

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

(повне найменування закладу вищої освіти)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій і робототехніки

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра автоматичної, електроніки та телекомунікацій

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістра

(ступінь вищої освіти)

на тему «Інтелектуальна система прийняття рішення в процесі керування  
судинним зерном»

Виконав: студент 2 курсу, групи 601-МЕ  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Курилко Я. С.

(прізвище та ініціали)

Керівник Галай В. М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Шефер О. В.

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2025 рік

## АНОТАЦІЯ

Магістерська робота присвячена удосконаленню системи управління сушінням зерна в шахтних зерносушарках шляхом застосування інтелектуальних методів на основі нечітких множин. Проведено аналіз технологічного процесу післязбиральної обробки зерна, визначено особливості експлуатації шахтних сушарок та виявлено обмеження існуючих детермінованих і імовірнісних моделей управління. Встановлено, що ефективність процесу сушіння залежить від кваліфікації оператора, рівня автоматизації та своєчасності контролю параметрів, зокрема вологості зерна.

У роботі розроблено багатопараметричну недетерміновану модель процесу сушіння зерна на основі нечітких множин, яка інтегрує вимірювані та суб'єктивно оцінювані параметри: вологість, температуру, колір, запах та якість оболонки зерна. Модель дозволяє формалізувати досвід кваліфікованих операторів і застосовується для побудови системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень. Система адаптується до сезонних особливостей якості зерна та конструктивних характеристик сушарки, забезпечує оперативний контроль вологості потоку зерна та підвищує ефективність сушіння, зменшує витрати енергоресурсів і підвищує кількість якісно висушеного зерна.

Проведено дослідження впливу обурюючих факторів на вимір вологості потоку зерна, удосконалено датчик вологості сипучих матеріалів у потоці, розроблено методи чисельної і лінгвістичної оцінки ефективності управління. Запропоновані підходи забезпечують підвищення продуктивності та економічної ефективності підприємств зернопереробної галузі.

**Ключові слова:** сушіння зерна, шахтна зерносушарка, нечіткі множини, інтелектуальна система підтримки рішень, контроль вологості, автоматизація управління, ефективність сушіння.

## ABSTRACT


The master's thesis is dedicated to improving the grain drying control system in shaft-type grain dryers using intelligent methods based on fuzzy sets. The technological process of post-harvest grain handling was analyzed, highlighting the operational features of shaft dryers and identifying the limitations of existing deterministic and probabilistic control models. It was found that the efficiency of the drying process depends on the operator's qualification, the level of automation, and the timeliness of parameter monitoring, particularly grain moisture.

A multi-parameter non-deterministic model of the grain drying process based on fuzzy sets was developed, integrating both measured and subjectively evaluated parameters, including moisture, temperature, color, odor, and grain coat quality. The model formalizes the experience of skilled operators and is applied in the design of an intelligent decision support system. The system adapts to seasonal variations in grain quality and the structural characteristics of the dryer, ensures real-time monitoring of grain flow moisture, increases drying efficiency, reduces energy consumption, and improves the amount of high-quality dried grain.

The study also investigated the influence of disturbing factors on moisture measurement, improved the moisture sensor for bulk materials in the flow, and developed methods for numerical and linguistic assessment of drying management effectiveness. The proposed approaches enhance productivity and economic efficiency in the grain processing industry.

**Keywords:** grain drying, shaft-type grain dryer, fuzzy sets, intelligent decision support system, moisture control, automation of management, drying efficiency.

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
 Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та  
 робототехніки  
 Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій  
 Рівень вищої освіти Магістр  
 Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
 Завідувач кафедри автоматики,  
 електроніки та телекомунікацій  
  
 О.В. Шефер  
 “15” 09 2025 р.

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**  
*Курилку Ярославу Сергійовичу*

1. Тема проекту (роботи) «Інтелектуальна система прийняття рішення в процесі керування сушінням зерна»  
 керівник проекту (роботи) Галай Василь Миколайович, к.т.н., доцент  
 затверджена наказом вищого навчального закладу від “03” 09 2025 року №1025 ф.а
2. Строк подання студентом проекту (роботи) 22.12.2025 р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи) Технічна документація на зерносушарку ДСП – 3.  
Зміна температури зерна в процесі мушки 10 - 50<sup>0</sup>С. Забезпечити перерегулювання у межах 20%, час регулювання не більше 60с.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз методів контролю та математичного опису параметрів сушіння зерна в сушарках. Ідентифікація управління сушінням зерна на основі нечітких множин. Виконання багатопараметричної ідентифікації та аналіз результатів. Моделювання управління сушінням зерна за допомогою нечіткого виводу. Дослідження впливу температури на показання діелектричної проникності зерна. Розроблення перевірки способу компенсації впливу температури на діелектричну проникність зерна. Дослідження розподілу вологості потоку зерна в горизонтальному перетині зони охолодження сушарки. Моделювання та розрахунок параметрів настроювання керуючого пристрою. Розроблення автоматизованої системи підтримки прийняття рішення щодо вибору режиму сушіння зерна. Розроблення підсистеми контролю вологості потоку зерна. Висновки по роботі.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів): Мета, об'єкт та предмет дослідження. Схема післязбиральної обробки зерна. Схема прямої шахтної зерносушарки типу ДСП. Характеристики об'єкта керування та вимірювальної інформації. Функція приналежності параметрів «Вологість» та «Запах» зерна. Графічне представлення приналежностей ситуації та виборок.

Тривимірне представлення результатів моделювання сушіння зерна. Функціональна структура та графічні залежності вимірювача діелектричної проникності. Графіки розподілу вологості в зерносушарці. Функціональна та структурна схеми камери сушки зерна. Графіки перехідних процесів. Алгоритми управління процесом регулювання вологості та температури. Блок-схема алгоритму передачі інформації. Схема автоматизації процесу управління вологістю потоку зерна. Функціональна схема перетворювача вологості сипучих матеріалів в потоці. Висновки по роботі.

6. Дата видачі завдання 15.09.2025 р.

*КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН*

№	Назва етапів магістерської роботи	Термін та обсяг виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
1	Аналіз методів контролю та математичного опису параметрів сушіння зерна.	07.10.25		15%	Пл. 1
2	Виконання багатопараметричної ідентифікації та аналіз результатів за допомогою нечітких множин.	21.10.25	I	25%	Пл. 2, 3
3	Розроблення та перевірка способу компенсації впливу температури на діелектричну проникність зерна.	04.11.25		40%	Пл. 4, 5
4	Дослідження розподілу вологості потоку зерна в горизонтальному перетині зони охолодження сушарки.	11.11.25		50 %	Пл. 6, 7
5	Моделювання та розрахунок параметрів настроювання керуючого пристрою.	18.11.25	II	60%	Пл. 8-10
6	Розроблення автоматизованої системи підтримки прийняття рішення щодо вибору режиму сушіння зерна.	25.11.25		70%	Пл. 11, 12
7	Розроблення підсистеми контролю вологості потоку зерна.	09.12.25		90%	Пл. 13,14
8	Оформлення пояснювальної записки	22.12.25	III	100%	Пл. 15

Магістрант

(підпис)

КУРИЛКО Я.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

ГАЛАЙ В.М.

(прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	7
1. ОГЛЯД СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ СУШІННЯ ЗЕРНА	9
1.1 Характеристика сушки зерна в сушарках	9
1.2 Методи контролю параметрів сушіння зерна в сушарках	18
1.3 Методи математичного опису сушіння зерна в сушарках	22
1.4 Висновки за розділом та постановка задач досліджень	28
2. МОДЕЛЮВАННЯ УПРАВЛІННЯ СУШІННЯ ЗЕРНА НА ОСНОВІ НЕЧІТКИХ МНОЖИН	30
2.1 Стан питання управління сушінням зерна в сушарках	30
2.2 Формулювання мети управління процесом сушіння зерна.	35
2.3 Ідентифікація управління сушінням зерна на основі нечітких множин з багатопараметричною оцінкою	38
2.3.1 Методи побудови функцій приналежності	39
2.3.2 Виконання багатопараметричної ідентифікації та аналіз результатів	41
2.4 Моделювання управління сушінням зерна за допомогою нечіткого виводу	44
2.4.1 Принцип проведення обчислювальних досліджень	44
2.4.2 Опис умов, результати обчислювальних досліджень	45
2.5 Висновки за розділом	52
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБУРЮВАЛЬНИХ ВПЛИВІВ НА ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ЗЕРНА	54
3.1 Аналіз методів вимірювання вологості зерна	54
3.2 Дослідження впливу збуджуючих впливів на діелектричну проникність зерна	61
3.2.1 Дослідження впливу температури на показання діелектричної проникності зерна	61
3.2.2	

Розроблення способу компенсації впливу температури на показання діелектричної проникності зерна	67
3.2.3 Перевірка способу компенсації впливу температури на показання діелектричної проникності зерна	68
3.3 Дослідження розподілу вологості потоку зерна в горизонтальному перетині зони охолодження шахтної сушарки ДСП-32	71
3.3.1 Принцип дослідження розподілу вологості потоку зерна в горизонтальному перетині зони охолодження шахтної сушарки ДСП-32 на основі планування і проведення експерименту	71
3.3.2 Особливості управління температурою й вологістю	75
3.3.3 Методи й засоби вимірювання вологості	76
3.3.4 Математична модель об'єкта керування	84
3.3.5 Розрахунок параметрів настроювання керуючого пристрою	87
3.3.6 Моделювання системи керування	88
3.3.7 Алгоритм регулювання температури й вологості	90
3.3.8 Принцип передачі даних	92
3.4 Висновки за розділом	94
4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ СУШІННЯ ЗЕРНА	95
4.1 Принцип автоматизованої системи підтримки прийняття рішення щодо вибору режиму сушіння зерна	96
4.2. Принцип підсистеми контролю вологості потоку зерна	99
4.2.1. Розроблення підсистеми контролю вологості потоку зерна	100
4.3 Висновки за розділом	106
ВИСНОВКИ	108
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	109
ДОДАТКИ	111

## ВСТУП

В Україні спостерігається підвищення врожайності, валового збору зерна - в 2018 році зібрано 50 млн. тон зерна, в 2019 році зібрано рекордний урожай зернових 61,5 млн. тон. Міністерство аграрної політики України заявляє про можливість збільшення виробництва зерна до 2020 року до 80 млн. тон. Збільшення валового збору зерна, сприяє збільшенню складової експорту країни. Вітчизняна і світова практика сушіння зерна на заготівельних підприємствах базується на тепловому методі сушки з конвективним енергопідводом. Пріоритет теплової сушки в потоці збережеться і в майбутньому. Процес сушіння зерна перед зберіганням (очищення, сушіння) характеризується найбільшою кількістю параметрів. На 96% підприємств України використовуються шахтні сушарки.

Зерно, яке надходить на заготівельні підприємства, очищається, сушиться (до базисних норм) для подальшого збереження і переробки. Час на збір врожаю обмежується кількома тижнями (місяць). За цей короткий проміжок зерно повинно бути очищене, висушене. Якщо зерно пересушити, то це призведе до зниження його ваги, перевитрати палива/енергії, збільшення собівартості продукції, зниження продуктивності технологічної лінії. Це супроводжується зниженням якості зерна, зниженням його вартості. Якщо зерно недосушити, то це призведе до додаткових заходів при його зберіганні, таким як: періодичному контролю температури, своєчасному охолодженні зерна, і додатковим економічним витратам. Існуюча інструкція по сушці і експлуатації сушарок повністю не вказує значень керуючих впливів (температура агенту сушки, час сушки/експозиція, витрата зерна) в тій чи іншій ситуації. Для заготівельного підприємства, важливо, не тільки дотримання інструкції, але і відповідність зерна вимогам контракту після очищення, сушки, зберігання.

При управлінні сушінням зерна завданням оператора є зниження вологості при збереженні якісних показників (хлібопекарських, продовольчих, кормових) зерна. Ефективність сушки визначається відповідністю вологості після сушіння

заданому значенню при збереженні інших якісних показників.

Сьогодні режим сушіння зерна в шахтних сушарках встановлюється оператором. Власний досвід оператора, особиста (органоліптична) оцінка таких показників зерна як температура, якість оболонки, колір, запах, вологість допомагають йому вибрати керуючі впливи в умовах невизначеності. Уміння кваліфікованих операторів при різних якісних показниках висушеного зерна з року в рік, ефективно управляти сушінням, використовуючи досвід і професійні здібності, обґрунтовує для моделювання процедури управління використовувати апарат нечітких множин. Знання оператора при оцінці процесу сушіння, прийняття рішень з управління сушінням зерна в умовах невизначеності призводять до істотних коливань якості зерна.

Підвищення вартості зерна в світі, коливання цін енергоносіїв, які імпортуються в нашу країну, вимагають дослідження і розробки технічних рішень, які підвищують кількість якісно висушеного зерна. Дана робота спрямована на дослідження процесу управління сушінням зерна оператором, отримання математичної моделі шляхом виявлення взаємозв'язку значень параметрів процесу сушіння з якісними показниками зерна. Сформульовані знання зберігаються для підтримки прийняття рішень при сушінні зерна в умовах невизначеності, що спрямоване на зменшення впливу фактору людини-оператора на якість продукту після сушки, підвищення ефективності сушіння.

**Метою магістерської роботи** є підвищення ефективності сушіння зерна шляхом удосконалення методів і моделей автоматизованого управління на підставі застосування нечітких множин та регресії в складі системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень (ППР) сушінням зерна в сушарках шахтного типу.

**Об'єкт дослідження** – процес управління сушінням зерна в сушарках шахтного типу.

**Предметом дослідження** є – методи і моделі управління сушінням зерна в сушарках шахтного типу.

# 1. ОГЛЯД СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ СУШІННЯ ЗЕРНА

## 1.1. Характеристика сушки зерна в сушарках

Процес сушіння полягає у видаленні вологи з різних матеріалів, базується на загальних фундаментальних законах тепло-масообміну широко використовується у виробництві (обробці) різних концентратів в гірській промисловості, матеріалів для вогнестійких, металізованих окатишів, вапна, цементу, азотних добрив, зерна, подрібненої деревини та ін. Сушінню піддають різні харчові продукти, напівфабрикати і сировину (зерно, солод, крохмаль, кормові та харчові дріжджі та ін.) [2]. Завдання сушіння - доведення до можливого мінімуму всіх життєздатних процесів при збереженні зерна як живого організму.

Сушку, як одну з операцій післязбиральної обробки зерна, проводять на заготівельних підприємствах (хлібоприймальних пунктах і елеваторах). Технологія обробки продовольчого зерна на заготівельних підприємствах складається з цілого ряду операцій, в результаті яких отримують зерно необхідної якості. Процес передбачає зважування вихідного матеріалу, розвантаження автомашин і залізничного транспорту, попереднє очищення, сушіння, первинну і вторинну очистку, сортування, транспортування зерна і відходів, зважування готової продукції, протруювання, тимчасове зберігання, вентилявання, тривале зберігання в силосах, в складах насипом або мішкотари.

В Україні і в світі на заготівельних підприємствах поширена конвекційна сушка. При конвекційному способі сушіння тепло передається зерну від сушильного агенту [3], а волога переміщається від матеріалу, що висушується до сушильного агенту. На 96% підприємств [4] України використовуються шахтні зерносушарки (на 48% підприємств використовуються шахтні вітчизняного виробництва, 38% - шахтні зарубіжного виробництва; 10% - шахтні вітчизняного та зарубіжного виробництва). На заготівельному підприємстві через географічне розташування і спеціалізації перелік культур, які підлягають заготівлі (сушці),

обмежується декількома найменуваннями.

Зерносушарка в технології післязбиральної обробки зерна на заготівельному підприємстві розташовується, як показано на рис. 1.1. Тут представлені дві прямоточні шахтні зерносушарки, розташовані поруч для більшого зниження вологості за прохід через технологічну лінію. Такий приклад часто можна зустріти на заготівельному підприємстві.

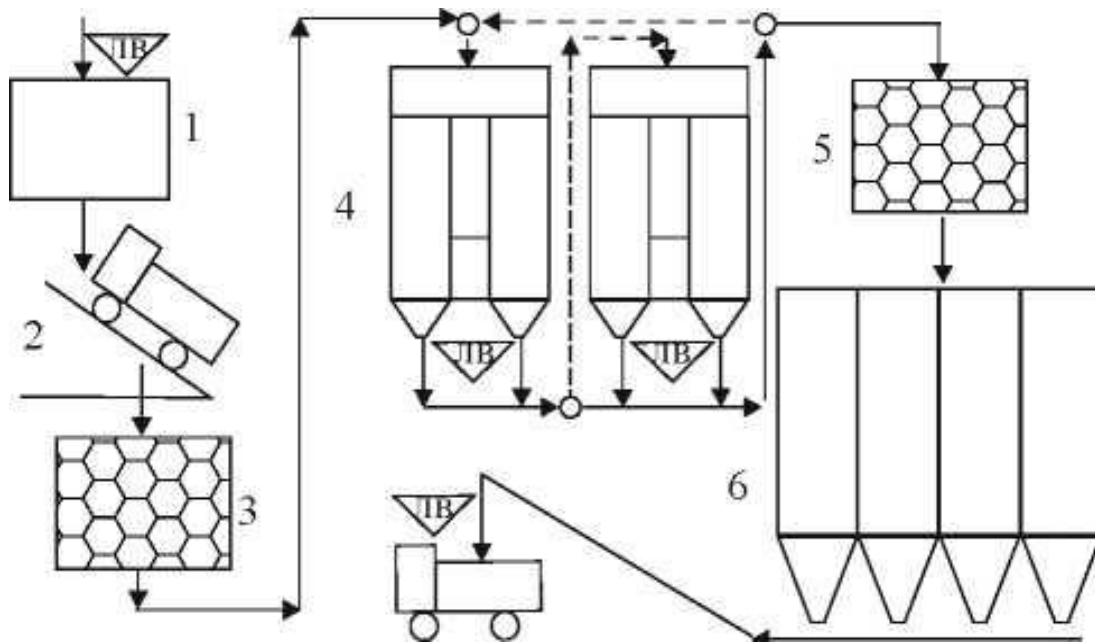


Рисунок 1.1 – Схема післязбиральної обробки зерна на заготівельному підприємстві: 1 - автомобільні ваги; 2 – автомобілерозвантажувач; 3 - зерноочисна машина (для попереднього очищення); 4 – зерносушарки прямоточні ДСП; 5 - зерноочисна машина (для вторинного очищення); 6 - елеватор

Беручи партію зерна на зберігання або переробку, лабораторія підприємства визначає його якість, тобто класифікує партію зерна згідно ДСТУ на дану культуру. Якість партії зерна контролюється при прийманні після очищення, сушки, під час зберігання і при відвантаженні.

З огляду на те, що енергоматеріали є імпортованим продуктом і в значній мірі впливають на ціну зерна, необхідно враховувати і структуру енерговитрат при виробництві зерна (табл.1.1) [5].

Таблиця 1.1– Структура енерговитрат в процесі вирощування, збирання та первинної обробки вологого зерна

Технологічна операція	Питомі енерговитрати, %	В тому числі	
		палива	електроенергії
1. Вирощування (обробка ґрунту, насіння, посів, догляд за посівом)	43	90	10
2. Прибирання	15	100	-
3. Первинна обробка, всього	30	65	35
у тому числі: сушка	21	85	15
очистка	9	-	100
4. Зберігання	7	10	90
5. Транспортування	5	85	15

З таблиці видно, що енерговитрати післязбиральної обробки зерна використовуються на сушку, очистку, зберігання, транспортування. Все разом складає 42% і відповідає енерговитратам на ґрунті, посів насіння, догляд за посівом. У післязбиральній обробці, сушка зерна має високі питомими енерговитратами, які складають 21%. Необхідно розуміти, що витрата енергії при сушінні залежить від зернової культури, її призначення, стану, необхідної технології обробки. Наприклад, для пшениці витрати енергії на післязбиральну обробку становлять 18-25%, а для кукурудзи насінневої - 50-60% [5].

На заготівельних підприємствах сушка виконується конвекційним способом в основному в шахтних зерносушарках. У післязбиральній обробці сушка зерна є енерговитратним процесом. Для розкриття системи управління сушінням зерна слід виконати аналіз характеристик (особливостей) сушіння в шахтних сушарках, виявити параметри і критерії управління.

Зерносушарка типу ДСП продуктивністю 12, 16, 20, 25, 32 і 50 планових тон/год [6], що випускається ВАТ «Карлівський машинобудівний завод» м. Карлівка, Полтавська обл., є найбільш поширеними. У таких зерносушарках застосовується конвективна сушка зерна в щільному рухомому шарі.

де 1 - норія сирого зерна; 2, 4 - вентилятори сушильних зон; 3 - патрубок з

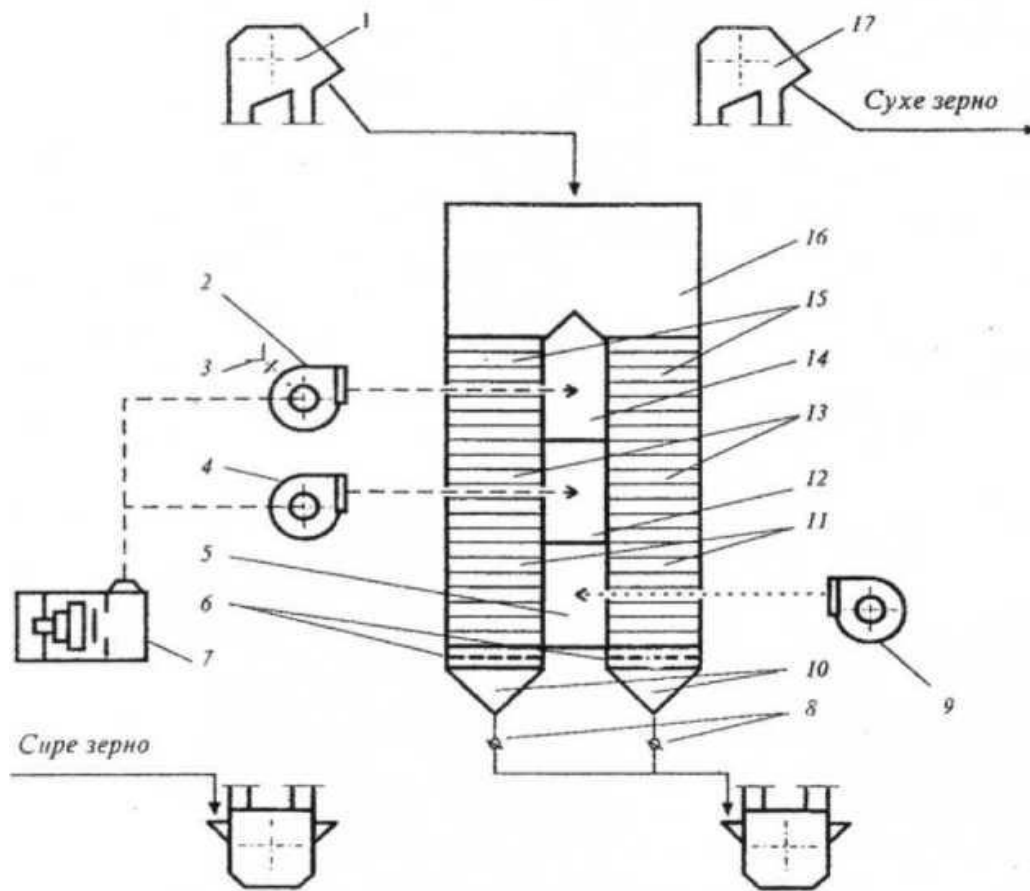


Рисунок 1.2- Схема прямої шахтної зерносушарки типу ДСП, дросельною заслінкою; 5 - повітророзподільна камера охолоджувальної зони; 6 - випускні механізми: 7- топка; 8- заслінки; 9 - вентилятор охолоджувальної зони; 10 – підсушуючий бункер; 11 - охолоджувальна зона; 12 - газорозподільна камера другої зони; 13 - друга сушильна зона; 14 - газорозподільна камера першої зони; 15 - перша сушильна зона; 16 - надсушильний бункер; 17 - норія сухого зерна

За характером руху зерна [7] всі шахтні зерносушарки діляться на прямоточні і рециркуляційні. У прямоточних сушарках зерно проходить один раз через шахту, після чого повністю випускається з сушарки. У рециркуляційних зерносушарках частина висушеного зерна циркулює по замкнутому контуру, проходячи циклічно стадії змішування з вологим зерном, відстежування отриманої суміші і сушки. Зерно сушать агентом сушіння, що представляє собою підігріте в калорифері повітря або суміш атмосферного

повітря з гарячими продуктами згоряння газоподібного або рідкого палива.

У прямоточних зерносушарках зерно проходить через сушильну шахту один раз. Можливе зниження вологості залежить від прийнятого режиму сушіння. Зазвичай, щоб уникнути перегріву і погіршення якості зерна, вологість його знижується за один прийом не більше 6-7%. При необхідності більшого зниження вологості доводиться застосовувати двох - триразовий пропуск зерна через зерносушарку або встановлювати послідовно кілька зерносушарок (рис.1.1). Повторна сушка сирого зерна ускладнює поточну обробку, різко знижує коефіцієнт використання сушильних потужностей, призводить до непродуктивних витрат коштів на вантажно-розвантажувальні роботи. Встановлюючи послідовно кілька прямоточних зерносушарок, забезпечують обробку найбільшої кількості зерна. Для прямоточних зерносушарок необхідні партії зерна з близькою початковою вологістю. Різниця по вологості окремих партій зерна не повинно перевищувати 2 ... 3%. У рециркуляційних зерносушарках, на відміну від прямоточних, частина виробленого зерна змішується з сирим зерном і знову повертається в зерносушарку. Завдяки цьому, можна висушити зерно з високою початковою вологістю до сухого стану, стійкого для зберігання.

Основним завданням сушіння зерна є зменшення вологості для приведення зерна в стійкий для зберігання стан. При сушінні не допускається погіршення хлібопекарських, продовольчих і кормових якостей зерна і якості олійного насіння. Працівники, які обслуговують зерносушарку, повинні дотримуватися режимів сушіння зерна, виконувати норми продуктивності, економити паливо і електроенергію. За кількісне і якісне зберігання зерна під час сушіння на зміні несуть відповідальність зерно-сушильник (оператор зерносушарки) і лаборант, який контролює процес сушіння, відбираючи проби зерна. Інструкція визначає вимоги до безпечної експлуатації сушарок, щоб уникнути загоряння сушарки, перегріву, псування зерна при сушінні.

