

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ  
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 681.5:664.1:636.082.474

**ПОГОДЖЕНО**

Директор ІН енергетики,  
автоматики і енергозбереження  
(назва ІН)

В.В. Каплун  
(ПІБ)

(підпис)

**ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ**

Завідувач кафедри автоматики  
та робототехнічних систем  
ім. акад. Г.П. Мартиненка  
(назва кафедри)

В.П. Лисенко  
(ПІБ)

(підпис)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р.

## КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

02.06.-КМР.176"С".2021.02.01.004.ПЗ

на тему «РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ В ІМАХТНІЙ ЗЕРНОСУШАРЦІ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ КТЗ ШНАЙДЕР-ЕЛЕКТРИК»

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

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

Виконав

І.В. Савченко

(підпис)

(ПІБ студента)

Керівник магістерської роботи

Д.С. Комарчук, к.т.н., доц.  
(ПІБ, науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Рецензент

(підпис)

КИЇВ-2021

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

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

В.П. Лисенко

2021 р.

## **ЗАВДАННЯ**

**ДО ВИКОНАННЯ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ**  
(бакалаврської, дипломної)

**Савченку Івану Вікторовичу**

(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 **«РОЗРОБЛЕННЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ В ЦАХТНІЙ ЗЕРНОСУШАРЦІ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ КТЗ ШНАЙДЕР-ЕЛЕКТРИК»**, затверджена наказом від 01.02.2021 року №176 «С»

Термін подання студентом магістерської роботи 15.11.2021 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 «08» лютого 2021 року**

**Керівник магістерської роботи**

(Підпис)

Комарчук Д.С.

(Прізвище та ініціали)

**Завдання прийняв до виконання**

(Підпис)

Савченко І.В.

(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. Принцип 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
Висновки .....	66
Список використаної літератури .....	67

# НУБІП України

# НУБІП України

## ВСТУП

# НУБІП України

*Актуальність теми.* У багатьох галузях сільського господарства і промислового виробництва доводиться стикатися із необхідністю зниження вологовмісту різних продуктів і матеріалів.

# НУБІП України

Відносно сільського господарства, переробної та харчової галузей це пов'язано із загальною задачею підвищення збереженості зернової, плодовоовочевої та іншої сільськогосподарської продукції, для чого в останні десятиріччя були створені численні технології сушіння різних продуктів

# НУБІП України

(зниження вологості) зернових та олійних культур, доведення сушених овочів і фруктів до такої вологості, коли цукор, що міститься у них, починає відігравати роль консерванту). При чому ці технології знаходять все більше

широкого використання, спостерігається формування сушильної галузі промисловості та сільського господарства [1].

# НУБІП України

При будь-якому масштабі використання сушильних технологій принциповою є реалізація ряду техніко-економічних параметрів, таких як мінімально можлива енергоємність процесу, максимальна однорідність

сушіння, мінімальний час виходу на заданий рівень вологості. Ці параметри

# НУБІП України

можуть бути забезпечені грамотним підходом до вибору базових фізичних процесів, що підходять до даної конкретної ситуації зневоднення продукції, відповідних їм технологій сушіння і, відповідно, за рахунок обладнання,

завдяки якому вказані процеси можуть бути реалізовані [5].

# НУБІП України

Основною задачею сушіння зернових і олійних культур є зниження вологості продукту до значень, при яких його можна безпечно закласти на тривале зберігання без побоювань виникнення осередків саморозігрівання.

Однак сушіння – це не тільки спосіб зниження вологості зерна. При правильно підбраному режимі сушіння відбувається фізіологічне дозрівання зерна та покращення його якості.

# НУБІП України

У процесі неправильного сушіння при нагріванні зерна більше допустимої температури відбувається погіршення його якості, знижується

схожість і енергія пророщування у насінневому зерні, збільшується кількість тріщин у зернобобових культурах та рису, знижуються хлібопекарські властивості муки, отриманої з такого зерна. Наприклад, у кукурудзи у результаті сушіння при високій температурі повністю втрачається схожість, але повністю зберігається кормова цінність. У пересушеній кукурудзі погано відокремлюється крохмаль. Під час сушіння пшениці при високій температурі відбувається "закалювання" зерна, що утруднює його розмелювання.

Велику небезпеку для зерна являють плісняві гриби, бактерії, шкідливі домішки і патогенні мікроорганізми, що переносяться шкідниками хлібних злаків (комахами, гризунами, птахами). Пліснява добре розвивається у теплому і вологому зерні. Коли комахи і пліснява знаходять сприятливе середовище і починають розмножуватися у зерновій масі, вони самі виділяють тепло і вологу, які є побічними продуктами їх живлення і дихання. Виділені тепло і волога підвищують вологість і температуру навколишнього зерна, зони псування зерна збільшуються, які часто називають "осередками саморозігрівання".

Токсини, що утворюються у процесі пліснявиння, пошкоджені комахами і пліснявою зернівки, забруднення і запахи від шкідників зерна обумовлюють зниження його кормової якості, тварини відмовляються споживати таке зерно. Обробка і транспортування пліснявілого і пошкодженого зерна негативно впливають на безпечність праці і здоров'я працівників. Ураження зерна грибками можливе і у полі, і при зберіганні.

Боротьба із мікотоксинами – загальносвітова проблема, оскільки у структурі втрат зерна на долю мікотоксинів припадає 25% [7].

Одночасно з існуючими зазначеними факторами ризику зберігання зерна і зниження вартості зернової сировини відбувається значне подорожчання енергоносіїв, що призводить до збільшення вартості процесу сушіння. Іншими словами, підвищуються вимоги до ретельного дотримання технологічних параметрів сушіння із одночасною економією енергоносіїв. Тому дослідження, спрямовані на енергетичне вдосконалення технології

сушіння зерна, підвищення ефективності використання електроенергії, обґрунтування раціональних параметрів та режимів роботи електрообладнання, є актуальними і своєчасними.

**Об'єктом дослідження** є процеси сушіння зерна активним вентиляванням атмосферним та підігрітим повітрям.

**Предметом досліджень** є залежності енергозатрат від режимів роботи і параметрів електротепловентиляційних установок для активного вентилявання зерна.

**Мета і задачі досліджень.** Мета роботи полягає у зменшенні витрат енергії на доведення зерна до кондиційного за вологістю стану шляхом застосування диференційованих режимів роботи електроустановок для активного вентилявання і сушіння зерна атмосферним і підігрітим повітрям.

Для досягнення цієї мети сформульовані такі задачі:

– обґрунтувати перспективні напрямки підвищення енергоефективності процесів сушіння зерна і режимів роботи тепловентиляційних установок;

– обґрунтувати і оцінити енергетичну і технологічну ефективність режимів роботи електровентиляційних установок із диференціюванням за потужністю співвідношення нагрівання і транспортування повітря;

– удосконалити математичні моделі процесу видалення вологи із зерна в нерухомому шарі;

– обґрунтувати параметри електровентиляційного обладнання та режими його роботи.

**Методи досліджень** ґрунтуються на основних положеннях теорії сушіння, тепло- і масопереносу, математичного моделювання з використанням комп'ютерних технологій.

НУБІП України

## РОЗДІЛ 1

# КЛАСИФІКАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ ЗЕРНА В АГРОПРОМИСЛОВОМУ КОМПЛЕКСІ

## 1.1. Основні положення управління процесами зберігання зерна

Сушіння є основною технологічною операцією по приведенню зерна і

насіння у стійкий стан, який необхідний для їх тривалого зберігання. Зерно

під час зберігання живе і дихає, хоча при цьому усі його життєві функції

зведемо до мінімуму. При диханні відбуваються хімічні перетворення, які

наприкінці зводяться до споживання крохмалю. Сушіння і охолодження зерна

дозволяють досягнути максимально низьких втрат на дихання під час

зберігання.

Зі зменшенням вологості зерна знижується інтенсивність дихання

зернової маси, пригнічується життєдіяльність мікроорганізмів і шкідників

зерна. Процес післязбирального дозрівання і свіжезбраному зерні при

сушінні прискорюється, зернова маса при вирівнюється за вологістю та

ступенем зрілості.

Межі вологості, до яких повинно бути висушене зерно, мають велике

значення для забезпечення його збереження. Зерно із низькою вологістю, що

пройшло післязбиральне дозрівання зберігає життєздатність при незначному

рівні дихання. В умовах постійної температури, чим вищою є вологість

зернової маси, тим швидше наростає енергія дихання, при чому цей процес

відбувається нерівномірно. Це пов'язано із появою у зерні вільної води.

При низькому вмісті вологи в зерні вода, яка ним поглинається,

знаходиться у зв'язаному стані: її міцно утримують білки і крохмаль. При

підвищенні вологості зернової маси у клітинах зерна з'являється вода, яка

слабо або зовсім не утримується крохмалем і білками. Вільна вода легко

переміщується по різних частинах зерна і використовується клітинами для

гідролітичних процесів. При появі вільної води також різко зростає активність ферментів, що приймає участь у диханні.

Вологість зерна, при якій у клітинах з'являється вільна волога і у зерні спостерігається різкий стрибок інтенсивності дихальних процесів, називається *критичною*. Так, наприклад, для пивоварного ячменю критичною вологістю є вологість 14,5%, усе зерно із вологістю вище 14,5% необхідно піддати сушінню.

Основними причинами, що обумовлюють збереженість зерна, є:

1. Висока вологість зерна. Зерно може повторно зволожуватись у процесі міграції вологи внаслідок різниці температур у сховищі, протікання у сховищах через відкриті люки, зернопроводи або при потраплянні ґрунтових вод у нижні зернові шари у сховищі.

2. Висока температура зернової маси.

3. Велика кількість сторонніх та мілких домішок. Мілкі домішки містять подрібнені зернівки та маленькі шматочки ґрунту, насіння бур'янів, незернові частини рослин (соломинки, колоски та ін.). Мілкі та сторонні домішки особливо небезпечні при їх концентрації у окремих зонах сховища.

4. Нерівномірний розподіл температури у сховищі.

5. Недостатнє очищення сховища перед завантаженням зерна.

6. Низький рівень моніторингу і діагностики зберігання зерна.

В цілому, фактори ризику при зберіганні зерна можна розділити на три групи: фізичні, біологічні та хімічні. Фізична група містить вологість і температуру зерна, його фізико-механічні властивості, зернові та інші домішки. Біологічні фактори – це комахи, пліснява, токсини та ін. До складу хімічної групи входять техногенні забруднення навколишнього середовища, порушення технології вирощування, обробки та зберігання зерна.

Основними факторами псування зерна є пліснява та комахи. Пліснява добре розвивається у теплому і вологому зерні. Для комах також необхідне середовище підвищеної температури. Оптимальне значення температури зерна – 15...38°C, однак комахи можуть розвиватися і у досить холодному

зерні [3]. У будь-який момент при зберіганні зерна в діапазоні температур 15...38°C і при вологості, що перевищує оптимальну для безпечного зберігання, існує велика ймовірність розвитку плісняви, комах і хвороб. Слід зауважити, що при самозигріванні найбільше страждає від хвороб кукурудза.

Оскільки пліснява і комахи добре розвиваються при приблизно однакових умовах зовнішнього зернового середовища, то пліснявіде зерно стає привабливим об'єктом для комах, і навпаки, зерно із комахами починає пліснявіти. Деякі види комах живляться пліснявою і є переносниками пліснявих спор. За цими причинами невеликі осередки із пліснявою і комахами можуть швидко перетворюватися у великі зони із підвищеними температурами, що містять запліснявілі корки та грудки, які виділяють неприємний запах.

Значення вологості зерна, при яких можна запобігти розвитку плісняви і комах, залежать від його температури, тривалості прогнозованого періоду зберігання, виду культур та первинної якості зерна (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1.

Рекомендовані максимальні значення вологості зерна (%) основних культур

для різних періодів зберігання і використання 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
Чресо	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 і комах залежать від комбінації значень температур і вологості зерна (рис. 1.1). Наприклад, зерно із підвищеною вологістю може бути збереженим протягом певного часу при зберіганні його в охолодженому стані.

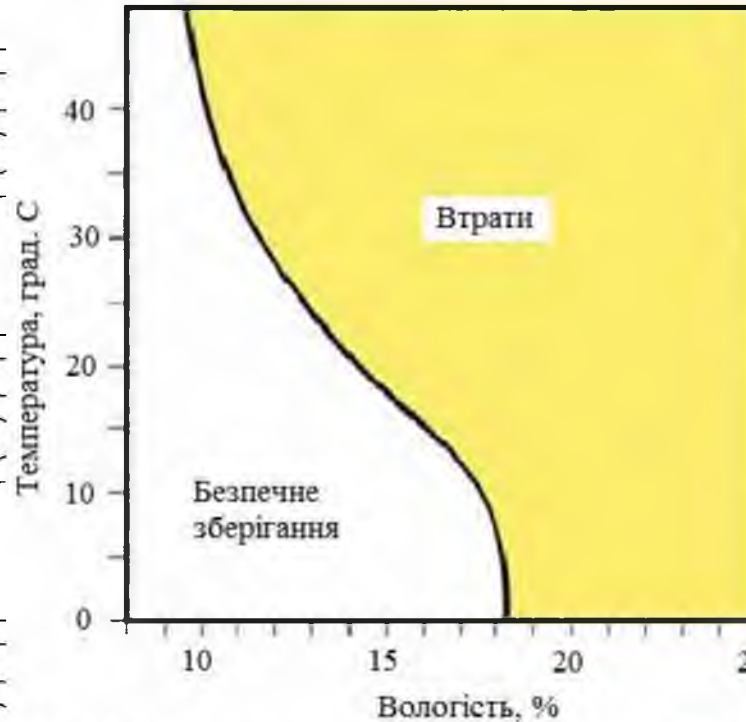


Рис. 1.1. Области безпечного зберігання і втрати якості зерна

Надзвичайно важливо під рекомендованими для безпечного зберігання значеннями вологості зерна розуміти максимальне значення вологості зернівки, а не усереднене значення усієї зернової маси. Якщо волога зернівка зберігається поруч із сухою, частина вологи від першої буде переходити до другої, поки різниця вологості між зернівками не складе 1-2%. Однак перенос вологи від однієї зернівки до іншої – досить тривалий процес. При наявності вологих зернівок у сховищі вони переважно розміщуються у зерновій масі пошарово або у локальних осередках. Таким чином, навіть якщо середня вологість зерна менша за безпечні для зберігання значення, пліснява може розвиватися в осередках із підвищеним вологовмістом.

## 1.2. Способи та технологічні установки для сушіння зерна

# НУБІП УКРАЇНИ

Основна кількість вологи у зерні міцно пов'язана із сухою речовиною, видалити її із зерна вдається лише при випаровуванні. Необхідно витратити певну енергію на подолання сили зв'язку вологи із сухою речовиною, а також на теплоту пароутворення. Таке сушіння називається *тепловим*.

# НУБІП УКРАЇНИ

За найважливішою класифікаційною ознакою – *способом підведення теплоти*, сушарки бувають: *конвекційні* (матеріал, що сушиться, омивається потоком попередньо нагрітого сушильного агента); *кондуктивні*, або *контактні* (безпосередній контакт матеріалу, що сушиться, із нагрітою поверхнею); *сублімаційні* (видалення вологи у замороженому стані під вакуумом); *радіаційні* (сушіння під дією інфрачервоного випромінювання); *високочастотні* (видалення вологи під дією електричного поля високої частоти) [3,4,7].

# НУБІП УКРАЇНИ

Конвекційні сушарки поділяються на установки низькотемпературного та високотемпературного сушіння.

# НУБІП УКРАЇНИ

За режимом роботи – неперервної та періодичної дії.

