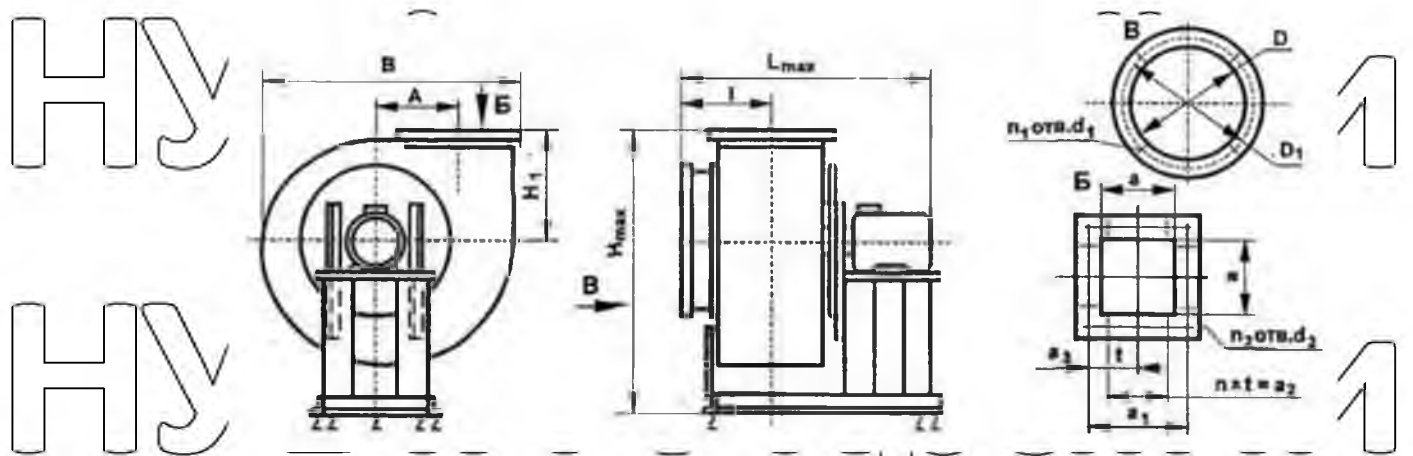


Рис. 3.7. Монтажне виконання вентилятора В-Ц4-70-8

НУБІП України Таблиця 3-3.  
Габаритні та монтажні розміри вентиляторів типу В-Ц4-70

№ вент.	A	a	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	B	D	D <sub>1</sub>	H <sub>max</sub>	H <sub>1</sub>	L <sub>max</sub>	l	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	n	n <sub>1</sub>	n <sub>2</sub>	t
2,5	162,5	175	205	100	52,5	480	253	280	508	197	475	152,5	7	7x10	1	8	8	100
3,15	208	224	255	200	27,5	602	323	345	623	240	541	177	7	7x10	2	8	12	100
4	260	280	310	200	55	742	403	430	762	291	648	205,5	7	7x10	2	8	12	100
5	324	353	380	300	40	915	510	530	988	346	760	255	7x14	7	3	16	16	100
6,3	410	445	470	400	35	1143	640	660	1148	428	937	308,5	7x14	7	4	16	20	100
8	520	560	600	500	30	1448	820	850	1493	583	1179	375	10x14	11	4	16	16	50
10	650	700	750	750	150	1807	1000	1035	1756	656	1484	455	12x20	12x20	3	24	20	130
12,5	812,5	875	925	875	150	2244	1250	1285	2161	811	1776	543	12x20	12x20	5	24	28	125

НУБІП України

Таблиця 3.4.

Технічні характеристики вентилятора В-Ц4-70-8

Вентилятор	Потужність електродвигуна приводу вентилятора,	Швидкість обертання робочого колеса,	Показники в робочій зоні	
	кВт	об/хв.	Продуктивність, тис. м <sup>3</sup> /год	Напір, Па
В-Ц4-70-8	11,0	950	10,0...22,0	1020...580

Для приводу вибраного вентилятора використовуємо асинхронний трифазний електродвигун АИР132М4 з наступними технічними характеристиками (таблиця 3.5).

Таблиця 3.5.

Технічні характеристики електродвигуна АИР132М4

Тип двигуна	Потужність, кВт	Частота обертання валу двигуна об/хв.	ККД, %	cos φ	Маса, кг
АИР132М4	11,0	1000	88,5	0,85	83,5

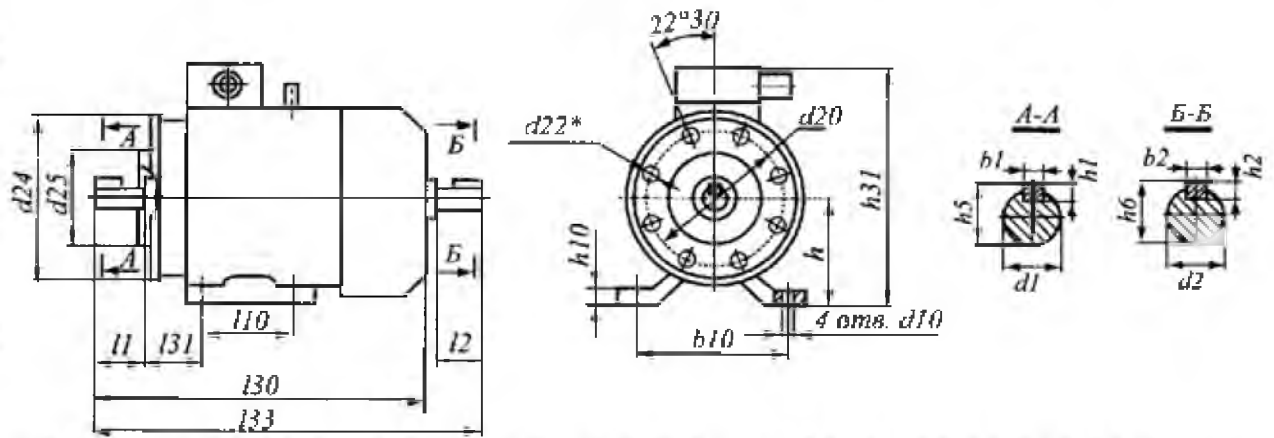


Рис. 4.8. Монтажне виконання електродвигуна АИР132М4

Найбільш доцільний спосіб плавного регулювання обертами вентилятора є частотний. Можливість зміни швидкості таким способом впливає з виразу для синхронної швидкості обертового магнітного поля статора

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}, \quad (3.2)$$

із якого ми бачимо, що швидкість  $\omega_0$  є прямо пропорційною частоті  $f$  напруги, що підводиться до обмоток статора.

Виведемо передатну функцію асинхронного електродвигуна при частотному керуванні. Позначимо  $\omega_{1V}$  швидкість обертання поля статора при частоті  $f_V$ .

З цього відносна швидкість поля

$$v = \frac{f_V}{f_H} = \frac{\omega_{1V}}{\omega_0}, \quad (3.3)$$

де швидкість  $\omega_0$  пов'язана з частотою мережі виразом (3.2).