Описуючи процес управління сушінням зерна варто відзначити, що це управління, при якому управляючі дії виробляються, здійснюються за

безпосередньої участі людини-оператора. Це управління зі зворотним зв'язком [8], при якому поточні дії, що управляючі впливи виробляють з урахуванням стану об'єкта управління. Відомості про якісні показники зерна після сушіння дозволяють реалізувати управління по відхиленню [8], коли управляючі дії виробляються тільки за значеннями впливів (сигналів) відхилень.

У процесі сушіння контролюються параметри [9]: температура агенту сушіння, температура нагріву зерна, стан устаткування і ін., а також якісні показники партії зерна в лабораторії підприємства: запах, колір, вологість, кількість і якість клейковини в пшениці, схожість для насіння, стан оболонки (підсмажені, потемнілі), зараженість і ін.

Розіб'ємо умовно параметри, що характеризують процес сушіння пшениці [10] на ряд груп (рис.1.3). Контрольовані впливи - параметри визначають якість вихідного матеріалу шифруються наступним чином: Культура - зернова культура;  $K_3V_{вх}$  - вологість зерна;  $K_3ЗАП_{вх}$  - запах зерна, тобто наявність запаху диму, сірчистого газу, рідкого палива;  $K_3K_{вх}$  - колір зерна;  $K_3ЯО_{вх}$  - якість оболонки зерна (потемніння, підгоряння, розтріскування оболонки, наліт кіптяви, запарені зерна з сирі оболонкою);  $K_3ЗАР_{вх}$  - зараженість;  $K_3ДБ_{вх}$  - домішка бур'яниста;  $K_3ДБ1_{вх}$  - домішка бур'яниста в тому числі зіпсовані зерна, наявність битих, завалених зерен, кришиться ендосперм;  $K_3ДЗ_{вх}$  - домішка зернова;  $K_3Н_{вх}$  - натура;  $K_3КК_{вх}$  - кількість сирі клейковини;  $K_3ЯК_{вх}$  - якість клейковини.

Керовані параметри скорочено позначені:  $T_{аг.1}$  - температура сушильного агенту на вході в сушильну шахту першої зони;  $T_{аг.2}$  - температура сушильного агенту на вході в сушильну шахту другої зони;  $Z_3$  - швидкість (витрата) зерна.

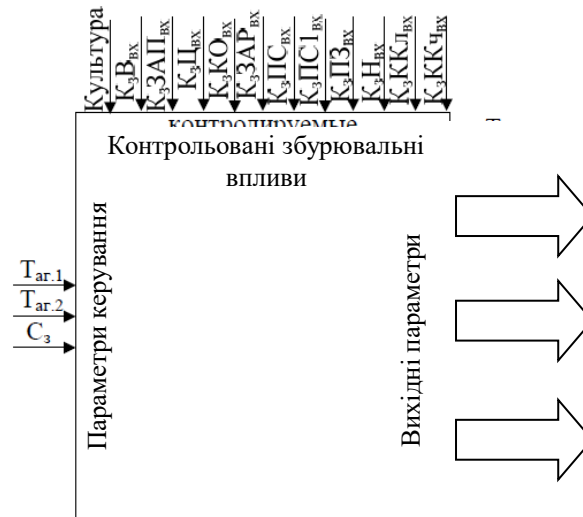


Рисунок 1.3 – Структура об'єкта управління

Вихідні параметри позначені:  $T_z$  - температура зерна на виході другої зони нагріву;  $T_{z,вих}$  - температура зерна на виході;  $K_3B_{вих}$  - вологість зерна;  $від. K_3ЗАП_{вих}$  - відхилення запаху зерна, тобто наявність запаху диму, сірчистого газу, рідкого палива;  $від. K_3K_{вих}$  - відхилення кольору зерна;  $відкл. K_3ЯО_{вих}$  - відхилення якості оболонки зерна (потемніння, підгоряння, розтріскування оболонки, наліт кіптяви, запарені зерна з сирію оболонкою);  $K_3ЗАР_{вих}$  - зараженість;  $K_3ДБ_{вих}$  - домішка бур'яниста;  $K_3ДБ1_{вих}$  - домішка смітна домішка бур'яниста, в тому числі зіпсовані зерна, наявність битих, завалених зерен, кришиться;  $K_3ДЗ_{вих}$  - домішка зернова;  $K_3Н_{вих}$  - натура;  $K_3ККЛ_{вих}$  - кількість сирію клейковини;  $K_3ЯКЛ_{вих}$  - її якість.

При зміні культури або призначення зерна (наприклад, насіннєве зерно) перелік параметрів може змінитися. Для окремого вихідного параметра правило (завдання) управління задається формулою:

$$відкл. X_{вих} = |X_{вих} - X_{ц}| \rightarrow \min \quad (1.1)$$

Де  $відкл. X_{вих}$  - відхилення параметра після сушарки від цільового значення;

$X_{ц}$  - цільове значення параметра після сушарки;

$X_{вих}$  - значення параметра після сушарки.

$$відкл. K_3B_{вих} = |K_3B_{вих} - K_3B_{вих/ц}| \rightarrow \min \quad (1.2)$$

де  ${}_{\text{відкл}} K_3 B_{\text{вих}}$  - відхилення параметра вологість після сушарки від цільового значення;

$K_3 B_{\text{вих/ц}}$  - цільове значення параметра вологість після сушарки;

$K_3 B_{\text{вих}}$  - значення параметра після сушарки

$${}_{\text{відх}} K_3 \text{ЯО}_{\text{вих}} = |K_3 \text{ЯО}_{\text{вих}} - K_3 \text{ЯО}_{\text{ех}}| \rightarrow \min \quad (1.3)$$

де  ${}_{\text{відх}} K_3 \text{ЯО}_{\text{вих}}$  - відхилення параметра якість оболонки після сушарки від цільового значення;

$K_3 \text{ЯО}_{\text{ех}}$  - значення параметра якість оболонки до сушарки;

$K_3 \text{ЯО}_{\text{вих}}$  - значення параметра якість оболонки після сушарки.

$${}_{\text{відх}} K_3 K_{\text{вих}} = |K_3 K_{\text{вих}} - K_3 K_{\text{ех}}| \rightarrow \min \quad (1.4)$$

${}_{\text{відх}} K_3 K_{\text{вих}}$  -

відхилення параметра колір зерна після сушарки від цільового значення;

$K_3 K_{\text{ех}}$  значення параметра колір зерна до сушарки;

$K_3 K_{\text{вих}}$  - значення параметра колір зерна після сушарки.

$${}_{\text{відх}} K_3 \text{ДБ1}_{\text{вих}} = |K_3 \text{ДБ1}_{\text{вих}} - K_3 \text{ДБ1}_{\text{ех}}| \rightarrow \min \quad (1.5)$$

Де  ${}_{\text{відх}} K_3 \text{ДБ1}_{\text{вих}}$  - відхилення параметра домішка бур'яниста після сушарки від цільового значення;

$K_3 \text{ДБ1}_{\text{ех}}$  - значення параметра домішка бур'яниста до сушарки;

$K_3 \text{ДБ1}_{\text{вих}}$  - значення параметра домішка бур'яниста після сушарки.

Подібно правила записуються для параметрів  ${}_{\text{відх}} K_3 \text{ЗАП}_{\text{вих}}$  відхилення запаху зерна,  $K_3 \text{ДБ}_{\text{вих}}$  домішка бур'яниста,  $K_3 \text{ДЗ}_{\text{вих}}$  домішка зернова,  $K_3 \text{КК}_{\text{вих}}$  кількість сирії клейковини  $K_3 \text{ККл}_{\text{вих}}$  якість клейковини. для параметрів  $K_3 \text{ЗАР}_{\text{вих}}$  зараженість,  $T_3$  температура зерна на виході другої зони нагріву,  $T_{3.\text{вих}}$

температура зерна на виході записуються окремі правила управління.

$$K_{з.ЗАР_{вих}} \rightarrow \min \quad (1.6)$$

де  $K_{з.ЗАР_{вих}}$  - значення параметра зараженість після сушарки.

$$T_{з} \leq T_{з.ц} \quad (1.7)$$

де  $T_{з}$  - значення параметра температура зерна на виході другої зони нагріву,

$T_{з.ц}$  - цільове значення параметра температура зерна на виході другої зони нагріву;

$$T_{з.вих} \leq (T_{пов.} - 10) \quad (1.8)$$

де  $T_{з.вих}$  - значення параметра температура зерна на виході,

$T_{пов.}$  - значення параметра температура навколишнього повітря;

Для параметра  $K_{з.H_{вих}}$  - натура правило керування не записується. Цей параметр повинен контролюватися один раз за зміну, призначається, в тому числі, для оцінки маси партії просушеного зерна.

Метою управління сушінням зерна є зниження вологості зерна при збереженні інших якісних характеристик, що визначаються призначенням зерна після сушіння. Набір правил управління формулює мету процесу управління і є критерієм сушки зерна. Цей складний комплексний показник результативності враховує вимірювані і суб'єктивно оцінювані параметри зерна, роботи зерносушарки.

Відповідно до інструкції по сушці зерна та експлуатації сушарок допускаються відхилення в параметрах: температура зерна не більше ніж на 5 °С, температура агенту сушіння, не більше ніж на 5 °С від заданого значення для прямооточних сушарок і на 10 °С для рециркуляційних сушарок. Відхилення по вологості зерна на виході з сушарки не більше 0,5% від заданого рівня.

Інструкція по сушці і експлуатації сушарок не містить конкретних значень керуючих впливів для культур, які підлягатимуть сушінню. Відповідальність за результативність (якість) сушіння зерна за інструкцією покладається на оператора і лаборанта відбираючого проби зерна до і після сушіння. Лаборант повідомляє результати аналізу відібраних проб оператору. Сушка зерна багато

параметричний, багато зв'язний процес. Система управління людино-машинна (автоматизована), оператор підтримує вихідні параметри поблизу цільових значень. Розглянемо методи контролю параметрів сушіння для вироблення керуючих впливів.

## **1.2 Методи контролю параметрів сушіння зерна в сушарках**

Одним з основних вимог інтенсифікації процесу сушіння зерна є ведення процесу на максимально допустимих температурах нагріву зерна, тобто в умовах значного ризику зниження його якості [9,11]. Згідно з інструкцією по сушці зерна та експлуатації сушарок [7], для досягнення максимальної продуктивності сушарки і високої якості просушеного зерна оператор зобов'язаний регулярно контролювати температуру агенту сушіння, максимальну температуру нагрівання зерна, а також рівень зерна в тепловологообмінника, оперативному бункері і бункері над камерою нагріву, завантаження норії, постійно спостерігати за роботою обладнання зерносушарки. Лабораторії підприємства наказано здійснювати систематичний контроль температурних режимів і якості зерна при сушінні, для чого не рідше, ніж кожні 2 години відбирати проби зерна до і після сушіння на аналізи. За цим пробам визначати температуру зерна, вологість, запах, стан оболонки (підсмажені, потемнілі), колір, зараженість, кількість і якість клейковини в пшениці. Результати аналізу негайно повідомляти оператору. З контрольних проб зерна до і після сушіння складаються проби за зміну, в яких, крім зазначених показників, визначають натуру, смітну домішку, в тому числі зіпсовані зерна, зернову домішку.

Найпростішим для вимірювання параметром є температура. Для вимірювання температури агенту сушіння і атмосферного повітря використовують логометри (цифрові прилади) з термометрами опору (тип ТОП – термометр опору платиновий). Термометр опору встановлюють в підвідному дифузори або повітроводі безпосередньо перед сушильними зонами, в повітроводах. Правильність показань дистанційних термометрів перевіряється

шляхом зіставлення з показаннями ртутних термометрів, які встановлюються поруч з термометрами опору в дифузор або повітровод. Для вимірювання температури зерна користуються логометри (цифрові прилади) з термометрами опору (тип ТОМ - термометр опору мідний), вивіреними скляними термометрами. Температуру зерна за допомогою скляних термометрів визначають за допомогою відбору проб зерна. Працівникам лабораторії наказано для визначення максимальної температури нагріву зерна при пуску сушарки проби відбирати кожні 30 хв, при сталому режимі - кожні 2 год.

З проб, відібраних до і після сушарки, в лабораторії вимірюються параметри: натура [12], вологість зерна [13], бур'яно-зернова домішка [14], Зараженість [15], запах, колір [16], клейковина [17]. З точки зору витраченого часу, найбільш тривалі в визначенні параметри клейковини і вологості, які займають одну годину часу.

Аналіз інструкції [7] і організації сушки на підприємстві дозволяє стверджувати, що відбір проб зерна, їх аналіз покладається на лаборанта, а управління сушаркою, відповідальність за результат сушіння покладається на оператора.

Сучасні сушарки зарубіжного виробництва [18, 19, 20, 21, 22] оснащуються технічними засобами автоматизації, однак, розгорнутий опис відсутній, що обмежує аналіз технічних рішень з посиланням на виробника.

Конвеєр в післязбиральній обробці зерна, включаючи сушку, був досліджений [23] з метою визначення оптимальної сукупності автоматичних пристроїв і оптимального розподілу функцій між оператором і автоматичними пристроями. Наводяться результати досліджень інформаційних характеристик системи «Оператор - конвеєр», де оцінювалася якість автоматизованого (ручного) керування потоковою лінією післязбиральної обробки зерна і можливості людини-оператора з прийому, обробки та використання інформації. Відзначається, що оператор (зерносушарник) здійснює періодичний контроль процесом сушіння, важливим параметром якого є період циклу. При автоматизованому (ручному) управлінні періоди циклів, як показали

дослідження [23], виявилися випадковими величинами.

Таблиця 1.2 - Характеристики вимірювальної інформації

№ п / п	Найменування контро- лінійних параметрів	Період циклу контролю		Час дії оператора, с	критерій цінності інформації	ранги цінності параметрів
		Контрольні значення Тц.о., хв	Розрахункові значення Тц.р., хв			
1	Вологість зерна, що надходить	120	80,1	300	0,025	7
2	Вологість зерна після сушіння	60	17,713,3i)	300	0,122	1
3	Температура теплоносія в сушарці	26	8,5	126	0,047	5
4	Температура зерна в сушарці	26	14,8	126	0,034	6
5	Відносна вологість зовнішнього повітря		34,6	140	0,087	2
6	Рівень зерна в над-сушильному бункері	24,8	24,8	125	0,051	4
7	Наявність факела в топці сушарки	29,7	29,7	125	0,021	8
8	Стан електродвигунів приводу	480	480	940	0,072	3

Зіставлення розрахункових і дослідних циклів дозволяє зробити висновок, що на практиці інтервал часу контролю більшості параметрів в 2 ... 5 разів більше, ніж потрібно. Особливо тривалий інтервал контролю вологості потоку зерна після сушіння - інтервал контролю в даний час в 4 (18) разів більше рекомендованого значення. Це призводить до зниження якісних характеристик. Ефективність управління процесом сушіння зерна оператором можна охарактеризувати дконтрольними даними [23], наведеними в табл.1.3.

Таблиця 1.3 - Показники роботи сушарки при автоматизованому керуванні

№	Найменування параметрів	характеристики параметрів
---	-------------------------	---------------------------

п / п		Середнє значення	Середнє квадратичне відхилення
1	Вологість зерна, що надходить, %	20,7	3,5
2	Температура теплоносія в сушарці, °С	69,8	10
3	Температура зерна в сушарці, °С	32,8	5
4	Вологість обробленого зерна, % (на виході сушарки)	14,4	2,5

З цієї таблиці видно, що оперативний персонал при автоматизованому управлінні не в змозі забезпечити необхідні режими сушіння насіннєвого зерна. Температура теплоносія в сушарці змінювалася в широких межах. Значні коливання вологості обробленого насіннєвого зерна викликано, як коливаннями температури теплоносія, так і низькою періодичністю і вибірковістю контролю вологості зерна на виході зерносушарки. Навіть середні значення вологості не відповідали кондиційним значенням, а з урахуванням середніх квадратичних відхилень цих показників за час дослідів отримано, близько 50% насіння, некондиційних по вологості. Цей приклад підтверджує, що оператор недостатньо поінформований про стан сушки зерна, що відбивається на результаті.

В умовах відсутності достовірних відомостей про стан процесу сушіння зерна досвідчені оператори контролюють стан зерна за допомогою органів почуттів (органолептичним методом): температура зерна, якість оболонки, колір, запах, смак, вологість зерна.

Отже, ефективність сушіння зерна залежить: 1) від оперативності контролю параметрів, найбільш важливим з яких є «вологість зерна» і повинен контролюватися фактично безперервно; 2) від кваліфікації оператора, його вміння вибрати раціональний режим сушіння, при відсутності достовірних відомостей про стан об'єкта.

Слід зауважити, що лаборант і оператор здійснюють періодичний контроль параметрів процесу сушіння з інтервалом часу вище необхідного. Інтервал контролю за часом параметра «вологість зерна після сушіння», як найбільш значимого, в 3 ... 18 разів вище, ніж потрібно. Тривалість лабораторного аналізу дозволяє оператору виявляти взаємозв'язок між збуджуючими впливами,

вихідними і керованими параметрами з інтервалом у часі, як правило, 2 години. Таким чином, оператор управляє сушкою зерна в умовах невизначеності. Необхідно розглянути існуючі методи математичного опису сушки для отримання моделі об'єкта.

### **1.3 Методи математичного опису сушіння зерна в сушарках**

Управління об'єктом передбачає наявність моделі даного об'єкта, представленої в тому чи іншому вигляді. Проаналізуємо існуючі моделі процесу сушіння зерна та їх придатність для автоматизації управління технологічним процесом.

Математичний опис процесу сушіння зерна як колоїдного капілярно-пористого матеріалу [24] в загальному вигляді характеризується рівняннями тепло- і масо-обміну. Стан об'єкта характеризується функціями розподілу, точне аналітичне рішення утруднено. У зв'язку з цим, при математичному описі процесу, в кожному конкретному випадку знаходять по різному, зокрема, вдаючись до спрощення задачі, отримання напівемпіричних і емпіричних виразів.

В роботі [3, 25] розглянута математична модель процесу сушіння зерна в шахтній сушарці, що складається з однієї або двох паралельних шахт прямокутного перетину. Шахта розділена на секції, в яких зерно і сушильний агент рухаються за принципом прямотоку і протivotоку. У кожному секціюсушильний агент вводиться і виводиться через горизонтальний ряд коробів. Зерно вниз послідовно проходить всі секції, а сушильний агент - одну, тобто в кожному секцію подається невідпрацьований сушильний агент. Авторами прийнята спрощена схема механізму сушки: а) волога із зерна виділяється по закону випаровування з вільної поверхні (в даному випадку - геометрично зовнішні поверхні зерна); б) суха речовина і волога в зерні мають однакову у всіх точках температуру; в) волога із зерна випаровується і видаляється одночасно; г) між шарами зерна, а також між шарами сушильного агента волого і теплообмін

не спостерігається, він відбувається тільки між зерном і сушильним агентом; д) теплообмін з навколишнім середовищем не враховується; е) стаціонарні поля температур і вологості приймаються одновимірними, що змінюються по координаті, відлічуваної в напрямку руху зерна.

Одна з моделей процесу сушіння зерна, що охоплює різні режими сушіння в щільному і киплячому шарах є модель [3] на підставі законів тепло- і масопереносу при цілому ряді спрощуючих припущень.

Для спрощення моделі прийнято, що шар складається з зернівок нескінченної циліндричної форми, які рухаються в декартовій прямокутній системі координат в напрямку осі  $x$ , що збігається з віссю циліндрів. Сушильний агент рухається перехресно (під кутом  $90^\circ$ ) уздовж осі  $y$ . Модель містить емпіричні коефіцієнти теплообміну і масообміну, може бути використана на різних стадіях моделювання процесів при вивченні кінетики і динаміки процесу. З точки зору типізації моделі, то вона є дифузійною багатопараметричною і описується системою диференціальних рівнянь в часткових похідних.

Похибка моделі, за даними авторів, для сушарок ВТІ-15, ДСП-24, ДСП-32 знаходиться в межах 4-7%.

Структурно імітаційну модель зерносушарки ДСП-32ОТ [29] можна розділити на кілька частин: модель формування сушильного агента, моделі першої і другої зон сушіння, модель зони охолодження зерна і модель ефективності функціонування зерносушарки. У даній роботі розвиток отримала математична модель процесів сушіння зерна за рахунок обліку енергії відриву молекул води від зерна, обмежень на відносну вологість відпрацьованого сушильного агента, зміни швидкості видалення вологи з зерна у міру його висушування, алгоритм управління для пускових режимів роботи системи гарантує управління з формуванням базової траєкторії перехідного процесу.

Звісно ж, що наведені моделі дозволяють моделювати різні методи конвекційного сушіння зерна в залежності від підведення тепла до матеріалу і гідродинамічного стану зернового шару в процесі сушіння. Так наприклад, конвекційна сушка [3], що враховує стан шару зерна і тиску (агента сушіння) в

сушильній камері, може бути в щільному рухомому і нерухомому шарах, в киплячому і віброкиплячих шарах, в підвішеному стані, в падаючому шарі. Наведені вище моделі оперують параметрами що не вимірюються на підприємствах, відповідно до інструкції по сушці зерна. Прикладами цих параметрів є: емпіричний коефіцієнт теплообміну; емпіричний коефіцієнт масообміну; віологовмісні (г/кг), барометричний тиск (мм.рт.ст.) і питома вага (кг/м) сушильного агента; коефіцієнт випаровування води з вільною поверхні (г/м • год • мм.рт.ст); частка геометричній зовнішньої поверхні зерна, з якої відбувається випаровування за законом Дальтона і т.д. Ці моделі не враховують всіх параметрів вимірюваних, суб'єктивно оцінюваних на підприємстві, які регламентовані інструкцією. У моделі не вказується, як виконати розрахунок для конкретної моделі сушарки, як виконати розрахунок для партії зерна підлягає сушки з урахуванням найменування культури та інших якісних характеристик.

Математичну модель, яка встановлює зв'язок між керованими величинами і керуючими впливами отримали для шахтної зерносушарки СЗШ-8 методом планування експерименту [30]. В якості досліджуваних відгуків обрані вологознімання за один пропуск, температура нагріву зерна. В якості вхідних впливів (факторів) прийняті вологість зерна, температура зерна, температура теплоносія на вході в сушильну камеру, частота коливань випускного апарату. Реалізувавши ортогональний план експерименту і обробивши дослідні дані на ЕЦОМ, отримали математичні моделі процесу сушіння у вигляді квадратичних поліномів (див. табл. 1.4., 1.5.).

Таблиця 1.4 -Передавальні функції сушильної камери СЗШ-8

	Найменування каналу передачі	Ряд коробів по висоті	
		2 ... 4 ряд коробів	6. ...15 ряд коробів
1.	Канал температура теплоносія $t_{ca}$ - температура зерна $t_3 (t_{ca} - t_3)$	$\frac{K_{t_{ca}t_3} e^{-ip}}{T_2^2 P^2 + T_1 P + 1}$	$\frac{K_{t_{ca}t_3} e^{-ip}}{T_2^2 P^2 + T_1 P + 1}$

2.	Канал частота коливань випускного апарату $\tau_{\text{ва}}$ - вологість зерна $w(\tau_{\text{ва}} - w)$	$\frac{K_{\tau_{\text{ва}}\omega} e^{-\tau P}}{T_2^2 P^2 + T_1 P + 1}$	$\frac{K_{\tau_{\text{ва}}\omega} e^{-\tau P}}{T_2^2 P^2 + T_1 P + 1}$
3.	Канал температура теплоносія $\tau_{\text{са}}$ - вологість зерна $w(\tau_{\text{са}} - w)$	$\frac{K_{\tau_{\text{са}}\omega} e^{-\tau P}}{T_2^2 P^2 + T_1 P + 1}$	$\frac{K_{\tau_{\text{са}}\omega} e^{-\tau P}}{T_2^2 P^2 + T_1 P + 1}$
4.	Канал вологість зерна до сушіння $w_{\text{вч}}$ - вологість зерна після сушіння $w(w_{\text{вч}} - w)$	$K_{\omega_{\text{вч}}\omega} e^{-\tau P}$	$K_{\omega_{\text{вч}}\omega} e^{-\tau P}$

Отримані моделі відображають розподіл температури і вологості зерна по висоті сушильної камери і дозволяють розраховувати криві кінетики нагрівання і сушіння зерна при різних поєднаннях вхідних факторів, як для всієї сушильної камери, так і для окремих її зон. Динамічні властивості сушильної камери визначалися по розгінним кривим, отриманим шляхом подачі на входи каналів типових одиничних впливів з подальшою обробкою їх на ЕОМ.

Таблиця 1.5 – Значення постійних часу

Постійні часу, хв	Межі зміни по каналах передачі		
	$(t_{\text{са}} - w)$	$(t_{\text{са}} - t_3)$	$(\tau_{\text{ва}} - w)$
T1	14.38.32.32	10.06.19.53	15.19.31.93
T2	6.66.15.36	4.49.9.23	6.76.15.56
$\tau_0$	11.3.12.9	3.7.5.1	6.7.16.7

Отримані результати в ході дослідження [30] характеризують шахтну сушарку як багатозв'язкову, розподілену динамічну систему, що володіє значною інерційністю по каналах управління і транспортним запізненням. Основним обурюючим впливом процесу сушіння є коливання вологості зерна на вході. Представлені передавальні функції характерні для однієї культури зерна на момент проведення експерименту, для однієї сушильної камери СЗШ-8, в якій проводився експеримент; враховують з якісних характеристик зерна тільки вологість і температуру зерна, що недостатньо для сушіння зерна в умовах підприємства. Неможливо виконати розрахунок для іншої культури зерна, тим більше для іншої сушильної камери.