# НУБІП УКРАЇНИ

За станом зернового шару із щільним нерухомим, рухомим, псевдоскрапленим та зваженим шаром.

За типом нагріву агента сушіння – із прямим і непрямим нагрівом. У сушарках із прямим нагрівом агент сушіння являє собою суміш атмосферного повітря та топкових газів; в таких сушарках висувуються особливі вимоги до якості палива. У сушарках із непрямим нагрівом агентом сушіння є чисте атмосферне повітря, що нагрівається у теплообміннику теплогенератора.

# НУБІП УКРАЇНИ

За принципом дії – прямоточні та протиточні (рециркуляційні). У прямоточних сушарках зерно проходить через сушильну шахту один раз, можливе зниження його вологості залежить від прийнятого режиму сушіння.

# НУБІП УКРАЇНИ

Для прямоточних сушарок необхідні партії зерна із однаковою початковою вологістю, різниця за вологістю окремих партій зерна не повинна

перевищувати 2-3%. У рециркуляційних сушарках на відміну від прямоточних частина зерна, що випускається з сушарки змішується із етим зерном і знову повертається до сушарки. Завдяки цьому можна висушити зерно із початковою високою вологістю до сухого стану, запобігаючи зайвих витрат на завантажувально-розвантажувальні роботи. Крім того відпадає необхідність формування партій зерна за вологістю.

За конструктивними ознаками існує велика різноманітність зерносушарок для різного виду сировини, кліматичних умов, продуктивності: шахтні, барабанні, тунельні, модульні, колонкові, конвеєрні, карусельні, мобільні та ін.

В Україні на підприємствах галузі хлібопродуктів найбільш поширеними є шахтні зерносушарки.

Стаціонарні сушарки неперервної дії є основним технічним засобом сушіння у великих господарствах, на елеваторах, оскільки: дають можливість налагодити поточне виробництво; забезпечують високу швидкість сушіння; виключають можливість простоїв сушарки внаслідок періодичного завантаження – вивантаження зерна.

Усі сушарки для зерна шахтного типу відрізняються наступними перевагами: висушують будь-які сипкі культури; здійснюють рівномірне просушування матеріалу; більшість сучасних зерносушарок здійснюють повернення нагрітого повітря у сушарку (рециркуляція теплоносія), що дає можливість сушіння дуже вологого зерна; мають "середню" вартість інвестицій та невисокі операційні витрати.

Агрегати оснащені системами теплоізоляції та аспірації. Шахтні сушарки у мінімальній комплектації складаються з елементів, що дають можливість почати сушіння одразу після встановлення механізмів.

Окрім сушарок СЗШ-16, ДСП50, в Україні добре зарекомендували себе закордонні шахтні зерносушарки Law, Strahl (включаючи суб-бренди Mulmix та Kika), Ravaro, Buhler, Stela, Petkus, а також двохзонні Satig і Scolari.

### 1.3. Принцип роботи шахтних зерносушарок

# НУБІП УКРАЇНИ

Однією з найбільш поширених є така техніка зерносушіння, коли сушіння зерна здійснюється у малорухомому гравітаційному щільному шарі.

# НУБІП УКРАЇНИ

За цим принципом працюють шахтні зерносушарки із коробами підведення та відведення, що розташовані у шахтовому порядку. У таких зерносушарках зерно рухається зверху вниз, проходячи послідовно певну кількість коробів

# НУБІП УКРАЇНИ

підведення та відведення теплоносія, які утворюють прямоточне або

перехресне продування рухомого потоку зерна агентом сушіння, який надходить з одного боку шахти в короба підведення, проходить шар зерна і виходить з протилежного боку шахти через короба відведення. Агент сушіння

# НУБІП УКРАЇНИ

виконує роль як тепло-, так і вологоносія. Температура агента сушіння не повинна падати нижче визначених меж, оскільки зі зниженням температури його відносна вологість збільшується, а вологовміст зменшується.

Короб являє собою канал із відкритою нижньою стороною, через яку агент сушіння входить у зерновий шар або виходить із нього (рис. 1.2). Під

# НУБІП УКРАЇНИ

нижньою відкритою стороною коробка зерно розташовується під кутом

природнього відкосу. Одна з торцевих сторін кожного коробу відкрита, інша –

заглушена. Короба підведення відкриті з боку входу агента сушіння і заглушені з боку його виходу із шахти. Короба відведення навпаки, закриті з

# НУБІП УКРАЇНИ

боку входу і відкриті з боку виходу агента сушіння із шахти. Короба

виготовляють з листової оцинкованої сталі товщиною 1,5...2 мм.

# НУБІП УКРАЇНИ

Шахтні прямоточні зерносушарки працюють у режимі неперервної дії.

Зерно рухається у шахті суцільною масою зі швидкістю, яка визначається роботою випускного механізму періодичної або неперервної дії. Необхідний

рівень зерна у сушарці контролюється датчиками мінімального LS(2) і

максимального LS(1) рівня, що встановлені у надсушильних бункерах (рис.

1.3). Датчики рівня керують роботою порційного розвантажувального пристрою: при досягненні мінімального рівня зупиняється електродвигун

розвантажувальних кареток М1, при досягненні максимального рівня та наявності керуючого сигналу електродвигун розвантажувальних кареток вмикається знову.

Сушильний агрегат складається з двох камер – шахт, встановлених паралельно. Між ними знаходиться розподільна камера, яка розділена на три зони горизонтальними перегородками. До кожного з сегментів підведені нагнітальні газоходи (рис. 1.4).

До двох верхніх зон підведений агент сушіння, а до нижньої зони – охолоджене повітря. В результаті кожна шахта розділяється на три зони. Дві верхні призначені для нагрівання і сушіння, а нижня для охолодження. При цьому у першій зоні сушіння видаляється поверхнева волога, температура регулюється форсуною теплоблоку; в другій зоні сушіння випаровується капілярна волога, тут нижча температура, яка регулюється заслінками у каналі підведення. Бункери для зерна розташовані над шахтами. Шахти і бункери кріпляться на металевих швелерах, які закріплені на фундаменті.

У дніщі сушильних відсіків розташовані випускні пристрої. Затворами роликового підвісного типу забезпечується рівномірний випуск зерна. На дві шахти приходиться 16 таких отворів. Кожен із затворів періодично відкривається електроприводом, який отримує команду від керуючого пристрою. Зачиняється затвор за допомогою повертальної пружини. Під його рамою знаходяться розвантажувальні бункери.

Температура сушильного агента – основний параметр сушіння, він тісно пов'язаний з температурою нагріву зерна. При високих температурах схожість насіннєвого зерна може суттєво знизитися, також руйнуються деякі види протеїну продовольчого зерна, погіршуються хлібопекарські властивості муки. Ступінь термічного пошкодження зерна залежить від вихідної якості вологи, температури і тривалості впливу сушильного агента. При цьому слід чітко розрізняти значення допустимих температур нагріву зерна і сушильного агента (повітря). Температура зерна не вимірюється безпосередньо у сушарці із прийнятною точністю внаслідок динаміки

процесів сушіння, хоча датчики температури зерна і розміщуються у декількох зонах зерносушарки. Тому на практиці вимірюють температуру сушильного агента перед входом в шахту та після виходу з неї.

При обґрунтуванні безпечних температур сушіння необхідно враховувати той факт, що у масі насіння можуть знаходитись зерна із різною термічною стійкістю. Безпечні температури для деякої частин насіння можуть перевищувати значення температур для термічно менш стійкого насіння, внаслідок чого схожість останніх може суттєво знизитись. В зв'язку з цим при виборі безпечних температур сушіння слід враховувати поправку на менш стійку в термічному відношенні частину зерна.

Оператори зерносушарок, у яких температура зерна не досягає температури сушильного агента, обов'язково повинні зважати на рекомендації виробників зерносушарки, із якою працюють. Наприклад, деякі виробники рекомендують для своїх шахтних зерносушарок значення температур, наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2.

Максимальні значення температур сушильного агента і зерна  
в шахтних зерносушарках

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

## РОЗДІЛ 2

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

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

Зерносушарка – це ОК, що характеризується значною кількістю вхідних та вихідних параметрів. На показник якості сушки впливає такий фактор як температура повітря.

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

Стабілізацію температури сушильного агенту здійснюють за допомогою витрати палива, яке подається в повітрянагрівач, або за допомогою регулювання швидкості надходження повітря з навколишнього середовища. Враховуючи конструкцію сушарки, для використання відпрацьованого сушильного агенту, доцільно обрати другий спосіб.

Повітрянагрівачі на рідкому або газоподібному паливі при наявності камери згорання мають складний процес теплообміну, який протікає в умовах рухомого та випромінюючого середовища в взаємному зв'язку окремих процесів (рух середовища, дифузія, горіння, зміна фізичних властивостей та складу середовища і т.д.). У силу складності вихідної системи рівнянь, що описують усю сукупність процесів теплообміну, при визначенні динамічних характеристик повітрянагрівачів можна використовувати спрощене рівняння теплового та матеріального балансів. Аналітичний метод визначення динамічних характеристик допускає усереднення рушійних сил взаємодіючих середовищ і прийняття умови лінійності зміни показників процесу по всій довжині теплообмінного апарата.

Для сільськогосподарських повітрянагрівачів динамічні характеристики є функціями від часу температури теплоносія при зміні витрати палива або електроенергії.

До повітрянагрівачів прямого нагрівання відносяться повітрянагрівачі, у яких теплоносії одержують змішуванням топкових газів із повітрям. Тепло, одержуване в результаті згорання розпилювального палива, частково передається випромінюванням й конвекцією через стінки камери згорання, а інша частина – безпосереднім змішуванням топкових газів із повітряним потоком.[1] Передача тепла через стінки камери згорання й визначає інерційність об'єкта, його динамічні властивості. Тому задача одержання динамічної характеристики об'єкта зводиться в основному до визначення кількості тепла, переданого через стінку та акумульованого в ній при перехідному режимі.

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

Зерно має значний вміст вологи. Для його кращого зберігання і поліпшення умов транспортування вміст вологи в зерні необхідно зменшити.

По даних Сакуна В.А. зернові вважаються сухими коли частка вологи в них складає менше 0,14%, середньої сухості 0,14 – 0,16%, вологими 0,16 – 0,17%, а для зерна вівса і кукурудзи 0,16 – 0,18% і мокрими, коли частка вологи перевищує 0,17%, а для зерна вівса і кукурудзи 0,18%.

Існує багато способів зменшення вологи, але в даному випадку вологу слід видалити із зерна шляхом видаровування, тобто за допомогою сушіння. Розповсюдженим способом сушіння зерна в промислових зерносушарках є конвекційне сушіння, тобто сушіння в потоці сушильного агента – нагрітого повітря та регулюванням випускним механізмом.

Процес сушіння пов'язаний з підводом до зерна, яке висушуємо, тепла, за рахунок якого проходить випарювання вологи. Для відведення випареної

вологи використовують повітря, або суміш повітря з продуктами згоряння палива, яке насичується вологою, що дифундує з поверхні зерна.

Через це сушіння з одного боку є дифузійним процесом, а з іншого – тепловим. Це складний технологічний процес, в результаті якого змінюються властивості зерна.

Процес сушіння зерна починається з випаровування води з поверхні зерна. Із зменшенням води на поверхні починається дифузія води із середини зерна до його поверхневої частини. Із зменшенням вмісту води під час процесу сушіння температура на поверхні і у внутрішній частині поступово підвищується.

Коли середня вологість зерна досягає рівноважного значення, тобто стає рівною гігротермічному вологовмісту повітря навколишнього середовища, сушіння зерна закінчується. Температура зерна в цей час стає близькою до температури сушильного агента – повітря.

В результаті дослідження процесу сушіння ми можемо отримати цілий ряд кінетичних кривих. Кривою *кінетики сушіння* є зміна середнього вологовмісту зерна під час процесу сушіння. Кривою *кінетики нагрівання матеріалу* є зміна середньої по об'єму температури зерна під час процесу

сушіння. [1]  
Сушіння поділяється на два етапи. На першому етапі видаляється вода, яку можна розглядати, як випарювання води з вільної поверхні.

На другому етапі видаляється зв'язана вода. В цей період тиск водяної пари на поверхні матеріалу стає функцією від температури матеріалу і його вологості на поверхні. По табличних даних було отримане рівняння залежності тиску насиченої водяної пари від температури, мм. рт. ст.:

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

(2.1)

Це рівняння можна використати для визначення вологовмісту парової суміші (кг водяної пари/кг сухого повітря).

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

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

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

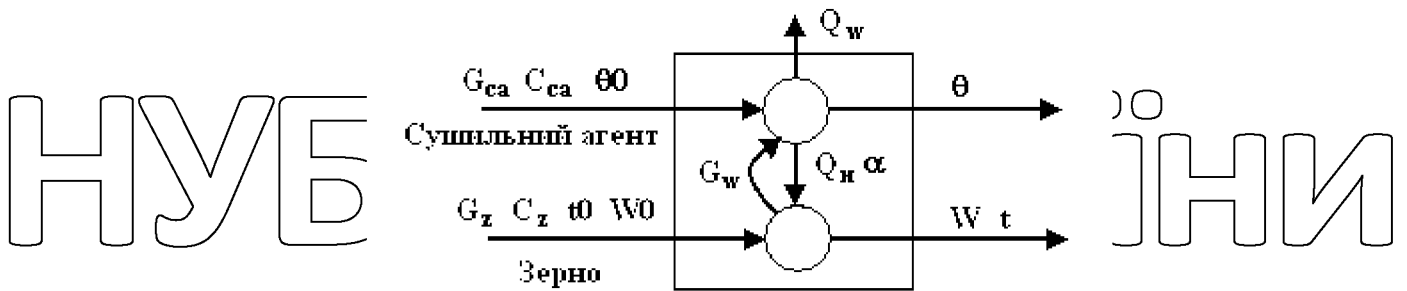


Рис. 2.1. Структурна схема процесу сушіння зерна

В структурній схемі процесу сушіння:  $G_{ca}$ ,  $G_z$  – витрати сушильного агента і зерна,  $C_{ca}$ ,  $C_z$  – теплоємність сухого повітря і зерна,  $t_0$  і  $\theta_0$  – початкові значення температури зерна і сушильного агента,  $t$  і  $\theta$  – температури цих самих продуктів на виході сушарки,  $W_0$  і  $W$  – початковий і кінцевий вологовміст зерна,  $G_w$  – випарена волога із зерна,  $Q_n$  і  $Q_w$  – витрати тепла на нагрівання зерна і випарювання вологи,  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі від повітря до зерна. Наведемо рівняння енергетичних балансів по сушильному агенту, гарячому повітрю і зерну. Вважаємо, що тепло нагрітого повітря витрачається на підігрівання зерна і випарювання вологи з нього:

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

Матеріальний баланс по зерну:

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

де:  $Q_{ca\text{ вих.}}$ ,  $Q_{z\text{ вих.}}$ ,  $G_{t\text{ вих.}}$  – витрати тепла сушильного агента і зерна, а також маса зерна на виході із сушарки.

Так як перший період займає незначну частину часу сушіння зерна, то ми розглянемо сушіння основного другого періоду. В цей період сушіння пов'язане з переміщенням вологи всередині матеріалу. Рушійною силою цього періоду сушіння є різниця між вологовмістом зерна  $W$  і рівноважним вологовмістом  $W_p$ . Швидкість сушіння тоді матиме вигляд:

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

де  $K$  – коефіцієнт сушіння, який характеризує інтенсивність процесу вологообміну.