Введемо поняття фіктивного ковзання

$$s_\phi = \left( \frac{\omega_{1V}}{\omega_0} \right) \cdot s = v \cdot s. \quad (3.4)$$

Дійсна швидкість обертання при частоті  $f_V$

$$\omega = \omega_{1V} \cdot (1 - s). \quad (3.5)$$

Підставляючи у (3.5) значення  $\omega_{1V}$  із (3.3) з урахуванням (3.4),

визначимо

$$\omega = \omega_0 \cdot (v - s_\phi). \quad (3.6)$$

Для невеликих значень ковзання крутний момент двигуна пропорційний ковзанню

$$M = \left( \frac{M_H}{s_H} \right) \cdot s_\phi. \quad (3.7)$$

Підставляючи (3.6) та (3.7) у вихідне рівняння

$$M - M_C = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (3.8)$$



(вважаючи при цьому  $M_C = 0$ )  $J \cdot s \cdot \omega = M$ , отримаємо

$$J \cdot s \cdot \omega_0 \cdot (v - s_{\phi}) = \left( \frac{M_H}{s_H} \right) s_{\phi} \quad (3.9)$$

Цей вираз можна представити як

$$\frac{J \cdot \omega_0 \cdot s_H}{M_H} \cdot s \cdot \frac{s_{\phi}}{s_H} + \frac{s_{\phi}}{s_H} = \frac{J \cdot \omega_0}{M_H} \cdot s \cdot v \quad (3.10)$$

Прийнявши за вхідну величину відносну швидкість поля  $v$ , а за

вихідну – відносне ковзання  $\sigma = \frac{s_{\phi}}{s_H}$ , то вираз (3.10) буде мати вигляд

$$T_{M1} \cdot s \cdot \sigma + \sigma = T_{M2} \cdot s \cdot v, \quad (3.11)$$

де  $T_{M1} = \frac{J \cdot \omega_0 \cdot s_H}{M_H}$  та  $T_{M2} = \frac{J \cdot \omega_0}{M_H}$

З цього передатна функція асинхронного електродвигуна при частотному керуванні

$$W(s) = \frac{\sigma(s)}{v(s)} = \frac{T_{M2} \cdot s}{T_{M1} \cdot s + 1} \quad (3.12)$$

Отже, передатна функція електродвигуна при керуванні частотою

$$W_{BM}(s) = \frac{k_{BM}}{T_{BM} \cdot s + 1} = \frac{1,988}{0,014 \cdot s + 1}$$

### 3.1.4. Вибір частотного перетворювача

У САК температурою в зерносушарці у якості пристрою для керування електродвигуном приводу відцентрового вентилятору вибраний частотний

п  
е  
р  
е  
т  
в  
о  
р  
ю  
в  
а  
ч

Промисловий перетворювач частоти AC70-T3-011G/015P відноситься до серії продуктів AC70 компанії VEICHI і розроблений для керування моментом обертання, плавного пуску та зупинки синхронних та асинхронних трифазних електродвигунів. Перетворювач частоти AC70-T3-011G/015P використовується у різних галузях промисловості та сільського

с

господарства, у металургії, харчовій, нафтогазовій, у системах водопостачання та водовідведення, у вентиляційних системах.

Ці перетворювачі оснащені вбудованим модулем реалізації ПИД-алгоритму керування.



Рис. 3.9. Зовнішній вигляд перетворювача частоти

AC70-T3-011G/015P

Частотні перетворювачі (інвертори) застосовуються для плавного безступінчатого регулювання швидкості трифазних асинхронних електродвигунів. Регулювання досягається генеруванням трифазного струму змінної частоти на виході. Привод дозволяє контролювати та переглядати найважливіші параметри на цифровій панелі - задану швидкість, вихідну частоту, струм і напругу двигуна, вихідну потужність і момент, стан дискретних входів, загальний час роботи приводу та ін.

Технології, реалізовані в приводах АС70, роблять цю серію однією з найпередовіших розробок у своєму класі. Серія АС70 охоплює діапазон потужностей від 11 до 15 кВт.

Характеристики частотного перетворювача АС70 вказані в таблиці

3.6

Таблиця 3.6

Бренд	Veichi
Серія	AC70
sku	AC70-T3-011G/015P
Основна Потужність	11.0 кВт
У режимі Другої Потужності	15.0 кВт
Число фаз/напруга на вході	3-ф/380 В
Число фаз/напруга на виході	3-ф/380 В
Mmax (1 хв) %	150
Струм номінальний	25 А
Номінальний струм з другої потужності	32 А
Струм протягом 1 хвилини	38.0 А
Струм максимальний протягом 2 с	50.0 А
Максимальна вихідна частота	400 Гц
Ступінь захисту IP	20
EMC фільтр	ні
Висота	291 мм
Ширина	195 мм
Глибина	167.5 мм
Гальмівний модуль	Є
Вбудований ПЛК	Є
Вбудований регулятор	ПД
Скалярний режим керування	є
Векторний режим керування без енкодера	є
Векторний режим керування з енкодером	ні
Лінійний закон управління U/f	є
Квадратичний закон управління U/f <sup>2</sup>	є
Знімна панель	Є
Програматор	ні
Максимальна кількість фіксованих швидкостей	16
Число/тип аналогових входів	3(1:0-20mA;1:0-10V;1:0-10Vабо0-20mA;)
Число дискретних входів	7
Число/тип аналогових виходів	2(1:0-10V;1:0(4)-20mA)
Число дискретних (транзисторних) виходів	2

Число релейних виходів	1
Вбудований потенціометр (або номінал опору)	Є
Протокол ModBus RTU	Є
Інтерфейс RS-485/Modbus	є

Особливості частотного конвертера АС70-Т3-011G/015P:

- Діапазон вихідних частот: 0,2-400 Гц;
- 16 програмованих налаштувань швидкості;
- Векторне керування з самоадаптацією до двигуна або контролера (поєднання векторного керування та функції компенсації ковзання дозволяє

забезпечити не менше 150% початкового моменту двигуна з частоти 1 Гц);

- Функція оптимізації часу розгону/гальмування;
- Вбудований ПІД-регулятор (з прямою та зворотною характеристиками) може, напр. В. використовуватися для контролю температури, витрати або тиску;

- Є два способи зупинити двигун: кероване гальмування або рух накатом;
- автоматичний перезапуск після відключення електроенергії з можливістю запуску обертового двигуна;

- вбудований інтерфейс RS-485 для зв'язку з ПК (швидкість обміну даними до 19500 бод).

- Види захисту електродвигуна або групи двигунів:
- Відключення надкрутного моменту;
- Захист від перевантаження, обриву/спотворення фази;

- захист від перегріву;
- Захист від короткого замикання.

Для нашого асинхронного трьохфазного двигуна АИР132М4 потужністю 11 кВт, частотний перетворювач АС70-Т3-011G/015P підходить по всіх характеристиках.



РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

# НУБІП України

## 4.1. Вибір алгоритму управління та технічних засобів його реалізації

Н

### 4.1.1. Визначення періоду квантування

Період квантування знаходимо за теоремою Котельникова за допомогою амплітудно-частотної (частотної) замкнутої безперервної частини системи з похибкою 1% (рис. 4.1) за допомогою MathCAD.