Представлені вище математичні описи процесу сушіння зерна відносяться до класу детерміновані (визначені), стохастичні (ймовірні). Огляд процесу

управління сушінням зерна показує, що кінцевий корисний ефект роботи сушарки – вологознімання, або значення кінцевої вологості зерна після сушарки, визначається просторовими змінами поточної вологості зерна, що залежить від безлічі значень якісних параметрів зерна і безлічі значень технологічних параметрів. Облік безлічі параметрів процесу сушіння зерна, при побудові імовірнісної моделі вимагає виконання умов: 1). Масовість проведених експериментів, тобто наявність великої вибірки; 2). Повторюваність умов експериментів, що виправдує порівняння їх результатів; 3). Статистична стійкість [3]. Це свідчить, що стохастичний підхід заздалегідь не можна застосовувати до одиничних експериментів. Застосування стохастичного підходу практично важко виконати для сушіння зерна. Керуючи сушінням, з року в рік, оператор взаємодіє з живою природою, яка змінюється і ніколи в точності не повторюється. Тому важливо і необхідно значення досвіду, інтуїції і особистісних якостей оператора для ефективного управління сушінням зерна.

Приклади недермінорованої моделі управління сушінням представлені авторами, [13] однак, з дуже сильним спрощенням за кількістю параметрів, не враховується якість сушеного продукту. Відзначається, що процесом сушіння зерна дуже складно управляти через тимчасові затримки і нелінійного поведіння. Представлена модель [12], містить два вхідних параметра: помилка між фактичною вологістю зерна на виході і граничним значенням; швидкість зміни помилки. Один вихідний параметр системи управляє швидкістю потоку зерна. Перевірка адекватності проведена із використанням користування моделі процесу, розробленої Лю і Баккег-Лгкеша (2001 р.) для потокової сушарки зерна. Відзначається простота процесу проектування на основі нечітких множин. Цю модель можна розглядати як спрощений приклад процесу управління, для ознайомлення з математичним апаратом нечіткого виведення. Даній математичний опис не враховує параметрів оцінюваних оператором на підприємстві. Проте, підходи, закладені в дану модель виявляються найбільш адаптованими до умов сушки зерна на підприємстві, оскільки дозволяють дати кількісну оцінку факторам, оцінюваним оператором на основі власного досвіду,

суб'єктивно.

Жодна з наведених моделей не застосовується для управління процесом сушіння зерна в шахтних зерносушарках через недостовірність математичного опису, нестационарністю об'єкта управління. Такими причинами є:

- неточності самої моделі процесу (неповнота інформації про параметри системи);
- похибка і перешкоди вимірювання вхідних і вихідних параметрів системи;
- мінливість фізико-механічних властивостей (якісних показників) оброблювальної зернової маси (вологість, засміченість, натура, клейковина для пшениці і ін.);
- мінливість конструктивних особливостей зерносушарок.

Оператори справляються із завданням отримання на виході зерносушарки зерна заданої якості. Для отримання на виході зерносушарки зерна заданої якості істотний вплив роблять знання оператора. Тому що поряд з достовірними кількісними даними і результатами присутні неоднозначні суб'єктивні, що вимагає нових підходів в математичному описі. Помічено, що кваліфікований оператор приймає рішення по управлінню на підставі контрольно-вимірювальних приладів, наявних на зерносушарці, результатів лабораторного аналізу і власному досвіді сушки зерна. Необхідно вибрати математичне забезпечення для формулювання знань оператора, щоб технічна система відтворювала (допомагала повторити) досягнутий раніше результат (ефект) досвідченим оператором.

Тому перспективним напрямком з управління процесом сушіння зерна є використання для цілей автоматизованого управління моделі, що дозволяє враховувати досвід і знання кваліфікованих операторів. Даний напрямок передбачає розробку недотерменірованої моделі процесу з використанням апарату нечітких множин для формулювання знань кваліфікованих операторів та подання суб'єктивних сприйнять операторів якісних характеристик зерна та інших характеристик процесу сушіння, аналізованих за допомогою органів

почуттів.

#### 1.4 Висновки за розділом та постановка задач досліджень

В технологічному процесі післязбиральної обробки зерна проаналізовано процес управління сушінням в зерносушарках шахтного типу та виявлено наступні особливості.

1. Поширеним типом зерносушарок (96%) на підприємствах України є шахтні зерносушарки з конвективним способом сушіння. Оператор повинен дотримуватися режимів сушіння зерна, виконувати норми продуктивності, економити паливо і електроенергію. При таких умовах, ефективність роботи зерносушарок (зниження вологості при збереженні якісних показників) залежить від кваліфікації оператора і рівня автоматизації.

2. Оператор зерносушарки від 2 до 5 разів рідше контролює параметри процесу сушіння, ніж потрібно. Найбільш критичною величиною для контролю є вологість зерна після сушіння - фактичний інтервал часу її контролю до 18 разів більше рекомендованого.

3. Відомі моделі процесу сушіння нераціонально використовувати для управління в силу властивих їм недоліків:

– детерміновані моделі через наявність диференціальних рівнянь тепло - масообміну з функціями, які не мають точного аналітичного рішення і використовують напівемпіричні або емпіричні вирази, отримані для конкретних умов;

– наявність великої кількості параметрів що не вимірюваних в умовах заготівельних підприємств;

– імовірнісні моделі - через прив'язку до зерносушарку певного типу (зерносушарці СЗШ-8) і обмеженого обліку тільки вологості і температури зерна, з безлічі показників, що підлягають оцінці згідно з нормативними документами;

– недетермінірованій моделі спрощена і зведена до двох вхідних

параметрів і одного вихідного, що також не відповідає вимогам нормативних документів.

4. Експлуатація шахтних сушарок здійснюється при неповноті інформації про стан об'єкта управління, що виключає математичний опис процесу управління сушінням детермінованими або імовірнісними моделями. Найбільш перспективним напрямком удосконалення систем управління сушінням зерна є системи, побудовані на підходах, закладених в недетермініровану модель, а саме - використання нечітких множин для формулювання знань кваліфікованих операторів. Даний підхід виявляється найбільш адаптованим до умов сушки зерна, оскільки дозволяє привести до єдиної кількісної оцінки абсолютно різні фізичні величини, вимірювані і оцінювані оператором на основі власного досвіду.

Для досягнення мети магістерської кваліфікаційної роботи необхідно вирішити такі завдання:

1. Виконати моделювання процесу управління сушінням зерна оператором на основі моделі нечітких множин, визначити і дослідити ефективність управління для автоматизації підтримки прийняття рішень по вибору величини керуючих впливів при сушінні зерна.

2. Обґрунтувати науково-технічне рішення по оперативному контролю вологості, провести дослідження впливу збурюючих впливів на вимір вологості потоку зерна в шахтній сушарці;

3. Запропонувати технічну реалізацію системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень сушки зерна з підсистемою контролю вологості потоку зерна в сушарках шахтного типу, оцінити показники ефективності її використання.

## 2МОДЕЛЮВАННЯ УПРАВЛІННЯ СУШІННЯ ЗЕРНА НА ОСНОВІ НЕЧІТКИХ МНОЖИН

### 2.1 Стан питання управління сушінням зерна в сушарках

В Україні шахтні сушарки найпоширеніші [4]. Кількість сушарок однієї моделі може вимірюватися сотнями, при цьому вони містять конструктивні, технічні особливості, що змінюються в часі. До того ж спостерігається мінливість фізико-механічних властивостей оброблюваної зернової маси (вологість, засміченість, натура, клейковина для пшениці і ін.) В один рік в різних областях, в різні роки в одній області. Суть підходу до автоматизації процесу сушіння зерна полягає в тому, щоб навчити систему управління процедурі сушіння кваліфікованим оператором (сушильним майстром). Результатом процедури повинен бути якісний продукт на виході сушарки. Надалі сформульовані знання кваліфікованого оператора можна використовувати для автоматичного режиму сушіння зерна або підтримки прийняття рішення в умовах невизначеності, при такій постановці завдання інтерпретація невизначених величин як нечітких більше відповідає реальним умовам виробництва ніж інтерпретація цих величин як детермінованих або випадкових. Спостереження за оператором показало, що ним контролюється не тільки стан обладнання зерносушарки, але і якісні параметри зерна для прийняття рішення. Найважливішим параметром є вологість на вході і виході зерносушарки, також їм контролюється температура нагріву зерна, запах, колір, якість оболонки зерна і ін. Ці параметри оператори контролюють частіше ніж лабораторія, яка виконує відбір проб не рідше ніж кожні дві години. Структура формування даних [37, 38] при контролі стану сушки зерна графічно зображена на рис.2.1.

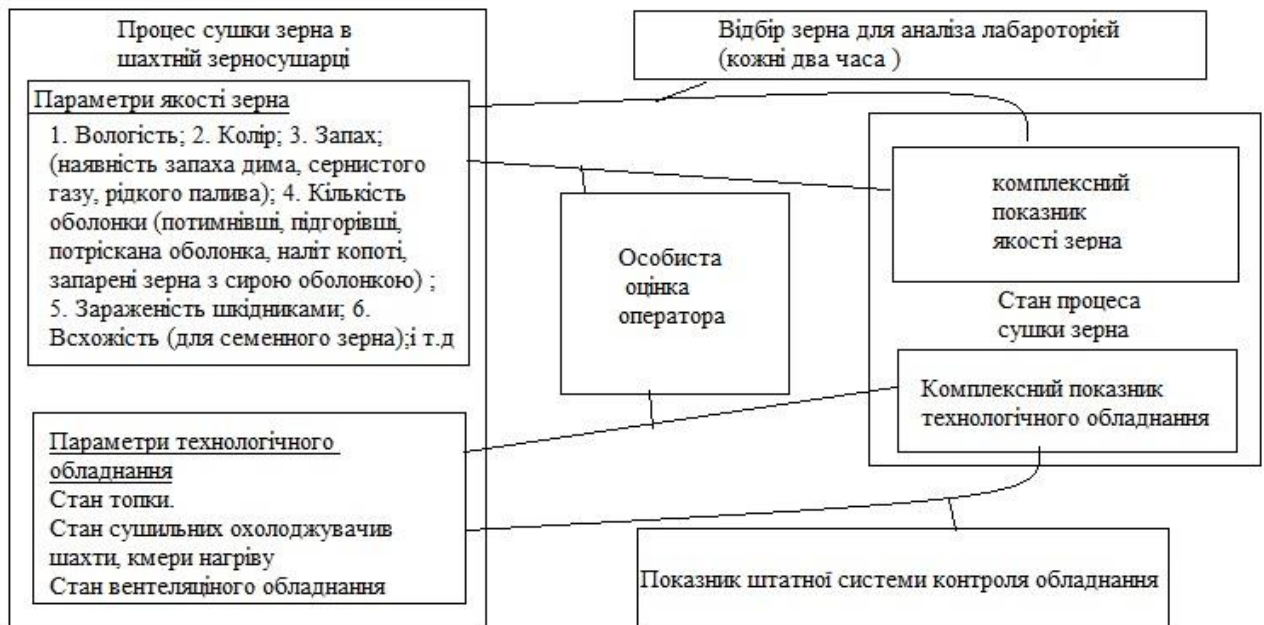


Рисунок 2.1 – Структура формування даних для процесу сушіння зерна

Безліч параметрів процесу сушіння зерна розділене на два підмножини параметрів: параметри якості зерна та параметри технологічного обладнання, яке функціонує при сушінні зерна. Стан процесу сушіння характеризується двома показниками: комплексним показником якості зерна та комплексним показником технологічного обладнання. Комплексний показник якості зерна формується на підставі результатів аналізу лабораторії, виконуваного не рідше ніж кожні дві години і особистої оцінки оператора. Оператор за допомогою портативних приладів (наприклад, параметри вологість зерна) або за допомогою органів почуттів (наприклад, параметр запах, колір, якість оболонки зерна) в необхідний момент часу виконує оцінку (вимірювання) параметра для прийняття рішення по керуючому впливу.

Оператор сушіння зерна на підставі показань штатної системи контролю параметрів, вимірювань виконаних портативними приладами, особистої оцінки деяких параметрів, створює особисте уявлення про стан процесу сушіння, що дозволяє прийняти рішення про величину керуючих параметрів.

Спостереження за сушінням зерна показують, що оператори змушені контролювати не тільки стан обладнання зерносушарки, але і якісні параметри

зерна, для прийняття рішення про величину управляючих впливів через тривалості лабораторного аналізу. Найважливішим параметром є вологість до і після сушарки, також ними контролюється температура нагріву зерна, запах, колір, якість оболонки зерна і ін.

Оператор для вироблення рішення про величину керуючих впливів, не чекаючи результатів аналізу відібраних проб зерна, оцінює стан потоку зерна (температура, вологість), що проходить через сушарку, в тому числі оцінює параметри, які не підлягають вимірюванню, такі як: якість оболонки, колір, запах .

Обґрунтуванням застосування недетермінованої моделі є відсутність достовірного (детермінованого або імовірнісного) опису сушіння зерна різних культур в шахтній сушарці. Перевагою недетермінованої моделі є можливість моделювання знань оператора, що враховують вимірювані і оцінювані параметри, такі як, запах, колір, якість оболонки.

Недетермінірованние моделі.

Математичні моделі представляють собою ідеальні (абстрактні, знакові) концептуальні образи систем, спеціально створювані дослідниками для практичного здійснення намічених ними цілей дослідження систем [39]. У моделях відображаються тільки найбільш істотні з точки зору дослідників елементи, властивості, стану системи.

Недетерміновані моделі застосовуються для математичного опису можна умовно розділити на два класи: штучні нейронні мережі і нечіткі множини. Нечіткі множини лежать в основі методу нечіткого виведення і методу ситуаційного управління.

Штучні нейронні системи і мережі. Штучна нейронна мережа [40, 41, 42] - математична модель побудована за принципом мереж нервових клітин живого організму. Має можливість навчання - знаходження коефіцієнтів зв'язків між нейронами, що дозволяє виявляти залежності між вхідними та вихідними даними. Побудова будь-якої нейронної мережі передбачає великий обсяг обчислень (навчання мережі є імітаційним процесом) [43]. Тому тільки з ростом

обчислювальної потужності комп'ютерів для обробки великих вибірок з'явилася можливість застосування нейромереж. Застосування штучних нейронних систем для зерносушарки як об'єкта управління вимагає навчання розробленої нейронної системи для кожної зерносушарки. Така робота супроводжується складністю налаштування внутрішньої структури мережі, залежністю результату від рівня спеціаліста, відсутністю будь-яких попередніх оцінок необхідного часу для навчання нейромережі. Беручи до уваги оцінку автора, що чисельність зерносушарок тільки в Україні вимірюється сотнями (їх більше тисячі) застосування штучних нейронних мереж і систем, яких навчають підготовленими інженерами, обмежена великою трудомісткістю методу для кожної зерносушарки з року в рік. Це занадто багато роботи нарівні з виконанням натурального експерименту.

Метод нечітких множин для розкриття невизначеності.

Нечітка множина [14] утворюється шляхом введення узагальненого поняття приналежності, тобто розширення двоелементною множиною значень характеристичної функції  $\{0, 1\}$  кілька разів континууму  $[0, 1]$ . Це означає, що перехід від повної приналежності об'єкта до класу до повної його неналежності відбувається не стрибком, а плавно, поступово, причому вводиться спеціальна характеристична функція множини - так звана функція приналежності, яка приймає значення з інтервалу  $[0, 1]$ .

Два основних підходи до формалізації нечіткості [4]:

Нечітка множина визначається математично як сукупність упорядкованих пар, складених з елементів  $x$  універсальної множини  $X$  і відповідних ступенів належності  $\mu_A(x)$  або (оскільки функція приналежності є вичерпною характеристикою нечіткої множини) безпосередньо у вигляді функції. При цьому універсальною множиною  $X$  нечіткої множини  $A$  називається область визначення функції приналежності  $\mu_A$

В основі другого способу формалізації нечіткості лежить теорема декомпозиції, що будь-яке нечітку множину можна розкласти по множинам рівня, коли нечіткість виражається за допомогою набору ієрархічно

упорядкованих чітких множин.

Навпаки застосування апарату нечіткого виведення на базі нечітких множин вимагає для навчання бази правил від експерта, реалізованих в середовищі Xfuzzy 2.1 двома методами нечіткого виведення метод Мамдані і метод Сугено. Експертом з сушіння зерна може виступити кваліфікований оператор.

Метод ситуаційного управління. Даний метод застосовується при описі унікального об'єкта управління, обліку в цьому описі не тільки його специфічної структури і функціонування, а й поведінки оператора, можливої зміни об'єкта в часі. Такий метод [46] управління складними технічними системами, заснований на поданні знань про об'єкт управління і способах управління ним, використання навчання та узагальнення при побудові процедури управління по поточних ситуацій, називається ситуаційним управлінням. Метод ситуаційного управління дозволяє безліч ситуацій процесу сушіння зерна привести до меншої множини типових ситуацій. Перерахуємо ряд особливостей, властивих методу ситуаційного управління:

1. Ситуаційне управління вимагає створення попередньої бази даних про об'єкт управління, його функціонування та способах управління ім. Це виправдано, коли традиційні шляхи формалізації опису об'єкта управління і процедури управління реалізувати неможливо;

2. Мова опису ситуацій повинна дозволяти відображати в ньому не тільки кількісні факти і співвідношення, що характеризують об'єкт управління, але і якісні знання, які не можуть бути реалізовані в математичному сенсі;

3. Системи ситуаційного управління орієнтовані лише на таке управління, коли досягнуті результати будуть не гірші кращих результатів, які могла отримати людина.

Застосування ситуаційної моделі пов'язано з наступним:

- а) урахуванням параметрів процесу сушіння зерна, які підлягають оцінці, не вимірюються технічними засобами;

- б) кваліфікований оператор має уявлення про управління сушінням,

відповідній меті управління.

Суть підходу до автоматизації процесу сушіння зерна [7] полягає в тому, щоб навчити систему управління, отримувати на виході зерно заданої якості, як це виконує кваліфікований оператор. Надалі сформульовані знання кваліфікованого оператора можна використовувати для підтримки прийняття рішення в умовах невизначеності. При такій постановці завдання, інтерпретація невизначених величин як нечітких більше відповідає реальним умовам виробництва, ніж інтерпретація цих величин як детермінованих, або випадкових.

Для виконання ідентифікації розглянемо параметричну схему сушіння зерна в шахтній сушарці.

## **2.2 Формулювання мети управління процесом сушіння зерна**

Інструкція по сушці і експлуатації сушарок [7] містить опис температурних режимів сушіння в шахтних зерносушарках, підкреслюючи важливість недопущення зниження хлібопекарських, продовольчих, кормових якостей зерна, збереження біологічних властивостей зерна. В обов'язки зерносушільщика входить контроль температури агента сушіння. Лабораторія підприємства повинна контролювати температурний режим сушіння і якість зерна, відбираючи кожні дві години проби зерна на аналіз до і після сушарки. У цих пробах визначити температуру зерна, запах, колір, вологість, кількість і якість клейковини в пшениці, якість оболонки, зараженість і ін. Показники якості залежно від культури, її призначення після сушки.

Завданням управління процесом сушіння зерна є зниження вологості при збереженні якісних характеристик зерна.

Комплексний показник якості зерна обраний узагальненим показником ефективності (якості управління) сушіння зерна в шахтних зерносушарках. Цей показник якості в залежності від культури, призначення зерна включає різні параметри. Якщо зерно насінне, то крім параметра вологість важливим є, наприклад, схожість зерна.

Комплексний показник якості, як критерій управління сушінням зерна, розділяється на ряд параметрів, кожен з яких в загальному вигляді представляється формулою

$$\text{відкл. } X_{\text{вих},i} = |X_{i\text{ц}} - X_{i\text{суш}}| \quad (2.1)$$

де  $\text{відкл. } X_{\text{вих},i}$  - помилка управління по параметру;  $X_{i\text{ц}}$  - цільове значення параметра;  $X_{i\text{суш}}$  - середнє значення параметра за час сушки.

Розрахунок середніх арифметичних параметрів за час перебування зерна в зерносушарці (сушильної шахті).

$$K_3 X_{\text{вих},\text{суш}} = \frac{\sum_{i=1}^N X_{\text{вих},i}}{N} \quad (2.2)$$

де  $K_3 X_{\text{вих},\text{суш}}$  - усереднене значення параметра за час перебування зерна в сушарці (сушильної шахті)  $K_3 X_{\text{вих},i}$  - миттєве значення параметра;  $i$  - номер вимірювання від 1 до  $N$ ;

Кількість вимірювань для отримання усереднених значень параметрів в залежності від швидкості зерна в зерносушарці обчислюється за формулою (2.4).

$$N = \frac{V_{\text{зсу}} * n}{V_{\text{затвора}} * C_3} \quad (2.3)$$

де  $N$  - кількість вимірювань;  $n$  - період вимірювання параметра (с);  $C_3$  - період відкриття випускного механізму (с);  $V_{\text{зсу}}$  - обсяг зерна в зерносушарці;  $V_{\text{затвора}}$  - обсяг зерна проходить при разовому відкритті випускного механізму.

Для усереднених значень параметрів обчислюється приналежність до цільового значення  $\mu_j$  ( $K_3 X_{\text{суш},\text{вих},j}$ ). Оцінка ефективності управління сушінням зерна проводилася двома способами: при рівній значимості параметрів застосовувалася лінгвістична оцінка (2.5), при різній значимості параметрів застосовувалася числова оцінка (2.6, 2.7). Спосіб оцінки (вибірки) на основі лінгвістичної оцінки визначає функцію приналежності для набору параметрів  $z_1, z_2, z_3, \dots, z_j$  та потім приводиться до лінгвістичної оцінки. Для оцінки «відмінно» ступінь приналежності від 0,81/1, для «добре» ступінь приналежності від 0,61/0,8, для оцінки «задовільно» ступінь

приналежності від 0,41/0,6, для оцінки «незадовільно» ступінь принадлежности від 0/0,4.

$$P(Z) = P(z_1, z_2, z_3, \dots, z_j) = \min | \mu_1(z_1), \mu_2(z_2), \dots, \mu_j(z_j) \quad (2.4)$$

Де  $\mu_j(z_j)$  - ступінь принадлежности параметра) до цільового значення,

$P(z_1, z_2, z_3, \dots, z_j)$  - функція принадлежности для параметрів  $z_1, z_2, z_3, \dots, z_j$  При цьому найкращого результату відповідає максимальне значення  $P(Z)$  Такий спосіб оцінки доцільно використовувати, коли будь-який з параметрів однаково впливає на якість і погане значення одного не може бути виправлено хорошим значенням іншого.

Способом оцінки якості управління (вибірки), при різній значимості параметрів, є сумарне зважене відхилення від еталону [44].

$$D(Z) = \sum_{j=1}^r \alpha_j \cdot \mu_j(z_{\text{ст}}, z_j), \quad (2.5)$$

$$\mu_j(z_{\text{ст}}, z_j) = \mu_j(z_{\text{ст}}) - \mu_j(z_j), \quad (2.6)$$

де  $\alpha_j$  - вагові коефіцієнти ознак ( $0 \leq \alpha_j \leq 1; \sum \alpha_j = 1$ );  $\mu_j(z_{em})$  - цільова ступінь принадлежности по кожному  $j$ - му ознаку,  $\mu_j(z_j)$  - ступінь принадлежности по  $j$ -му ознакою  $D(z)$  - оцінка за кількома параметрами. При цьому найкращий результат досягається при найменшому значенні оцінки  $D(z)$ .

Такий спосіб оцінки доцільно використовувати, коли погане значення одного з параметрів може бути виправлено хорошим значенням іншого.

Для візуалізації багатопараметричної оцінки від функцій принадлежности окремих параметрів переходимо до функції принадлежности ситуації (рис. 2.2.), або іншими словами, функції принадлежности лінгвістичної змінної «целоезначеніє зерна на виході зерносушарки », значення якої визначаються всіма змінними процесу сушіння зерна

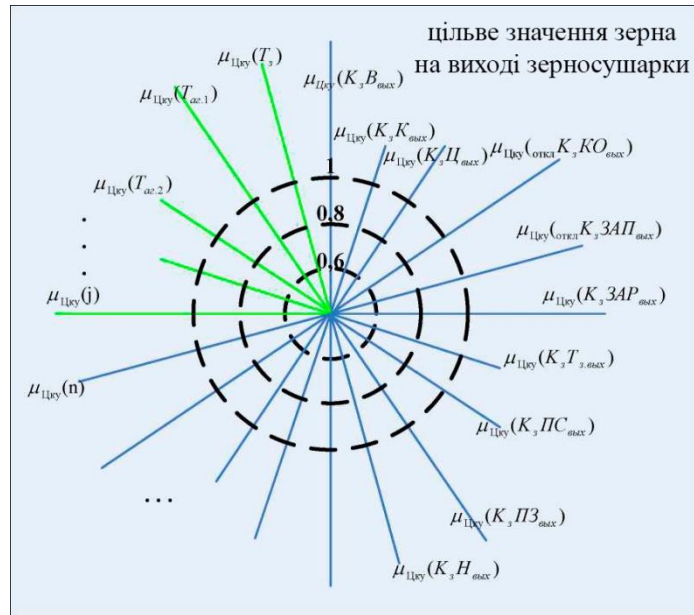


Рисунок 2.2– Графічне представлення приналежності ситуації до цільового значення

Для дослідження взаємозв'язку параметрів з оцінкою результативності управління виконаємо наступні етапи:

- 1) дослідження процедури управління сушінням зерна (на підставі даних технологічного процесу сушіння) на підставі нечітких множин з багатопараметричної оцінкою в числовому і лінгвістичному поданні;
- 2) шляхом імітаційного моделювання дослідження моделі управління сушки зерна на основі нечіткого виведення за допомогою даних технологічного процесу сушіння зерна.

### 2.3. Ідентифікація управління сушінням зерна на основі нечітких множин з багатопараметричної оцінкою

Виглядає концепція таким чином, що автоматизована система запам'ятовує режим сушки оператором, якщо на виході зерносушарки виходить зерно заданої якості. Іншими словами, якщо якість зерна після сушіння вище порогового

значення процедура управління сушінням зерна запам'ятовується в базі знань. Надалі під час вступу на сушку зерна зі схожими вихідними і цільовими значеннями параметрів з бази знань витягуються значення керуючих впливів, які використовуються для підтримки прийняття рішення або автоматичного режиму роботи.

Ідентифікацію [8] об'єкта управління під час сушіння при отриманні на виході зерна заданої якості представляється виконати за допомогою математичного апарату нечітких множин. Це обумовлено в тому числі необхідністю врахування параметрів, які не вимірюються технічними засобами, а підлягають оцінці.