Коефіцієнт сушіння  $K$  знаходиться експериментально. Якщо на другому етапі швидкість сушіння представити прямою, то коефіцієнт сушіння буде рахуватися 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 (зернини), яке висушуємо, м;  $\beta$  – коефіцієнт зовнішнього вологообміну, м/с;  $a_m$  – коефіцієнт провідності масопереносу, м<sup>2</sup>/с.

Коефіцієнт провідності масопереносу аналогічний коефіцієнту температуропровідності і залежить в основному від форм зв'язку вологи з матеріалом і температури матеріалу і визначає внутрішній перенос вологи.

Допускаємо, що процес нагрівання частинок матеріалу (зернин) безградієнтний, а вологість по об'єму рівномірна і втрат в навколишнє середовище немає. Складемо рівняння теплового балансу для визначення зв'язку між нагріванням і швидкістю сушіння. Для періодичного процесу сушіння це буде рівняння, де температура і вологовміст змінюється в часі:

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

Для безперервного процесу температура і вологовміст зерна змінюється по довжині сушарки:

$$\frac{d\bar{\theta}}{dx} G \cdot c - \frac{d\bar{W}}{dx} r G_0 = \alpha \cdot F (t - \bar{\theta}) \quad (2.8)$$

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

Розглянемо процес сушіння в сушарці безперервної дії. Математична модель сушарки буде спрощеною і не враховувати першого етапу сушіння, етапу нагрівання зерна. Коефіцієнт тепловіддачі від сушильного агенту до зерна також буде вважатися постійною величиною. Значення змінних в рівняннях для визначення коефіцієнту сушіння  $K$ , рівноважного вологовмісту  $W_p$  використані по даних вчених, які вивчали процес сушіння зерна, наприклад Сеакова В.Ю.

Таким чином рівняння рівноважного вологовмісту, в частках до вмісту сухих речовин, має вид:

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

Значення відносної вологості повітря знаходимо з рівняння:

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

Коефіцієнт сушіння,  $1/c$ , знаходимо з рівняння:

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

Рівняння статички процесу сушіння, перетворимо на рівняння динаміки і складемо систему диференційних рівнянь по температурі зерна, сушильного агенту (повітря) в град С і вмісту вологи у зерні, в частках. Приведемо рівняння:

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

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

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

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

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

Вихідними даними математичної моделі для сушки зерна будуть такі:

Витрати зерна на сушіння складають  $G_z = 16,7 \text{ кг/с}$ , або  $60 \text{ т/год}$ , температура зерна  $t_0 = 15 \text{ град С}$ , а його теплоємність  $C_z = 3000 \text{ Дж/(кг град)}$  а початковий вологовміст  $W_0 = 0,25$ . Сушильний агент, гаряче повітря, подається в кількості  $G_{ca} = 25 \text{ кг/с}$  з температурою  $\theta_0 = 95, \text{ град С}$ , і теплоємністю  $C_{ca} = 1050 \text{ Дж/(кг град)}$ . Прийнято, що питома поверхня зерна  $\sigma = 2,47 \text{ м}^2/\text{кг}$ , вологовміст пароводяної суміші в сушарці  $dn = 0,012 \text{ кг пари/кг сухого повітря}$ , теплота пароутворення  $r = 2500 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$ , барометричний тиск  $P_b = 750 \text{ мм рт. ст.}$ , коефіцієнт тепловіддачі від повітря до зерна  $\alpha = 10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{град)}$ . [1]

Розробимо модель в середовищі Simulink MATLAB. Так як модель достатньо громіздка, розіберемо її на дві частини. В основній частині (рис. 2.2.) розмістимо рівняння, які представляють із себе систему диференційних

рівнянь і розраховують температуру зерна, температуру повітря і вологовміст зерна.

# НУБІП України

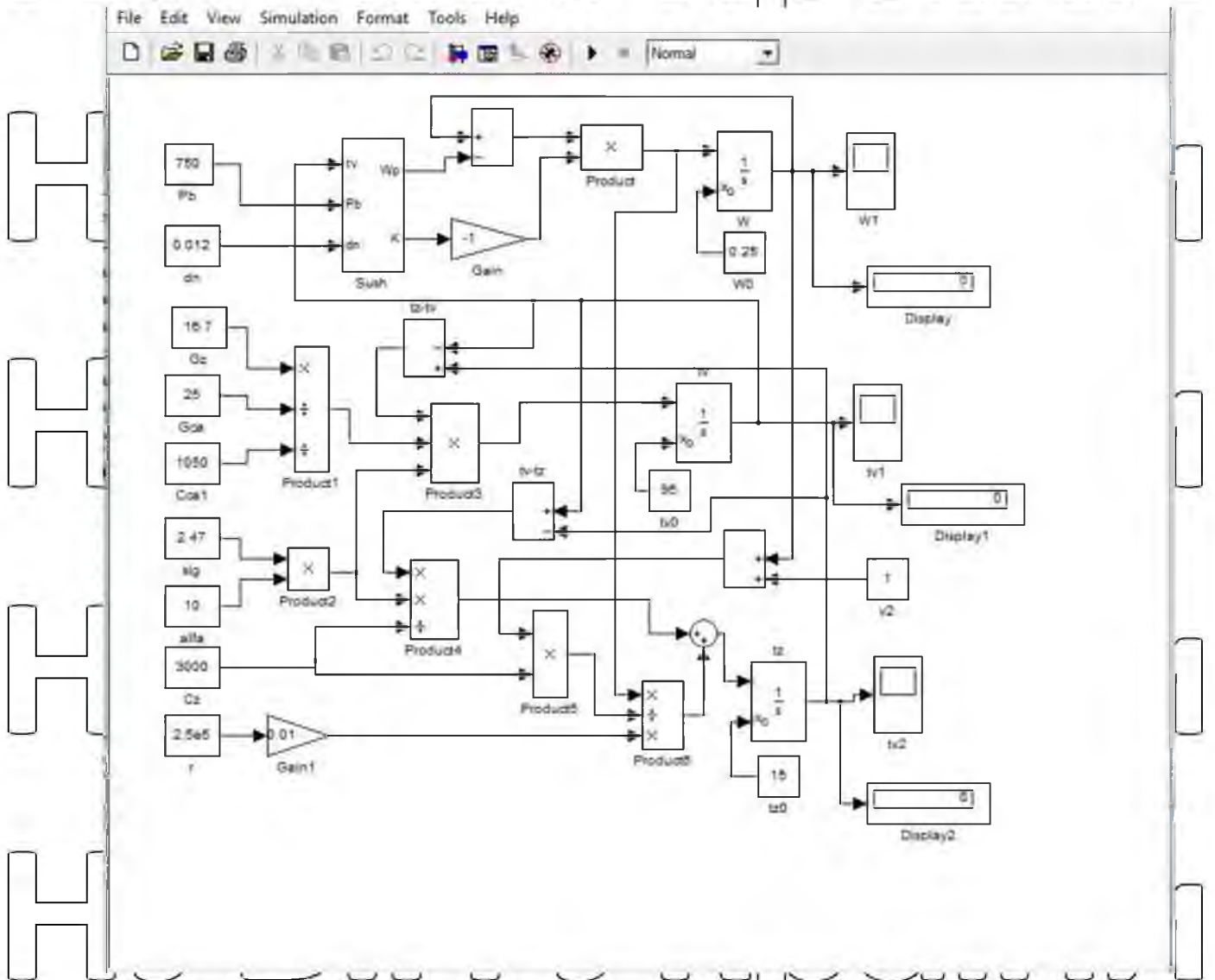


Рис. 2.2. Імітаційна модель зерносушарки в середовищі Matlab Simulink

Для допоміжних рівнянь, які дають тиск насиченої водяної пари, відносну вологість повітря, рівноважний вологовміст і коефіцієнт сушіння створимо підсистему (рис. 2.3.).

# НУБІП України

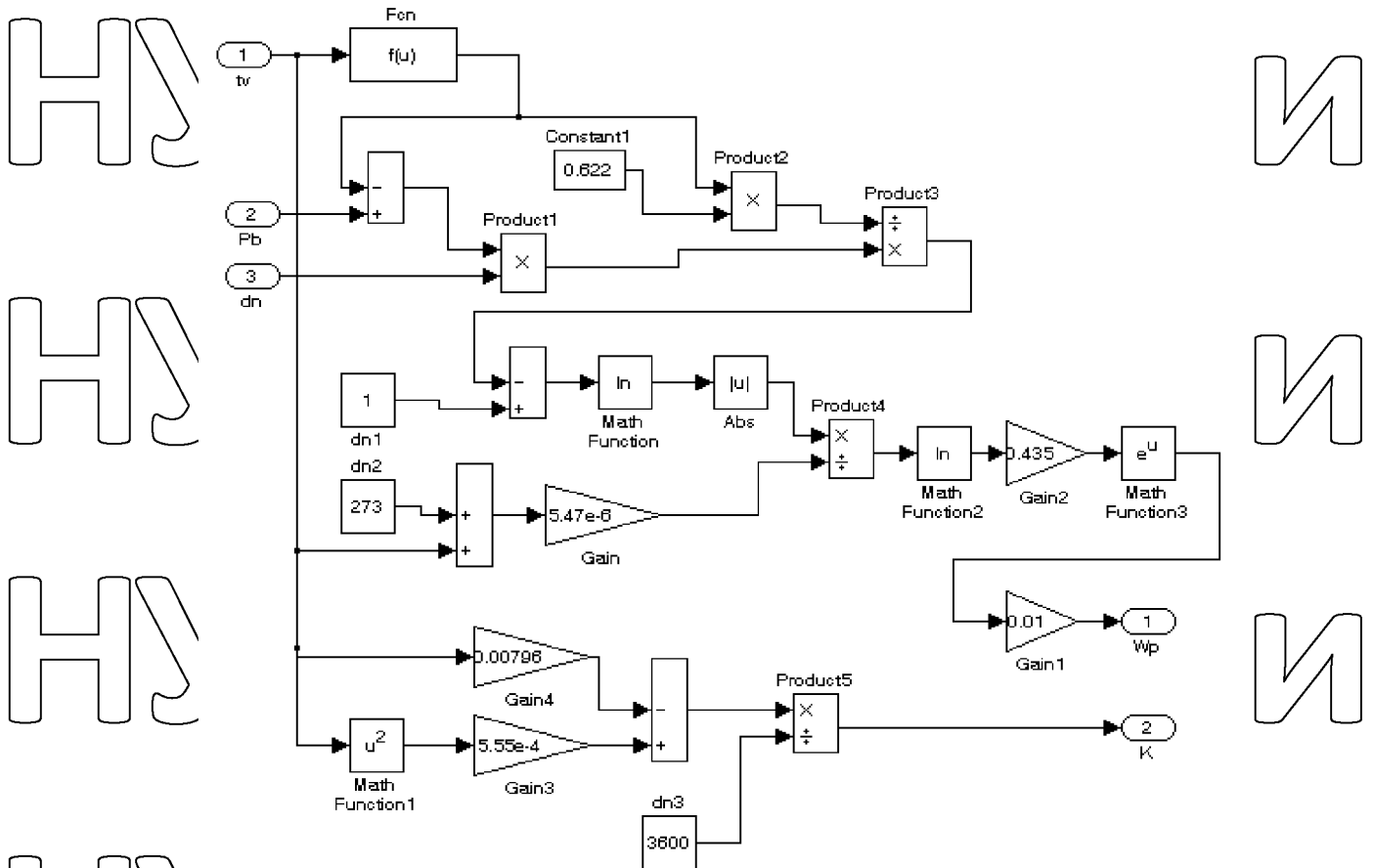


Рис. 2.3 Імітаційна модель підсистеми моделі сушарки в середовищі Matlab Simulink

Підсистема створюється виділенням частини моделі і використанням пункту меню **Edit**  $\Rightarrow$  **Create Subsystem**. Порти вводу і виводу підсистеми позначимо з використанням позначень змінних моделі. Для введення поліному, що рахує тиск насиченої пари використаємо блок **Fcn** із бібліотеки **Functions & Tables**. Вхідні дані введемо за допомогою блоків **Constant**, а результати, значення температури зерна, повітря і вологовмісту зерна виведемо на віртуальний осцилограф **Scope**. Встановимо час сушіння (моделювання) 1500 секунд. Для цього в параметрах моделювання **Simulation**  $\rightarrow$  **Simulation Parameters** у вікні **Stop time** введемо число секунд.

В результаті проведеної операції отримаємо розгінні криві температур зерна (рис. 2.4) і сушильного агенту під час сушіння (рис. 2.5) і криву зміни вологовмісту зерна (рис. 2.6).

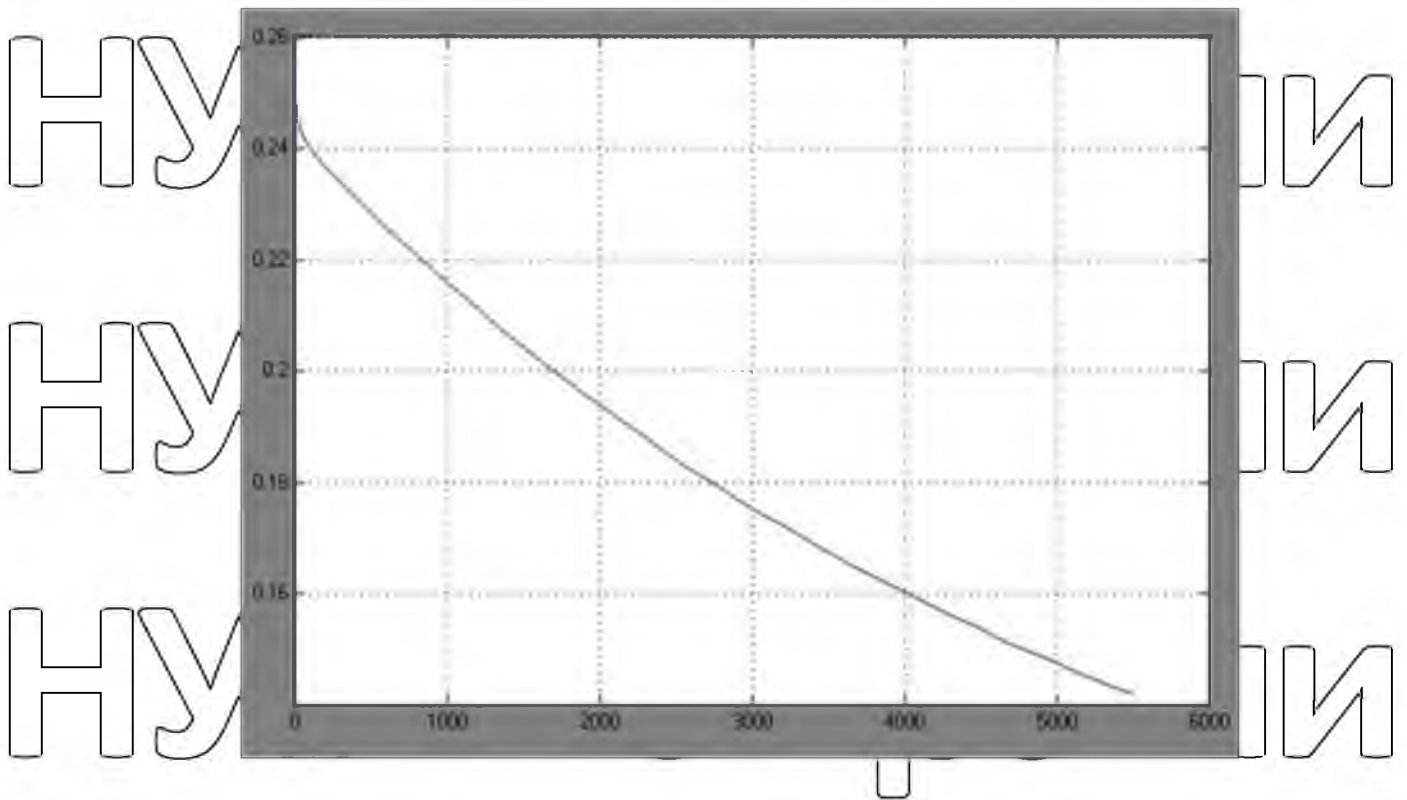


Рис. 2.6. Зміна вологовмісту зерна під час його сушіння

Знайдемо передаточну функцію об'єкта керування.