$w := 0,0001..1 \quad j := i$   
 $Wp(w) := \frac{0,8}{200 \cdot j \cdot w + 1} \cdot e^{-50j \cdot w}$   
 $w := 1$   
 Given  
 $|Wz(w)| = 0,01$

$(w) := \text{Find}(w)$   
 $w = 0,308$   
 $Tk := \frac{\pi}{w} \quad Tk = 10,189$

$w := 0,00001..0,4$   
 $Az(w) := |Wz(w)| \quad Az(0,308) = 0,01$

НУБІП України

НУБІП України

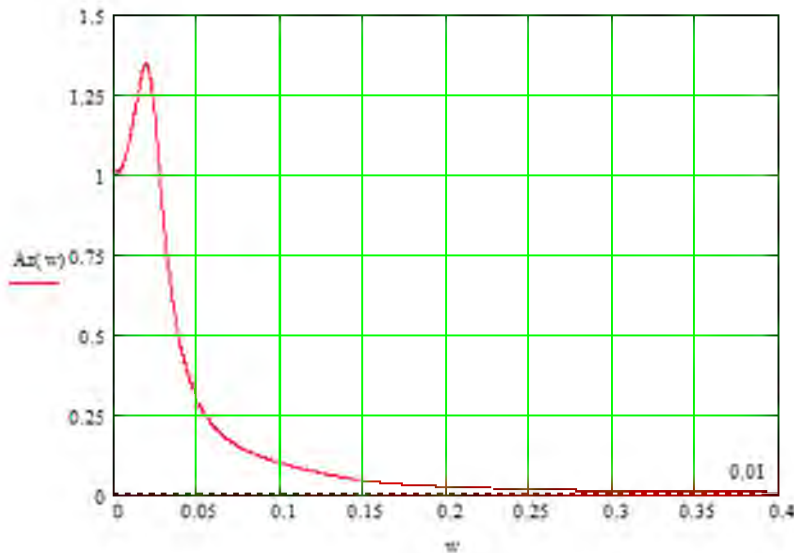


Рис. 4.1. АЧХ замкненої неперервної частини системи.

По отриманому графіку, період квантування  $T_k$  складає 10с.

#### 4.1.2 Розрахунок цифрового регулятора

Для забезпечення аперіодичного монотонного перехідного процесу доцільне застосування ПІД-алгоритму управління.

Передатна функція цифрового ПІД-алгоритму (регулятора) виглядає

$$W_{PII}(z) = K_P + \frac{K_I T (z+1)}{2(z-1)} + \frac{K_D (z-1)}{Tz} \quad (4.1)$$

Визначаємо значення коефіцієнту (КІ). Це рівняння проводиться на основі добротності системи за швидкістю  $K_v$ . Решта коефіцієнтів  $K_P$ ,  $K_D$  визначаються так, щоб компенсувати полюси (інерційності) неперервної частини системи.

$$K_v = \lim_{z \rightarrow 1} W_{PII}(z) \cdot K_I \quad (3.40)$$

$$z \rightarrow 1$$

Використовуючи MATLAB визначаємо передачу функцію неперервної частини системи в цифровому вигляді (z-перетворення), попередньо розклавши ланку запізнення в ряд Таде.

```
>> Wn=tf([-40 0.8],[10000 250 1])
```

Transfer function:

$$\frac{-40s + 0.8}{10000s^2 + 250s + 1}$$

```
>> Wz=c2d(Wn,10)
```

Transfer function:

$$\frac{-0.03165z + 0.03872}{z^2 - 1.77z + 0.7788}$$

Sampling time: 10

```
>>
```

Отже, передатна функція неперервної частини системи буде мати вигляд

$$W_{int}(z) = \frac{-0,03165 \cdot z + 0,03872}{z^2 - 1,77 \cdot z + 0,7788} \quad (4.2)$$

Добротності системи за швидкістю  $K_v$  визначають за формулою

$$K_v = \frac{(1+K)^2}{(\alpha_1 - \beta_1) \cdot K} \quad (4.3)$$

де  $\alpha_1, \beta_1, K$  – коефіцієнти передатної функції неперервної частини, поданої у вигляді

$$W_{int}(s) = \frac{b_m + b_{m-1} \cdot s + \dots + b_1 \cdot s^{m-1} + b_0 \cdot s^m}{a_n + a_{n-1} \cdot s + \dots + a_1 \cdot s^{n-1} + a_0 \cdot s^n} \cdot K \frac{1 + \beta_1 \cdot s + \dots + \beta_{m-1} \cdot s^{m-1} + \beta_m \cdot s^m}{1 + \alpha_1 \cdot s + \dots + \alpha_{n-1} \cdot s^{n-1} + \alpha_n \cdot s^n} \quad (4.4)$$

$$\text{де } K = \frac{b_m}{a_n}; \quad \beta_1 = \frac{b_{m-1}}{b_m}; \quad \beta_m = \frac{b_0}{b_m}; \quad \alpha_1 = \frac{a_{n-1}}{a_n}; \quad \alpha_n = \frac{a_0}{a_n}$$

$$\text{В нашому випадку } W_{int}(s) = 0,8 \cdot \frac{1 + 50 \cdot s}{1 + 250 \cdot s + 10000 \cdot s^2}$$

За формулою (4.3) визначаємо  $K_v$





Прирівняємо вирази (4.5) та (4.6) при однакових степенях  $z$  та розв'яжемо систему рівнянь за допомогою MathCAD:

Отже,  $K_P = 1,232$ ,  $K_D = 44,252$ .

$K_i := 0.005$      $T := 10$

$K_p := 1$      $K_d := 1$

Given

$$K_i \cdot T^2 - 2 \cdot T \cdot K_p - 4 \cdot K_d = -1.77$$

$$\frac{K_i \cdot T^2 + 2 \cdot T \cdot K_p + 2 \cdot K_d}{2 \cdot K_d} = 0.7788$$

$$K_i \cdot T^2 + 2 \cdot T \cdot K_p + 2 \cdot K_d$$

$\begin{pmatrix} K_p \\ K_d \end{pmatrix} := \text{Find}(K_p, K_d)$      $K_p = 1.232$      $K_d = 44.252$

Таким чином, передатна функція регулятора буде мати вигляд:

$$W_{PER}(z) = 1,232 + 0,025 \frac{(z+1)}{(z-1)} + 4,425 \frac{(z-1)}{z}. \quad (4.7)$$

#### 4.1.3 Технічна реалізація цифрового регулятора

В якості керуючого пристрою ми використовуємо мікроконтролерний пристрій, який дозволяє задавати параметри в широких межах і змінювати їх під час роботи. КНУ є універсальним контролером програмування.

Технічні характеристики ЦП:

- пряма адресація пам'яті до 64 кбайт;

- Тип адресації (неявна, пряма), адресована одиниця - байт;

- кількість інструкцій, включаючи інструкції для арифметичних і логічних операцій, операцій десяткової корекції (78).

У нашому випадку необхідно використовувати аналого-цифровий перетворювач (АЦП) з урахуванням меж зміни температури осушувача (40...+140°C) і необхідної точності  $\Delta = 1^\circ\text{C}$ .

Кількість дискретних рівнів АЦП визначається за формулою

$$N = \frac{X_{B \max} - X_{B \min}}{\Delta} = \frac{140 - 40}{1} = 100. \quad (4.8)$$

Визначаємо розрядність АЦП за формулою

$$n = [\log_a N]^+, \quad (3.48)$$

де  $[\dots]^+$  – найбільше ціле, яке більше або дорівнює аргументу.

$$n = [\log_2 100]^+ = 7.$$

Беремо АЦП К1113ПВ1.

Визначимо коефіцієнт масштабування за допомогою MathCAD,

$$\begin{aligned} & \text{Каср} := 1 \quad \text{Васр} := 1 \\ & \text{given} \\ & \text{Каср} \cdot 10 + \text{Васр} = 0 \\ & \text{Каср} \cdot 100 + \text{Васр} = 250 \\ & \left( \begin{array}{l} \text{Каср} \\ \text{Васр} \end{array} \right) := \text{Find}(\text{Каср}, \text{Васр}) \quad \text{Каср} = 2.5 \quad \text{Васр} = 0 \end{aligned}$$

враховуючи діапазон кодів АЦП (0...250).