Виконання ідентифікації немислимо проводити без оцінки якості управління. Для кожного параметра оцінка якості управління виражається за допомогою функції приналежності. Функції приналежності будуються відповідальними за якість зерна після сушіння. Всі параметри ефективності сушіння інтегруються в один показник - комплексний показник якості зерна.

### **2.3.1 Методи побудови функцій приналежності**

Для оцінки результативності управління сушінням зерна відповідальний за якість зерна на підприємстві задає цільову функцію приналежності для кожного вихідного параметра. Поруч з графіком функції приналежності вказується лінгвістична оцінка приймаюча значення - «відмінно», «добре», «задовільно», «незадовільно». Графік цільової функції приналежності дозволяє визначити приналежність поточного значення параметра до цільового значення (цілі). Можна говорити про приналежність параметра до цільового значення, яка визначається числом з інтервалу  $[0, 1]$ . Крім числової оцінки приналежності можна отримати лінгвістичну оцінку [38, 47]. Для оцінки «відмінно» ступінь приналежності від  $0,81 \div 1$ , для «добре» ступінь приналежності від  $0,61 \div 0,8$ , для оцінки «задовільно» ступінь приналежності від  $0,41 \div 0,6$ , для оцінки «незадовільно» ступінь приналежності від  $0 \div 0,4$ .

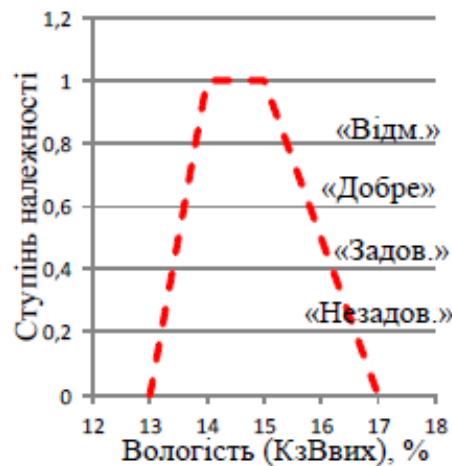


Рисунок 2.3– Функція приналежності параметра «Вологість. Після сушіння»

На рис.2.3. представлена пунктиром функція приналежності цільового значення параметра «Вологість. Після сушіння» («КзВвих»). Ступінь приналежності одиниця відповідає відсутності відхилення вологості від цільового значення з похибкою ( $\pm 0,5\%$ ).

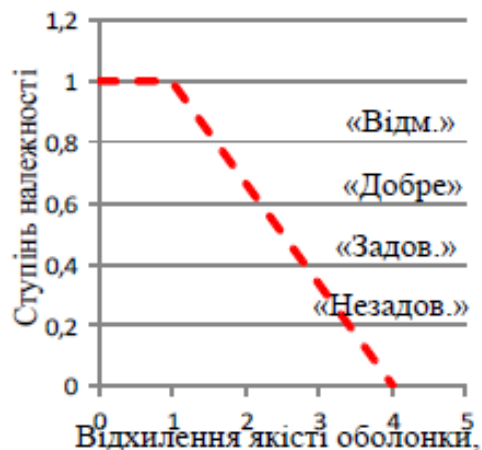


Рисунок 2.4 – Функція приналежності параметра  $откл\ K_3\ ЗАП_{вих}$ . «Запах зерна» (наявність запаху диму або сірчистого газу або рідкого палива).

На рис.2.4. представлена пунктиром функція приналежності цільового значення параметра запах зерна (диму, сірчистого газу, рідкого палива), воно ж відповідає  $откл\ K_3\ ЗАП_{вих}$  – середнє значення параметра запах зерна після сушарки. Ступінь приналежності одиниця (див. табл. 2.1) відповідає відсутності запаху (диму, сірчистого газу, рідкого палива).

Таблиця 2.1 - Визначення інтенсивності запаху (димув, сірчистого газу, рідкогопалива)

інтенсивність запаху	Оцінка інтенсивності запаху	Характер прояву запаху
немає	1	запах не відчувається
дуже слабка	2	запах відразу не відчувається, але виявляється при ретельному дослідженні (нагріванні).
слабка	3	запах помічається якщо звернути увагу
помітна	4	запах легко помічається і викликає неохвальний відгук
чітка	5	запах звертає на себе увагу

### 2.3.2 Виконання багатопараметричної ідентифікації та аналіз результатів

Дані для імітаційного моделювання бралися з протоколів сушки зерна в зерносушарці ДСП-32 елеватора Просянский філія ДП "Сантрейд" Були відібрані 5 вибірок, кожна відображає сушку зерна не менше ніж за зміну. Параметри ( $T_{ar1}$ ;  $T_{ar2}$ ;  $T_z$ ;  $K_z V_{вих}$ ;  $T_{звих}$ ) вимірювалися технічними засобами в зерносушарці (в потоці), передавалися на комп'ютер для збереження (інтервал 5 хв) з прив'язкою до часу для протоколу ходу технологічного процесу. Значення інших вихідних параметрів визначалися в лабораторії з відібраних в зерносушарки проб зерна, заносилися в журнал. Значення приналежності до цільового значення для параметрів представлені в таблиці 2.2. Призначенням зерна після сушіння є зберігання, а найбільш важливим параметром визначена вологість зерна після сушіння, а іншим параметри присвоєні такі коефіцієнти.

Результати багатопараметричної оцінки сушки зерна представлені у вигляді мішені (рис. 2.5). Центр мішені відповідає ступеню приналежності зі значенням 0,2. Площина в якій розташовується мішень позначає поняття мета управління при багатопараметричної оцінки. Оскільки, мета управління сушінням зерна є отримання зерна заданої якості, то чим ближче форма кривої до кола (також, чим більше площа), тим ближче вибірка до мети управління.

Багатопараметрична оцінка ситуації виконана по 15 параметрам. П'ять замкнених кривих ліній - багатопараметрична оцінка п'яти ситуацій, які склалися при сушінні зерна в зерносушарці ДСП-32 під керівництвом оператора. Користуючись графіком можна візуально визначити ситуації, які ближче до мети управління з 15 параметрами.

Таблиця 2.2 – Результати імітаційного моделювання процесу сушіння зерна

номер ознаки	Найменування ознаки	Значення ступеня приналежності					ваговий коеф.
		номер вибірки					
		1	2	3	4	5	
1	$T_{аг, 1}$	0.9	0.85	0.65	0.7	0.78	0.1
2	$T_{аг, 2}$	1	0.8	0.7	0.73	0.82	0.1
3	$T_z$	1	0.8	0.71	0.75	0.76	0.1
4	$K_{зВ_{вих}}$	1	0.65	0.6	0.8	0.7	0.2
5	$\begin{matrix} K_{ЗАП} \\ \text{Відкл. з} \\ \text{-Вих} \end{matrix}$	1	1	1	1	1	0.05
6	$\begin{matrix} K_{зК} \\ \text{Відкл. з} \\ \text{К}_{вих} \end{matrix}$	1	1	1	1	1	0.1
7	$\begin{matrix} K_{зЯО} \\ \text{Відкл. з} \\ \text{ЯО}_{вих} \end{matrix}$	1	1	0.2	1	1	0.1
8	$K_{зЗАР_{вих}}$	1	1	1	1	1	0.03
9	$K_{зДБ_{вих}}$	0.9	1	1	1	1	0.03
10	$K_{зДБ1_{вих}}$	0.9	0.9	0.7	1	1	0.03
11	$K_{зПЗ_{вих}}$	1	1	1	1	1	0.03
12	$K_{зН_{вих}}$	1	1	1	1	1	0.03
13	$T_{вих}$	1	1	1	0.9	0.9	0.03
14	$K_{зКК_{вих}}$	1	1	1	1	1	0.03
15	$K_{зЯК_{вих}}$	1	1	1	1	1	0.04

Повний опис кожної вибірки містить вхідні, вихідні та керуючі параметри, оцінку якості управління для збереження в базі знань представляється оформити у вигляді продукцій. Продукція представляється у вигляді: «умова застосування правила - дія». Оцінка ефективності управління служить критерієм для збереження вибірки в базі знань. Оператор для вибору величини керуючого впливу зможе з бази знань на підставі значень вхідних збудовуючих і цільових параметрів вибрати значення керуючих параметрів з найкращою оцінкою.

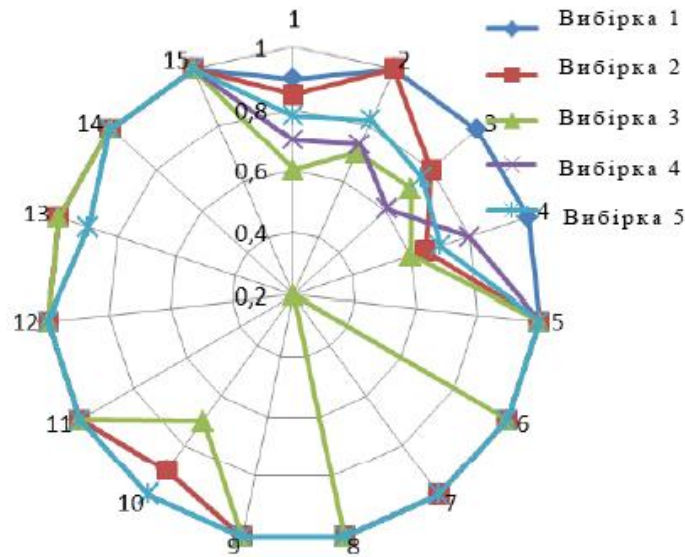


Рисунок 2.5 – Графічне представлення вибірок (15 параметрів) сушіння зерна

Результати оцінки вибірок зі значеннями керуючих параметрів представлені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Результати багатопараметричної ідентифікації

Номер вибірки	Значення керованих параметрів для збереження в базі знань	оцінка вибірки	
		Числова оцінка D (Z)	Лінгвістична оцінка P (2)
1	Tag, 1 = 108 (°C); Tag, 2 = 143 (°C); Cz = 35 (с)	0,01	Відмінно
2	Tag, 1 = 107 (°C); Tag, 2 = 131 (°C); Cz = 40 (с)	0,11	Добре
3	Tag, 1 = 134 (°C); Tag, 2 = 153 (°C); Cz = 60 (с)	0,27	Незадовільно
4	Tag, 1 = 104 (°C); Tag, 2 = 124 (°C); Cz = 36 (с)	0,14	Добре

Запам'ятовування системою керуючих впливів для отримання на виході зерна заданої якості дозволить поширити типову модель управління на безліч зерносушарок одного типу.

Виконані дослідження дозволили встановити науковий результат: в умовах неповноти інформації для побудови моделі управління сушінням зерна вперше запропоновано взаємозв'язок значень параметрів, які характеризують процес сушіння зерна з ефективністю сушіння, уявити недетермінованої моделлю на основі нечітких множин. При цьому управління сушінням зерна оцінюється апріорними значеннями параметрів, які вимірюються і суб'єктивно

оцінюються, в тому числі, якість оболонки, колір, запах, а не тільки вологість і температура.

## **2.4 Моделювання управління сушінням зерна за допомогою нечіткого виводу**

Для застосування апарату нечітких множин вводиться поняття лінгвістичної змінної [48, 49, 50, 51, 52, 53]. Лінгвістична змінна описується набором  $(L, T(L), U, G, M)$ , в якому  $L$  - назва цієї змінної;  $T(L)$  - безліч лінгвістичних значень (терм-множина);  $U$  - універсальна множина;  $G$  - синтаксичне правило, породжує терми безлічі  $T(L)$ ;  $M$  - семантичне правило, яке формує сенс кожному лінгвістичному значенню  $X$ . Кожне семантичне правило асоціюється з лінгвістичним значенням  $M(X)$ , причому  $M(X)$  позначає нечітке підмножина безлічі  $U$ .

Сенс лінгвістичного значення  $X$  характеризується функцією приналежності  $c: U \rightarrow [0,1]$ , яка кожному елементу  $u$  множини  $U$  ставить приналежність  $X$ .

### **2.4.1. Принцип проведення обчислювальних досліджень**

Знання оператора по управлінню сушінням зерна в зерносушарці шахтного типу ДСП-32, формулюються у вигляді правил, що зв'язують входи  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  і виходи  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  у формі продукційної системи «Якщо ТО» [16].

Для моделювання системи за допомогою нечітких множин використаний алгоритм Е. Мамдані [19]. Даний алгоритм (структура) нечіткого виведення найбільш підходить для формулювання знань оператора (на відміну від Сугено), оскільки функція приналежності задається в прямому вигляді. Структура нечіткого виведення складається з наступних компонентів: бази правил, блоку фазифікації, блоку вироблення рішень, блоку дефазифікації.

1. Процедура фазифікація визначає значення функції приналежності

для кожного правила.

2. Нечітке виведення. Визначаються рівні відсікання для лівої частини кожного правила. Як  $t$ -норми виступає логічний мінімум ( $\min$ ).

3. Об'єднання усічених функцій. З використанням операції максимум ( $\max$ ) проводиться об'єднання знайдених усічених функцій, що призводить до отримання підсумкового нечіткого підмножини для змінної виходу з функцією приналежності.

4. Процедуру (дефазифікації) перетворення нечіткої множини в число можна виконати різними методами, наданими нижче.

4.1. Метод центру ваги ( $\text{centroid}$ ), де чітке значення вихідної змінної визначається як центр ваги для кривої (області) на площині  $\mu(y)$ .

4.2. Метод двох секторів ( $\text{bisector}$ ). Чітке значення вихідної змінної ділить область функції приналежності  $\mu(y)$  на дві рівні подобласти. Іноді, але не завжди, збігається з методом центра ваги.

4.3. Метод середнього максимуму ( $\text{middle of maximum (mom)}$ ). Чітке значення вихідної змінної знаходиться по середині всіх елементів мають максимальну ступінь приналежності.

4.4. Метод лівого ( $\text{Small of maximum (som)}$ ), правого ( $\text{Large of maximum (lom)}$ ) максимуму.

Вибирається найменший чи найбільший елемент нечіткої множини серед всіх елементів мають максимальну ступінь приналежності.

#### **2.4.2. Опис умов, результати обчислювальних досліджень**

Параметри якості зерна контрольовані при сушінні представляються безліччю параметрів згідно ГОСТ на дану культуру і інструкції із сушіння зерна та експлуатації сушарок [7], представлені на рисунку 1.3. Як збудені вхідні змінні системи нечіткого виведення моделює сушку пшениці в шахтній зерносушарці ДСП-32 розглядатимемо 8 лінгвістичних змінних (ЛП): КзВвх - вологість зерна; КзЗАПвх - запах зерна, тобто наявність запаху диму, сірчистого газу, рідкого

палива;  $K_3Ц_{вх}$  - колір зерна;  $K_3ЯО_{вх}$  - якість оболонки зерна (потемніння, підгоряння, растресканість оболонки, наліт кіптяви, запарені зерна з сирої оболонкою);  $K_3ЗАР_{вх}$  - зараженість;  $K_3ДБ1_{вх}$  - домішка бур'яниста в тому числі зіпсовані зерна, наявність битих, завалених зерен, кришиться ендосперм;  $K_3КК_{вх}$  - кількість сирої клейковини;  $K_3ЯК_{вх}$  - якість клейковини. Як керованих параметрів системи нечіткого виведення для випадку сушіння пшениці будемо розглядати 3 нечітких лінгвістичних змінних: «Швидкість (витрата) зерна» (« $C_3$ »), «Температура сушильного агента. На вході в сушильну шахту першої зони» (« $Tag1$ »), «Температура сушильного агента. На вході в сушильну шахту другої зони» (« $Tag2$ »).

В якості вихідних параметрів виступають 9 лінгвістичних змінних:  $T_3$  - Температура зерна на виході другої зони нагріву;  $K_3V_{вх}$  - вологість зерна;  $откл. K_3ЗАП_{вх}$  - відхилення запаху зерна, тобто наявність запаху диму, сірчистого газу, рідкого палива;  $вткл. K_3K_{вх}$  - відхилення кольору зерна;  $откл. K_3ЯО_{вх}$  - відхилення якості оболонки зерна (потемніння, підгоряння, растресканість оболонки, наліт кіптяви, запарені зерна з сирої оболонкою);  $K_3ЗАР_{вх}$  - зараженість;  $K_3ДБ1_{вх}$  - домішка смітна домішка бур'яниста, в тому числі зіпсовані зерна, наявність битих, завалених зерен, кришиться ендосперм;  $До_3ккл_{вх}$  - кількість сирої клейковини;  $K_3ЯК_{вх}$  - якість клейковини.

В якості терм-множин вхідних лінгвістичних змінних будемо використовувати множини:  $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8$ .

1-а ЛП: «Вологість вихідного зерна» (« $K_3V_{вх}$ ») Будемо використовувати множини  $T_1 = \{ \text{«сухе» («dry»)} - \text{не більше } 14,0\%, \text{ «середньої сухості» («average dry»)} - 14,1 \div 15,5\%, \text{ «вологе» («wet»)} - 15,6 \div 17,0\%, \text{ «сире» («raw»)} - 17,1\% \text{ і більше} \}$ .

2-а ЛП: «Запах зерна» (« $K_3ЗАП_{вх}$ »). Наявність запаху диму, сірчистого газу, рідкого палива. Будемо використовувати множину  $T_2 = \{ \text{«запах не відчувається (відсутній)»} - \text{від } 0 \text{ до } 1, \text{ «запах відразу не відчувається, але виявляється при ретельному дослідженні (нагріванні)»} - \text{від } 1,1 \text{ до } 2, \text{ «запах помічається якщо звернути увагу»} - \text{від } 2,1 \text{ до } 3, \text{ «запах легко помічається і викликає несхвальний}$

відгук» - від 3,1 до 4, «запах звертає на себе увагу» - від 4,1 до 5}.

3-а ЛП: «Колір зерна» (« $K_3K_{BX}$ »). Будемо використовувати множини  $T_3 = \{$  «відхилення кольору не помічається (відсутній)» - від 0 до 1, «викл. кольори відразу не помічається, але виявляється при ретельному дослідженні (в лабораторних умовах)» - від 1,1 до 2, «викл. кольору помічається якщо звернути увагу;»- від 2,1 до 3, «викл. кольори легко помічається і викликає несхвальний відгук »- від 3,1 до 4, «викл. кольори звертає на себе увагу»- від 4,1 до 5}.

4-а ЛП: «Якість оболонки зерна» (« $_{\text{відкл}}K_3ЯОвх$ »). Будемо використовувати безліч  $T_4 = \{$  «відхилення якості оболонки не помічається (відсутній)» - від 0 до 1, «викл. якості оболонки відразу не помічається, але виявляється при ретельному дослідженні (в лабораторних умовах)»- від 1,1 до 2, «викл. якості оболонки помічається якщо звернути увагу» - від 2,1 до 3, «викл. якості оболонки легко помічається і викликає несхвальний відгук» - від 3,1 до 4, «викл. якості оболонки звертає на себе увагу»- від 4,1 до 5}.

5-а ЛП: «Зараженість» (« $K_3ЗАР_{BX}$ ») в % будемо використовувати множини  $T_5 = \{$  клас 1 » (« C1 # 1 ») - не більше 0,2%, « клас 2 » (« C1 # 2 ») - не більше 0,3%, « клас 3 » (« C1 # 3 »).

6 - не більше 0,5%, « клас 4 » (« C1 # 4 ») - не більше 0,5%, « клас 5 » (« C1 # 5 ») - не більше 0,5%, « клас 6 » (« C1 # 6 ») - не більше 0,5%}.

7-а ЛП: «Домішка бур'яниста. Зіпсовані зерна » («  $K_3ДБ1_{BX}$  ») в% використовуватимемо множини  $T_6 = \{$  Клас 1 » (« с # 1 ») -неболее 0,2%, « клас 2 » (« с # 2») - не більше 0,2%, « клас 3 » (« с # 3») -неболее 0,5%, « клас 4 » (« с # 4») - не більше 0,5%, « клас 5 » (« с # 5») -неболее 1,0%, « клас 6 » (« с # 6») - не більше 1,0% }.

8-а ЛП: «Кількість сирієї клейковини» (« $K_3КК_{BX}$ ») В% будемо використовувати множини  $T_7 = \{$  Клас 1 » (« C1 # 1 ») -неменше 30%, « клас 2 » (« с # 2») - не менше 27%, « клас 3 » (« с # 3») - не менше 23%, « клас 4 » (« C1 # 4») - не менше 18%, « клас 5 » (« с # 5 ») - не менше 18%, « клас 6 » (« с # 6 ») - не обмежується}.

9-а ЛП: «Якість клейковини» (« $K_3ЯК_{BX}$ ») в одиницях приладу ВДК будемо

використовувати множину  $T_8 = \{\text{«клас 1» («cl \# 1») - 45 \div 75 \text{ од.}, \text{«клас 2» («cl \# 2») - 45M00 \text{ од.}, \text{«клас 3» («cl \# 3») - 45M00 \text{ од.}, \text{«клас 4» («cl \# 4») - 20M00 \text{ од.}, \text{«Клас 5» («cl \# 5») - 20M00 \text{ од.}, \text{«Клас 6» («cl \# 6») - не обмежується}\}.$

В якості терм-множин керуючих лінгвістичних змінних будемо використовувати множини:  $T_9, T_{10}, T_{11}$ .

10-а ЛП: «Швидкість руху зерна в сушарці» («З<sub>3</sub>»). Будемо використовувати параметр інтервал часу в секундах між спрацьовуваннями рами затвора представлений у вигляді безлічі  $T_9 = \{\text{«Найменший» («VerySmall»), «Малий» («Small»), «Середній» («Middle»), «Високий» («High») }\}.$  Проводиться оцінка по 90 бальною шкалою, при якій цифрі 11 відповідає найменша оцінка, а цифрі 90 найвища оцінка.

11-а ЛП: «Температура сушильного агента. На вході в сушильну шахту першої зони (« $T_{a21}$ ») будемо використовувати декілька  $T_{10} = \{\text{«Малий» («Small») - 80M05 } ^\circ\text{C}, \text{«Середній» («Middle») - 95M25 } ^\circ\text{C}, \text{«перевищує середнє» («Above Middle») - 120M45 } ^\circ\text{C і вище}\}.$

10- а ЛП: «Температура сушильного агента. На вході в сушильну шахту другої зони» (« $T_{a22}$ ») будемо використовувати безліч  $T_{11} = \{\text{«Середній» («Middle») - 105 \div 135 } ^\circ\text{C}, \text{«перевищує середнє» («Above Middle») - 130M65 } ^\circ\text{C}\}.$

Не наводяться терм-множини вихідних лінгвістичних змінних, оскільки діапазони функцій приналежності відповідають вхідним лінгвістичним змінним. Для вирішення завдання фазифікація і дефазифікації обрані трапецієподібні функції приналежності. Графічне представлення (інтерпретація) функцій приналежності для деяких лінгвістичних змінних представлено на рис.2.6. Знання оператора по управлінню сушінням зерна пшениці в зерносушарці ДСП-32 представлені у вигляді сукупності правил (табл.2.4.). Представлені правила інтегрально відображають думки різних операторів (експертів), дозволяють приблизенно, в рамках заданих функцій приналежності, моделювати управління процесом сушіння.

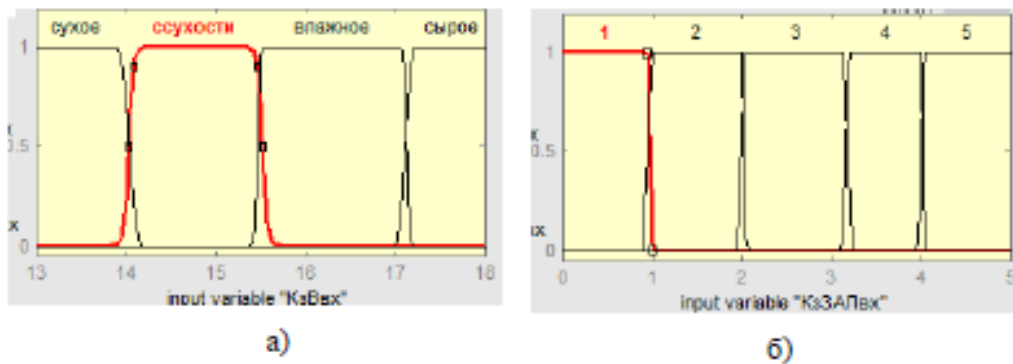


Рисунок 2.6 – Графічна інтерпретація функцій приналежності для лінгвістичних змінних. а) «Вологість вихідного зерна» (« $K_3B_{vx}$ »), б) «Запах зерна» (« $K_3ZAP_{vx}$ »)

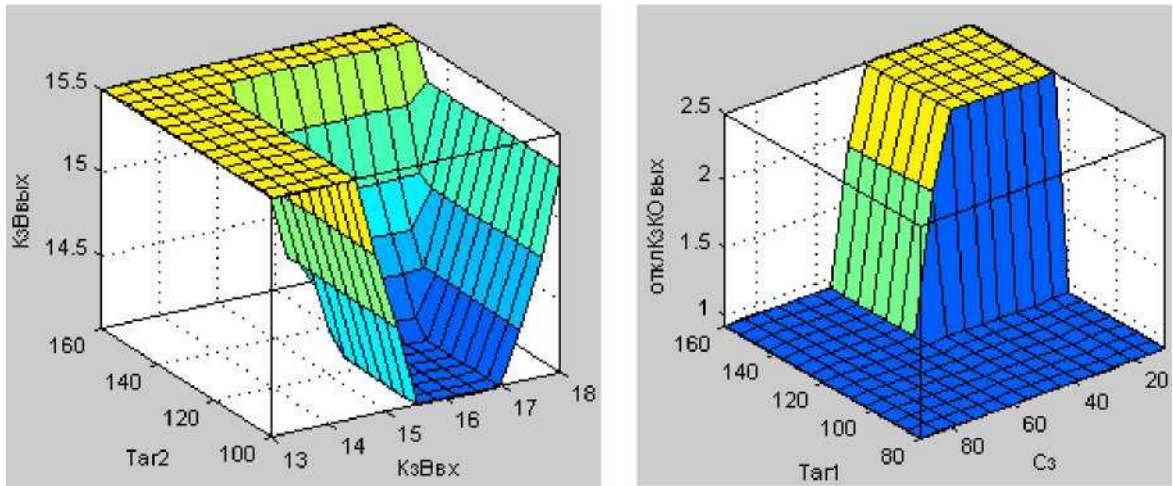
Таблиця 2.4 - Продукційна база знань

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	$K_3B_{вх}$	$K_3Z_{апвх}$	$K_3Ц_{вх}$	$K_3K_{вх}$	$K_3ZAP_{вх}$	$K_3ДБ_{вх}$	$K_3КК_{лвх}$	$K_3КК_{Лвх}$	$T_{аг.1}$	$T_{аг.2}$
1	AD	0,5	0,5	0,5	cl # 2	cl # 2	cl # 1	cl # 1	S	M
2	W	0,5	0,5	0,5	cl # 2	cl # 2	cl # 1	cl # 1	M	M
3	R	0,5	0,5	0,5	cl # 2	cl # 2	cl # 1	cl # 1	AM	AM
4	W	0,5	0,5	0,5	cl # 2	cl # 2	cl # 1	cl # 1	AM	AM
5	W	0,5	0,5	0,5	cl # 2	cl # 2	cl # 1	cl # 1	M	M
№	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	$Z_3$	$T_3$	$K_3B_{ви}$	откл $K_3ZAP$	откл $K_3K$	откл $K_3КО$	$K_3ZAP_{ви}$	$K_3ДБ_{ви}$	$K_3КК_{лви}$	$K_3К_{ли}$
1	S	S	D	0,5	0,5	0,5	cl # 2	cl # 2	cl # 1	cl # 1
2	M	S	D	0,5	0,5	0,5	cl # 2	cl # 2	cl # 1	cl # 1
3	S	S	D	0,5	0,5	0,5	cl # 2	cl # 2	cl # 1	cl # 1
4	VS	AS	D	1,5	2,5	2,5	cl # 2	cl # 3	cl # 2	cl # 2
5	H	S	AD	0,5	0,5	0,5	cl # 2	cl # 2	cl # 1	cl # 1

Графічно деякі результати моделювання сушіння зерна представлені на рис.2.7. в аксонометричному вигляді [60, 61]. З рис.2.7.а. видно, що вологість зерна на виході зерносушарки не перевищує 14 (%) якщо «Вологість вихідного зерна» (« $K_3B_{vx}$ ») відповідає діапазону 15.6 ÷ 17,0 (%)

«Вологе» («wet») і «Температура сушильного агента на вході в сушильну шахту першої зони» (« $T_{аг2}$ ») в діапазоні 105 ÷ 135 (° C) тобто відповідає діапазону «Середній» («Middle»).