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

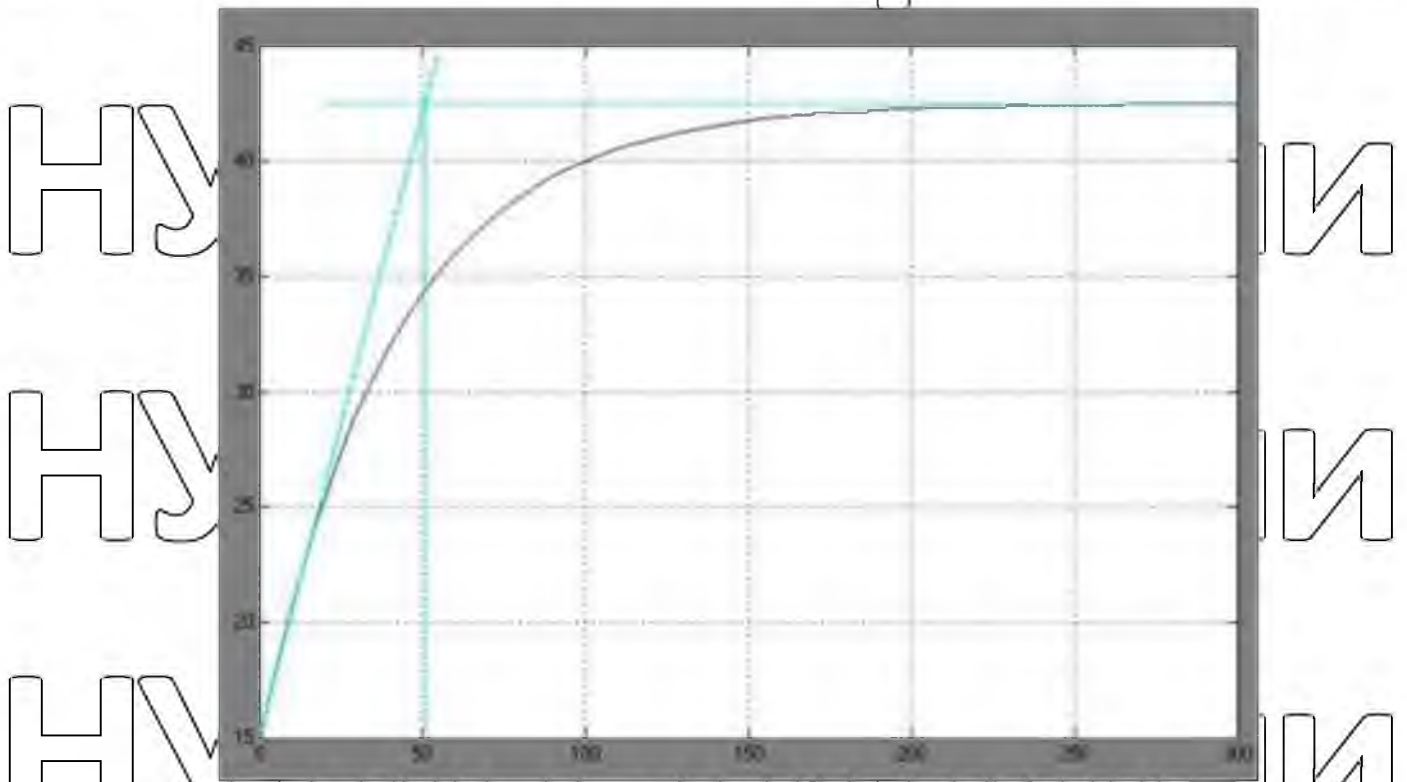


Рис 2.7. Розгінна характеристики ОК

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

Час запізнення для каналу регулювання складає, с:

$$\tau_3 = \frac{V_{труб}}{V_{c.a.}} \quad (2.15)$$

Де  $V_{труб}$ ,  $m^3$  – об'єм трубопровода, по якому подається сушильний агент,  
 $V_{c.a.}$ ,  $m^3/c$  – об'єм сушильного агенту.

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

де  $R$  – радіус трубопровода,  $L$  – довжина трубопровода.

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

$$V_{c.a.} = \frac{G_{ca}}{\rho} \quad (2.18)$$

де  $\rho$  – густина гарячого повітря при температурі  $90^\circ C$ .

$$V_{c.a.} = \frac{25}{1.293} = 19.33 m^3/c \quad (2.19)$$

Тоді час запізнення:

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

Коефіцієнт передачі

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

де  $\Delta x$  – зміна кількості сушильного агенту,  $\Delta y$  – зміна температури, до якої потрібно нагрівати зерно.

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

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

де  $y_1$  – температура нагрітого зерна при початковій температурі  $15^\circ C$  та кількості сушильного агенту  $x_1 = 25$  кг/с,  $y_2$  – температура нагрітого зерна при початковій температурі  $15^\circ C$ , та кількості сушильного агенту  $x_1 = 20$  кг/с.

$$K = \frac{42.27 - 38.53}{25 - 20} = 0.75^{\circ}\text{C} \cdot \text{с/кг}, \quad (2.24)$$

Тоді 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 об'єктів керування дають змогу, на стадії проектування, визначити алгоритм керування. Для цього проаналізуємо співвідношення між сталою часу та часом запізнення об'єкта керування. Залежності вибору закону регулювання наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Залежності вибору закону

Закон керування	Позиційний	Лінійний	Імпульсний
$\tau/T$	$< 0.2$	$0.2 < \tau/T < 1$	$> 1$

Провівши розрахунки ми отримали таке співвідношення

$$\frac{\tau}{T} = \frac{0.52}{51} = 0.01 < 0.2 \quad (2.26)$$

Спираючись на дані наведені в таблиці №1, ми можемо обрати позиційний закон керування. Але, так, як позиційний алгоритм керування характеризується значною амплітудою автоколиваний, особливо для такого інерційного об'єкта, як сушарка, в якій САР температурою потребує високої точності, високої швидкості регулювання та відсутності перерегулювання, то доцільно вибрати лінійний закон регулювання.

Визначаємо динамічний коефіцієнт регулювання  $R_d$ .

Враховуючи, що об'єкт керування статичний та перехідний процес аперіодичний, значення динамічного коефіцієнту розраховуємо за формулою (2.27).

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

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

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

Далі за графічними залежностями (рис. 2.8) дістанемо алгоритм керування. Згідно графіка розгінної характеристики обираємо залежність динамічного коефіцієнта регулювання від динамічних властивостей об'єкта керування для типового перехідного процесу.

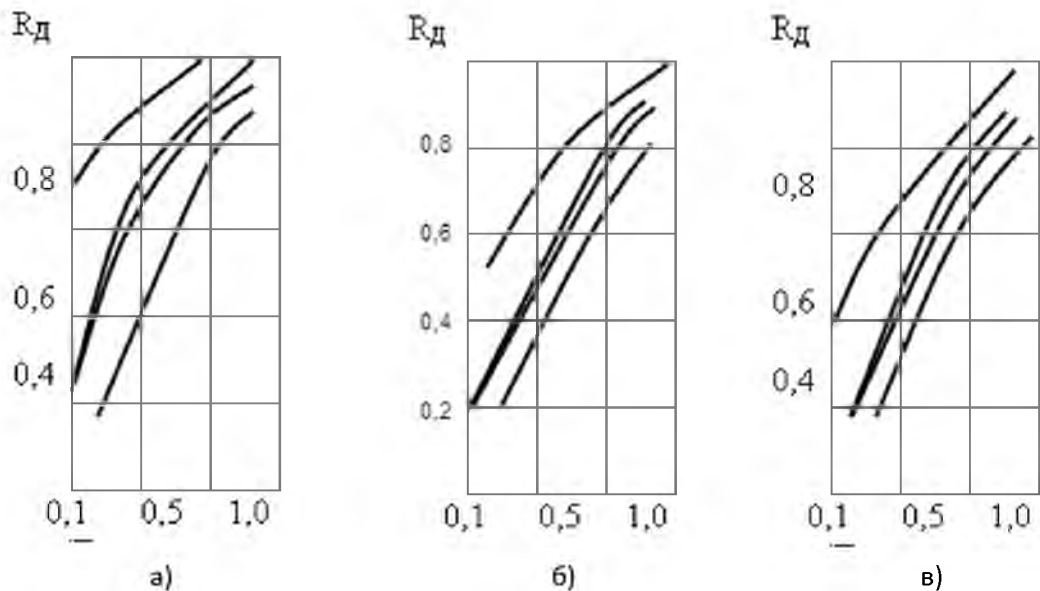


Рис. 2.8. Залежність динамічного коефіцієнта регулювання від динамічних властивостей об'єкта керування:

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

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

Згідно графіка розгінної характеристики обираємо залежність динамічного коефіцієнта регулювання від динамічних властивостей об'єкта керування для типового перехідного процесу з 20% перерегулюванням.

Перевіряємо, чи забезпечить даний алгоритм керування заданий час регулювання, для цього визначимо  $\psi$  з даних наведених в таблиці 2

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

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

З розрахунків видно, що вибраний алгоритм керування здатний забезпечити заданий час регулювання, так як виконується умова  $t < T_{ок}$ , тобто

$$2,86 < 51 \text{ с.}$$

## РОЗДІЛ 3

ВИБІР РЕГУЛЯТОРА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ  
ПАРАМЕТРІВ ЙОГО НАЛАШТУВАНЬ

## 3.1. Реалізація алгоритму керування

Згідно з функціональною схемою автоматизації система керування

складається з:

- програмно-логічного контролера (ПЛК), який отримує інформацію про температуру та рівень зерна від датчиків температури у трьох зонах сушарки та від датчиків рівня (верхній та нижній) зерна температури, і формує сигнали керування частотним перетворювачем та регулятором потужності;

- модуля розширення аналогових входів для підключення до ПЛК аналогових датчиків температури;

- перетворювача частоти, який за ПД-алгоритмом здійснює безпосереднє керування швидкістю обертання валу електродвигуна приводу відцентрового вентилятора, змінюючи витрати повітря;

- електродвигунів приводу транспортерів зерна, електродвигуна приводу повітряного клапану.

### 3.1.1. Вибір промислових пристроїв керування

Для керування технологічним обладнанням згідно із завданням на виконання магістерської роботи обраний програмний логічний контролер MODICON TM238LFDC24DT Schneider Electric (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Програмний логічний контролер  
MODICON TM238LFDC24DT Schneider Electric

Контролер MODICON TM238 – це універсальний модульний програмований контролер для вирішення задач автоматичного керування низького та середнього ступеня складності. Ефективному використанню контролерів сприяє наявність широкій гами центральних процесорів, модулів вводу-виводу дискретних і аналогових сигналів, функціональних і комутаційних модулів, модулів блоків живлення та інтерфейсних модулів.

Основні технічні характеристики ПЛК MODICON TM238 наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1.

## Технічні характеристики ПЛК MODICON TM238LFDC24DT

Напруга живлення	24 В постійного струму
Допустимі межі напруги живлення	19,2...28,8 В
Споживана потужність	17,2 Вт
Кількість дискретних входів/виходів	24
Кількість дискретних входів	8 швидкодіючих входів за EN/МЭК 61131-2 (тип 1) 6 входів за EN/МЭК 61131-2 (тип 2)
Напруга дискретних входів	24 В постійного струму
Кількість дискретних виходів	4 швидкодіючих виходів за EN/МЭК 61131-2 (тип 1) 6 виходів за EN/МЭК 61131-2 (тип 2)
Напруга дискретних виходів	24 В постійного струму
Память	Вбудована 1000 КБ
Напруга живлення датчиків	19,2...30,0 В
Струм дискретного входу	8 мА – швидкодіючий вхід 10,4 мА звичайний вхід
Струм дискретних виходів	500 мА швидкодіючий вихід (нормальний режим) 100 мА швидкодіючий вихід (режим ПИД, режим РТО)
Час відклику	300 нс швидкодіючий вхід 3 мс звичайний вхід 0,25 мс швидкодіючий вихід < 1 мс звичайний вихід
Швидкість передачі даних CANopen	50 Кбіт/с (1000 м) 125 Кбіт/с (500 м) 250 Кбіт/с (250 м) 425 Кбіт/с (125 м) 800 Кбіт/с (50 м) 1000 Кбіт/с (20 м)
Робоча температура навк. середовища	-10...+55°C
Відносна вологість	95% без утворення конденсату
Ступінь захисту	IP20

Для підключення аналогових датчиків температури (термометрів опору) використовується модуль розширення аналогових входів TM2AMM6HT Schneider Electric (рис. 3.2), розроблений для збільшення

технічних можливостей ПЛК різних типів компанії Schneider Electric, зокрема MODICON TM238.



Рис. 3.2. Модуль розширення аналогових входів TM2AMM6HT

### 3.1.2. Вибір первинного вимірювального перетворювача САК

До первинних вимірювальних перетворювачів (ПВП) висуваються наступні вимоги:

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

- висока чутливість;

- стабільність характеристик у часі;

- швидкодія;

- стійкість до хімічних впливів контролюючого і навколишнього

середовища (первинні перетворювачі, розміщені у захисній оболонці);

- мінімальний зворотній вплив на контролюючий параметр та зручність монтажу і обслуговування.

Вимірювальні перетворювачі, що входять до складу регулятора, вибирають в два етапи:

- на першому етапі за типом контрольованого параметра об'єкта керування та умовами його роботи визначається різновид перетворювача;

- на другому етапі, після вибору всіх елементів регулятора за каталогами, знаходять його типорозмір.

ПВП рекомендується підбирати таким чином, щоб межі його вимірювання охоплювали діапазон зміни контрольованої ним величини і були якнайближчими до них, не забуваючи про необхідність забезпечення

необхідної перевантажувальної здатності ПВП і про можливість його підключення до обраного електронного керуючого пристрою регулятора.

При цьому особливу увагу необхідно приділяти швидкодії (інерційності) ПВП, яка характеризується його постійною часу.

Враховуючи вимоги за діапазоном вимірювання та інерційністю, а також особливості підключення датчиків температури до ПЛК типу MODICON TM238 обраний термоперетворювач опору загальнопромислового виконання ТСМУ-2212-50М, технічні характеристики якого наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2.

Основні технічні характеристики термоперетворювача опору ТСМУ-2212

Діапазон вимірюваних температур, °С	-25...+50
Номинальна статична характеристика (НСХ)	50М
Клас допуску	В
Показник теплової інерції, с	8 (при Ø гільзи 6мм)
Ступінь захисту від пилу та вологи	IP55
Матеріал захисної арматури	Ст. 12Х18Н10Т
Діапазон умовного тиску, МПа	0,4...4,0
Стійкість до вібрації	Група вик. N3
Кліматичне виконання	У3

Термоперетворювачі з уніфікованим вихідним сигналом типу ТСМУ призначені для неперервного перетворення температури

середовища (газів, пари, рідин та сипких середовищ) у пропорційний струмовий сигнал 0-5 або 4-20 мА дистанційної передачі. Датчик складається із вбудованого в голівку вимірювального перетворювача із вихідним сигналом 0-5 або 4-20 мА та термозонду (рис. 3.3).