Отже, залежність коду АЦП від температури буде мати вигляд

$$X_{\text{АЦП}} = 2,5 \cdot \theta, \quad (4.9)$$

де  $\theta$  – це температура об'єкта.

## 4.2. Аналіз роботи САК та визначення показників якості керування

Перевірку нашої цифрової системи на стійкість ми виконуємо за критерієм Джурі.

Для цього необхідно знайти передатну функцію розімкнутої системи

$$\begin{aligned} W_{\text{РОЗ}}(z) &= W_{\text{НЧ}}(z) \cdot W_{\text{РЕГ}}(z) = \frac{-0,03165 \cdot z + 0,03872}{z^2 - 1,77 \cdot z + 0,7788} \cdot 1,232 + 0,025 \frac{(z+1)}{(z-1)} + 4,425 \frac{(z-1)}{z} = \\ &= \frac{-0,18z^3 + 0,22z^2 - 0,07z + 0,03}{z^4 - 2,77z^3 + 2,54z^2 - 0,77z}. \end{aligned}$$

Знайдемо передатну функцію замкненої системи

$$W_{зам}(z) = \frac{W_{РОЗ}(z)}{1+W_{РОЗ}(z)} = \frac{-0,18z^3 + 0,22z^2 - 0,07z + 0,03}{z^4 - 2,95z^3 + 2,76z^2 - 0,84z + 0,03}$$

Розв'яжемо характеристичне рівняння замкненої системи за допомогою MathCAD.

$$z^4 - 2,95 \cdot z^3 + 2,76 \cdot z^2 - 0,84 \cdot z - 0,03 \text{ solve, } z \rightarrow \begin{pmatrix} .15787412568974547892 - .82941756891253480547 \cdot i \\ .15787412568974547892 + .82941756891253480547 \cdot i \\ .75495377091125615427 - .25106297537018535310 \cdot i \\ .75495377091125615427 + .25106297537018535310 \cdot i \end{pmatrix}$$

Відобразимо корені на  $Z$ -площині. Якщо всі корені знаходяться всередині одиничного кола, то за критерієм Джурі система стійка.

Використавши MATLAB складемо структурно-алгоритмічну схему цифрової системи та побудуємо перехідний процес.

З перехідного процесу знаходимо показники якості САК:

- час регулювання  $T_p=240$  с;
- перерегулювання  $\sigma=0\%$ ;
- коливальність  $n=0$ ;
- статична похибка  $\Delta=0$ .

Ці показники задовільняють технологічним вимогам до процесу сушіння зерна.

НУБІП України

НУБІП України

## РОЗДІЛ 5

## РОЗРОБКА SCADA-СИСТЕМИ

# НУБІП України

Візуалізація — це спосіб подання інформації у вигляді наочного образу (наприклад, у вигляді малюнків і фотографій, графіків, схем, структурних схем, таблиць, карт тощо).

При візуалізації контролю використовуються такі підходи:

- SCADA SYSTEM (Trace mode, Genesis);
- управління за допомогою пульта управління;
- контролер з дисплеєм;

Вибір технічних засобів візуалізації залежить від обсягу інформації та розміру ОУ. Системи SCADA використовуються у великих системах.

SCADA — програмний комплекс для візуалізації та керування технологічними процесами. Система SCADA забезпечує візуальне представлення процесу та зазвичай надає оператору графічний інтерфейс для контролю та керування.

Враховуючи кількість технічних ресурсів, візуалізація операторського інтерфейсу виконана за допомогою Scada Trase Mode (AdAstrA), одного з рішень автоматизації технологічних процесів (ASUTP), та автоматизованої системи контролю та управління процесом сушіння зерна. Був розроблений.

Розроблена система SCADA дозволяє виконувати основні завдання технологічного процесу сушіння зерна:

- ефективно керувати та контролювати технологічний процес сушіння;
- забезпечити високий рівень надійності та безпеки;
- оптимізація споживання енергетичних ресурсів;
- Отримувати дані в реальному часі;
- мати доступ до проекту з будь-якого місця;

- Впровадження підсистеми підтримки прийняття рішень.

Результат роботи представлено нижче. Уявімо кілька робочих екранів, між якими можна перемикатися за допомогою відповідних кнопок у нижньому

# НУБІП України

правому куті. На першому екрані ми будемо стежити за роботою механізмів в цілому по всій сушарці, тому накладемо на зображення сушарки сигнальні лампочки, пов'язані з відповідними параметрами програми. На другому екрані панелі керування ми покажемо параметри керування, важливі для керування.

На рис. 5.1 показаний інтерфейс оператора. На цьому екрані (мнемосхемі) показано технологічне обладнання: зерносушарка, топкова установка, завантажувальна норія, розвантажувальний конвеєр, вентилятор, газопровід і манометри.