Рисунок 2.7 – Аксонометричне тривимірне представлення результатів



моделювання сушіння зерна

З рис.2.7. б. видно, що можливе погіршення якості оболонки зерна до значення «відхилення якості оболонки помічається, якщо звернути увагу» - від 2,1 до 3 якщо підвищити значення змінної «Температура сушильного агента на вході в сушильну шахту першої зони»( «*Tar1*») і знизити значення змінної швидкість руху зерна в сушарці ( «*Cз*»).

Питання подібності (адекватності) моделі розглянуто в табл.2.5., де вибірка з процесу сушіння в умовах підприємства (натурний експеримент) порівнюється з результатом математичного моделювання при різних методах дефазифікації. Видно, що застосування трьох методів дефазифікації (centroid, bisector, mom) дає однаковий результат, який не відрізняється від значень вибірки з процесу сушіння на підприємстві.

Виконані дослідження дозволяють сформулювати науковий результат: отримала подальший розвиток імітаційна модель нечіткого виведення відповідно до алгоритму І. Мамдані на прикладі сушіння зерна пшениці в сушарці ДСП-32. Ця модель, на відміну від існуючих, використовує спільно з вологістю апріорні значення якісних параметрів, які необхідні для обліку на заготівельному підприємстві, в тому числі, якість оболонки, колір, запах зерна, що дозволяє більш повно, для умов виробництва, прогнозувати значення вихідних параметрів процесу сушіння.

Таблиця 2.5 - Адекватність методів дефазифікації натурному

## експерименту

параметр	натурний експеримент
КзВвх, %	16,1
Кз Запвх	0,5 (0-1)
КзЦвх	0,4 (0-1)
Кз Кох	0,5 (0-1)
КзЗАРвх, %	0,3
Кз ПС1вх, %	0,2
КзККЛвх, %	35
КзККЧвх, од	50 (45-75)
Тар.1, °С	108
Тар.2, °С	117
Сз, з	44

параметр	Наг. експеримент	метод дефазифікації									
		centro id	раз ність	bisect or	раз ність	mom	раз ність	som	раз ність	lom	раз ність
Тз	41	42,5	-1,5	42,4	-1,4	42,4	-1,4	36	5	48,8	-7,8
КзВвих, %	13,9	13,6	0,3	13,6	0,3	13,6	0,3	13	0,9	14,1	-0,2
отклКзЗАПвих	(0-1)	0,49	0	0,5	0	0,5	0	0	0	0,9	0
отклКзЦвих	(0-1)	0,49	0	0,5	0	0,5	0	0	0	0,8	0
отклКзКОВих	(0-1)	0,49	0	0,5	0	0,5	0	0	0	0,9	0
КзЗАРвих, %	0,3	0,25	0,05	0,25	0,05	0,25	0,05	0,2	0,1	0,29	0,01
КзПС1вих, %	0,2	0,15	0,05	0,15	0,05	0,15	0,05	0,1	0,1	0,2	0
КзККЛвих, %	35	35	0	35	0	35	0	30	5	40	-5
КзККЧвих 7 од. ІДК	50	60	-10	60	-10	60	-10	45	5	75	-25
Лінгвістична оцінка	відмінно	відмінно	-	відмінно	-	відмінно	-	задовільно	-	відмінно	-
числова оцінка	0	0	-	0	-	0	-	0,42	-	0	-

Математичне моделювання управління сушінням зерна в сушарках шахтного типу розглянуто для підвищення ефективності сушіння зерна шляхом вдосконалення системи управління. Особливістю моделювання є використання не тільки параметрів вологості і температури зерна, а й таких параметрів якості зерна необхідних для контролю при сушінні, які неможливо виміряти технічними засобами. Підвищення точності моделювання досягається шляхом уточнення мети моделювання на всіх етапах алгоритму нечіткого виведення. Сформульовані знання на підставі апріорних даних з управління сушінням зерна, представлені у вигляді бази правил, дозволяють реалізувати

недетермінованого модель управління. До недоліків виконаного моделювання можна віднести:

1) неповноту правил для однієї культури (представлені правила сушіння відповідають вихідного якості пшениці);

2) залежність кінцевого результату моделювання від обраного методу дефазифікації.

З огляду на моделювання показують залежність результату моделювання від кваліфікації інженера по знаннях.

Порівняння двох способів побудування моделі: на підставі апостеріорного значень параметрів використовуючи ситуаційне управління на основі нечітких множин та на підставі апріорних даних на основі нечіткого виведення (алгоритм Е.Мамдані) говорить про можливість застосування обох підходів при розробці системи підтримки прийняття рішень. На погляд автора, модель заснована на апостеріорного значеннях параметрів менш трудомістка, для адаптації в умовах заготівельного підприємства.

З усіх параметрів сушіння зерна для оператора найважливішим параметром є вологість потоку зерна в сушарці. Чим частіше він контролюється, тим вище якість управління процесом сушіння зерна. З табл.1.2. видно рекомендований період контролю вологості зерна на виході в одному дослідженні [23] склав 17,7 хв, а в іншому дослідженні [6] 3,3 хв.

## **2.5 Висновки за розділом**

1. При неповноті апріорної і апостеріорної інформації, що виключає математичний опис процесу управління сушінням класичними методами (детермінована/імовірнісна модель), знання оператора по управлінню сушінням зерна представлені за допомогою нечітких множин, враховуючи вимірювані і суб'єктивно оцінювані параметри, в тому числі, запах, колір, якість оболонки зерна.

2. Отримана не детермінована багатопараметрична математична модель

сушіння зерна на підставі нечітких множин. Модель розширюється відповідно до призначення зерна, діючими нормативними документами та містить апостеріорні значення параметрів, які вимірюються приладами і оцінюються людиною, в тому числі якість оболонки, колір, запах зерна, використовується оцінка ефективності сушіння.

3. Взаємозв'язок значень параметрів процесу сушіння з якісними показниками зерна в вигляді недетермінованої моделі на основі нечітких множин дозволяє розробити рекомендації до технічної реалізації інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень, яка адаптується в тому числі, відповідно до сезонних особливостей якості зерна, конструктивними особливостями сушарки.

4. Оцінка ефективності управління сушінням зерна в числовому і лінгвістичному вигляді дозволяє оцінити дії персоналу сушарки для отримання зерна заданої якості після сушки.

5. Розроблено спосіб відображення багатопараметричної оцінки на площині у вигляді кола. Правильна форма кола (також, чим більше площа) є свідченням того, що процедура управління відповідає меті, це дозволяє людині підвищити оперативність прийняття рішення щодо вибору режиму сушіння.

## **ЗДОСЛІДЖЕННЯ ЗБУРЮВАЛЬНИХ ВПЛИВІВ НА ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ЗЕРНА**

### **3.1. Аналіз методів вимірювання вологості зерна**

Якість висушеного зерна безпосередньо пов'язано з періодичністю контролю вологості. Аналіз ймовірно-статичних характеристик зерна, шахтних сушарок, досвід в області вимірювання вологості сипучих матеріалів дозволив сформулювати вимоги до оперативності контролю вологості потоку зерна при сушінні. Контроль вологості після сушіння повинен становити не менше ніж один раз на 5 хв, що визначено в результаті аналізу спектральних густин вимірювань з урахуванням похибки дискретної оцінки.

Відзначається взаємозв'язок коливального характеру вологості сипучих матеріалів з інтервалом контролю. Підвищення коливань вологості вимагає підвищення оперативності (зниження інтервалу) контролю. Сповільнення контролю вологості призводить до неадекватної оцінки стану процесу сушіння зерна при управлінні оператором. У подібних випадках управління не забезпечує необхідного режиму сушки, що призводить або до пересушування зерна (зниження ваги, можлива втрата якості, зниження вартості) і зниження продуктивності сушарок, або до отримання некондиційного по вологості зерна, що вимагає додаткових витрат, наприклад, своєчасний контроль температури і переміщення зерна.

Відомі методи визначення вологості насіння і зерна поділяються: за принципами вимірювання на фізичні, хімічні та електричні [15]. За формою отримані результати – прямі (хімічні, фізичні) і непрямі (електричні і неелектричні) [16]. На підприємствах зберігання та переробки зерна метод визначення вологості [13] висушуванням до постійної ваги застосовується для економічних розрахунків. Метод заснований на повітряно-тепловій сушці зразка матеріалу до постійної ваги [15]. Вологість розраховують по різниці між

початковим вагою навішування до і після висушування:

$$W = \frac{G_1 - G_2}{G_1} 100 [\%] \quad (3.1)$$

де  $W$  - вологість речовини в процентах;

$G_1$  - вага навішування і бюкси до сушки;

$G_2$  - вага навішування і бюкси після сушки.

Тривалість сушіння 40 хв при температурі 130 °С. Похибка методу складає 0.5%. Даний метод розроблений для цілого і розмеленого зерна. При його використанні час отримання показань вологості складається з наступних складових [18]:

$$T = T_n + T_a + T_c, (3.2)$$

де  $T_n$ - час, який необхідно витратити працівникові лабораторії для того, щоб відібрати пробу на зерносушарці і принести зразок в лабораторію;

$T_a$ - час проведення аналізу методом висушування (більше 40 хвилин);

$T_c$ - час для повідомлення оператору сушарки результату.

Таким чином, при лабораторному вимірі вологості час отримання результату становить не менше 60 хвилин, що істотно перевищує рекомендований період контролю вологості зерна (див. табл. 1.2.) До переваг методу відноситься простота; до недоліків тривалість визначення вологості, неодноразове зважування, що не дозволяє використовувати його в безперервно-поточкових лініях.

Для підвищення оперативності контролю вологості в даний час застосовують портативні експрес - аналізатори вологості, що використовують, в основному, діелькометричний метод вимірювання. Використання експрес-аналізатора вологості зерна має такі недоліки [17]:

– наявність людського фактора, яке може проявитися в несвоєчасності вимірювання вологості зерна;

– взята проба, може характеризувати не весь потік зерна, а лише ту частину, яка поміщається в експрес-аналізатор вологості зерна.

Аналіз процесу сушіння показує, що кінцевий корисний ефект роботи зерносушарки - вагоносієм або значення кінцевої вологості (див. табл.1.2).

Оперативність достовірного вимірювання вологості потоку зерна впливає на ефективність процесу сушіння. Дослідження показують, що чим частіше контролюється вологість, тим вище якість висушеного продукту. Тому розробка достовірного поточного вологомера для зерносушарок є важливою економічною і науково-технічним завданням. З усього різноманіття вологомірів (рис. 3.1.), принципи дії яких засновані на використанні різних частот спектра електромагнітних коливань, найбільшого поширення набули системи, що використовують високочастотний метод вимірювання ємності (діелькометричний метод) [6]

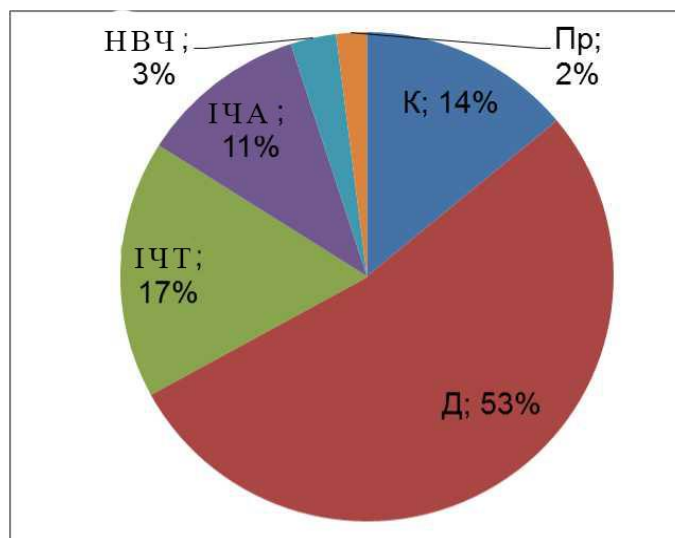


Рисунок 3.1 - Діаграма розподілу вологомірів по використаних методах, де К - кондуктометричні; Д-діелькометричні, високочастотні; ІКС - інфрачервоні термогравіметричні; ІКА - інфрачервоні аналізатори; СВЧ - надвисокочастотні; Пр-інші вологоміри

Ємність конденсатора пропорційна діелектричній проникності діелектрика розміщеного між електродами, площі електродів і обернено пропорційна відстані меду електродами [9]. Діелектрична проникність - макрочроматична здатності діелектрика до поляризації в зовнішньому електричному полі [10], основна електрична характеристика діелектрика [7]. Діелектричну проникність [23] можна визначити як відношення ємності конденсатора з даним діелектриком до ємності конденсатора тих же розмірів, в

якому замість діелектрика використаний вакуум:

$$\varepsilon = \frac{C}{C_p} \quad (3.3)$$

де  $\varepsilon$  - діелектрична проникність;

$C$  - ємність конденсатора з даним діелектриком;

$C_p$  - ємність конденсатора з вакуумом.

Діелектрична проникність характеризує здатність діелектрика поляризуватися в електричному полі конденсатора. Поляризація діелектрика, вміщеного між обкладинками конденсатора, пояснюється тим, що при створенні електричного поля в діелектрику заряди зміщуються у напрямку до металевих обкладинок-електродів.

Всі матеріали характеризуються певними значеннями діелектричної проникності. В основі ємнісного методу вимірювання вологості сипучих матеріалів лежить на відміну діелектричної проникності сухих матеріалів основний інтервал становить  $2 \div 5$  одиниць, від діелектричної проникності води, 81 одиниця (при температурі  $200\text{ }^\circ\text{C}$ ). Загалом, при підвищенні процентного вмісту води (вологості) значення діелектричної проникності матеріалу зростає. Внесення вологого матеріалу в датчик-конденсатор, на електроди якого подано напругу змінного струму, викликає збільшення ємності датчика до величини

$$C = C_p * \varepsilon, \quad (3.4)$$

де  $C_p$  - робоча ємність датчика (ємність порожнього датчика),

$\varepsilon$  - діелектрична проникність вологого зерна.

Високочастотний контроль вологості [7] передбачає вплив на контрольований матеріал змінним електромагнітним полем в діапазоні  $5 * 10^3 - 5 * 10^7$  Гц. Важливим питанням ємнісного методу вимірювання вологості є вибір частоти змінного електричного поля датчика- конденсатора в якому відбувається перетворення вологості матеріалу в електричну величину. Для обґрунтування вибору частоти виконано дослідження [12] волого-частотних характеристик зерна пшениці. Вимірювалися характеристики  $dC = F(W)$  (тут  $dC$ -приріст ємності конденсатора-датчика,  $W$  - вологість зерна) на частотах електричного

поля конденсатора-датчика 5, 50, 500, 5000 кГц. З представлених характеристик на низьких частотах - 5 і 50 кГц -  $dC$  і ступінь нелінійності значно більше, ніж на високих 500, 1500, 5000 кГц.

Ємність датчика, заповненого контрольованим матеріалом є складною функцією багатьох параметрів [74]

$$C = F(W; T; П; Г; X; EM; \dots), \quad (3.5)$$

де  $W$ ,  $T$ ,  $П$ ,  $Г$ , і  $X$  - відповідно вологість, температура, щільність, гранулометричний і хімічний склад контрольованого матеріалу;  $EM$  - електрохімічний критерій кордону електрод - матеріал.

Особливістю вимірювання вологості сипучих матеріалів знаходиться в зерносушарці в технологічному процесі сушіння є нагрів сипучого матеріалу. З літератури [12] відомо, що для вологих сипучих матеріалів температура є основним показником за ступенем впливу на результат вимірювання вологості ємнісним методом. Тому дослідження механізму впливу температури на діелектричні характеристики сипучих продуктів для ємнісний влагометрії є актуальним питанням.

При підвищенні температури від 0 до 100 °C діелектрична проникність води [7] знижується від 89,7 до 53,3. Оскільки діелектрична проникність вологого сипучого продукту в основному визначається кількістю вмісної в ньому води, можна припустити, що при підвищенні температури вона також повинна знижуватися. Однак на практиці спостерігається зворотне - при підвищенні температури ємність конденсаторного датчика з зерном підвищується. Щоб встановити причину цього явища, була проведена експериментальна робота на зерні пшениці IV типу рис. 3.2.

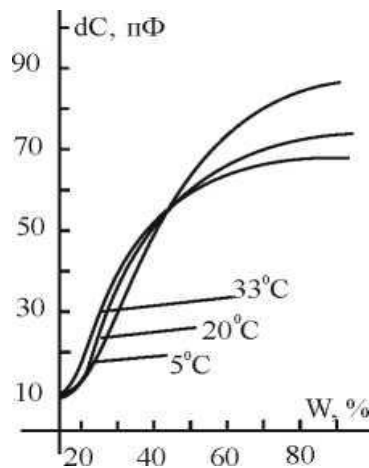


Рисунок 3.2 - Вплив вологості і температури контрольованого продукту на ємність конденсатора-датчика

З побудованих за результатами вимірювань залежностей (рисунок 3.2.)  $dC=F(W)$  видно, що при вологості зерна від 8% до 40% вплив температури на ємність конденсаторного датчика при її підвищенні від 5°C до 35 °C зростає і ємність датчика підвищується; при вологості зерна вище 40% вплив температури убиває, а при вологості 45% дорівнює нулю. При вологості зерна вище 45%, знак впливу температури на ємність конденсатора датчика змінюється, при підвищенні температури ємність датчика знижується.

Отримані результати, а також аналіз опублікованих джерел показують, що механізм впливу температури на діелектричну проникність вологого зерна пояснюється зміною співвідношення міститься в ньому пов'язаної і вільної води при нагріванні.

Вологе зерно містить певну кількість пов'язаної води, діелектрична проникність якої значно нижче, ніж вільної води. При підвищенні температури, з одного боку, зменшується ємність датчика в результаті зниження діелектричної проникності вільної води, а з іншого - ємність датчика збільшується завдяки підвищенню діелектричної проникності вологого продукту при переході частини вільної води у вільний стан. При вологості зерна до 45%, останній процес превалує над першим, тому в разі підвищення температури ємність датчика з вологим зерном зростає.

При подальшому підвищенні вологості зростає кількість вільної води.

Отже, збільшується вплив її діелектричної проникності на ємність датчика. Коли вологість зерна сягає 45%, протилежно діючі ефекти, що відбуваються при зміні температури, стають рівними. Вплив температури на ємність датчика при цьому дорівнює нулю. Таке значення вологості називається критичним.

При значеннях вологості вище критичної (45%) кількість вільної вологи така, що вплив температури на її діелектричну проникність переважає. Тому при підвищенні температури ємність датчика з вологим зерном зменшується. Це пояснює те явище, що збільшення температури надає протилежний вплив на ємність конденсаторного датчика з водою і вологим зерном.

Аналіз даних досліджень дозволяє зробити наступні висновки:

- 1) вплив температури на ємність (діелектричну проникність) вологого зерна залежить від співвідношення кількості вільної і зв'язкової вологи в зерні;
- 2) графіки (рис. 3.2.)  $dC=F(W)$  представляють залежності в широкому діапазоні вологості (10-100%), для трьох значень температури (5, 20, 33 °C). Приріст ємності датчика робить залежності унікальними для даного датчика, але тільки три значення температури є недостатніми для компенсації впливу температури. Отримані залежності придатні для розгляду впливу температури на ємність датчика з зерном в загальному.

При виконанні досліджень електричних характеристик матеріалу (зерна), слід вести облік діелектричної проникності матеріалу, а не ємності, що дозволяє врахувати характеристики матеріалу без датчика. З урахуванням можливості отримання лінійної шкали вологості була обрана висока частота струму вимірювання 1500 кГц.

## 3.2. Дослідження впливу збурюючих впливів на діелектричну проникність зерна

### 3.2.1. Дослідження впливу температури на показання діелектричної проникності зерна

Сушінні зерна підлягають всі культури зерна і насіння прийнятих заготівельним підприємством. Вплив щільності, хімічного і гранулометричного складів зерна зумовлює залежність діелектричної проникності від типу культури зерна.

Перелік впливів, що збурюють параметрів (3.5) вологість зерна, температура зерна, щільність, гранулометричний і хімічний склад зерна, електрохімічний критерій кордону електрод - зерно на діелектричну проникність за доцільне обмежити до параметрів культура зерна, вологість і температура зерна [67, 75].

Завданням дослідження даного розділу є уточнення залежностей діелектричної проникності зерна від температури зерна в потоці в високочастотному діапазоні (ВЧ) для компенсації впливу температури на діелектричну проникність зерна.

Вимірювання діелектричної проникності зерна проводиться на дослідному зразку автоматизованої системи контролю вологості зерна. Функціональна схема зразка представлена на рис.3.3.

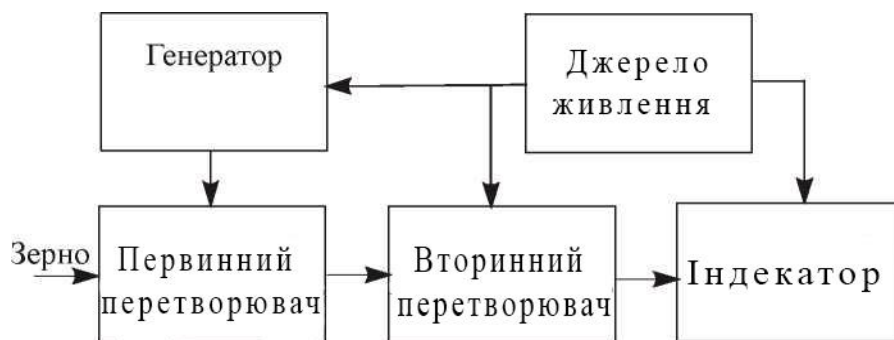


Рисунок 3.3. Функціональна структура вимірювача діелектричної проникності

Зерно, впливаючи на первинний перетворювач, змінює високочастотний сигнал генератора, який перетворюється вторинним перетворювачем для відображення діелектричної проникності зерна на індикаторі. Похибка вимірювання діелектричної проникності становить 0.7%. Температура зерна визначається термометром. Вологість зерна визначається відповідно за допомогою сушильного шафи СЕШ-3М. Підігрів зерна проводився в муфельній печі СНОЛ-1.6-2.5. Охолодження зерна проводилося в холодильнику Мінськ-11. Дослідження полягає в тому, щоб виміряти діелектричну проникність потоку зерна при різних значеннях температури і вологості [7]. Інтервали варіювання факторів представлені в таблиці 3.1. Верхні і нижні значення факторів обмежуються бажанням отримати адекватну модель [7, 9].

Таблиця 3.1 -Інтервали факторів

рівень	Температура зерна Т, °С	Вологість зерна W,% (Пш)
1	10	14
2	20	20
3	30	26
4	40	
5	50	

Так для температури зерна верхня межа обумовлена значенням максимально допустимої температури нагріву зерна при сушінні. Нижня межа вологості зерна обумовлений базисної нормою вологості зерна відповідно до ГОСТ на дану культуру, а верхній обумовлений максимально можливою вологістю зерна.

Дослідження проводиться з зерном по бурнистій і зернової домішок відповідним вимогам для зерна, що заготовляється по ГОСТу на дану культуру. Для підвищення точності вимірювання вологості і температури зерна вимір діелектричної проникності проводиться в статиці, в лабораторних умовах, на пробах зерна відібраних із зерносушарки шахтного типу. З літературних джерел

відомо [16], що діелектрична проникність залежить від щільності, тому при проведенні дослідження намагалися відтворити в первинному перетворювачі (рис.3.2.) Таку ж щільність як в місці розміщення первинного перетворювача на зерносушарці.

Відібрана з зерносушарки проба зерна піддається вимірюванню вологості і температури. Частина проби зерна даної вологості нагрівається, а інша частина охолоджується в герметичній ємності після чого підготовлена проба поміщається в первинний вимірювальний перетворювач. У діапазоні температур від 0 до 50 °С крок зміни прийнятий рівним 10 °С.