Вимірюваний параметр – температура – лінійно перетворюється термочутливим елементом у пропорційну зміну омичного опору, який в свою чергу, перетворюється вимірювальним перетворювачем у струмовий вихідний сигнал.

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
	-Up	4	
	+Up	1	
Датчик із штуцером	Коло	Конт.	а
	-Up	-Up	
	+Up	+Up	

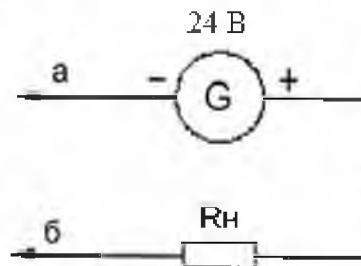


Рис. 3.4. Схема зовнішніх з'єднань датчиків типу ТСМУ із вихідним сигналом 4-20 мА

Для визначення передатної функції ПВП скористаємось його номінальною статичною характеристикою (рис. 3.5).

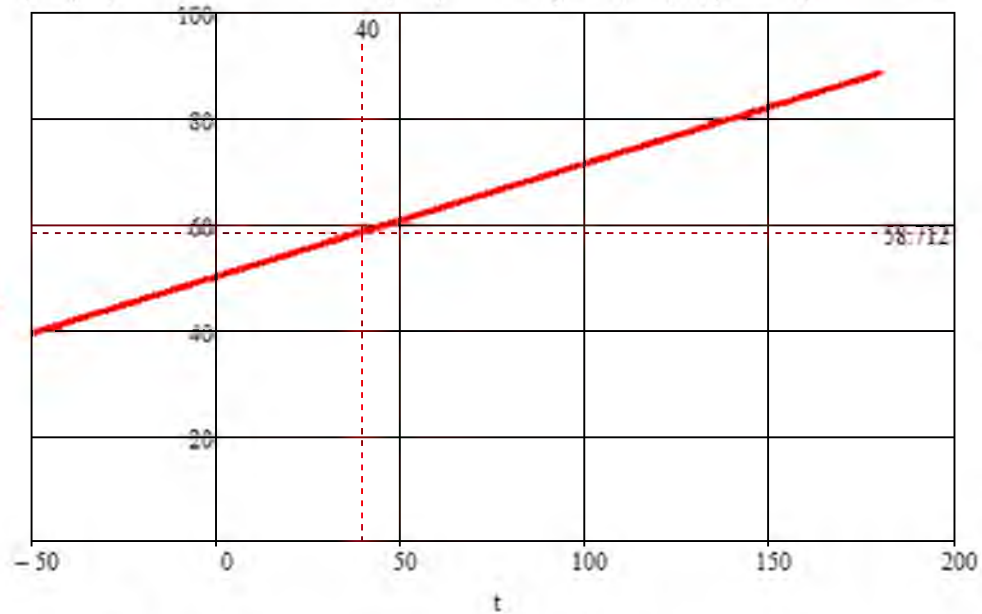


Рис. 3.5. Номінальна статична характеристика термоперетворювача опору ТСМУ-2212 (50М)

За динамічними властивостями датчик є інерційною ланкою, передатна функція якого має вигляд  $W_{ПВП}(s) = \frac{k_{ПВП}}{T_{ПВП} \cdot s + 1}$ .

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

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

де  $\Delta T$  – різниця значень вимірюваних датчиком температур,  $^{\circ}C$

(таблиця 3.2);

$\Delta I$  – різниця струмів, що відповідає значенням температур в робочому діапазоні, мА.

Враховуючи, що показник теплової інерції сприймаючого елемента складає  $T_{ПВП} = 8 \text{ с}$  (таблиця 3.2), передатна 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 та розміру вентилятора при його використанні для активного вентилявання необхідно знати розрахункові значення обміну повітря, необхідного для видалення надлишкової вологи та температури з шару зерна, та повного тиску.

Вентилятор повинен забезпечити витрату повітря  $400 \frac{m^3}{год}$  із

поступовим її зменшенням до  $100 \frac{m^3}{год}$ . Враховуючи, що повністю заповнена сушарка містить 40 т зерна пшениці, отримаємо, що вентилятор повинен забезпечувати подачу повітря в межах 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 вентилятор повинен забезпечувати необхідний тиск для проходження повітря крізь щільний шар зернової маси. Відомо, що радіальні (відцентрові) вентилятори здатні створювати набагато більший статичний тиск (до  $2000 \div 2500$  Па), ніж осьові ( $30 \div 300$  Па).

Враховуючи вищевказане, для використання в даній системі керування обраний **радіальний (відцентровий) вентилятор В-Ц4-70-8** (рис. 4.6), призначений для роботи в стаціонарних вентиляційних установках, зокрема в зерносушарках.



Рис. 4.6. Зовнішній вигляд вентилятора В-Ц4-70-8

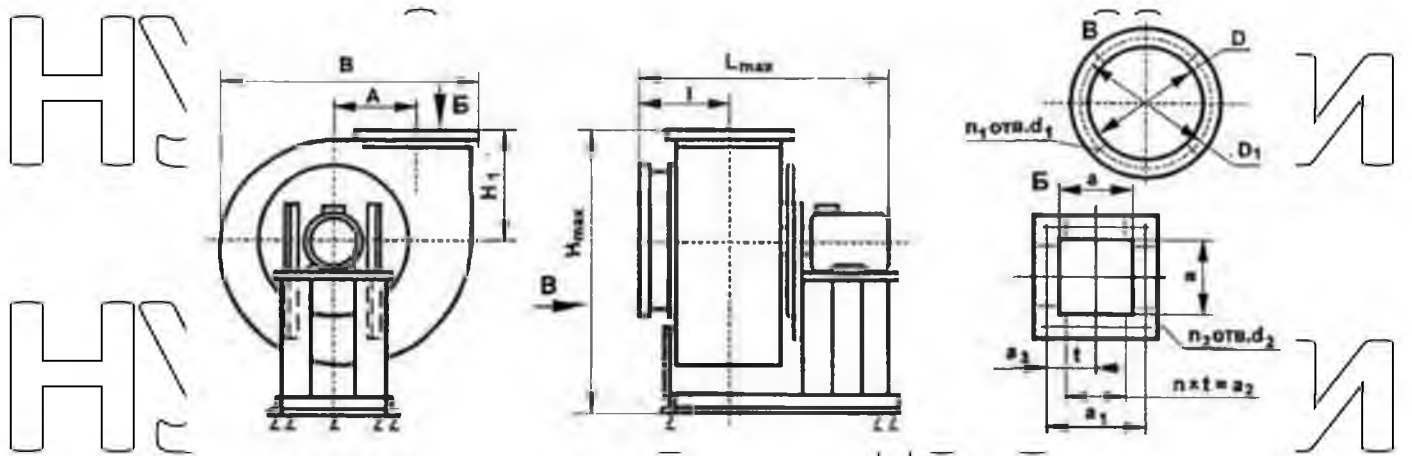


Рис. 4.7. Монтажне виконання вентилятора В-Ц4-70-8

Таблиця 4.3.  
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	600	1	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	975	150	2244	1250	1285	2161	811	1776	543	12x20	12x20	5	24	28	125



Таблиця 4.4.

Технічні характеристики вентилятора В-Ц4-70-8

Вентилятор	Потужність	Швидкість	Показники в робочій зоні	
	електродвигуна приводу вентилятора, кВт	обертання робочого колеса, об/хв.	Продуктивність, тис. м <sup>3</sup> /год	Напір, Па
В-Ц4-70-8	11,0	950	10,0...22,0	1020...550

Для приводу вказаного вентилятора використовується асинхронний трифазний електродвигун АИР132М4 з наступними технічними характеристиками (таблиця 4.4).

Таблиця 4.5.

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

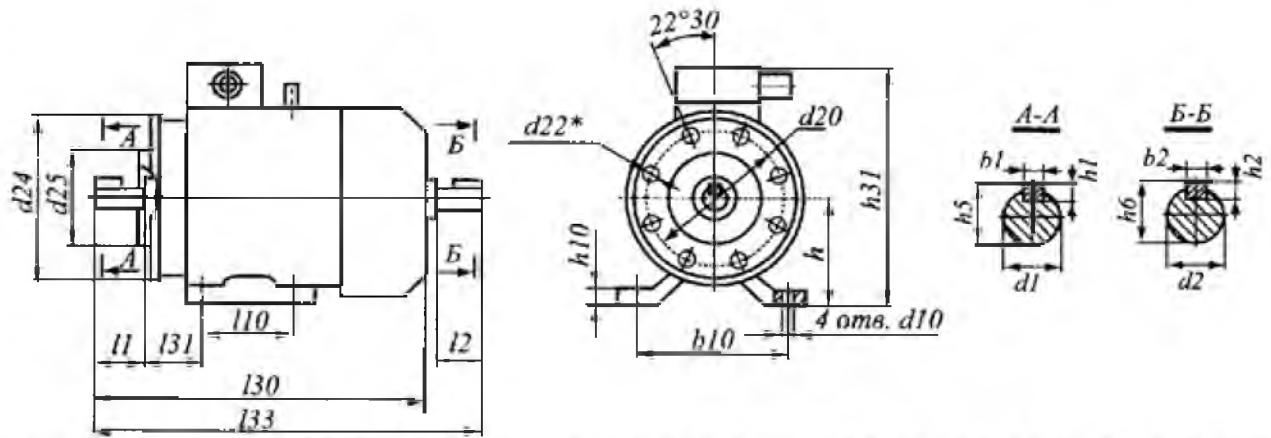


Рис. 4.8. Монтажне виконання електродвигуна АИР132М4

Найбільш раціональним способом плавного регулювання швидкості обертання є частотний. Можливість зміни швидкості цим способом випливає із виразу для синхронної швидкості обертового магнітного поля статора

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

з якого видно, що швидкість  $\omega_0$  є прямо пропорційною частоті  $f$  напруги, що підводиться до обмоток статора.

Виведемо передатну функцію асинхронного електродвигуна при частотному керуванні. Позначимо через  $\omega_V$  швидкість обертання поля статора при частоті  $f_V$ .

Тоді відносна швидкість поля

$$v = \frac{f_V}{f_H} = \frac{\omega_V}{\omega_0}, \quad (3.3)$$

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

Введемо поняття фіктивного ковзання

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

Дійсна швидкість обертання при частоті  $f_V$

$$\omega = \omega_V \cdot (1 - s). \quad (3.5)$$

Підставляючи у (3.5) значення  $\omega_V$  із (3.3) з урахуванням (3.4),

визначимо

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

Для малих значень ковзання обертаючий 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

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

Цей вираз можна представити як

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

Якщо за вхідну величину прийняти відносну швидкість поля  $v$ , а за вихідну – відносне ковзання  $\sigma = \frac{s_\phi}{s_H}$ , то вираз (3.10) матиме 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  $T_{M2} = \frac{J \cdot \omega_0}{M_H}$ .

Тоді 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 частотному керуванні

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

### 3.1.4. Вибір частотного перетворювача

У САК температурою в зерносушарці у якості пристрою для керування електродвигуном приводу відцентрового вентилятору вибраний частотний перетворювач серії **Altivar ATV312** фірми **Schneider Electric** (рис. 3.9).

Промисловий перетворювач частоти Altivar ATV312 відноситься до серії продуктів Altivar Process ATV300 компанії Schneider Electric і розроблений для керування моментом обертання, плавного пуску та зупинки синхронних та асинхронних трифазних електродвигунів. Перетворювач частоти Altivar ATV312 використовується у різних галузях

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

Ці перетворювачі оснащені вбудованим модулем реалізації ПІД-алгоритму керування.

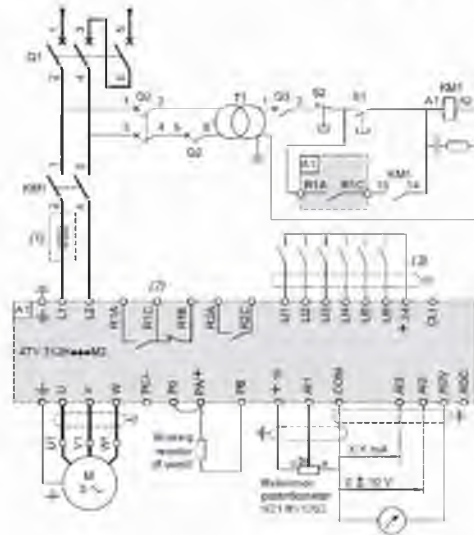


Рис. 3.9. Зовнішній вигляд перетворювача частоти Altivar ATV312 фірми Schneider Electric

Частотні перетворювачі (інвертори) служать для плавного, безступінчастого регулювання швидкості трифазних асинхронних електродвигунів. Регулювання відбувається за рахунок створення на виході трифазного струму змінної частоти. Перетворювач дозволяє відстежувати і відображати на цифровому табло основні параметри – задану швидкість, вихідну частоту, струм і напругу двигуна, вихідну потужність і момент, стан дискретних входів, загальний час роботи перетворювача і т.д.

Технології, реалізовані у частотних перетворювачах типу Altivar ATV312, роблять дану серію однією з самих досконалих розробок в даному класі. Серія ATV312 охоплює діапазон потужності від 0,75 до 75 кВт.

Можливості перетворювача Altivar ATV312:

- діапазон вихідних частот: 0,2-400 Гц;
- 15 програмованих установок швидкості;
- векторне керування із самоналагодженням на двигун або  $U/f$ -

керування (поєднання векторного керування та функції компенсації ковзання дозволяє забезпечувати не менше 150% від початкового моменту двигуна, починаючи з частоти 1 Гц);

- функція оптимізації часу розгону/гальмування;

вбудований ПИД-регулятор (із прямою та зворотною характеристикою) може бути використаний, наприклад, для регулювання температури, витрати або тиску;

- передбачено два способи зупинки двигуна: контрольованим гальмуванням або вільним вибігом;

- автоматичний перезапуск після провалу живлення із можливістю пуску на двигун, що обертається;

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

види захисту електродвигуна або групи двигунів:

- вимикання при перевищенні крутного моменту;
- захист від перевантаження, обриву/перекосу фаз;
- захист від перегріву;
- захист від коротких замикань.

У перетворювач частоти вбудована функція "Stop&Go", яка зменшує споживання електроенергії у режимі очікування до 60%.

Altivar ATV312 дозволяє не тільки вимірювати кількість спожитої електроенергії із похибкою менше 5%, але і проконтролювати відхилення енергоспоживання системи від номінальних значень. Причому розрахунок витрати спожитої енергії перетворювач частоти ATV312 виконує без

додаткового датчика і у тих одиницях вимірювання, що вибрані користувачем.

Наявність вбудованого порту Ethernet дозволяє швидко отримати доступ до параметрів налаштування і конфігурації ATV312.

Потужність перетворювача частоти, або необхідна їх кількість для живлення усіх електродвигунів приводу вентиляторів, визначається за таблицею 3.6.

Таблиця 3.6.