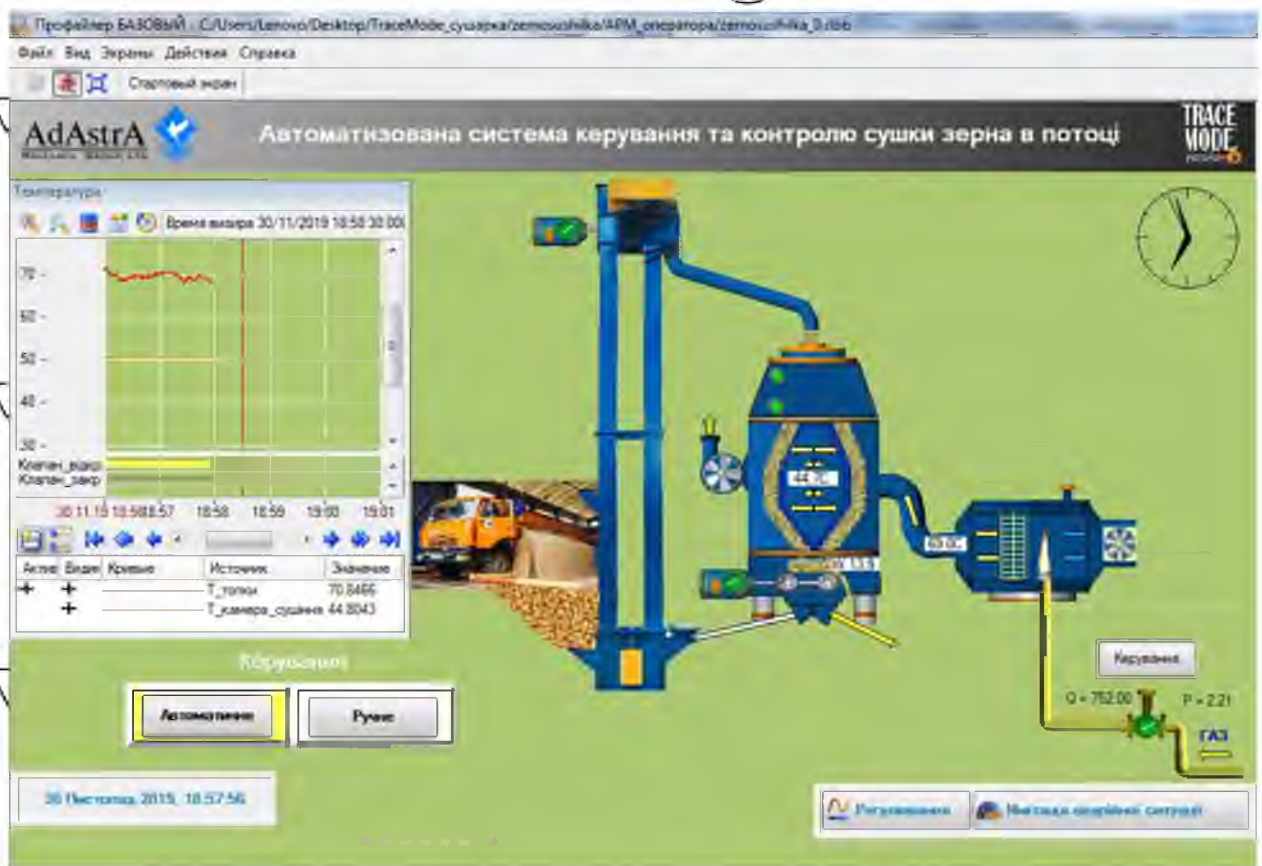


Рис. 5.1. Графічний інтерфейс системи в Scada Trace Mode

Часову динаміку зміни технологічного параметра має сенс представити у вигляді тимчасової залежності зміни цього параметра. З цієї причини в системах SCADA широко використовуються об'єкти, які дозволяють візуалізувати зміну певного параметра з часом. Такі об'єкти називають трендами. Тренд реального часу показує зміну параметра в реальному часі. Як правило, тенденції включають смугу прокрутки, яка дозволяє «повернутися



назад» і побачити, що сталося раніше у виробництві, або повернутися до «поточного часу». Тенденція відображення температури теплоносія печі та сушильної камери, показано на рис. 5.2.

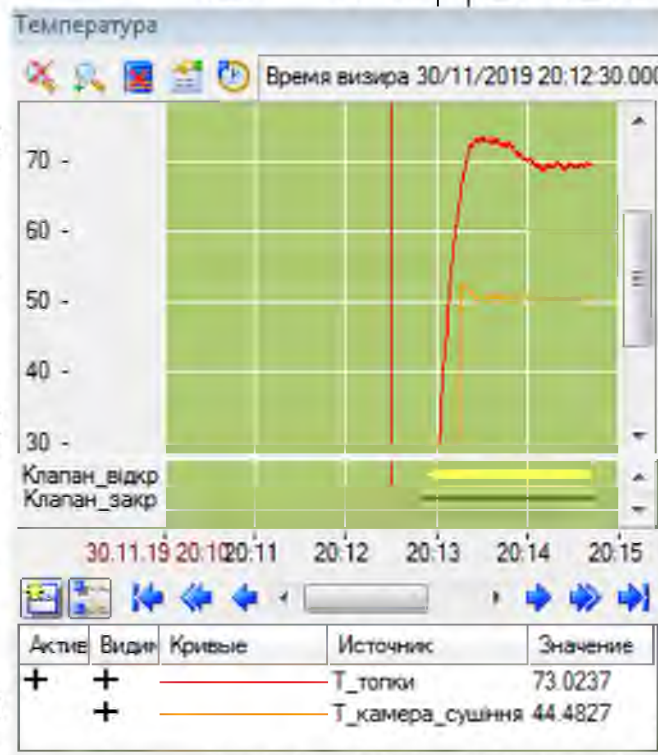


Рис 5.2. Відображення показників температури у вигляді тренда

На рис. 5.3 зображено перемикачі режиму роботи, а також вікно автоматичного режиму, яке містить відповідні кнопки ввімкнення та вимкнення, які передають сигнал на елементи (контакти та котушки) програми керування.

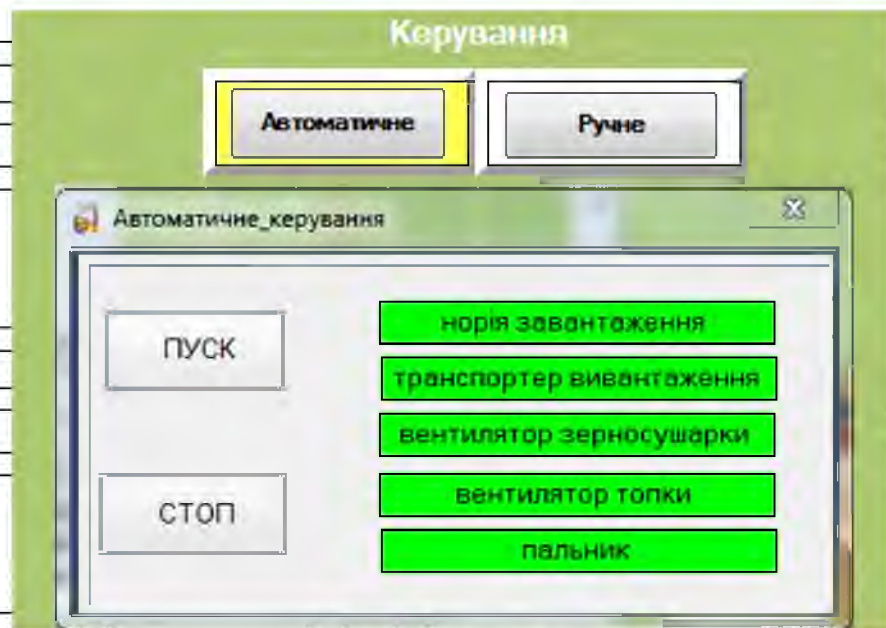


Рис. 5.3. Перемикання режимів роботи (автоматичний/ручний).

На рис. 5.4 показано вікно режиму ручного керування, в якому управління механізмами виконання сушарки здійснюється за допомогою кнопкових перемикачів.

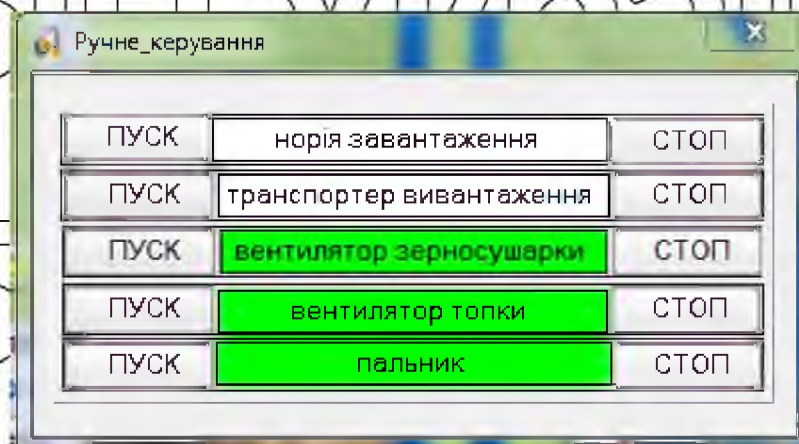


Рис. 5.4. Вікно режиму ручного керування механізмами сушарки

На рис. 5.5 показано керування виконавчим механізмом клапана в ручному режимі. Відображення інформації (значень тиску, витрати), а також стану у вигляді кольорової індикації дозволяють стежити за подачею палива.