Для підвищення достовірності (інформативності) дослідження визначено кількість паралельних дослідів. Вимірювання діелектричної проникності зерна проведено дослідження, яке полягає в зіставленні кількості паралельних дослідів зі середньоквадратичних відхилень (СКВ). Результати занесені в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2-

Зіставлення кількості паралельних дослідів зі середньоквадратичним відхиленням

№ дослідів	2	3	5	7	10	15	20	25	30	35	40	45	50
СКО	0,3	0,2	0,15	0,12	0,11	0,1	0,09	0,1	0,11	0,09	0,1	0,1	0,1

З таблиці видно, що при збільшенні кількості дослідів, середньоквадратичне відхилення зменшується. СКО 10, 20, 30 спостережень і 50 спостережень практично однакові. Можна зробити висновок, що досить 10-20 паралельних дослідів для проведення дослідження та отримання достовірного результату.

Для оцінки адекватності моделі розглянемо теорію і виконаємо розрахунок. Для обробки даних і отримання незалежних оцінок параметрів моделі в багаторівневому експерименті розглянемо побудову однофакторної моделі на основі ортогональних поліномів. З математичного аналізу [87] відомо, що через N точок на площині можна провести параболу (N-1) порядку. При п'ятирівневих віддалених з кроком в дослідних точках, в яких задані значення

відгуку  $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5$  можна побудувати многочлен четвертого ступеня

$$\hat{y}(x) = b_0 P_0(x) + b_1 P_1(x) + b_2 P_2(x) + b_3 P_3(x) + b_4 P_4(x), \quad (3.6)$$

де  $P_r$  ортогональні поліноми;  $r$  - ступінь полінома,  $r = 0, 1, \dots, 4$ ;  $b_r$  - що підлягають визначенню за даними експерименту параметри моделі ( $b$ -коєфіцієнти;  $x$ -кодованих змінна (фактор)). Поліноми  $P_r(x), i = 0, 1, \dots, 4, 5$ , задовольняють умовам ортогональності [88].

Попередньо обчислені значення коєфіцієнтів  $b_r$  полінома (3.6) за виразом (3.7) наведені в таблиці 3.3.

$$b_r = \frac{\sum_{u=1}^5 P_r(x_u) \bar{y}_u}{\sum_{u=1}^5 P_r^2(x_u)}, \quad r = 0, 1, 2, 3, 4. \quad (3.7)$$

де  $\bar{y}_u$  середнє значення відгуку в точці  $u$  Обчислена за  $n$  паралельним дослідом

$$\bar{y}_u = \frac{\sum_{f=1}^n y_{uf}}{n}$$

Серед обчислених коєфіцієнтів  $b_r$  можуть бути статистично незначущі, які не повинні входити в рівняння регресії. Для обчислення статистичної значущості коєфіцієнтів  $b_r$  необхідно знати їх дисперсію  $b_r$ , (СКО помилки визначення відгуку  $b_r = 0.1$ ) визначається за формулою:

$$\bar{\sigma}_{b_r}^2 = \frac{\bar{\sigma}_y^2}{n * \sum_{u=1}^5 P_r^2(x_u)} \quad (3.8)$$

де  $n$ -число паралельних дослідів.

При відомій дисперсії, значимість коєфіцієнтів  $b_r$  перевіряється за допомогою нормального розподілу, з якого для рівня значущості

$$a = 0,05, 7_{\text{табл}} = 1,96.$$

Таблиця 3.3 - Обчислення  $b_r$ - коефіцієнтів моделі (3.5)

$u$	$P_0(X_u)Y_u$	$P_1(X_u)Y_u$	$P_2(X_u)Y_u$	$P_3(X_u)Y_u$	$P_4(X_u)Y_u$
1	6,76	-13,52	13,52	-6,76	6,76
2	7,27	-7,27	-7,27	14,54	-29,08
3	7,88	0	-15,76	0	47,28
4	8,61	8,61	-8,61	-17,22	-34,44
5	9,5	19	19	9,5	9,5
$\sum_{u=1}^5 P_r(x_u)\bar{y}_u$	40,02	6,82	0,88	0,06	0,02
$\sum_{u=1}^5 P_r^2(x_u)$	5	10	14	10	70
$b_r$	8,004	0,682	0,0628	0,006	0,00029
$\bar{b}_{br}$	0,045	0,032	0,027	0,032	0,012
$b_{кр}$	0,088	0,062	0,052	0,062	0,023

Отже  $b_{кр} = Z_{табл} * \bar{b}_{br} = 1,96 b_{br}$ . Значення  $b_{кр}$  дані в табл. 3.3. На рівні значимості  $\alpha = 0,05$  незначними слід вважати коефіцієнти  $|b_3| = 0,006$  ( $b_{кр} = 0,062$ ) і  $|b_4| = 0,00029$  ( $b_{кр} = 0,023$ ) (див. табл. 3.3). Таким чином, рівняння регресії (3.6) набуде вигляду:

$$Q_{ад} = \sum_{u=1}^5 \Delta y_u^2 = 0,056 \quad (3.9)$$

Для розрахунку адекватності моделі розраховуємо залишкову суму квадратів яка має  $f_{ад} = 5 - 3 = 2$  ступеня свободи, тобто по п'ятизначенням  $y_i$  знайдені три коефіцієнта моделі:  $b_0, b_1, b_2$ . Тоді оцінка дисперсії адекватності  $S_{аб}^2 = \frac{Q_{аб}}{f_{аб}} = 0,028$

Перевірку адекватності моделі виконуємо по F-критерію;

$$F_p = \frac{S_{аб}^2}{\sigma_y^2} = \frac{0,028}{0,0016} = 2,17; F_{табл} = 2,99; (f_{ад} = 2; f_y = \infty; \alpha = 0,05)$$

Відповідно, модель можна визнати адекватною. Аналіз результатів проводиться з метою оцінки його отриманої моделі даними, дослідження. Результати представлені графічно на рис. 3.4.

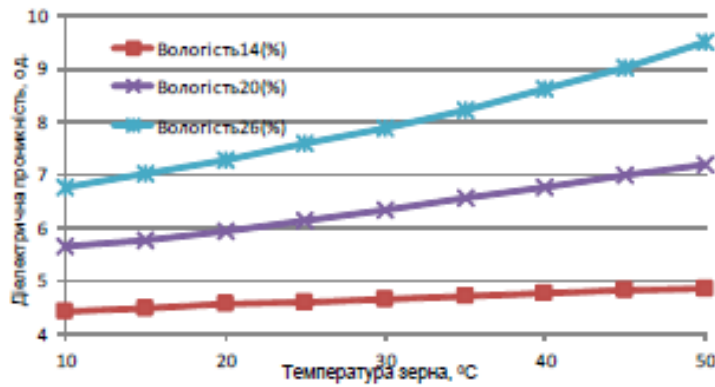


Рисунок 3.4 -Залежність діелектричної проникності від температури при різних вологості для зерна пшениці

З рис.3.4. видно, що залежність діелектричної проникності від температури зерна для пшениці при високочастотному методі вимірювання носять нелінійний характер і різна при різних значеннях вологості. Нелінійність зростає при збільшенні всіх трьох параметрів.

Відповідно до розробленої методики випробувань може бути отримана система рівнянь описує вплив температури зерна на діелектричну проникність і для інших культур. Для пшениці система рівнянь має наступний вигляд.

$$\begin{aligned}
 e|_{14} &= 0,0109T + 4,323; \\
 e|_{20} &= 0,039T + 5,2; \\
 e|_{26} &= 0,00063T^2 + 0,0304T + 6,399.
 \end{aligned}
 \tag{3.10}$$

Це дозволило сформулювати науковий результат: залежності діелектричної проникності від вологості і температури зерна пшениці апроксимуються поліномами першого та другого ступеня, при цьому забезпечується безперервність значень параметрів вологості і температури, які характеризують процес сушіння. На підставі отриманих рівнянь приступимо до розробки методу компенсації впливу температури на діелектричну проникність зерна.

### 3.2.2. Розроблення способу компенсації впливу температури на показання діелектричної проникності зерна

Суть пропонованого методу полягає в отриманні залежності, яка зводить діелектричну проникність зерна при різній температурі до діелектричної проникності зерна при певній температурі. Значення температури повинно бути найближче до середнього значення температури на виході зерносушарки шахтного типу, де розташовується первинний перетворювач автоматизованої системи контролю вологості потоку зерна. Цьому значенню відповідає температура  $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$  вибираємо як найбільш близьку до середнього значення температури зерна на виході зерносушарки.

В системі рівнянь (3.10) перенесемо вісь ординат в точку  $T_0$ , отримуємо наступну систему рівнянь записану в загальному вигляді

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{K_3 B_1} = F(T - T_0); K_3 B_1 = \text{const} \\ \varepsilon_{K_3 B_2} = F(T - T_0); K_3 B_2 = \text{const} \\ \dots\dots\dots \\ \varepsilon_{K_3 B_n} = F(T - T_0); K_3 B_n = \text{const} \end{array} \right. \quad (3.11)$$

Для реалізації методу виконуємо перетворення системи рівнянь до наступного вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{T_0} = F(\varepsilon_{T_1}); T_1 = \text{const} \\ \varepsilon_{T_0} = F(\varepsilon_{T_2}); T_2 = \text{const} \\ \dots\dots\dots \\ \varepsilon_{T_0} = F(\varepsilon_{T_n}); T_n = \text{const} \end{array} \right. \quad (3.12)$$

де  $\varepsilon_{T_0}$  - діелектрична проникність при  $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$ ,  $\varepsilon_{T_1}$  - діелектрична проникність при  $T = \text{Var } ^{\circ}\text{C}$ .

Рівняння системи (3.12) апроксимуються поліномом другого ступеня маючим вид:

$$\varepsilon_{T_0} = A * \varepsilon_{T_1}^2 + B * \varepsilon_{T_1} + C \quad (3.13)$$

де  $A$ ,  $B$  коефіцієнти і  $C$  - вільний член безрозмірні величини, які визначаються відповідно до такої системи рівнянь

$$\begin{cases} A = F(T/T_0) \\ B = F(T/T_0) \\ C = F(T/T_0) \end{cases} \quad (3.14)$$

Підставляючи рівняння системи (3.14) в рівняння (3.13) отримуємо рівняння, що компенсує вплив температури зерна на діелектричну проникність в діапазоні від 0 до 50 °С. Для зерна пшениці це рівняння має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{T_0} = & (0.4 * 10^{-4} * (T/T_0)^2 + 1.9 * 10^{-3} (T/T_0 + 0,011) * \varepsilon_T^2 + \\ & (4 * 10^{-5} (T/T_0)^3 + 1.5 * 10^{-3} * (T/T_0)^2 + 3.1 * 10^{-3} (T/T_0) + 0.97) * \varepsilon_T - \\ & - 1 * 10^{-4} (T/T_0)^3 + 4.3 * 10^{-3} * (T/T_0)^2 + 0.01 * (T/T_0) + 0.09 \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$K_3B = 4,43 * \varepsilon_{T_0} - 6,23 \quad (3.16)$$

де  $K_3B$ - вологість зерна;  $\varepsilon_{T_0}$  - діелектрична проникність при  $T_0 = 20$  °С.

### 3.2.3 Перевірка способу компенсації впливу температури на показання діелектричної проникності зерна

Методика перевірки полягає в отриманні вибірки не менше 41 значення ( $n \geq 41$ ) різниці значень діелектричної проникності наведеної до температури ( $T_0$ ) і значення діелектричної проникності при температурі ( $T_0$ ) при різній вологості зерна (табл. 3.4, 3.5.).

Далі виконується перевірка вибірки на відповідність нормальному закону розподілу і оцінки ймовірності заданого відхилення від математичного очікування.

Для вибірки  $\varepsilon_{T_0}$  гіпотеза про те, що результати спостережень належать нормальному розподілу, перевіряється за допомогою двох складових критеріїв.

$$\tilde{d} = \sum_{i=1}^n |x_i - \tilde{A}| / (nS^*), \quad (3.17)$$

Де  $S^*$  - зміщена оцінка квадратичного відхилення

$$S^* = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{A})^2}, \quad (3.18)$$

$\tilde{A}$ - серене арифметичне результатів спостережень

$$\tilde{A} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (3.19)$$

де  $n$  – кількість спостережень

Таблиця 3.4 - Значення діелектричної проникності наведені до температури ( $T_0$ )

температура, °C		Діелектрична проникність							
T	-20	$\varepsilon$	$\varepsilon_{T_0}$	$\varepsilon$	$\varepsilon_{T_0}$	$\varepsilon$	$\varepsilon_{T_0}$	$\varepsilon$	$\varepsilon_{T_0}$
0	-20	2.53	2.76	3.75	4.11	4.21	4.77	4.68	5.53
5	-15	2.61	2.77	3.83	4.10	4.34	4.78	4.89	5.58
10	-10	2.67	2.77	3.92	4.10	4.49	4.8	5.12	5.62
15	-5	2.72	2.76	4	4.09	4.66	4.82	5.39	5.67
20	0	2.78	2.78	4.08	4.08	4.85	4.85	5.64	5.64
25	5	2.82	2.78	4.16	4.06	5.09	4.9	5.96	5.63
30	10	2.87	2.80	4.25	4.05	5.36	4.93	6.35	5.62
35	15	2.91	2.81	4.35	4.04	5.67	4.96	6.83	5.6
40	20	2.95	2.82	4.46	4.02	6	4.96	7.41	5.57
45	25	2.99	2.83	4.59	4.00	6.39	4.97	8.04	5.55
50	30	3.04	2.84	4.74	3.96	6.85	5.02	8.69	5.63

Таблиця 3.5 - Вибірка значень, що перевіряється на ймовірність заданого відхилення

i	$\varepsilon T_x - \varepsilon T_0$	i	$\varepsilon T_x - \varepsilon T_0$	i	$\varepsilon T_x - \varepsilon T_0$	i	$\varepsilon T_x - \varepsilon T_0$
1	-0.0169	12	0.0347	23	-0.0781	34	-0.113
2	-0.0122	13	0.0227	24	-0.0738	35	-0.0611
3	-0.0141	14	0.0237	25	-0.0542	36	-0.0194
4	-0.0161	15	0.0124	26	-0.0271	37	0.0268
5	0	16	0	27	0	38	0
6	0.00257	17	-0.0154	28	0.0466	39	-0.00788
7	0.0198	18	-0.0275	29	0.0815	40	-0.0213
8	0.03	19	-0.0409	30	0.106	41	-0.0439
9	0.0409	20	-0.0603	31	0.108	42	-0.074
10	0.0503	21	-0.0836	32	0.12	43	-0.0912
11	0.0625	22	-0.116	33	0.169	44	-0.00506

Результати спостережень можна вважати розподіленими нормально, якщо

$$d_{1-q_1/2} < \tilde{d} < d_{q_1/2} \quad (3.20)$$

де  $d_{1-q_1/2}, d_{q_1/2}$  - квантили розподілу;

$q_1$  - заздалегідь обраний рівень значимості критерію.

Обчислюємо  $\tilde{d}$  за формулою (3.17):  $\tilde{d} = 0,7564$ . Вибравши рівень значущості  $q_1 = 0,01$  при  $n = 46$ , знаходимо  $d_{0,01} = 0.8682$ ;  $d_{0,99} = 0.7256$ . Так як  $0.7256 < 0.7564 < 0.8682$ , то критерій 1 виконується.

Критерій 2. Можна вважати, що результати спостережень належать нормальному розподілу, якщо не більш 2 різностей  $|x_i - A|$  перевищили значення  $Z_{p/2}S$ , де  $Z_{p/2}$  - верхня квантиль розподілу нормованої функції

Лапласа, що відповідає ймовірності  $P/2$ ;  $S$  - оцінка середнього квадратичного відхилення результату спостереження

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{A})^2}{(n-1)}}. \quad (3.21)$$

Приймаємо рівень значущості  $q_2 = 0.01$ . Для  $n = 44$  і  $q_2 = 0.01$  знаходимо  $P = 0,99$   $Z_{p/2} = 2,6$ . звідси,  $Z_{p/2} = 2,6 * 0,61556 = 0,16$ . Згідно з критерієм 2 цієї статті не більше двох різностей наведеними в таблиці, бачимо, що ця різниця тільки при значенні  $1 = 33$  перевищує критичне значення. Отже, критерій 2 виконується.

Таким чином, гіпотеза про нормальність розподілу отриманих даних узгоджується з даними спостережень.

Для визначення ймовірності відхилення показань системи контролю вологості не перевищують  $\pm 0.15$  від середнього арифметичного ( $\tilde{A}$ ), Визначимо ймовірність заданого відхилення нормально розподіленої випадкової величини по абсолютній величині відповідно до формули

$$P(|X| < 0.1) = 2\Phi(0,15/\sigma) \quad (3.22)$$

де  $P(X)$  - ймовірність,

$\Phi(X)$  - функція Лапласа,

$\sigma$  - середнє квадратичне відхилення нормального розподілу

$$\sigma = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n(n-1)}} \quad (3.23)$$

Імовірність відхилення (3.22),  $P(|X| < 0.15) = 0,82$ .

### **3.3 Дослідження розподілу вологості потоку зерна в горизонтальному перетині зони охолодження шахтної сушарки ДСП -3**

Для достовірного вимірювання вологості потоку зерна на виході зерносушарки шахтного типу необхідно визначити місце розташування первинного вимірювального перетворювача в корпусі шахтної зерносушарки ДСП-32. Для визначення місця розташування датчика на виході шахтної зерносушарки ДСП-32 необхідно знати розподіл вологості потоку зерна між шахтами зерносушарки і всередині зерносушарки.

#### **3.3.1. Принцип дослідження розподілу вологості потоку зерна в горизонтальному перетині зони охолодження шахтної сушарки ДСП-32 на основі планування та проведення експерименту**

Призначенням експерименту є отримання розподілу вологості зерна в горизонтальному перетині шахти зерносушарки.

Метою експерименту є визначення мінімальної кількості та місця розміщення датчиків вимірювання вологості в корпусі зерносушарки ДСП.

Для досягнення мети експерименту необхідно провести відбір проб зерна з корпусу зерносушарки при протіканні процесу сушіння зерна. Пробазерна відбирається за допомогою щупа з коробів корпусу зерносушарки в зоні охолодження, відкритих зовні. Причому всередині коробка береться дві точки від-бору проби: одна ближче до зовнішньої стінки шахти (1), а друга (2) ближче до стінки шахти, яка межує з напірної камерою. Схема розташування місць відбору проб для визначення вологості представлена на рис.3.6.

Для підвищення достовірності (інформативності) експерименту знайденокількість паралельних дослідів [88] для проведення експерименту:

$$n \geq \frac{\bar{\sigma}_y^2}{\sigma_y^2} \quad (3.24)$$

де  $\bar{\sigma}_y^2$  середньоквадратичне відхилення одного спостереження ( три вміри)

$\sigma_y^2$  - сedyоквадратичне відхилення вибіркового середньої вологості

$$n \geq \frac{(0,13)^2}{(0,1)^2} \geq 1,7 \quad (3.25)$$

Таким чином, треба провести не менш 1 спостереження включає п'ять вимірів, тобто не менше 5 паралельних дослідів. Проби відбираються послідовно з 14 коробів шахти зерносушарки. Розбіжність у вологості потоку зерна в одній шахті з вологістю потоку зерна в іншій шахті визначається шляхом одночасного взяття проб з одних коробів (точок) обох шахт, вимірювання вологості і обчислення різниці згідно формули:

$$\Delta = W_{ш2} - W_{ш1} \quad (3.26)$$

де  $W_{ш2}$  - середня вологість зерна в шахті 2,

$W_{ш1}$  - середня вологість в шахті 1,

$\Delta W$  - різниця вологості між шахтами зерносушарки ДСП-32.

На рис 3.6 хрестиком показані місця взяття проб в горизонтальному перетині шахти. Заштриховані частини позначають короба зерносушарки, недоступні для взяття проби зовні. Після відбору проби вимір вологості проводиться двома методами: електричним і фізичним (висушування до постійної ваги).

В якості основного методу вимірювання вологості прийнятий електричний метод - діелькометричний лабораторний вологомір РМ-600. Як зразкового методу, прийнятий метод висушування на повітряно-тепловій сушінні зразка матеріалу до постійної ваги.

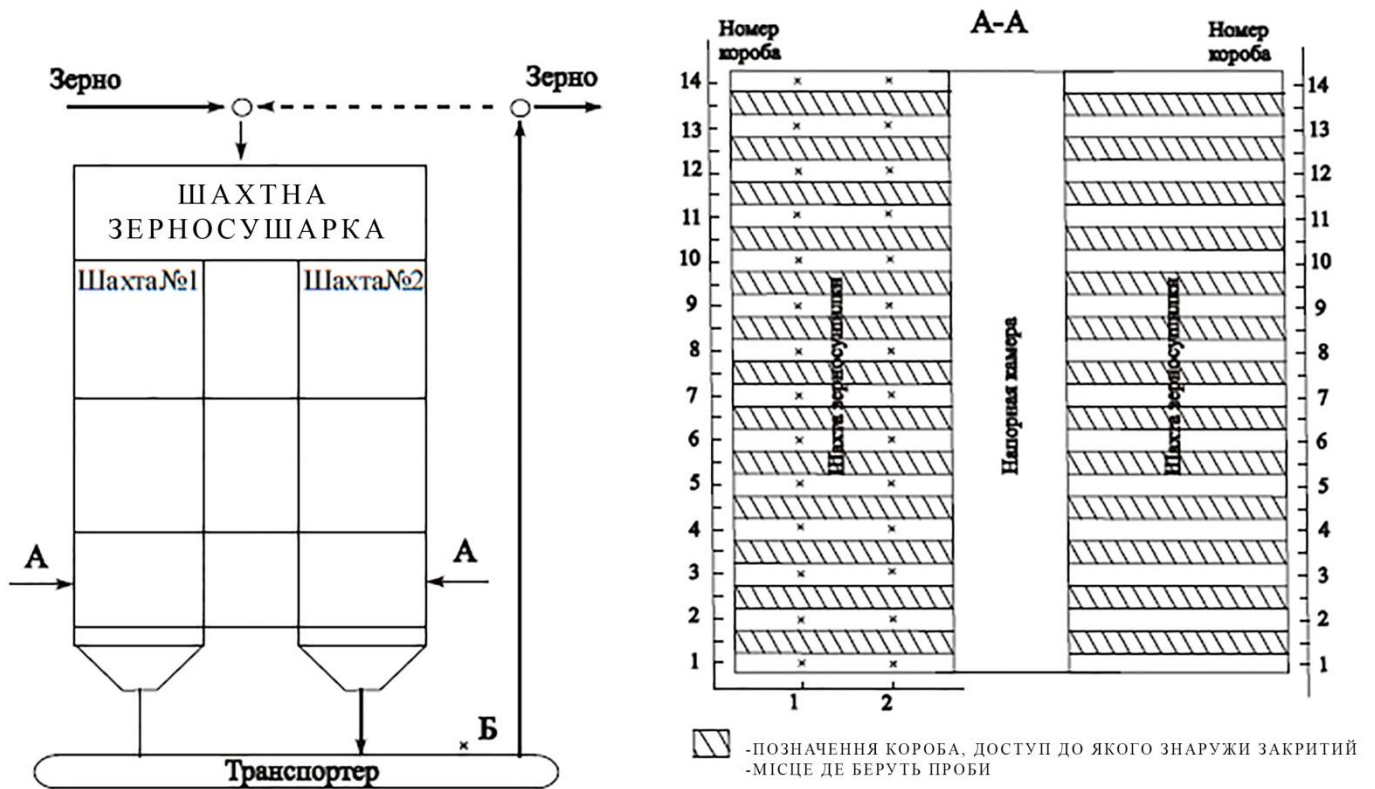


Рисунок 3.6 - Схема відбору проб зерна із шахтної зерносушарки ДСП- 3

Електричний метод застосовується для оперативності проведення експерименту і реалізується за допомогою портативного вологоміра РМ-600. Похибка вимірювання вологості 0.5%. Метод висушування до постійної ваги відповідно до стандарту застосовується для перевірки показань отриманих електричним методом.

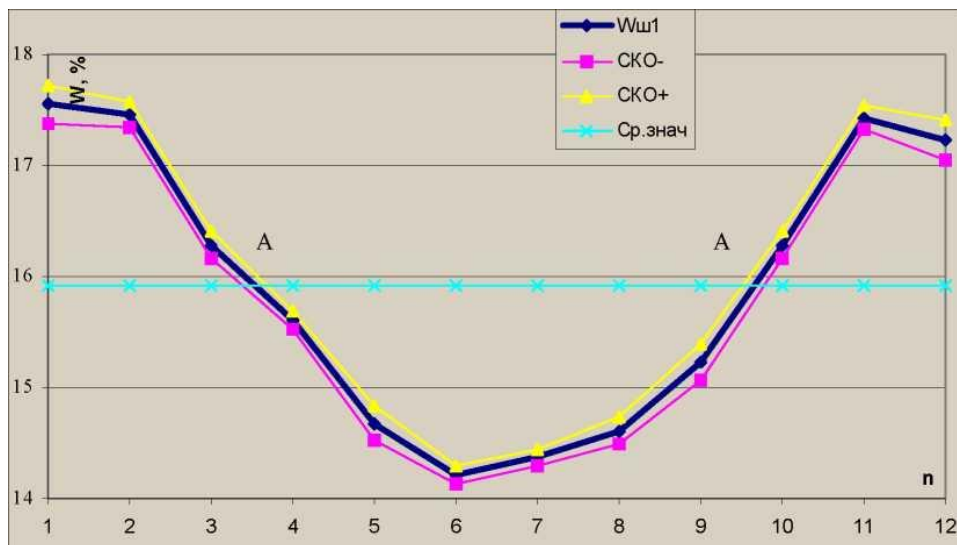


Рисунок. 3.7 - Розподіл вологості в зерносушарці ДСП при сушінні пшениці

З рис.3.7 видно, що крива розподілу вологості потоку зерна в шахті зерносушарки нерівномірна, симетрична щодо центру (коробів 5, 6, 7), різниця у вологості між різними точками може становити до 3.5% вологості.

Якщо вважати, що вологість зерна завантажується в силос (завантаженого в силос) після сушіння дорівнює середньому значенню вологості на виході зерносушарки, то місцем розташування датчиків є точки перетину кривої розподілу вологості і лінії середнього значення. Середнє значення вологості в горизонтальному перетині шахти зерносушарки, яке визначається підсумовуванням вологості в кожному коробі і діленням на кількість коробів, дорівнює 15.9 (%). Точки перетину позначені (А) на рис.3.7.