Технічні характеристики моделей перетворювачів частоти

типу Altivar ATV312 фірми Schneider Electric

Номер за каталогом	Потужність, кВт	Струм в усталеному режимі, А	Перевантаження за струмом, 60 сек., А	Габарити, ВхШхГ	Маса, кг
ATV312U075N4	0,75	2,2	2,4	143x107x150	2
ATV312U15N4	1,50	3,7	4	143x107x150	2
ATV312U22N4	2,20	5,1	5,6	143x107x150	2
ATV312U30N4	3	7,2	7,9	184x142x150	3,350
ATV312U40N4	4	9,1	10	184x142x150	3,350
ATV312U55N4	5,5	12	13,2	184x142x150	3,350
ATV312U75N4	7,5	16	17,6	232x180x170	6,450
ATV312HD11N4	11	22,5	24,8	232x180x170	6,450
ATV312HD15N4	15	30,5	33,6	232x180x170	11,650
ATV312HD18N4	18,5	37	40,7	330x245x190	11,650
ATV312HD22N4	22	43,5	47,9	330x245x190	26,400

Оскільки для приводу відцентрового вентилятора використовується

асинхронний трифазний електродвигун АІР132М4 потужністю 11кВт,

згідно з табл. 3.6 необхідно використати перетворювач Altivar

ATV312HD11N4

## РОЗДІЛ 4

## РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

## НУБІП України

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

## 4.1.1. Визначення періоду квантування

Період квантування знаходимо за теоремою Котельникова за допомогою амплітудно-частотної (АЧХ) замкненої неперервної частини системи при похибці 1% (рис. 3.5) використовуючи ПНІ 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

$$|Wz(w)| = 0,01$$

$$(w) := \text{Find}(w)$$

$$w = 0,308$$

$$T_k := \frac{\pi}{w} \quad T_k = 10,189$$

$$w := 0,0001..0,4$$

$$Az(w) := |Wz(w)|$$

$$Az(0,308) = 0,01$$

НУ України

НУ України

НУБІП України

НУБІП України

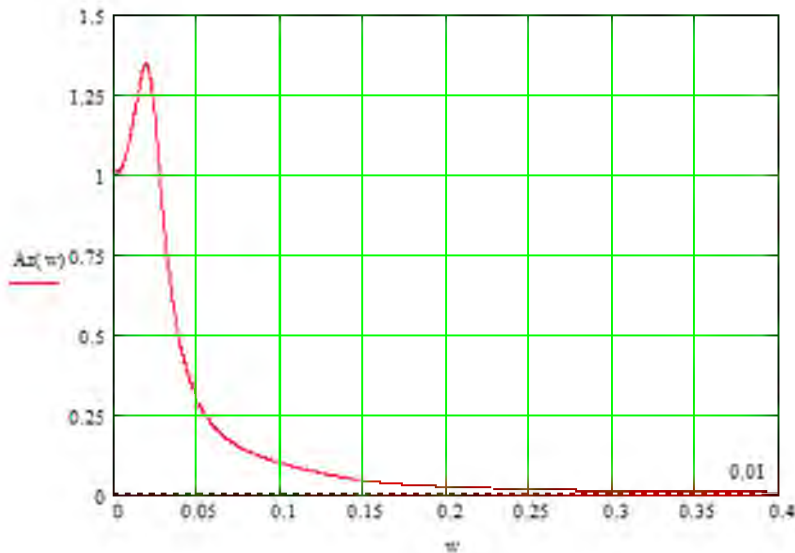


Рис. 4.1. АЧХ замкненої неперервної частини системи.

Отже, період квантування  $T_k$  складає 10с.

#### 4.1.2 Розрахунок цифрового регулятора

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

Передаюча функція цифрового ПИД-алгоритму (регулятора) має вигляд

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

Визначаємо значення одного коефіцієнта (КІ). Це визначення проводиться на основі добротності системи за швидкістю  $K_v$ . Інші коефіцієнти  $K_P$ ,  $K_D$  визначаються таким чином, щоб компенсувати полюси (інерційності) неперервної частини системи.

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

За допомогою ППП MATLAB визначаємо передаточну функцію неперервної частини системи в цифровому вигляді (z-перетворення), попередньо розклавши ланку записання 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:

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

$$z^2 - 1.77z + 0.7788$$

Sampling time: 10

```
>>
```

Отже, передаточна функція неперервної частини системи матиме

ВИГЛЯД

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

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 передаточної функції неперервної частини, поданої в вигляді

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



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

$$K_i := 0.005 \quad T := 10$$

$$K_p := 1 \quad K_d := 1$$

$$\begin{aligned} & \text{Given} \\ & \frac{K_i \cdot T^2 - 2 \cdot T \cdot K_p + 4 \cdot K_d}{K_i \cdot T^2 + 2 \cdot T \cdot K_p - 2 \cdot K_d} = -1.77 \\ & \frac{K_i \cdot T^2 + 2 \cdot T \cdot K_p + 2 \cdot K_d}{K_i \cdot T^2 + 2 \cdot T \cdot K_p + 2 \cdot K_d} = 0.7788 \end{aligned}$$

$$\begin{pmatrix} K_p \\ K_d \end{pmatrix} := \text{Find}(K_p, K_d) \quad K_p = 1,232 \quad K_d = 44,252$$

Отже,  $K_p = 1,232$ ,  $K_d = 44,252$ .

Таким чином, передаточна функція регулятора матиме 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 пристрою керування застосуємо мікроконтролерний пристрій, який дозволяє задавати параметри в широких межах і змінювати їх в процесі роботи. КПУ – контролер програмуючий універсальний.

Технічна характеристика КПУ:

пряма адресація до пам'яті об'ємом до 64 кбайт;

вид адресації (неявна, пряма), адресованою одиницею є байт;

кількість команд, включаючи команди арифметичних і логічних операцій, операції десяткової корекції, (78).

В нашому випадку необхідно застосовувати аналого-цифровий перетворювач (АЦП), враховуючи межі зміни температури сушильного агента ( $40 \dots +140^\circ\text{C}$ ) та необхідну точність  $\Delta=1^\circ\text{C}$ .

Кількість дискретних рівнів АЦП визначаємо за формулою

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

Визначаємо розрядність АЦП за формулою

$$n = \lceil \log_a N \rceil, \quad (3.48)$$

де  $\lceil \dots \rceil$  – найбільше ціле, яке більше або дорівнює аргументу.

$$n = \lceil \log_2 100 \rceil = 7.$$

Обираємо АЦП К1113ПВ1.

Визначимо коефіцієнт масштабування за допомогою MathCAD,

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

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

Отже, залежність коду АЦП від температури матиме вигляд

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

де  $\theta$  – температура об'єкта.

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

Перевірку цифрової системи на стійкість виконуємо за критерієм Джурі.

Для цього необхідно знайти передаточну функцію розімкнutoї системи

$$W_{PO3}(z) = \frac{W_{PI}(z) \cdot W_{PEI}(z)}{z^2 - 1,77z + 0,7788} = \frac{-0,03165 \cdot z + 0,03872}{z^2 - 1,77z + 0,7788} \cdot 1,232 + 0,025 \frac{(z+1)}{(z-1)} + 4,425 \frac{(z-1)}{z} =$$

$$= \frac{-0,18z^3 + 0,22z^2 - 0,07z + 0,03}{z^4 - 2,77z^3 + 2,54z^2 - 0,77z}$$

Знайдемо передаточну функцію замкненої системи

$$W_{зам}(z) = \frac{W_{PO3}(z)}{1 + W_{PO3}(z)} = \frac{-0,18z^3 + 0,22z^2 - 0,07z + 0,03}{z^4 - 2,95z^3 + 2,76z^2 - 0,84z + 0,03}$$

Розв'яжемо характеристичне рівняння замкненої системи за

допомогою ППП MathCAD.

$$z^4 - 2,95 \cdot z^3 + 2,76 \cdot z^2 - 0,84 \cdot z - 0,03 \text{ solve, } z \rightarrow$$

$$\begin{pmatrix} .15787412568974547892 - .82941756891253480547 \cdot i \\ .15787412568974547892 + .82941756891253480547 \cdot i \\ .75495377091125615427 - .25106297537018535310 \cdot i \\ .75495377091125615427 + .25106297537018535310 \cdot i \end{pmatrix}$$

Зобразимо корені на Z-площині. Оскільки всі корені знаходяться всередині одиничного кола, то за критерієм Джурі система стійка.

За допомогою ППП MATLAB складемо структурно-алгоритмічну

схему цифрової системи та побудуємо перехідний процес.

З перехідного процесу визначаємо показники якості САК:

час регулювання  $T_r = 240$  с;

перерегулювання  $\sigma = 0\%$ ;

коливальність  $n = 0$ ;

статична похибка  $\Delta = 0$

Ці показники задовольняють технологічним вимогам до процесу сушіння зерна.

НУБІП України

## РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА SCADA-СИСТЕМИ

# НУБІП України

Візуалізація - метод подання інформації у вигляді оптичного зображення (наприклад, у вигляді малюнків і фотографій, графіків, діаграм, структурних схем, таблиць, карт і т. д.).

При візуалізації керування використовують такі підходи:

- SCADA SYSTEM (Trace mode, Genesis);
- Контролер з панеллю оператора;
- Контролер з дисплеєм;

# НУБІП України

Вибір технічних засобів для забезпечення візуалізації залежить від кількості інформації та величини ОК. У разі масштабних об'єктів використовують SCADA-системи.

# НУБІП України

SCADA - програмний комплекс для візуалізації та диспетчеризації технологічних процесів. SCADA-система дає наочне уявлення процесу і надає, як правило, графічний інтерфейс оператору для контролю і керування.

Враховуючи об'єм технічних засобів, було виконано візуалізацію інтерфейсу оператора за допомогою Scada Trace Mode (AdAstrA), яка є одним з рішень автоматизації технологічних процесів (АСУТД) розроблено автоматизовану систему контролю та керування процесом сушіння зернових.

# НУБІП України

Розроблена SCADA система дозволяє виконувати головні задачі технологічного процесу сушки зернових культур:

- ефективно керувати та контролювати технологічний процес сушки;
- забезпечити високий рівень надійності та безпеки;
- оптимізувати витрати енергоресурсів;
- отримувати дані в режимі реального часу;
- мати доступ до проекту з будь-якого місця;
- реалізувати підсистему підтримки прийняття рішень.

# НУБІП України

Нижче представлено результат роботи. Передочимо кілька робочих екранів з перемиканням між ними відповідними кнопками у нижньому

правому кутку. На першому екрані будемо відстежувати роботу механізмів в цілому по всій сушарці, тому на зображення сушарки накладасмо сигнальні лампи з прив'язкою до відповідних параметрів програми. На другий екран панелі оператора винесемо значущі для контролю параметри регулювання.

На рис. 1 відображено інтерфейс оператора. На даному екрані (мнемосхема) зображено технологічне обладнання: зерносушарка, топковий агрегат, норія завантаження, вивантажувальний конвеєр, вентилятори, газопровід та індикатори.

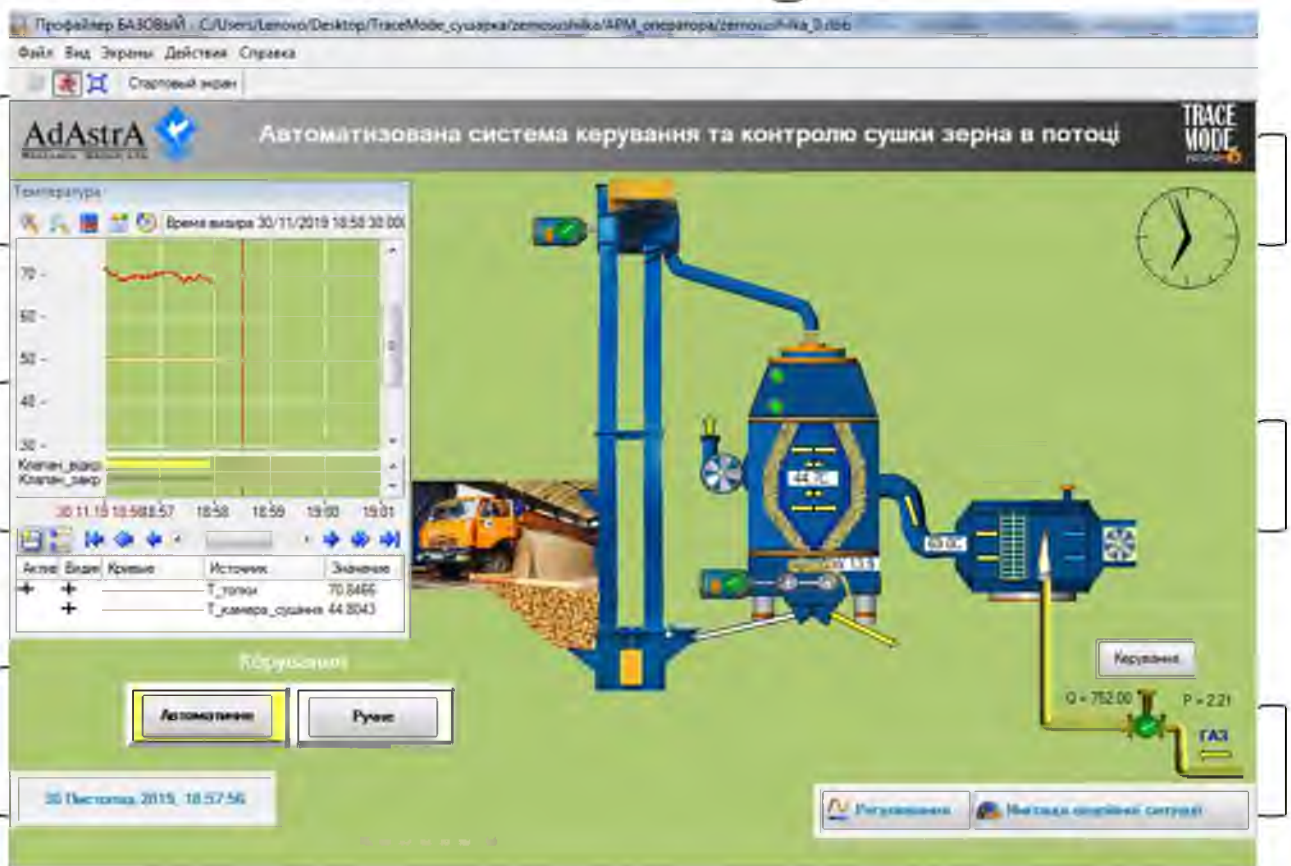


Рис. 1. Графічний інтерфейс системи в Scada Trace Mode

Динаміку зміни технологічного параметра в часі зручно представити у вигляді залежності зміни даного параметра в часі. З цієї причини в SCADA-системах знайшли широке поширення об'єкти, які дозволяють уявити зміну певного параметра в часі. Такі об'єкти називають трендами. Тренд реального часу відображає в реальному часі зміну параметра. Як правило, тренди містять смугу прокрутки, що дозволяє повернутися «назад», і подивитися що

відбувалося раніше на виробництві або повернутися в «потонний час». Тренд для відображення температури теплоносія, точки та камери сушіння, представлений на рис 2

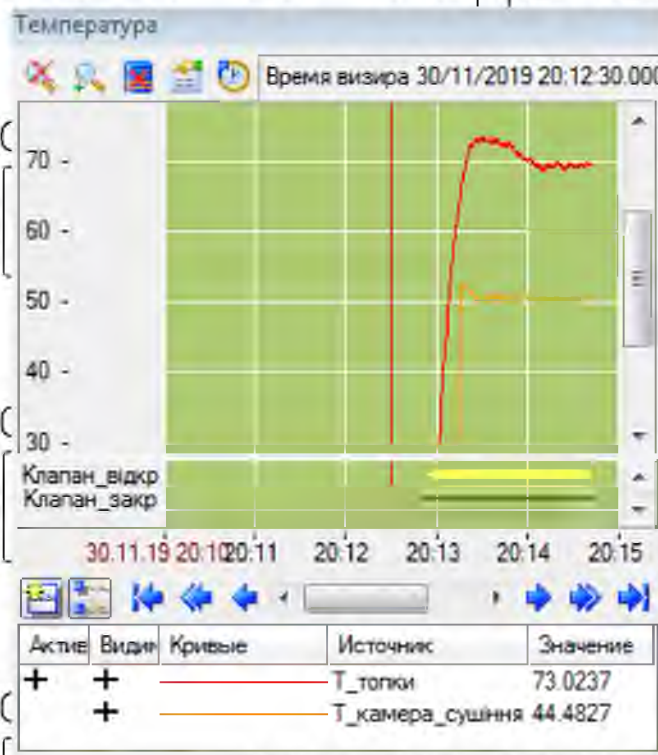


Рис 2. Відображення показників температури у вигляді тренда

На рис. 3 зображено перемикачі режиму роботи, а також вікно режиму автоматичного керування, в якому розміщено відповідні кнопки вмикання та вимикання, які передають сигнал на елементи (контакти і кстущки) програми керування.