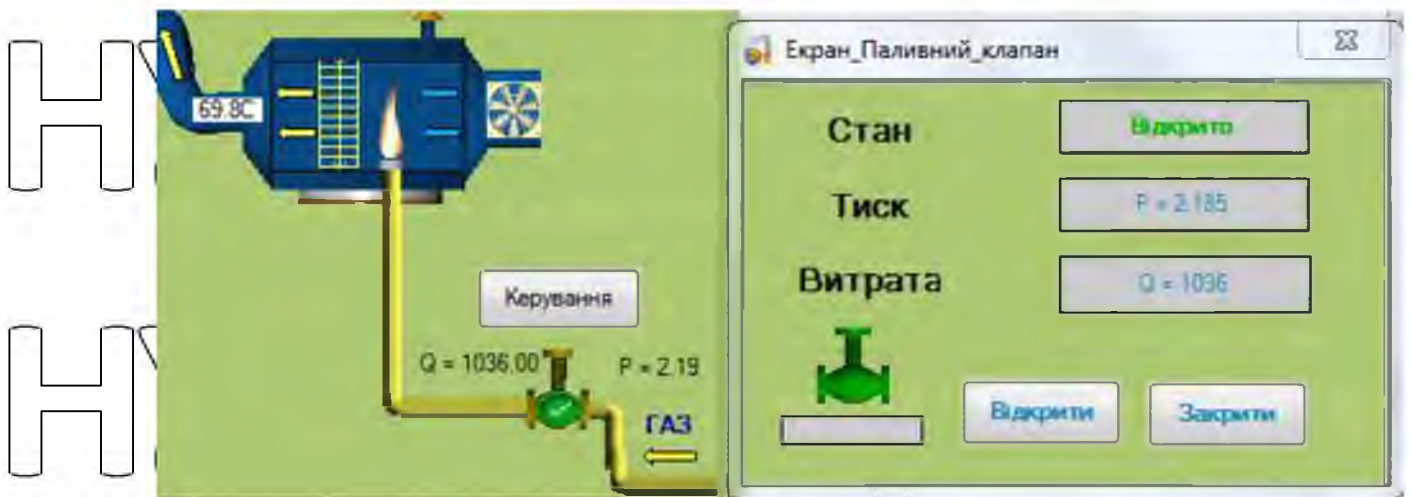


Рис. 5.5. Вікно керування виконавчим механізмом клапана у ручному режимі

Під час технологічного процесу необхідно контролювати той чи інший параметр, щоб виключити аварії та поломки обладнання. Система SCADA дозволяє контролювати значення параметрів виробничого процесу.

Однак просто перевірити параметри недостатньо, у багатьох випадках необхідно повідомити оператора про аварійну ситуацію, наближеність значення параметра до аварійного значення. На рис. 5.6 показано вікно, що імітує аварійну ситуацію на прикладі зміни тиску палива, світловий індикатор, коли тиск падає вище норми.

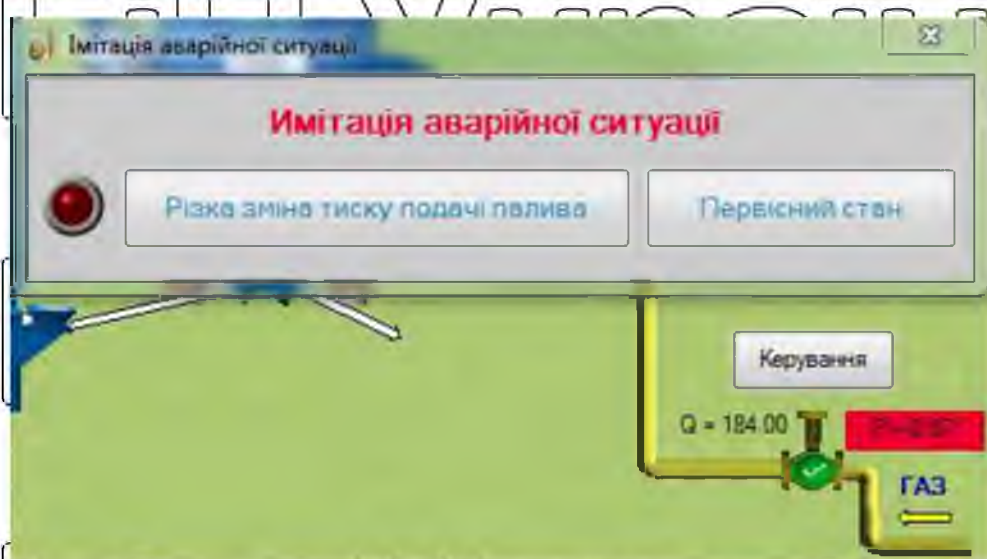


Рис. 5.6. Вікно імітації аварійної ситуації



Останній екран нашого огляду системи Scada показаний на рис. 5.7. Це екран налаштування. Він містить такі технологічні параметри, як: температура теплоносія, тиск подачі палива, швидкість розвантажувального конвеєра, яка має 10 рівнів налаштування, а також параметри налаштування ПІД-регулятора, який виробляє відповідну уставку.



Рис. 5.7. Екран регулювання технологічних параметрів

### Розробка програмного забезпечення

Як пристрій керування технологічним процесом використовується програмований логічний контролер, для якого розробляється керуюча програма.

Для створення символічного запису робочого алгоритму використовуємо такі позначення:

X1 – електромагнітний пускач двигуна вентилятора сушарки;

X2 – електромагнітний пускач електродвигуна вентилятора рекуперації;

X4 – електромагнітний пускач електродвигуна Норі для завантаження зерна;

X5 - електромагнітний пускач двигуна вихлопних систем;

X6 - електромагнітний пускач двигуна вентилятора горіння;

X7 - електромагнітний пускач двигуна насоса камери згоряння;

X9, X10 - привід заслінки (вліво і вправо);

X11, X12 - приводи клапанів (вліво і вправо);

X13.1 - режим "малий вогонь";

X13.2 - режим "Велика пожежа";

X14 - перетворювач частоти;

b1 - кінцевий вимикач, що фіксує положення розвантажувального люка;

b2 - кінцевий вимикач, що встановлює положення застібки досушування;

b3 - кінцевий вимикач, який вдруге встановлює положення клапана використання теплоносія;

b4 - кінцевий вимикач, який визначає положення крана зливу теплоносія;

b5 - нижній датчик рівня зерна;

b6 - верхній датчик рівня зерна;

b7 - датчик температури теплоносія в сушильній камері;

b8 - датчик температури в сушильній камері (сигнал на ПД-регулятор і на вікно панелі керування);

b9 - датчик вологості охолоджуючої рідини;

b10 - датчик вологості зерна на виході;

z1 і z'1 - котушка і контакт програмного реле часу прогріву сушарки;

z2 і z'2 - котушка і контакт програмного реле часу очікування вивантаження зерна і зупинки сушарки.

Визначаємо елементи системи, які будуть підключені до входів контролера та елементи, які будуть підключені до виходів контролера.

Для наочності зведемо їх у таблицю назв (рис. 5.8).