Результати експерименту з дослідження розподілу вологості потоку зерна в горизонтальному перетині зони охолодження зерносушарки між шахтами зерносушарки типу ДСП представлені на рис. 3.8.

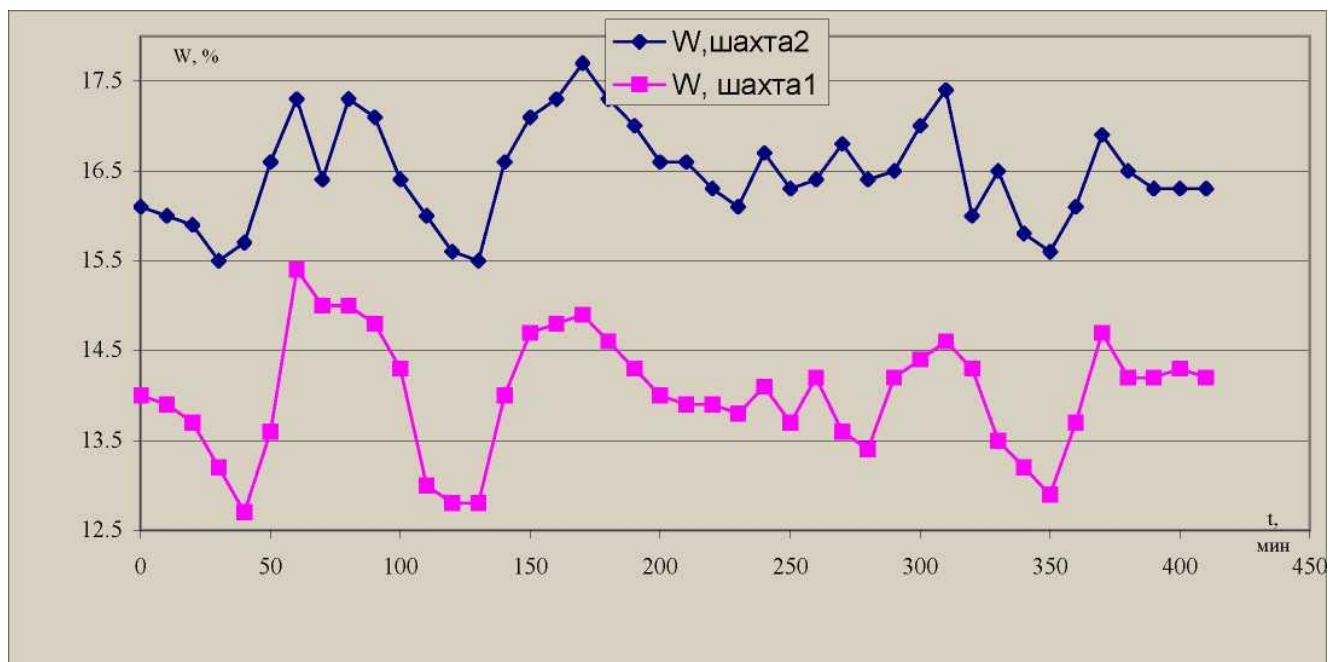


Рисунок 3.8 - Розподіл вологості між шахтами ДСП-32 при сушінні пшениці

Таким чином, гіпотеза про нормальність розподілу отриманих даних узгоджується з даними спостережень і слід визначити ймовірність попадання нормальної випадкової величини  $\Delta W$  в інтервал (1, 3.5).

Так як вже визначено, що величина  $\Delta W$  розподілена за нормальним законом, то ймовірність того, вона приймає значення в інтервалі (1, 3.5)

$$P(1 \langle \Delta W \rangle 3.5) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_1^{3.5} e^{-(\Delta W - a)^2 / (2\sigma^2)} dx \quad (3.27)$$

остаточно отримуємо

$$P(1 \langle \Delta W \rangle 3.5) = \Phi\left(\frac{3.5 - a}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{1 - a}{\sigma}\right) \quad (3.28)$$

де  $P(\Delta W)$ - ймовірність,  $\Phi(\Delta W)$  - функція Лапласа,  $a$ - математичне очікування;  $\sigma$ - середньоквадратичне відхилення, яке визначається за формулою:

$$\sigma = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n(n-1)}} \quad (3.29)$$

Ймовірність знаходження величини  $\Delta W$  в інтервалі (1, 3.5) дорівнює

$$P(1 \langle \Delta W \rangle 3.5) = 0,94.$$

Виконані дослідження при сушінні зерна в зерносушарці ДСП-32 показують нерівномірність розподілу вологості потоку зерна, що зумовлює установку вимірвальних перетворювачів в обох корпусах зерносушарки.

### 3.3.2 Особливості управління температурою й вологістю

Регульованими параметрами технологічного мікроклімату в чистих приміщеннях є температура й вологість повітряного середовища, значення яких повинні підтримуватися в чітко заданих діапазонах. Складність регулювання й стабілізації цих параметрів заключається в їхньому взаємозв'язку, коли зміна одного з них викликає зміну іншого. Для рішення цього завдання необхідно спільне застосування регуляторів температури й вологості повітря, при цьому дія регулятора вологості зводиться до цілеспрямованої зміни вологості повітря з тим, щоб компенсувати зміну вологості, викликану роботою регулятора температури повітря.

Очевидно, що при спільній роботі регуляторів виникають коливання в

процесі зміни вологості, викликані впливом контуру регулювання температури, що погіршує показники якості стабілізації відносної вологості й може привести до нестійкої роботи контуру регулювання вологості. Це явище можна усунути, використовуючи принцип пріоритетності регулювання температури й вологості, відповідно до якого температурному контуру, як більш інерційному, віддається перевага в черговості виконання регулювання. Після того як температура в приміщенні досягла заданого значення, проводиться регулювання вмісту вологи в повітрі. При рішенні завдань контролю й управління режимами температури й вологості у приміщеннях досить великого об'єму зазвичай використовують системи багатоланкового кондиціонування повітря, утворених центральним кондиціонером і рядом місцевих регулюючих органів, що здійснюють доведення параметрів повітря, що надходить, в окремих приміщеннях до необхідних значень, зумовлених внутрішнім виділенням тепла у кожному приміщенні.

При тому бажано управляти по середньому в обсязі зони значенню відповідного параметра мікроклімату, а не за значенням в одній точці зони. Для цього в просторі кожної зони необхідно встановити не один, а кілька датчиків (залежно від обсягу даної зони). На підставі інформації цих датчиків розраховується середнє значення регульованого параметра, по якому проводиться керування відповідним виконавчим механізмом. Оскільки регулювання ведеться по відхиленню, доцільно використовувати не середнє значення регульованого параметра, а середнє значення його відхилення від потрібного значення в даній точці простору.

### **3.3.3 Методи й засоби вимірювання вологості**

Вологість і вміст молекул води в речовинах і матеріалах є одним з найбільш важливих характеристик складу. Вже вказувалося, що вологу необхідно вимірювати в газах (концентрація парів води), у сумішах рідин (власне вміст молекул води) і у твердих тілах у якості кристалізаційної вологи, що входить до структури кристалів. Відповідно, набір методів і пристроїв для

вимірювання вмісту молекул води в матеріалах виявляється досить різноманітним.

Традиції вимірювальної техніки, що спираються на повсякденний досвід, привели до того, що у вимірах вологості склалася специфічна ситуація, коли залежно від впливу кількості вологи на ті або інші процеси необхідно знати або абсолютне значення кількості вологи в речовині, або відносне значення, обумовлене як процентне відношення реальної вологості речовини до максимально можливого в даних умовах. Якщо необхідно знати, наприклад, зміну електричних або механічних властивостей речовини, у цьому випадку визначальною є абсолютне значення вмісту вологи. Те ж саме стосується вмісту вологи в нафті, у продуктах харчування й т.д. У тому випадку, коли необхідно визначити швидкість висихання вологих об'єктів, комфортність середовища перебування людини або метеорологічну обстановку, на перше місце виступає відношення реальної вологості, наприклад повітря, до максимально можливого при даній температурі.

У зв'язку із цим характеристики вологості, а також величини й одиниці вологості підрозділяються на характеристики стану вологості та вологовмісту.

Вологовміст - величини й одиниці, що виражають реальну кількість вологи в речовині. Основною характеристикою вологовмісту є абсолютна вологість, обумовлена як кількість вологи в одиниці об'єму:

$$A = \frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{V}. \quad (3.30)$$

До цього класу характеристик можна віднести парціальний тиск водяних пар у газах, абсолютну концентрацію молекул води для газу, близького до ідеального, обумовлену як:

$$n_{\text{H}_2\text{O}} = n_0 \cdot \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_0} \frac{T_0}{T} \left( \frac{1}{\text{см}^3} \right), \quad (3.31)$$

де  $T$  – абсолютна температура,  $n_0$  – постійна Лошмідта, рівна числу молекул ідеального газу в  $1 \text{ см}^3$  при нормальних умовах, тобто при  $p_0=760\text{Торр}=1015 \text{ Гпа}$

й  $T_0 = 273,16$  К. Часто використовується така характеристика абсолютної вологості як точка роси, тобто температура, при якій дана абсолютна вологість газу стає 100%. Ця характеристика привнесена в гігromетрію метеорологам і, оскільки є найбільш характерною при визначенні моменту випадання роси й визначення її кількості.

Стан вологості - процентне співвідношення, рівне відношенню абсолютної вологості до максимально можливого при даній температурі:

$$\varphi \% = \frac{A}{A_{\text{нас}}} \cdot 100. \quad (3.32)$$

Відносна вологість може характеризуватися так званим дефіцитом парціального тиску, рівного відношенню парціального тиску вологи до максимально можливого при даній температурі. Дуже рідко в гігromетричних вимірах можна зустріти дефіцит точки роси.

Зв'язок між температурою й максимально можливою абсолютною вологістю дається як рівняння пружності насиченої пари води. Це рівняння має вигляд:

$$\log \rho_{\text{шт}} = A + B \log \frac{1}{T} + C \log T. \quad (3.33)$$

На практиці частіше користуються таблицею тиску насиченої пари над пласкою поверхнею води або льоду при різних температурах.

На стандартних довідкових даних засновані практично всі перерахунки характеристик вологості. На їхній основі можна, наприклад, по відомій абсолютній вологості й температурі знайти відносну вологість, точку роси й т.д., виразити практично будь-яку характеристику вологості газів.

Серед приладів для виміру вологості найбільш масовими є прилади для визначення вмісту води в газах - гігromетри. Для виміру вологості твердих і сипучих тіл найчастіше використовуються ті ж гігromетри, тільки процес підготовки проби до аналізу містить у собі переведення вологи в газову фазу, що потім і аналізується. Існують у принципі методи безпосереднього виміру вмісту вологи в рідинах і у твердих тілах, наприклад, методом ядерного магнітного

резонансу. Прилади, побудовані на такому принципі, досить складні, дорогі й вимагають високої кваліфікації оператора.

Гігрометри як самостійні прилади є одними із самих затребуваних вимірювальних приладів, оскільки з давніх часів їх потребували метеорологи. По зміні вологості, також як по зміні тиску й температури, можна прогнозувати погоду, можна контролювати комфортність життєзабезпечення в приміщеннях, контролювати різного роду технологічні процеси. Наприклад, контроль вологості на електростанціях, на телефонних станціях, на поліграфічному виробництві й т.п. є визначальним у забезпеченні нормального режиму функціонування.

Затребуваність гігrometerів породила розробки й виготовлення великої кількості різних типів приладів. Більшість вимірювачів вологості являють собою датчики вологості з індикатором або аналогового сигналу, або сигналу в цифровій формі. Оскільки індикаторами є здебільшого або механічні прилади, або електровимірювальні прилади, розглянуті в попередніх розділах, зупинимося на датчиках вологості, що визначають майже всі функціональні можливості гігrometerів.

Датчики гігrometerів можна класифікувати за принципом дії на наступні типи:

- волосяні датчики, у яких використовується властивість волосся змінювати довжину при зміні вологості;
- ємнісні датчики, у яких при зміні вологості змінюється електрична ємність конденсатора з гігроскопічним діелектриком;
- резистивні датчики, у яких змінюється опір провідника, на поверхню якого нанесений гігроскопічний шар;
- п'єзосорбційні датчики, у яких волога, поглинена гігроскопічним покриттям, змінює власну частоту коливань п'єзокристалу, на поверхню якого нанесений гігроскопічний шар;
- датчик температури точки роси, у якому фіксується температура, що відповідає переходу дзеркального відбиття металевою поверхнею в дифузійне;

- оптичний абсорбційний датчик, у якому реєструється частка поглиненої енергії світла в смугах поглинання парами води електромагнітного випромінювання.

Найбільш древній, найбільш простий і найбільш дешевий датчик вологості являє собою звичайне волосся, натягнуте між двома пружинами. Для виміру вологості використовується властивість волосся змінювати довжину при зміні вологості. Незважаючи на примітивність такого датчика і на те, що процес, що лежить в основі виміру, не визначається законами фізики й тому не піддається розрахунку, гігрометри з волоссяними датчиками виготовляють у великій кількості.

Ємнісні датчики вологості в цей час по масовості використання конкурують і навіть перевершують волоссяні, оскільки по простоті й дешевизні вони не поступаються волоссяним. Вимірюваною фізичною величиною є ємність конденсатора, а це означає, що як індикатор або вихідний пристрій може використатися будь-який вимірювач ємності. На підкладку із кварцу наноситься тонкий шар алюмінію, який є однією з обкладок конденсатора.

На поверхні алюмінієвого покриття утворюється тонка плівка окису  $Al_2O_3$ . На окислену поверхню за допомогою напилювання наноситься другий електрод з металу, що вільно пропускає пари води. Такими матеріалами можуть бути тонкі плівки палладію, родію або платини. Зовнішній пористий електрод є другою обкладкою конденсатора.

Конструкція резистивного датчика вологості являє собою меандр із двох не дотичних електродів, на поверхню якого нанесено тонкий шар гігроскопічного діелектрика. Останній, сорбуючи вологу з навколишнього середовища, змінює опір проміжків між електродами меандру. Про вологість судять по зміні опору або провідності такого елемента.

Останнім часом з'явилися гігрометри, в основу роботи яких покладено фундаментальний фізичний закон поглинання електромагнітного випромінювання – закон Ламберта-Бугера-Бера. Відповідно до цього закону

через шари речовини, що поглинає або розсіює, проходить електромагнітне випромінювання інтенсивністю  $I_\lambda$ , рівне:

$$I_\lambda = I_0 e^{-\delta_\lambda N l}, \quad (3.34)$$

де  $I_\lambda$  – інтенсивність випромінювання, що падає на поглинаючий стовп;  $N$  – концентрація поглинаючих атомів (число молекул в одиниці об'єму);  $l$  – довжина поглинаючого стовпа,  $\delta_\lambda$  - молекулярна константа, рівна площі «тіні», створеної одним атомом і вираженої у відповідних одиницях.

Пари води мають інтенсивні смуги поглинання в інфрачервоній області спектра і в області довжини хвиль від 185 нм до 110 нм – у так званій вакуумній ультрафіолетовій області. Є окремі розробки по створенню інфрачервоних і ультрафіолетових оптичних вологомірів, і всі вони мають одну загальну позитивну якість – це вологоміри миттєвої дії. Під цим розуміється рекордно швидке встановлення аналітичного сигналу для проби, поміщеної між джерелом світла й фотоприймачем. Інші особливості оптичних датчиків визначаються тим, що в інфрачервоній області поглинання молекулами води відповідає обертально-коливальним ступеням свободи. Це означає, що ймовірності переходів, і, відповідно, перетину поглинання в законі Ламберта-Бугера-Бера залежать від температури об'єкта. У вакуумній ультрафіолетовій області перетин поглинання від температури не залежить. Із цієї причини ультрафіолетові датчики вологості є кращими, але інфрачервона техніка, що використовується в ІЧ датчиках вологості, більш довговічні й прості в експлуатації, ніж ВУФ техніка.

У оптичних датчиків є також один загальний недолік - вплив на показники компонентів, що заважають. В інфрачервоній області це різні молекулярні гази, наприклад окису вуглецю, сірки, азоту, вуглеводню й т.д. У вакуумному ультрафіолеті основним компонентом, що заважає є кисень. Проте можна вибрати довжини хвиль у ВУФ, де поглинання кисню є мінімальним, а поглинання пари води - максимальним. Наприклад, зручною областю є випромінювання резонансної лінії водню з довжиною хвилі  $\lambda = 121,6$  нм. На цій довжині хвилі в кисні спостерігається «вікно» прозорості в той час, як пари води

помітно поглинають. Іншою можливістю є використання випромінювання ртуті з довжиною хвилі 184,9 нм. У цій області кисень випромінювання не поглинає і весь сигнал поглинання визначається парами води.

Важливою якістю оптичного датчика є слідування із закону Ламберта-Бугера-Бера, що заключається в тому, що такий датчик потрібно калібрувати тільки в одній точці. Якщо, наприклад, визначити сигнал із приладу при якій-небудь одній певній концентрації пари води, то відградувати шкалу приладу можна розрахунковим шляхом на тій підставі, що зміна логарифма сигналів при різних концентраціях дорівнює:

$$\Delta \lg I = (\lg I_0 - \lg I_\lambda) = \delta_\lambda N l, \quad (3.35)$$

де  $N$  – концентрація (число) молекул в одиниці об'єму;  $\delta_\lambda$  - перетин поглинання,  $l$  - довжина поглинаючого проміжку.

Для визначення відносної й абсолютної вологості на практиці часто використовуються прилади, що одержали назву психрометрів. Психрометри являють собою два однакових термометри, один із яких обертають гнітом і змочують водою. Мокрий термометр показує температуру нижчу, ніж сухий термометр у тому випадку, якщо відносна вологість не дорівнює 100%. Чим нижче відносна вологість, тим більше різниця показань сухого й мокрого термометрів. Для психрометрів різних конструкцій складаються так звані психрометричні таблиці, за допомогою яких визначають характеристики вологості.

Психрометр не дуже зручний в експлуатації, оскільки його показання не просто автоматизувати, і потрібне постійне зволоження гніота. Проте саме психрометр є найпростішим і разом з тим досить точним й надійним засобом виміру вологості. Саме по психрометру найчастіше градууються гігрометри з волосяними, ємнісними або резистивними датчиками.

На закінчення коротко зупинимося на методах виміру вологості рідин і твердих матеріалів. Найпоширенішим є метод висушування або випарювання вологи з речовини з наступним зважуванням. Звичайно пробу висушують доти,

поки не перестане змінюватися її вага. При цьому зазвичай робиться два припущення. Перше – що вся сортована й хімічно зв'язана волога при обраному режимі випаровується. І друге – що разом з вологою не випаровується ніякий інший компонент. Очевидно, що в багатьох випадках гарантувати коректність виконання процедур випарювання дуже складно. Іншим універсальним методом виміру вологості рідких і твердих тіл є метод, коли волога з них переходить у газову фазу в якому-небудь замкнутому об'ємі. У цьому випадку стандартизують методику підготовки проби, а вимірювання проводять одним зі згаданих типів гігрометрів, призначених для вимірювання вологи в газовій фазі. З метою одержання надійних результатів такі пристрої калібрують по стандартних зразках вологості.

*Вимірювання вологості психрометричним вологоміром.* Вологість газів, рідин і твердих матеріалів - один з важливих показників у технологічних процесах. Вологість газів, наприклад, необхідно вимірювати в сушильних установках, при очищенні газів, у газозбірниках, при кондиціюванні повітря й т.д. Вимірювання вмісту води в нафті, спиртах, ацетоні проводять у процесах нафтопереробки й нафтохімії, у пульпах - у виробництві сірчаної кислоти й мінеральних добрив. Вимірювання вологості твердих сипучих матеріалів займає важливе місце у виробництві фарб, мінеральних добрив, будівельних матеріалів; вологість волокнистих матеріалів визначає якість продукції при виробництві паперу й картону.

Вологість газів у технологічних процесах звичайно вимірюють психрометричним методом.

Дія психрометричних вологомірів заснована на вимірі двох температур: температури «сухого» термодатчика, поміщеного в аналізований газ, і температури «мокрого» термодатчика, загорненого в панчоху з вологої тканини, кінець якого опущений у воду. За рахунок випару води цей термодатчик прохолоджується до температури меншої, ніж температура газу. Зі збільшенням вологості газу випар іде менш інтенсивно і температура «мокрого» термометра зростає. При вологості 100% вода взагалі не буде випаровуватись і температури

обох термодатчиків зрівнюються.

В промислових вологомірах у якості термодатчиків зазвичай використовують термометри опору, включені у схему для вимірювання відношення їхніх опорів, тобто відношення температур «мокрого» і «сухого» термометрів.

### 3.3.4 Математична модель об'єкта керування

Визначення математичної моделі об'єкта керування. У даній роботі розглядається камера для сушка зерна. Функціональна схема камери як об'єкта управління може бути представлена в такий спосіб (рис. 3.9).

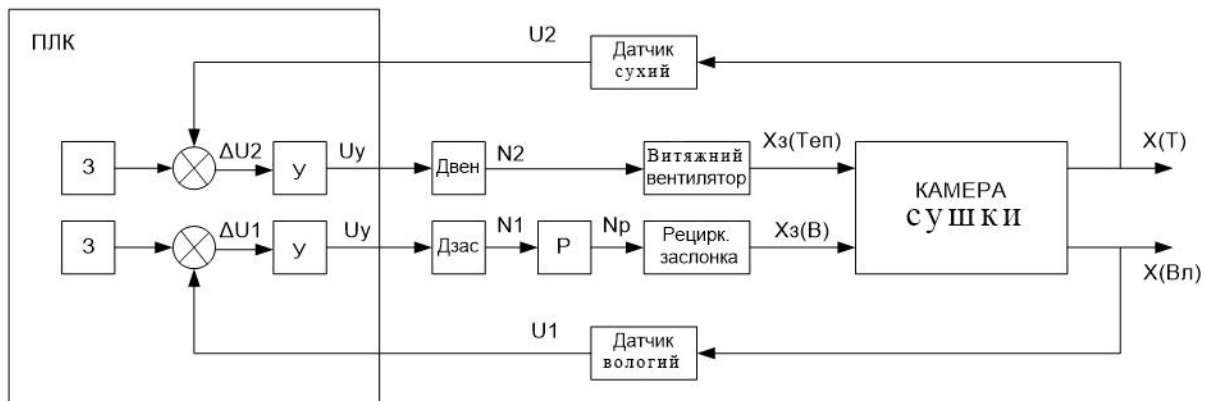


Рисунок 3.9 - Функціональна схема камери сушки зерна

Регулювання відбувається по двох контурах. Вхідними параметрами або параметрами регулювання є тепло (Теп), що виділяється ТЕНом, і повітря (В). Кількість подаваного тепла й повітря в камеру регулюється за допомогою задатчиків (z). Величина впливу, що задається, визначається за допомогою ПЛК. Вихідними параметрами камери є температура (Т) і вологість (ВЛ). Регулювання параметрів камери сушки будемо робити шляхом регулювання цих параметрів. Вихідні сигнали фіксуються термометрами, потім перетворюються датчиками в напругу ( $U_1$  і  $U_2$ ). Далі сигнали надходять на відповідні суматори, де відбувається зіставлення значень с заданим. Різниця цих величин посилюється підсилювачами (п). Зрегульована й посилена величина по вологості надходить у

двигун (Дзас) рециркуляційної заслінки. Обороти двигуна через редуктор (р) перетворюються у відхилення заслінки (зас). Заслінка, у свою чергу, регулює вологість у камері. При вологості більше, ніж задана, пару необхідно випустити, - заслінка відкривається, і навпаки. Температура в камері регулюється за допомогою витяжного вентилятора, тобто при перевищенні заданої температури вентилятор включається, повітря виходить, температура знижується і навпаки. При неприпустимому збільшенні температури через сигнал від ПЛК відбувається відключення ТЕНа.

Складемо для ланок передаточні функції й диференціальні рівняння, для цього скористаємося даними, наведеними в [3]. Найбільше часто об'єкт такого класу представляють у вигляді наступних передаточних функцій:

$$\text{камера сушки } W(p) = \frac{K_c}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \Rightarrow \quad (3.41)$$

$$T_1 T_2 \frac{d^2 X_{\text{вих}}(t)}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d X_{\text{вих}}(t)}{dt} + X_{\text{вих}}(t) = K_c * X_{\text{вх}}(t); \quad (3.42)$$

$$\text{перетворювач вологості } W(p) = K_1 \Rightarrow X_{\text{вих}}(t) = K_1 * X_{\text{вх}}(t); \quad (3.43)$$

$$\text{підсилювач напруги } \Delta U_1 W(p) = K_2 \Rightarrow X_{\text{вих}}(t) = K_2 * X_{\text{вх}}(t); \quad (3.44)$$

$$\text{двигун (Дзас)} W(p) = \frac{K_3}{T_3 p + 1} \Rightarrow T_3 \frac{d X_{\text{вих}}(t)}{dt} + X_{\text{вих}}(t) = K_3 * X_{\text{вх}}(t); \quad (3.45)$$

$$\text{двигун (Двен)} W(p) = \frac{K_9}{T_9 p + 1} \Rightarrow T_9 \frac{d X_{\text{вих}}(t)}{dt} + X_{\text{вих}}(t) = K_9 * X_{\text{вх}}(t); \quad (3.46)$$

$$\text{редуктор } W(p) = K_4 \Rightarrow X_{\text{вих}}(t) = K_4 * X_{\text{вх}}(t); \quad (3.47)$$

$$\text{заслінка } W(p) = K_5 \Rightarrow X_{\text{вих}}(t) = K_5 * X_{\text{вх}}(t); \quad (3.48)$$

$$\text{підсилювач напруги } \Delta U_2 W(p) = K_7 \Rightarrow X_{\text{вих}}(t) = K_7 * X_{\text{вх}}(t); \quad (3.49)$$

$$\text{перетворювач температури } W(p) = K_6 \Rightarrow X_{\text{вих}}(t) = K_6 * X_{\text{вх}}(t); \quad (3.50)$$

$$\text{вентилятор } W(p) = \frac{K_8}{p} \Rightarrow \frac{d X_{\text{вих}}(t)}{dt} = K_8 * X_{\text{вх}}(t); \quad (3.51)$$

Складемо рівняння динаміки системи по каналі що задає й керуючого впливу.