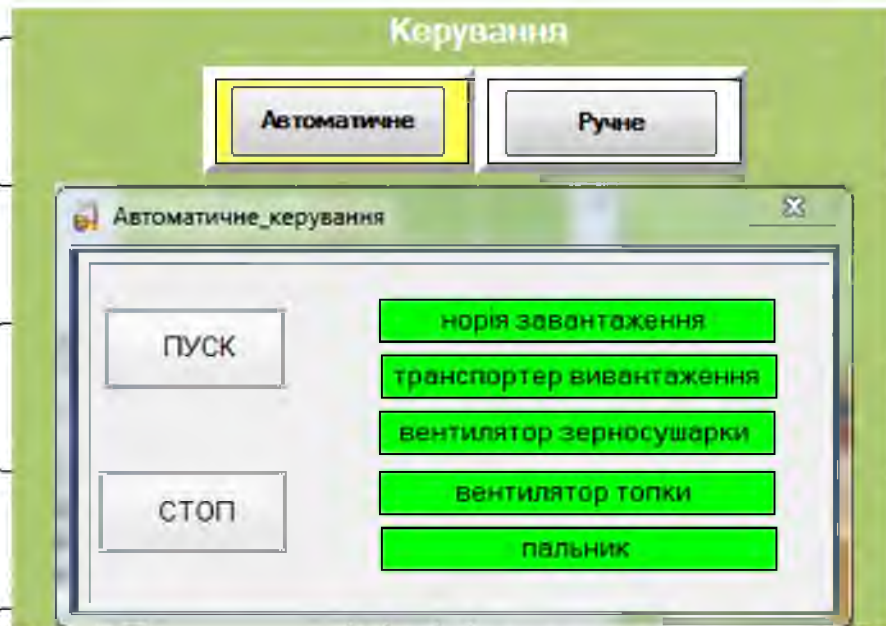


Рис. 3. Перемикання режимів роботи (автоматичний/ручний).

На рис. 4 зображено вікно режиму ручного керування, в якому відбувається керування виконавчими механізмами сушарки за допомогою кнопок вмикачів та звимикачів.

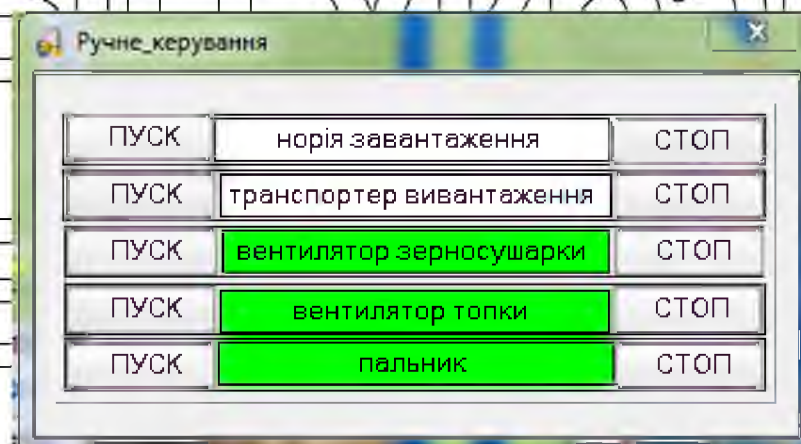


Рис. 4 Вікно режиму ручного керування механізмами сушарки

На рис. 5 зображено керування виконавчим механізмом клапана в ручному режимі. Відображення інформації (значень тиску, витрати), а також стану у вигляді кольорової індикації дозволяють стежити за подачею палива.

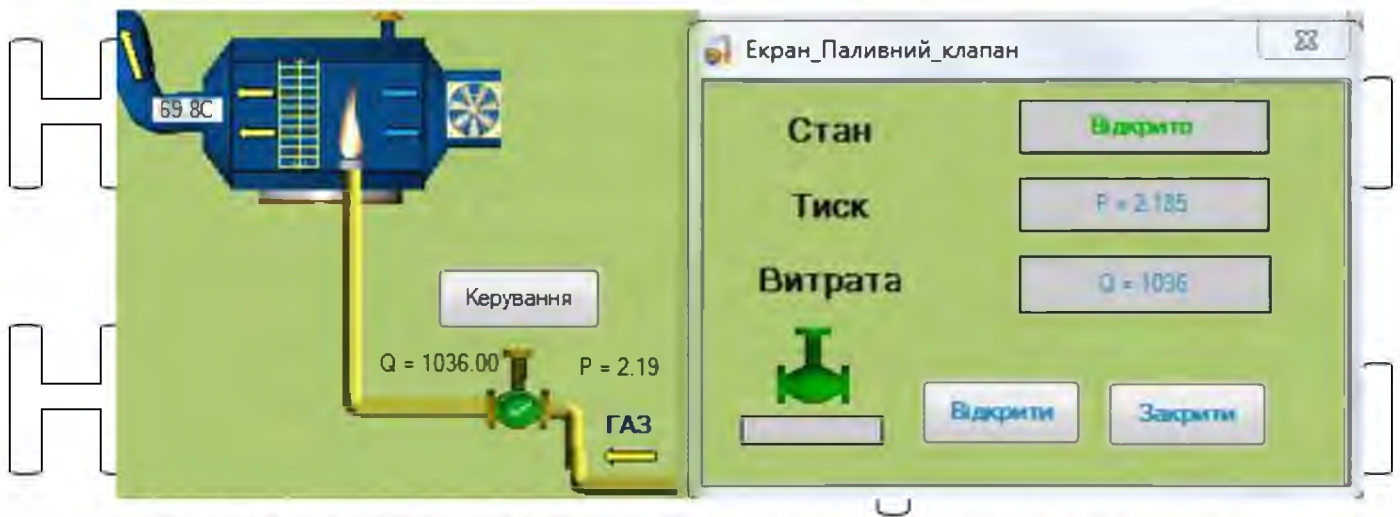


Рис. 5. Вікно керування виконавчим механізмом клапана в ручному режимі

Під час технологічного процесу необхідно контролювати той чи інший параметр для виключення аварій, виходу з ладу обладнання. SCADA-система дозволяє контролювати значення параметрів виробничого процесу.

Однак тільки контролю параметрів мало, необхідно в багатьох випадках повідомляти оператора про аварійну ситуацію, близькості значення параметра до аварійного значення. На рис. 6 зображено вікно імітації аварійної ситуації на прикладі зміни тиску палива, світлову індикацію при падінні тиску за межі норми.

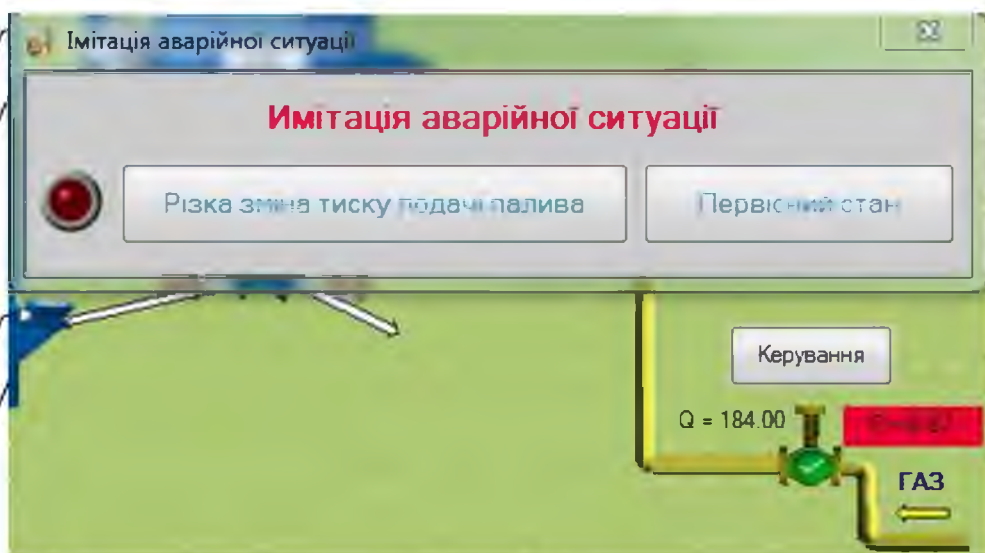


Рис. 6. Вікно імітації аварійної ситуації

Завершальний екран в нашому розгляді Scada системи представлено на рис. 7. Це є екран регулювання. В ньому і відбувається визначення таких

технологічних параметрів як: температура теплоносія, тиск подачі палива, швидкість вивантажувального конвєсра, що має 10 рівнів регулювання, а також параметрів настройки ПІД-регулятора, котрий відпрацьовує відповідне значення уставки.

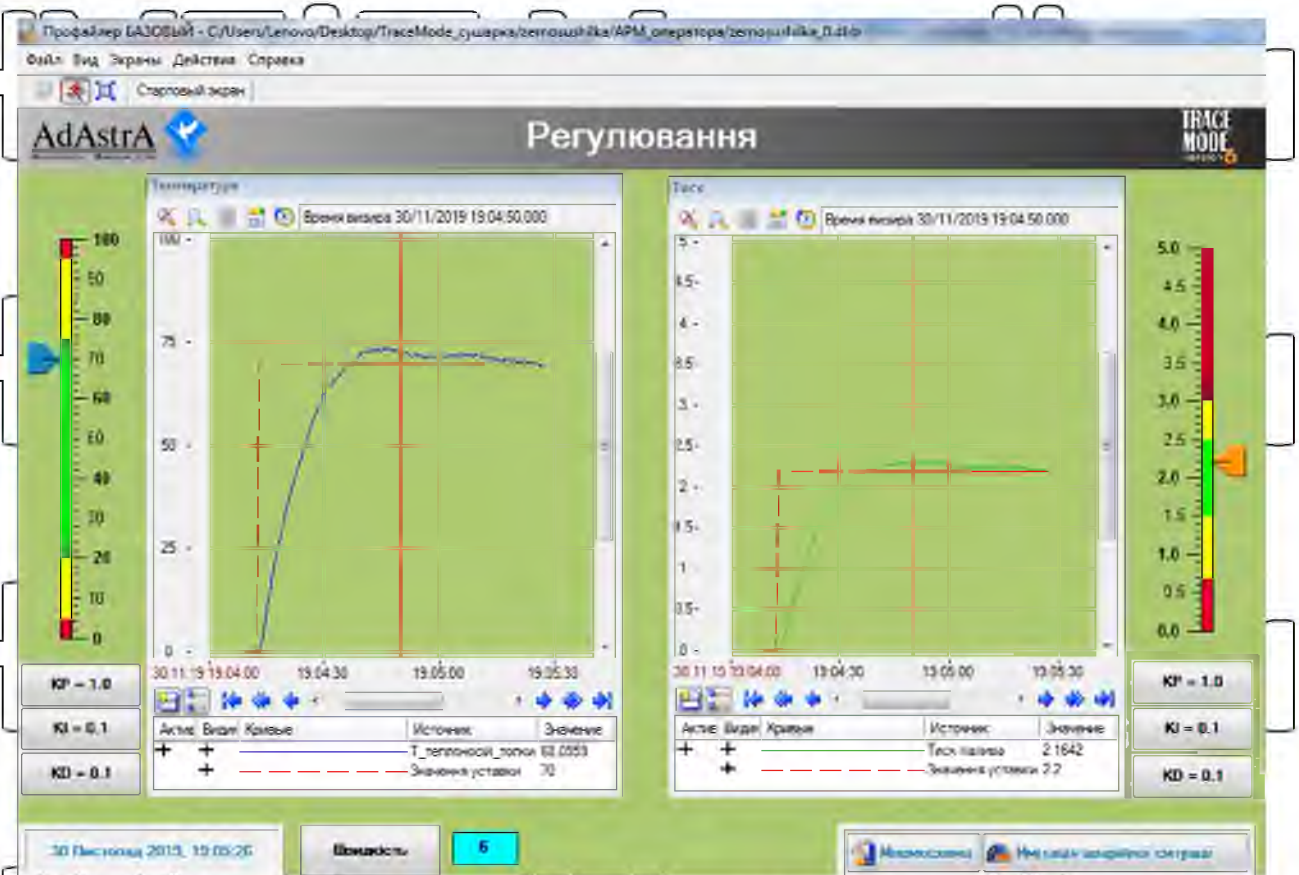


Рис. 1. Екран регулювання технологічних параметрів

### Розробка програмного забезпечення

Як пристрій керування технологічним процесом використовується програмований логічний контролер, тому слід розробити програму керування для нього.

Для складання символічного запису алгоритму функціонування приймемо такі позначення:

X1 – електромагнітний пускач двигуна вентилятора сушарки;

X2 – електромагнітний пускач електродвигуна вентилятора рекуперації;

X4 – електромагнітний пускач електродвигуна норії завантаження

зерна;

X5 – електромагнітний пускач двигуна випускних пристроїв;

X6 – електромагнітний пускач двигуна топкового вентилятора;

X7 – електромагнітний пускач двигуна насоса топки;

X9, X10 - виконавчий механізм заслінки (вліво і вправо);

X11, X12 - виконавчий механізм клапана (вліво і вправо);

X13.1 - режим «малий вогонь»;

X13.2 - режим «великий вогонь»;

X14 – перетворювач частоти;

b1 – кінцевий вимикач, що фіксує положення заслінки на вивантаженні;

b2 – кінцевий вимикач, що фіксує положення заслінки на повторну сушку;

b3 – кінцевий вимикач, що фіксує положення клапана на повторне використання теплоносія;

b4 – кінцевий вимикач, що фіксує положення клапана на викид теплоносія;

b5 – датчик нижнього рівня зерна;

b6 – датчик верхнього рівня зерна;

b7 – датчик температури теплоносія в камеру сушіння;

b8 – датчик температури в камері сушіння (сигнал, що подається на блок ПД-регулятора і в вікно панелі оператора);

b9 – датчик вологості теплоносія;

b10 – датчик вологості зерна на виході;

z1 і z'1 – котушка і контакт програмного реле часу на розігрів сушарки;

z2 і z'2 – котушка і контакт програмного реле часу витримки на вивантаження зерна і зупинка сушарки.

Попередньо визначимо елементи системи, які будуть підключатися на входи контролера, і елементи, які будуть підключатися на виходи контролера.

Для великої наочності зведемо їх в таблицю імен (рис. 3.7).