Name	Tag table	Data type	Address	Retain	Visibl.	Acces.	Comment
y1	Default tag table	Bool	%I 0				сигнал розрешення
b1	Default tag table	Bool	%I 1				заслонка на вивантажу
b2	Default tag table	Bool	%I 2				заслонка на повторную сушку
b3	Default tag table	Bool	%I 3				кнопка закрыт
b4	Default tag table	Bool	%I 4				кнопка открыт
b5	Default tag table	Bool	%I 5				нижний уровень
b6	Default tag table	Bool	%I 6				верхний уровень
x1	Default tag table	Bool	%Q 0				вентилятор сушки
x2	Default tag table	Bool	%Q 1				вентилятор рециркуляции
x3	Default tag table	Bool	%Q 2				ворота загрузки
x4	Default tag table	Bool	%Q 3				ворота загрузки
x5	Default tag table	Bool	%Q 4				выпускные устройства
x6	Default tag table	Bool	%Q 5				вентилятор топки
x7	Default tag table	Bool	%Q 6				насос топки
x8	Default tag table	Bool	%Q 1 0				заслонка на выгрузку
x10	Default tag table	Bool	%Q 1 1				заслонка на повторную сушку
x11	Default tag table	Bool	%Q 8 0				кнопка на рециркуляцию
x12	Default tag table	Bool	%Q 8 1				кнопка на выброс
x13.1	Default tag table	Bool	%Q 8.2				малый огонь ТГ
x13.2	Default tag table	Bool	%Q 8.3				большой огонь ТГ
b7	Default tag table	Int	%WI 14				температура в камере сушки
b8	Default tag table	Int	%WI 18				температура в камере сушки
b9	Default tag table	Int	%WI 30				влажность теплоносителя
b10	Default tag table	Int	%WI 32				влажность на выходе
x14	Default tag table	Int	%WI 28				ПЛ

Скріншот 5.8. Таблица входов і виходів контролера

Основою для створення програми є керуюча структура (рис. 1.2), яка повинна бути представлена в програмі спеціальними символами та функціями. Вибране керування програмується на мові логіки контактів реле (сходових діаграм LD). Програма на мові релейної логіки має наочний та інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс, представляє логічні операції у вигляді схеми із замкнутими та розімкненими контактами.

Основними елементами мови логіки контактів реле є контакти, які образно можна порівняти з парою контактів реле або кнопки.

Існують нормально закриті та нормально розімкнені контактні елементи, які можна порівняти з нормально закритими та нормально розімкненими кнопками в електричних колах.

Ось приклад тегів, необхідних для компіляції керуючої програми:

- нормально відкритий контакт (позначає вхід);
- нормально закритий;
- кінець логічного ланцюжка називається котушкою (позначає

вихід);  
 НУБІП України

М — маркер (пам'ять на проміжні результати);

D — реєстр даних (зберігає інформацію про дані);

K — десяткова константа (визначає значення десяткового числа);

T - Таймер (пам'ять для реалізації параметрів часу);

НУБІП України

Однак, залежно від структури управління, також необхідно організувати дві затримки часу за допомогою блоків часу TON, сигнал яких надходить на прапор, задіяний у вихідних схемах керування.

Для керування перетворювачем частоти необхідне ПД-регулювання.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України



## РОЗДІЛ 6

## ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

## НУБІП України

Монтаж і експлуатація електрообладнання повинна здійснюватися відповідно до норм і правил з охорони праці та відповідної експлуатаційної документації.

Безпека електричних систем повинна бути гарантована:

- Надійність ізоляції;

- Безпечне розміщення струмопровідних частин;

- Заземлення або занулення корпусів електрообладнання.

- Попереджувальні, блокувальні та запобіжні знаки.

Усі щойно підключені, відремонтовані електроустановки повинні пройти приймальні випробування та прийняти комісією відповідно до застосованих норм.

Введення в експлуатацію електричних систем можливе лише за наявності відповідного електричного персоналу та призначеної особи, відповідальної за управління електрикою.

Співробітники, які обслуговують електричні системи, повинні бути обізнані з вимогами державних постанов у межах своєї сфери відповідальності.

На кожну електроустановку на підприємстві, крім технічної документації з експлуатації, проектної документації, акта введення електроустановки в експлуатацію, паспорта на обладнання, апаратуру та пристрої, план виконання електричних з'єднань, блокувань, сигналізації, розміщення, протоколи електричних випробувань, вимірювання потребують затвердження, налагодження окремих пристроїв тощо.

Струмопровідні частини електричних систем повинні бути захищені від випадкового дотику.

Усі електродвигуни повинні бути заземлені та належним чином захищені від короткого замикання та перевантаження.

## НУБІП України

Металеві частини електроустановок 380/220 В з плаваючою нейтраллю, які можуть опинитися під напругою через порушення ізоляції, повинні бути заземлені відповідно до правил улаштування електроустановок.

Забороняється встановлювати заземлювачі в місцях проходження людей і тварин, на вході на майданчик і на вигульних майданчиках.

Зовнішні лінії слід прокладати в сталевих або пластикових трубах, коробах і коробах у місцях, де вони можуть бути схильні до механічних пошкоджень.

Електропроводка та електрообладнання в приміщеннях з підвищеним вмістом пилу (кормосховища, гноєсушильники, сховища трав'яного борошна та ін.) повинні бути вибухозахищеними.

Електропроводки, що з'єднують машини з іншим електрообладнанням у місцях, де є небезпечні механічні пошкодження, слід прокладати в сталевих або пластмасових трубах, металевих гільзах, коробах, повітропроводах тощо.

Встановлення вимикачів і запобіжників у лініях захисного заземлення не допускається.

Заземлена нейтраль внутрішньої електропроводки повинна бути позначена або пофарбована.

Надійність заземлення та його загальний стан необхідно перевіряти вимрюванням один раз на рік, а також після кожного капітального ремонту та тривалої зупинки установки.

При виявленні відхилення опору заземлення від значень, зазначених у правилах улаштування електроустановок, слід вжити заходів для приведення його до нормативного рівня.

Зовнішню перевірку стану заземлювачів (длин) проводити кожні 6 місяців, у вологих і особливо мокрих приміщеннях - кожні 3 місяці.

У разі несправності або несправності заземлювального пристрою система негайно відключається до усунення несправності.

Роз'єми повинні бути захищені від випадкового дотику до струмоведучих частин і розташовані таким чином, щоб з'єднання було можливе без проблем.

Розетки для підключення випромінювальних приладів до джерела живлення повинні мати третій захисний контакт.

У приміщеннях підвищеної небезпеки (вологість понад 90%, запиленість понад 800 мг/м<sup>3</sup>) необхідно передбачати герметичні розетки зі спеціальними розетками для підключення до захисного нульового провідника.

Штекерні з'єднувачі (розетки, вилки), які використовуються в мережі напругою 12-42 В, повинні відрізнятися за конструкцією від звичайних вставних з'єднувачів, щоб дозволити установку вилок 12-42 В в 127-220 розеток ПН перешкоджати.

Огляд, технічне обслуговування і ремонт приймачів і електроспоживачів дозволяється проводити тільки після відключення від електромережі. Плакат «Не вмикайте! Люди працюють!»

Роботи на машинах і апаратах з електроприводом можна доручати особам з групою з електробезпеки не нижче І.

Виробничі, допоміжні та складські будівлі та приміщення повинні бути обладнані блискавкозахистом згідно з інструкцією з монтажу.

Щоб зменшити вірогідність потрапляння кульової блискавки в приміщення, перед початком грози слід запобігти утворенню в приміщеннях протягів (закрити двері, вікна, люки та інші щілини і отвори).

#### Вимоги безпеки в надзвичайних ситуаціях

При аварійній ситуації (виникнення сторонніх шумів під час роботи пристрою, запаху гару, диму, виявлення несправностей, іскріння електроприладів, поява електричної напруги на деталях, підвищений нагрів поверхні підшипників, редукторів, інших частин машин, порушення цілісності захисних пристроїв, бункерів, ємностей, засмічення вихідних отворів горловин і т. д.) необхідно спочатку припинити роботу машин і апаратів у порядку,

передбаченому правилами експлуатації, в першу чергу поворотом. відключення постачання електроенергії, пари, води, палива та хімічних розчинів.

Якщо існує ризик для вашого здоров'я або життя, ви повинні залишити небезпечну зону та попередити працівників, які знаходяться поблизу.

Проводити аварійний ремонт і усувати несправності без зупинки машин і обладнання забороняється. Після аварійної зупинки та при повторному запуску машину необхідно звільнити від продукту обробки.

При пожежі або пожежі необхідно терміново сповістити (телефоном, кур'єром) керівника об'єкта, пожежну охорону, пожежну охорону, оповіщення звуковим сигналом (сирена, радіостанція, дзвінок). ), приступити до гасіння пожежі наявними засобами (вогнегасник, кран вогнегасника, пісок тощо).

При гасінні пожежі горюча речовина ізолюється від кисню і повітря, охолоджується до температури, що виключає горіння, при цьому не допускається виникнення інших небезпечних факторів (вибухів, обвалів, коротких замикань ліній електропередачі тощо). Велика кількість горючого матеріалу розширюється і гасить кожен частину окремо.

Легкозаймисті рідини (паливо) гасять вогнегасником, направляючи струмінь під основу полум'я або засипаючи горючу поверхню піском, землею або мокрим брезентом.

Вибухові речовини (кормовий і борошняний пил, вибухову концентрацію аміаку) рясно поливають струменем води з гідранта.

Більшість твердих горючих речовин (сіно, солом'я та ін.) гасять водою, засипають хутром, засипають піском або землею.

Якщо лінії електропередач загорілися, негайно відключіть лінію від електромережі, вимкнувши автоматичний вимикач. Якщо такої можливості немає, доведеться сокирою або лопатою з сухим дерев'яним держаклом перерізати дроти один за одним перед місцем загоряння. При цьому необхідно

встати на суху дерев'яну підставку або гумовий килимок і надіти гумові рукавички або ізолювати руки вовняною тканиною (шарфом, шаткою тощо). Проводи електроприладів можна затирати тільки сухим піском.



Якщо мобільний транспортний засіб загорівся, якщо можливо, відбуксируйте його в безпечне місце для інших предметів, вимкніть пожежну сигналізацію та приступайте до гасіння.

При відключенні обладнання для резавання кормів в аварійних ситуаціях слід дотримуватися запобіжних заходів щодо запобігання нещасним випадкам: не торкатися до проводів, металевих частин технологічного обладнання, якщо є підозра на появу на них електричної напруги, або пошкоджених проводів, не наближатися до небезпечних механізмів, технічних

Для захисту матеріалів або інших предметів використовуйте засоби захисту (рукавички, гумове взуття, вогнегасник тощо).

У разі нещасного випадку спочатку усувають небезпечний фактор (подача пари, хімічного розчину, електрики, зуминка рухомих механізмів тощо), потерпілому надають першу (долікарську) медичну допомогу і направляють до лікарні, медичний заклад для догляду. По можливості залишаються до розслідування обстановка і стан обладнання на робочому місці на момент події (за умови, що це не створює загрози життю і здоров'ю оточуючих і не порушує безперервність технологічного процесу).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

## НУБІП УКРАЇНИ

- 1 Гірник М. А. Механізація і автоматизація післязбиральної обробки зерна. - К.: Урожай, 1970. - 190с.
- 2 Боуманск Г. Эффективная обработка и хранение зерна//Пер. с англ. В.И. Даневского. - М.: Агропромиздат, 1991. - 608с.
- 3 Бородин И.Ф., Недилько Н.М. Автоматизация технологических процессов. - М.: Агропромиздат, 1996.
- 4 Гинзбург А.С. Технология сушки пищевых продуктов. - М.: Пищевая промышленность, 1973. - 527с.
- 5 Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. - М.: Пищевая промышленность, 1976. - 248с.
- 6 Анискин В.И. Консервация влажного зерна. - М.: Колос, 1968. - 286с.
- 7 Голубкович А.В. Сушка высоковлажных семян и зерна / А.В. Голубкович, А.Г. Чижиков. - М.: Росагропромиздат, 1991. - 174 с.
- 8 Гуляев Г.А. Автоматизация процессов послеуборочной обработки и хранения зерна. - М.: Агропромиздат, 1990. - 240с.
- 9 Злоруйко В.А., Кривошеев Ю.И., Слынько О.А.Г. Определение влагосодержания гигроскопических грузов для их сохранной перевозки. - М.: Транспорт, 1988. - 496с.
- 10 Драганов Б.Х. Использование возобновляемых и вторичных энергоресурсов в сельском хозяйстве. - Киев: Вища школа, 1988. - 56с.
- 11 Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. - Тернопіль: Підручники & посібники, 2001. - 977с.
- 12 Кирпа Н.Я. Развитие оборудования и технологий для первичной обработки, сушки и хранения зерна в хозяйствах АПК. //Хранение и переработка зерна. - 2000. - №10 - С.25-26.
- 13 Кирпа Н.Я. Развитие и перспективы обработки и хранения зерна в Украине // Хранение и переработка зерна. - 2000. - №12. - С.25-26.
- 14 Красников В.В. Кондуктивная сушка. -М.: Энергия, 1973. - 288с.
- 15 Малцн Н.И. Снижение затрат на сушку зерна. - М.: ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, 1991. - 45 с.
- 16 Лыков А.В. Теория сушки. - М.: Энергия, 1968. - 471с.
- 17 Краусп Р.В. Автоматизация послеуборочной обработки зерна. - М.: Машиностроение, 1975. - 227с.
- 18 Мартыненко И.И., Головинкий Б.Д., Проценко Р.Д., Резниченко Т.Ф. Автоматика и автоматизация производственных процессов. М.: 1985. - 336с.
- 19 Мартыненко И.И., Лысенко В.Ф. Проектирование систем автоматизации. 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Агропромиздат, 1990 г. - 243 с.

## НУБІП УКРАЇНИ

## НУБІП УКРАЇНИ

## НУБІП УКРАЇНИ

## НУБІП УКРАЇНИ

## НУБІП УКРАЇНИ

## НУБІП УКРАЇНИ

- 20 Мельник Б.Е. Активное вентилирование зерна. Справочник. - М.: Агропромиздат, 1986. - 159с.
- Морозов В.В. Энергозосерегающая сушка семян рапса в установках бункерного типа / В.В. Морозов, Н.М. Максимов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2011. - №5. - С.13-14.
- 21 Остапчук Н.В., Шашкин А.Б., Каминский В.Д. Повышение эффективности сушки зерна. - К.: Урожай, 1988. - 132 с.
- 22 Попов Н.Я. Повышение эффективности работы зерносушилок с повторным использованием агента сушки. - М.: ЦНИИЭТ Хлебопродуктов, 1980. - 34с.
- 23 Станкевич Г.М., Страхова Г.В., Атаназевич В.И. Сушка зерна. - К.: Либидь, 1997. - 351с.
- 24 Теленгатор М.А. Обработка и хранение семян. - М.: Колос, 1980. - 272 с.

- 25 Каталог електродвигунів серії АІР [Електронний ресурс]  
Режим доступу: <https://air.com.ua/katalog-elektrodvigatelei-air/>
- 26 Датчик рівня сипких продуктів [Електронний ресурс]  
Режим доступу:  
<https://temix.com.ua/product/vibracionnyj-datchik-signalizator-predelnogo-urovnia-sypuchih-materialov-dpu-10>

- 27 Шахтні зерносушарки Law  
Режим доступу:  
<http://www.zemosushilki.com>
- 28 Зерносушарки поточкові (поточні)  
Режим доступу:  
<https://ravaro.com.ua/products-ua/zemosusharki-potochni>
- 29 Сушіння зерна та вибір сушарок в господарствах Скандинавії  
Режим доступу:  
<https://hipzmag.com/tehnologii/hranenie/sushka-zerna-i-vybor-sushilok-v-hozyajstvah-skandinavii/>