Name	Tag table	Data type	Address	Retain	Visible	Access	Comment
y1	Default tag table	Bool	%I 0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	сигнал разрешения
b1	Default tag table	Bool	%I 1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	заслонка на выгрузку
b2	Default tag table	Bool	%I 2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	заслонка на повторную сушку
b3	Default tag table	Bool	%I 3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	клапан закрыт
b4	Default tag table	Bool	%I 4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	клапан открыт
b5	Default tag table	Bool	%I 5		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	нижний уровень
b6	Default tag table	Bool	%I 6		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	верхний уровень
x1	Default tag table	Bool	%Q 0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	вентилятор сушилки
x2	Default tag table	Bool	%Q 1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	вентилятор рекупирации
x3	Default tag table	Bool	%Q 2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	нория загрузки
x4	Default tag table	Bool	%Q 3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	нория загрузки
x5	Default tag table	Bool	%Q 4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	выпускные устройства
x6	Default tag table	Bool	%Q 5		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	вентилятор топки
x7	Default tag table	Bool	%Q 6		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	насос топки
x9	Default tag table	Bool	%Q 1 0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	заслонка на выгрузку
x10	Default tag table	Bool	%Q 1 1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	заслонка на повторную сушку
x11	Default tag table	Bool	%Q 8 0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	клапан на рекупирацию
x12	Default tag table	Bool	%Q 8 1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	клапан на выброс
x13.1	Default tag table	Bool	%Q 8 2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	малый огонь тт
x13.2	Default tag table	Bool	%Q 8 3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	большой огонь тт
b7	Default tag table	Int	%MW 14		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	теплоноситель в камеру сушки
b8	Default tag table	Int	%MW 18		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	температура в камере сушки
b9	Default tag table	Int	%MW 30		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	влажность теплоносителя
b10	Default tag table	Int	%MW 32		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	влажность на выходе
x14	Default tag table	Int	%QW 28		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	ПЧ

Скриншот 3.7 Таблица входов і виходів контролера

Основною для написання програми є структура керування (рис. 1.2), яка в програмі повинна бути представлена спеціальними символами і функціями. Обраний контролер запрограмуємо мовою релейно-контактної логіки (сходових діаграм LD). Програма на мові релейної логіки має наочний і інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс, представляє логічні операції, як електричний ланцюг з замкнутими і розімкнутими контактами.

Основними елементами мови релейно-контактної логіки є контакти, які можна образно порівняти в парі контактів реле або кнопки.

Відрізняються нормально замкнуті і нормально розімкнені контактні елементи, які можна зіставити з нормально замкнутими і нормально розімкнутими кнопками в електричних ланцюгах.

Наведемо приклад позначень, необхідних для складання програми контролера:

А — нормально-розімкнений контакт (позначає вхід);

$\text{---/---}$  – нормально-замкнений контакт;  
 $( )$  – закінчення логічного ланцюжка називається когوشка (позначає вихід);

M – маркер (пам'ять для проміжних результатів);

D – реєстр даних (зберігає інформацію про дані);

K – десяткова константа (визначає значення десяткового числа);

T – таймер (пам'ять для реалізації часових параметрів);

Однак, відповідно до структури керування, необхідно також

організувати дві витримки часу, для чого використовуються блоки таймерів

TON, сигнал з яких йдуть на маркер, задіяний в ланцюгах керування виходами.

Для керування перетворювачем частоти необхідно використовувати

PID-регулювання.

У повному обсязі програма керування для контролера приведена в додатку А на рисунках 3.8-3.11.

## РОЗДІЛ 6

## ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

## НУВБІП України

Монтаж та експлуатація електрообладнання повинні виконуватися згідно з стандартами і нормативно-правовими актами з охорони праці та експлуатаційної документації на нього.

Безпечність електроустановок повинна забезпечуватися:

- надійністю ізоляції;
- безпечним розміщенням струмопровідних частин;
- заземленням або зануленням корпусів електрообладнання.
- попереджувальною сигналізацією, блокуванням, знаками безпеки;

## НУВБІП України

Усі заново під'єднані, реконструйовані електроустановки повинні підлягати приймально-здавальним випробовуванням і прийманню комісією відповідно до діючих положень.

Уведення в експлуатацію електроустановок можливе тільки за наявності відповідного електротехнічного персоналу і призначеної особи, яка відповідає за електрогосподарство.

## НУВБІП України

Працівники, які обслуговують електроустановки, повинні знати вимоги нормативно-правових актів у межах своєї компетенції.

На кожну електроустановку в підприємстві, крім технічної документації з експлуатації, має бути затверджена проектна документація, акт здачі електроустановки в експлуатацію, паспорт на обладнання, апаратуру й прилади, виконавча схема електричних з'єднань, блокувань, сигналізації, розміщення, протоколи електричних випробувань, вимірів, налагодження окремих пристроїв тощо.

## НУВБІП України

Струмоведучі частини електроустановок повинні мати захист від випадкового доторкання.

Усі електродвигуни повинні бути заземлені і мати відповідний захист від короткого замикання й неревантажень.

## НУВБІП України

Металеві частини електроустановок 380/220 В із глухозаземленим нульовим проводом, які можуть опинитися під напругою внаслідок порушення ізоляції, повинні заземлюватися відповідно до Правил улаштування електроустановок.

Забороняється влаштування заземлювачів у місцях проходу людей і тварин, на вході у приміщення, на вигульних майданчиках.

Зовнішні електропроводки в місцях, де вони можуть піддаватися дії механічних пошкоджень, повинні прокладатися у сталевих або пластмасових трубах, коробах, каналах.

Електропроводки й електрообладнання у приміщеннях з підвищеним умістом пилу (кормоцехи, цехи сушіння посіду, трав'яного борошна тощо) повинні бути пиловибухозахищеного виконання.

Електропроводки, що з'єднують машини з іншим електрообладнанням у місцях, небезпечних щодо механічних пошкоджень, повинні прокладатися в сталевих або пластмасових трубах, металорукавах, коробах, каналах товще.

Не допускається установлення вимикачів і запобіжників у проводах, які використовуються для захисного заземлення.

Заземлений нульовий провід внутрішньої електропроводки повинен мати розпізнавальні позначення або пофарбування.

Надійність заземлення і його загальний стан повинні перевірятися шляхом заміру один раз на рік, а також після кожного капітального ремонту і тривалої перерви в роботі установки.

При виявленні відхилення опору заземлення від значень, вказаних у Правилах улаштування електроустановок, слід ужити заходів щодо приведення його до нормативних.

Зовнішній огляд стану заземлювальних провідників (шин) повинен проводитися один раз на 6 місяців, у вологих і особливо вологих приміщеннях - кожні 3 місяці.

При порушенні або несправності заземлювального пристрою установку негайно відключають до ліквідації несправності.

Штепсельні роз'єднання повинні бути захищені від випадкового дотику до частин під напругою і розміщені таким чином, щоб їхнє приєднання здійснювалося без ускладнень.

Штепсельні розетки для підключення опромінювальних установок до електричної мережі повинні мати третій заземлювальний контакт.

У приміщеннях підвищеної небезпеки (вологість понад 90%, запиленість понад 800 мг/м<sup>3</sup>) потрібно влаштовувати герметичні штепсельні розетки зі спеціальними гніздами для приєднання до захисного нульового проводу.

Штепсельні з'єднання (розетки, вилки), що застосовуються в мережі з напругою 12-42 В, за своїм конструктивним виконанням повинні відрізнятися від звичайних штепсельних з'єднань, щоб запобігти включенню вилок на 12-42 В у штепсельні розетки на 127-220 В.

Огляд, обслуговування й ремонт приймачів та споживачів електроенергії слід проводити тільки після відключення їх від електромережі. На засобах відключення електроенергії (вимикачі, запобіжники тощо) вивішується плакат "Не вмикати! Працюють люди!".

Роботу на машинах та обладнанні з електроприводом дозволяється доручати тільки персоналу з групою електробезпеки не нижче ІІ.

Виробничі, допоміжні і складські будівлі й приміщення потрібно обладнувати блискавкозахистом відповідно до інструкції по улаштуванню.

Для зменшення вірогідності проникнення кульових блискавок у приміщення, перед початком грози слід запобігати утворенню протягів у приміщеннях (закривати двері, вікна люки та інші прорізи й отвори).

**Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях**

У випадку аварійної ситуації (появі сторонніх шумів під час роботи обладнання, запаху горілого, диму, виявленні несправностей, іскрінні електрообладнання, появі електричної напруги на деталях, підвищеному нагріванні поверхні підшипників, редукторів, інших частин машин, порушенні цілісності захисних пристроїв, бункерів, смкоостей, забиванні

вихідних отворів, горловин тощо) необхідно зупинити роботу машин, обладнання в порядку, передбаченому правилами їх експлуатації, в першу чергу, відключивши подачу електроенергії, пари, води, пального, хімічного розчину.

При наявності загрози здоров'ю і життю слід покинути небезпечну зону, попередивши працівників, що знаходяться поблизу неї.

Забороняється проводити ремонт, усувати несправності в аварійній ситуації без зупинки машин і обладнання. Після аварійної зупинки і при повторному запуску машина повинна бути звільнена від продукту переробки.

При виникненні пожежі чи загоранні необхідно терміново повідомити про це (по телефону, через посилювача) керівника робіт, пожежно-сторожову охорону, пожежну частину, підняти тривогу звуковим сигналом (сирена, радіостанція, дзвінок), приступити до гасіння пожежі наявними засобами (вогнегасник, пожежний кран, пісок тощо).

Під час гасіння пожежі ізолюють горючу речовину від кисню, повітря, охолоджуючи до температури, що перешкоджає горінню, і при цьому слідкують за тим, щоб не з'явилися інші небезпечні фактори (вибухи, обвали, замикання електропроводів тощо). Великі об'єми горючого матеріалу розтягують і гасять кожну частину окремо.

Легкозаймисті рідини (пальне) гасять вогнегасником, направляючи струмінь під основу полум'я або закидають горючу поверхню піском, землею чи накривають мокрим брезентом.

Вибухові речовини (кормовий і борошняний пилю, вибухонебезпечна концентрація аміаку) рясно поливають розпиленням струменем води із гідранта.

Більшість твердих горючих речовин (сіно, солома тощо) гасять водою, накривають кошмою, закидають піском або землею.

При загорянні електропроводів слід негайно від'єднати лінію від струму, вимкнувши рубильник. Якщо це зробити неможливо, потрібно екіпірою або лопатою з сухою дерев'яною ручкою перерубати проводи по

одному попереду місця їх загоряння. При цьому необхідно стати на суху дерев'яну підставку або гумовий килимок і надіти гумові рукавиці чи ізолювати руки вовняною тканиною (шарфом, картузом тощо). Гасити проводи електрообладнання необхідно тільки сухим піском.

При загоранні пересувної машини по можливості відбуксирують її в безпечне для інших об'єктів місце, подають сигнал пожежної тривоги і приступають до гасіння.

При відключенні кормороздавального обладнання в аварійних ситуаціях слід дотримуватися застережних заходів для запобігання нещасних

випадків - не торкатися проводів, металевих частин технологічного обладнання при підозрі появи електричної напруги на ньому або пошкодженні проводів, не підходити близько до небезпечних механізмів, технологічних матеріалів або інших предметів, застосовувати засоби захисту (рукавиці, гумове взуття, вогнегасники тощо).

При нещасних випадках в першу чергу усувається небезпечний фактор (подача пари, хімізчину, електроенергії, зупинка механізмів, що рухаються, і т.п.), надається потерпілому перша (долікарська) допомога і відправляється потерпілий в медичний заклад. По можливості, зберігається до розслідування

на робочому місці обстановка і стан обладнання такими, якими вони були на момент випадку (якщо це не загрожує життю і здоров'ю оточуючих і не порушує безперервність технологічного процесу).

НУБІП України

НУБІП України

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

## НУБІП України

- 1 Анискин В.И. Консервация влажного зерна. - М.: Колос, 1968. - 286с.
- 2 Бородин И.Ф., Недилько Н.М. Автоматизация технологических процессов. - М.: Агропромиздат, 1996.
- 3 Боуманек Г. Эффективная обработка и хранение зерна / Пер. с англ. В.И. Даневского. - М.: Агропромиздат, 1991. - 608с.
- 4 Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. - М.: Пищевая промышленность, 1976. - 248с.
- 5 Гинзбург А.С. Технология сушки пищевых продуктов. - М.: Пищевая промышленность, 1973. - 527с.
- 6 Гірник М. А. Механізація і автоматизація післязбиральної обробки зерна. - К.: Урожай, 1970. - 190с.
- 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.
- 10 Драганов Б.Х. Использование возобновляемых и вторичных энергоресурсов в сельском хозяйстве. - Киев: Вища школа, 1988. - 56с.
- 11 Згоруйко В.А., Кривошеев Ю.И., Слынько А.Г. Определение влагосодержания гигроскопических грузов для их сохранной перевозки. - М.: Транспорт, 1988. - 496с.
- 12 Кей. Р. Введение в технологию промышленной сушки. - Минск: Наука и техника, 1983 - 262с.
- 13 Кирпа Н.Я. Развитие и перспективы обработки и хранения зерна в Украине // Хранение и переработка зерна. - 2000. - №12 - С.25-26.
- 14 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.
- 15 Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. - Тернопіль: Підручники & посібники, 2001. - 977с.
- 16 Красников В.В. Кондуктивная сушка. - М.: Энергия, 1973. - 288с.
- 17 Краусп Р.В. Автоматизация послеуборочной обработки зерна. - М.: Машиностроение, 1975. - 227с.
- 18 Кунце В., Мит Г. Технология солода и пива. - Санкт Питербург, Изд-во "Профессия", 2003. - 348 с.
- 19 Лыков А.В. Теория сушки. - М.: Энергия, 1968. - 471с.
- 20 Малин Н.И. Снижение затрат на сушку зерна. - М.: ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, 1991. - 45 с.
- 21 Мартыненко ИИ, Головинкий БЛ, Проценко Р.Д, Резниченко Т.Ф. Автоматика и автоматизация производственных процессов. М.: 1985. - 336с.

## НУБІП України

- 22 Мартыненко И.И., Лысенко В.Ф. Проектирование систем автоматики. 2-е изд./перераб. и доп. - М.: Агропромиздат, 1990 г. - 243 с.
- 23 Мельник Б.Е. Активное вентилирование зерна. Справочник. - М.: Агропромиздат, 1986. - 159с.
- Морозов В.В. Энергозберегаюча сушка семян рапса в установках бункерного типа / В.В. Морозов, Н.М. Максимов // Механізація і електрифікація сільського господарства. – 2011. - №5. – С.13-14.
- 24 Остапчук Н.В., Шашкин А.Б., Каминский В.Д. Повышение эффективности сушки зерна. - К.: Урожай, 1988. - 132 с.
- 25 Попов Н.Я. Повышение эффективности работы зерносушилок с повторным использованием агента сушки. М.: ЦНИИЭТ Хлебопродуктов, 1980. - 34с.
- 26 Станкевич Г.М., Страхова Т.В., Атаназевич В.И. Сушка зерна. - К.: Либидь, 1997. - 351с.
- 27 Тарасенко А.П. Снижение травмирования семян при уборке и послеуборочной обработке / А.П. Тарасенко. Воронеж, 2003. – 331 с.
- 28 Теленгатор М.А. Обработка и хранение семян. - М.: Колос, 1980. - 272с.
- 29 Каталог електродвигунів серії АІР [Електронний ресурс]  
Режим доступу: <https://air.com.ua/katalog-efektrodvigatelei-air/>
- 30 Датчик рівня сипких продуктів [Електронний ресурс]  
Режим доступу:  
<https://temix.com.ua/product/vibracionnyi-datchik-signalizator-predelnogo-urovnya-sypuchih-materialov-dnu-10>
- 31 Шахтні зерносушарки Law  
Режим доступу:  
<http://www.zernosushilki.com/>
- 32 Зерносушарки поточкові (поточні)  
Режим доступу:  
<https://ravaro.com.ua/products-ua/zernosusharki-potocni>
- 33 Сушіння зерна та вибір сушарок в господарствах Скандинавії  
Режим доступу:  
<https://hipzmag.com/tehnologii/hranenie/sushka-zerna-i-vybor-sushilok-v-hozvajstvah-skandinavii/>
- 34 Электротехнический справочник. / Алиев И. И., - М.: ИП РадиоСофт, 2006. - 384 с.