Для контуру керування по вологості (1 контуру):

$$\Phi_{x_3'}(p) = \frac{x_3'(p)}{x_3(p)} = \left( \frac{ke^{-\tau_0 p}}{p(T_3 p + 1)(T_2 p + 1)(T_1 p + 1)} \right) : \left( 1 + \frac{k_1 k e^{-\tau_0 p}}{p(T_3 p + 1)(T_2 p + 1)(T_1 p + 1)} \right) =$$

$$= \frac{ke^{-\tau_0 p}}{p(T_3 p + 1)(T_2 p + 1)(T_1 p + 1) + k_1 k e^{-\tau_0 p}}; \quad (3.52)$$

$$x_3'(p) = \frac{x_3(p) k e^{-\tau_0 p}}{p(T_3 p + 1)(T_2 p + 1)(T_1 p + 1) + k_1 k e^{-\tau_0 p}}, \quad (3.52)$$

де  $k = k_2 k_3 k_4 k_5 k_c$

Для контуру керування по температурі (2 контури):

$$\Phi_{x_3}(p) = \frac{x_3(p)}{x_3(p)} = \left( \frac{ke^{-\tau_0 p}}{p(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \right) : \left( 1 + \frac{k_6 k e^{-\tau_0 p}}{p(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \right) = \frac{ke^{-\tau_0 p}}{p(T_1 p + 1)(T_2 p + 1) + k_6 k e^{-\tau_0 p}}; \quad (3.53)$$

$$x_3(p) = \frac{x_3(p) k e^{-\tau_0 p}}{p(T_3 p + 1)(T_2 p + 1)(T_1 p + 1) + k_6 k e^{-\tau_0 p}}, \quad (3.54)$$

де  $k = k_7 k_8 k_c$

Тоді структурна схема камери сушки як об'єкта керування буде виглядати (рис.3.10).

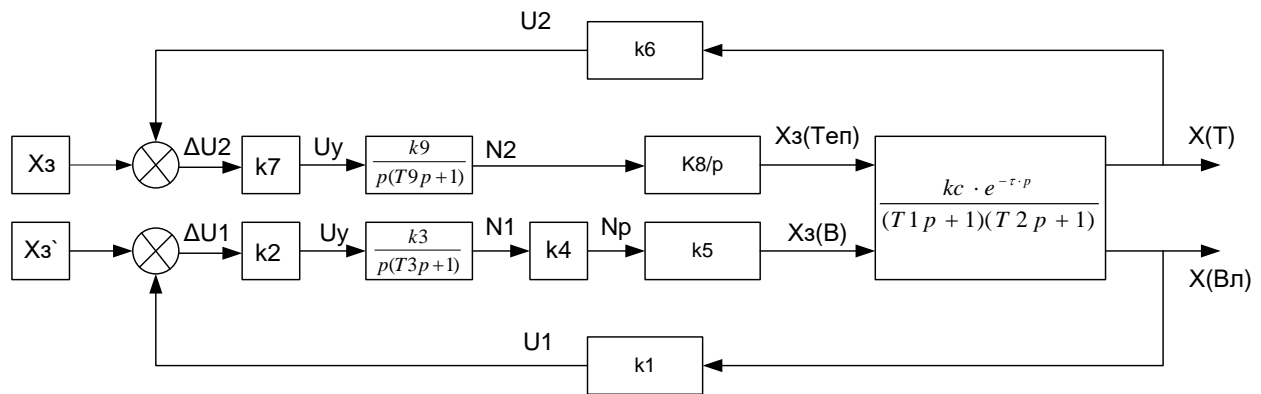


Рисунок 3.10- Структурна схема камери сушки

### 3.3.5 Розрахунок параметрів настроювання керуючого пристрою

Для першого контуру.

$$W'(p) = \frac{ke^{-\tau_0 p}}{p(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)} = \frac{200e^{-300p}}{p(900p + 1)(3600p + 1)(0.5p + 1)}; \quad (3.55)$$

де  $k = k_2 k_3 k_4 k_5 k_c = 2 \cdot 100 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 200$

Застосуємо ПД-регулятор:

$$W_p(p) = \frac{k_p (T_u p + 1)(T_d p + 1)}{T_u p} ; \quad (3.56)$$

$k_p=0.28$ ;  $T_u=T_2=3600$  з;  $T_d=900$  з

$$W'(p) = \frac{28e^{-300p}}{p^2 3600(0.5p + 1)}. \quad (3.57)$$

САК нестійка, позбудемося від одного ступеня астатизму. Для цього введемо диференціальну коригуючу сигнал відповідно до передаточної функції:

$$W_k(p) = \frac{Tp}{Tp + 1} \quad (3.58)$$

При виконанні умови, що  $T=0.5$ с передаточна функція САК регулювання температури прийме вид:

$$W'(p) = \frac{14e^{-300p}}{p3600(0.5p + 1)^2} \quad (3.59)$$

*Для другого контуру.*

$$W(p) = \frac{ke^{-\tau_0 p}}{p(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} = \frac{100e^{-300p}}{p(3600p + 1)(900p + 1)}, \quad (3.60)$$

де  $k = k_7 k_8 k_c = 100 \cdot 1 \cdot 1$

Застосуємо ПД-регулятор.

$$W_p(p) = \frac{k_p (T_u p + 1)(T_d p + 1)}{T_u p} \quad (3.61)$$

$k_p=0.16$ ;  $T_u=3600$  з;  $T_d=900$  з

$$W(p) = \frac{16e^{-300p}}{p^2 3600} \quad (3.62)$$

Введемо диференціальну складову помилково:

$$W_k(p) = \frac{Tp}{Tp + 1}; \quad (3.63)$$

При виконанні аналогічної умови, що  $T=0.5$ с передаточна функція САУ регулювання вологості прийме вид:

$$W(p) = \frac{8e^{-300p}}{p3600(0.5p + 1)} \quad (3.64)$$

### 3.3.6 Моделювання системи керування

Для оцінки адекватності отриманої моделі й перевірки працездатності, змодельюємо систему в середовищі Matlab SimuLink. Для цього по черзі на кожний канал (контур температури й контур вологості) будемо подавати ступінчатий сигнал і знімати отримані значення.

Для контуру температури:

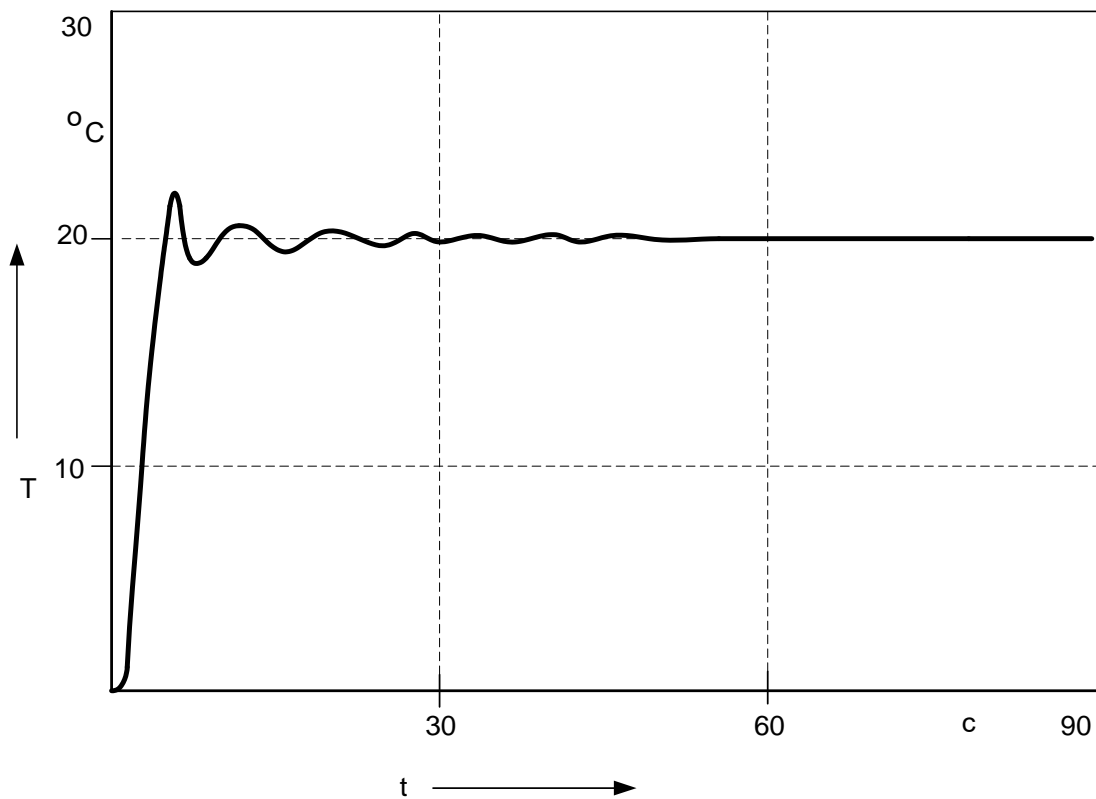


Рисунок 3.11 - Графік перехідного процесу контуру регулювання температури при подачі східчастого керуючого впливу

Із графіка бачимо, що час перехідного процесу становить 50 секунд, при цьому контур температури є досить інерційним. Це пояснюється тим, що температуру неможливо встановити моментально.

Для контуру вологості:

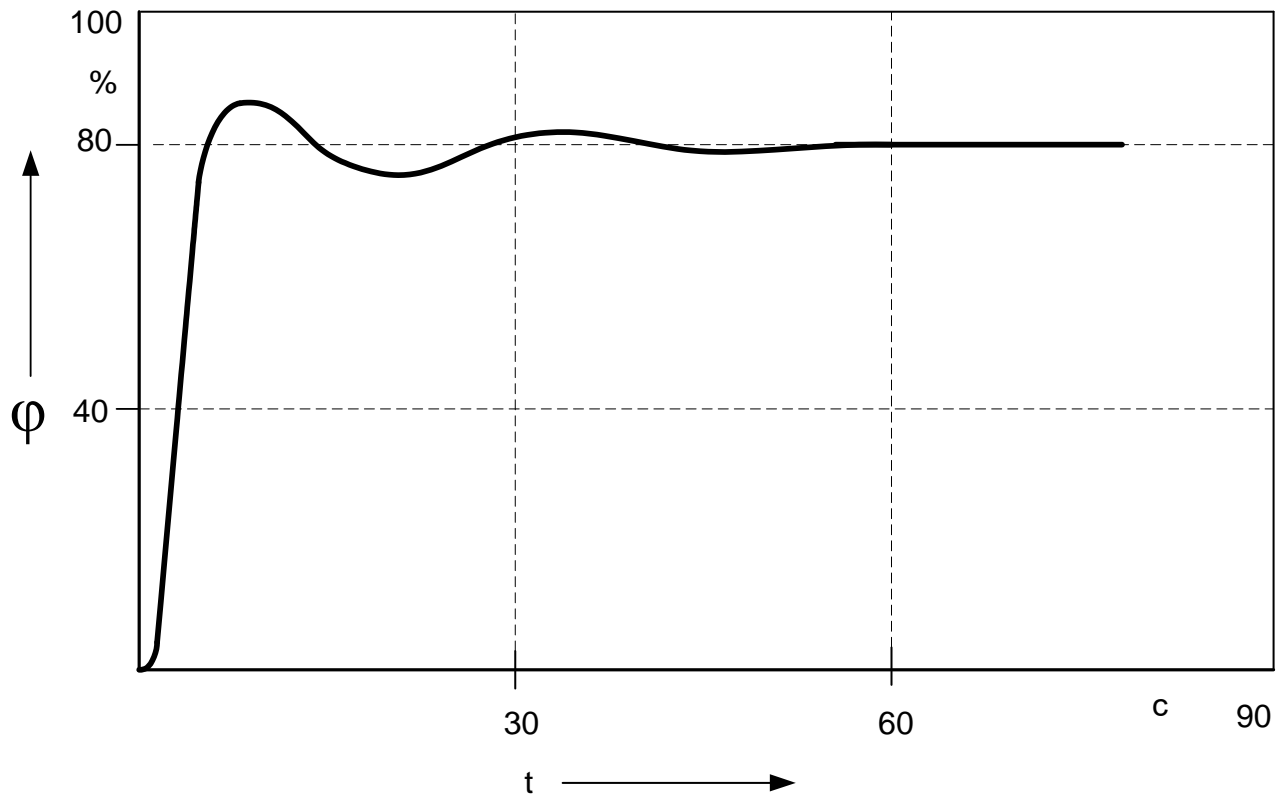


Рисунок 3.12 - Графік перехідного процесу в контурі регулювання вологості при подачі ступінчатого керуючого впливу

Із графіка бачимо, що час перехідного процесу також досить великий, оскільки є пряма залежність від температури.

У результаті моделювання переконалися в тому, що математична модель камери сушки є стійкою, а отже дану модель має сенс розглядати як реально працюючу систему.

### 3.3.7 Алгоритм регулювання температури й вологості

Управління процесом регулювання температури здійснюється системою керування в такий спосіб (блок-схема алгоритму керування)



Рисунок 3.13 - Блок-схема управління процесом регулювання температури  
На першому етапі управління здійснюється ініціалізація системи

керування (блок 1) - це тестування пам'яті, настроювання портів вводу/виводу ПЛК, перевірка лінії зв'язку.

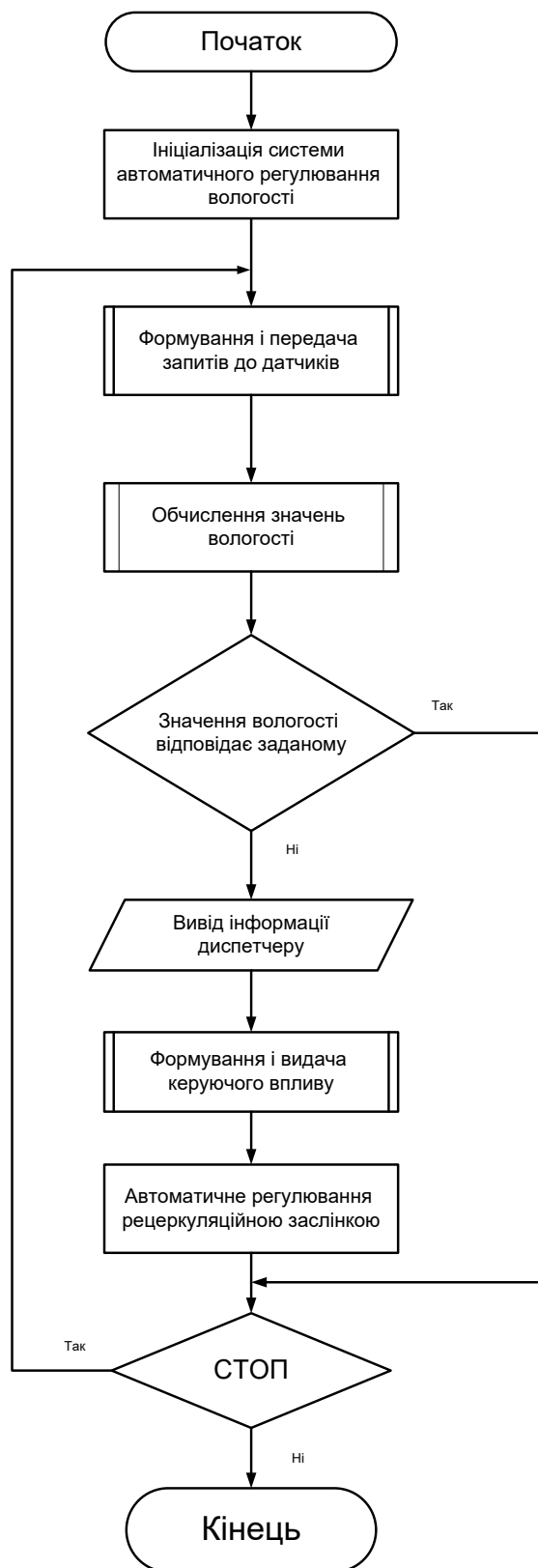


Рисунок 3.14 - Блок-схема управління процесом регулювання вологості  
Вимір величини температури, здійснюється датчиками. ПЛК системи

керування здійснює послідовне опитування датчиків шляхом посилення до відповідного адаптера імпульсів «запиту» (блок 3). Далі здійснюється прийом інформації від запитуваного датчика й передача. Опитування датчиків здійснюється з інтервалом  $q=0,01c$ .

Поточні значення температури, отримані від датчиків, виводяться на прилади, що показують мнемосхеми технологічної установки пульта диспетчера. Крім того, у ПЛК порівнюються поточні значення параметрів із заданими (блок 6) і у випадку не відповідності формуються керуючі команди на автоматичні регулятори (блок 9). Наприклад, зміни температури в контрольованій точці здійснюється шляхом включення витяжного вентилятора.

Інформація про роботу установки передається від ЕОМ на мнемосхему технологічного об'єкта з елементами індикації й, при необхідності, на друкувальний пристрій.

Алгоритм регулювання значення вологості аналогічний, з тією лише різницею, що додано блок обчислення самого параметра (значення вологості). Приклад на рисунку 3.13.

### **3.3.8 Принцип передачі даних**

Принцип передачі даних у системі керування полягає в наступному (див. блок-схему алгоритму на рисунку 3.14).

При одержанні запиту від ПЛК про необхідність одержання інформації про контрольований параметр (блок 2), мікроконтролер здійснює опитування і введення сигналів від відповідного аналогового або дискретного датчика (блок 5 або блок 6). Далі відбувається обробка й, при необхідності, нагромадження поточних значень контрольованого параметра. Отримана інформація передається на пульт оператора. Прийом-передача інформації здійснюється за допомогою інтерфейсу RS-485[2]. Стандарт RS485 є найбільш застосовуваним у сучасних системах керування й передбачає зв'язок в обидва боки по симетричній погодженій лінії зв'язку (витим парам дроту).

Уведення даних у ПЛК здійснюється через блок узгодження БС, що призначений для перетворення струмових сигналів від аналогових датчиків у сигнал напруги (для цього використовуються прецизійні резистори); здійснюється гальванічна розв'язки лінії зв'язку адаптера з контактними датчиками (наприклад, за допомогою транзисторних оптопар АОТ128Б [3]); здійснюється захист мікроконтролера від можливих перенапруг у сполучних лініях датчиків (за допомогою стабілітронів і резисторів).

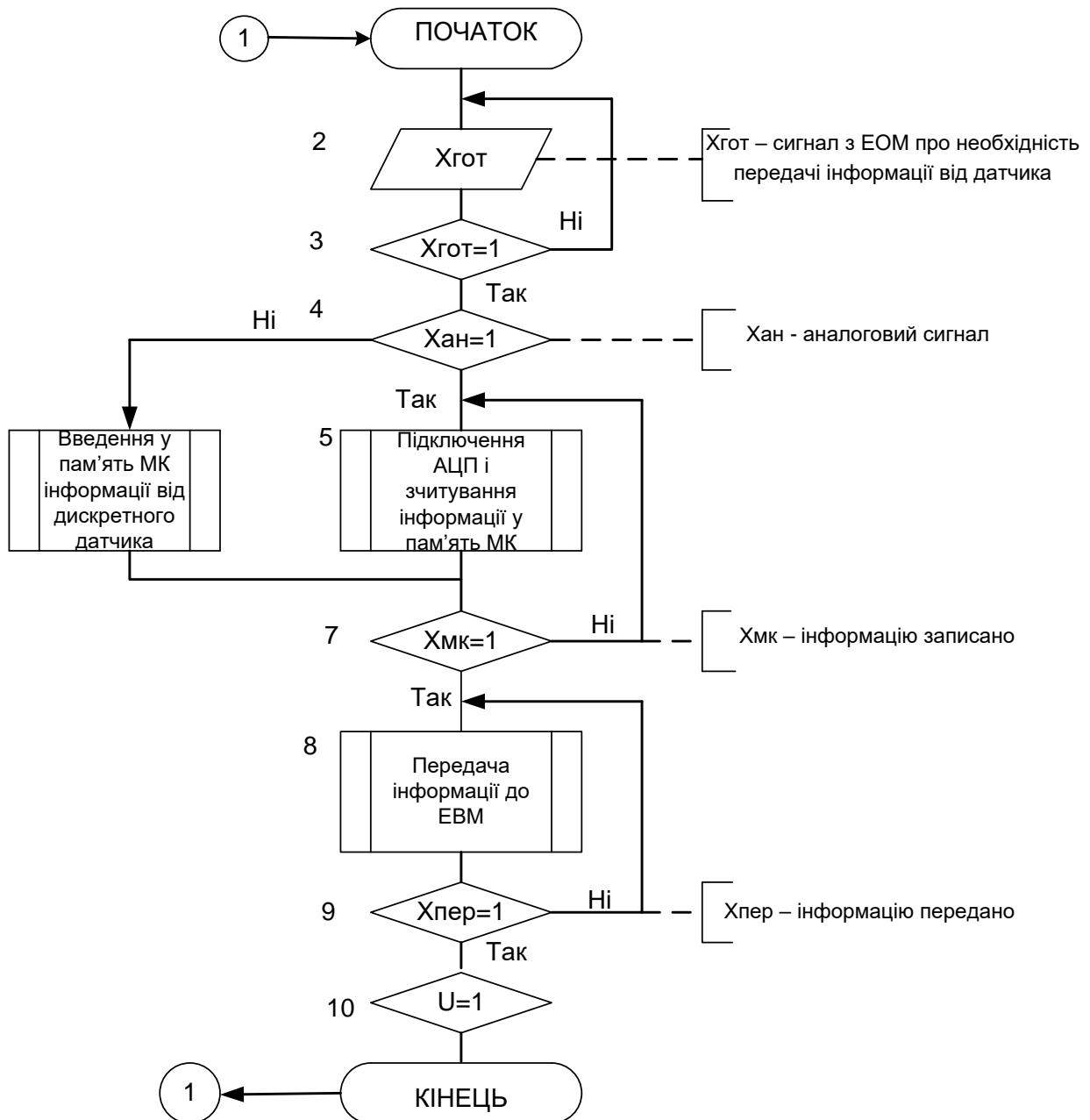


Рисунок 3.15 – Блок-схема алгоритму передачі інформації

Основним елементом є мікроконтролер, що здійснює прийом інформації

від датчиків, обробку й зберігання в пам'яті даних, управляє передачею даних в ЕОМ, а також приймає «запит» від оператора про необхідність передачі інформації. Для передачі даних від регуляторів у ПЛК у структурі передбачений спеціальний погоджувальний елемент, АСМЗ послідовного інтерфейсу стандарту RS485.

На рис.3.15 зображена мнемосхема візуалізації панелі оператора камери сушки.

### **3.4 Висновки за розділом**

Для підвищення достовірності контролю вологості потоку зерна в зерносушарках шахтного типу в результаті досліджень впливів, що обурюють, на вимір вологості потоку зерна в шахтній сушарці ДСП отримані наступні результати:

1. На достовірність вимірювання вологості потоку зерна в сушарці шахтного типу ємнісним методом в високочастотному діапазоні найбільш важливими обурюючими впливами є найменування зернової культури, температура зерна, нерівномірність розподілу вологості потоку зерна в всередині шахти і між шахтами сушарки шахтного типу.

2. Удосконалено залежності, які пов'язують діелектричну проникність з вологістю, температурою зерна пшениці і апроксимується поліномами першого та другого ступеня регресійній моделі, яка адекватна за F - критерієм на рівні значущості 0,05, при цьому забезпечується безперервність значень параметрів вологості і температури, які характеризують процес сушки. Це дозволяє компенсувати вплив температури і підвищити кількість якісно висушеного зерна, ефективність управління шляхом оперативного контролю вологості потоку зерна в сушарці шахтного типу.

## **4 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ СУШІННЯ ЗЕРНА**

Процес впровадження результатів роботи є органічною частиною реалізації сучасних систем технологічної автоматизації зерносушарок і включає в себе кілька стадій. Можна виділити наступні основні стадії: розробка концепції автоматизації шахтної зерносушарки певного типу, розробка проектних рішень по автоматизації окремих функцій відповідно до концепції його автоматизації, підготовка технічної бази для впровадження, включаючи впровадження базових засобів автоматизації, і, власне, впровадження результатів в промисловість. Отримані в роботі науково-технічні результати знаходяться на різних стадіях впровадження і повинні враховувати особливі умови конкретних об'єктів автоматизації, на яких вони впроваджені або тих, де планується впровадження.

Існує безліч визначень систем підтримки прийняття рішень, які характерні для різних дисциплін і наукових напрямів [9]. В одному з визначень, система підтримки прийняття рішень (ППР) визначається як «комп'ютерна інформаційна система [12], яка використовується для підтримки різних видів діяльності при прийнятті рішень в ситуаціях, де неможливо або небажано мати автоматичну систему, яка повністю виконує весь процес вирішення». З визначення можна зробити висновок, що система не замінює людини, автоматизуючи процедуру вирішення, а забезпечує його різного роду допомогою в ході рішення (слабоструктурованої) проблеми. Відповідно до визначення [13], до слабо структурованих відносяться проблеми, які містять як кількісні, так і якісні змінні, причому якісні складові проблеми мають тенденцію домінувати. Неструктуровані проблеми мають лише якісний опис. Компонентами архітектури системи ППР є [22]: 1. База знань (база даних); 2. Модель (аналітичний апарат, який проводить обробку інформації і виконує обчислення, формує поради, їх обґрунтування); 3. Інтерфейс користувача.

### **4.1. Принцип автоматизованої системи підтримки прийняття рішення**

### щодо вибору режиму сушіння зерна

Характерною особливістю зерносушарок на кожному підприємстві є наявність операторського приміщення та лабораторії якості. У приміщенні оператора сходяться всі керовані і контрольовані сигнали штатної системи контролю стану обладнання сушарки. Дискретні сигнали управління (включення / виключення) деякими виконавчими механізмами проходять через відповідні пости керування. В результаті має місце топологічна концентрація контролюючих та керуючих сигналів в приміщенні оператора.

У приміщенні лабораторії якості за допомогою лабораторного обладнання виконується аналіз проб зерна, відібраних з сушарки. Показання заносяться в журнал, повідомляються оператору зерносушарки для прийняття рішення про величину керуючих впливів.

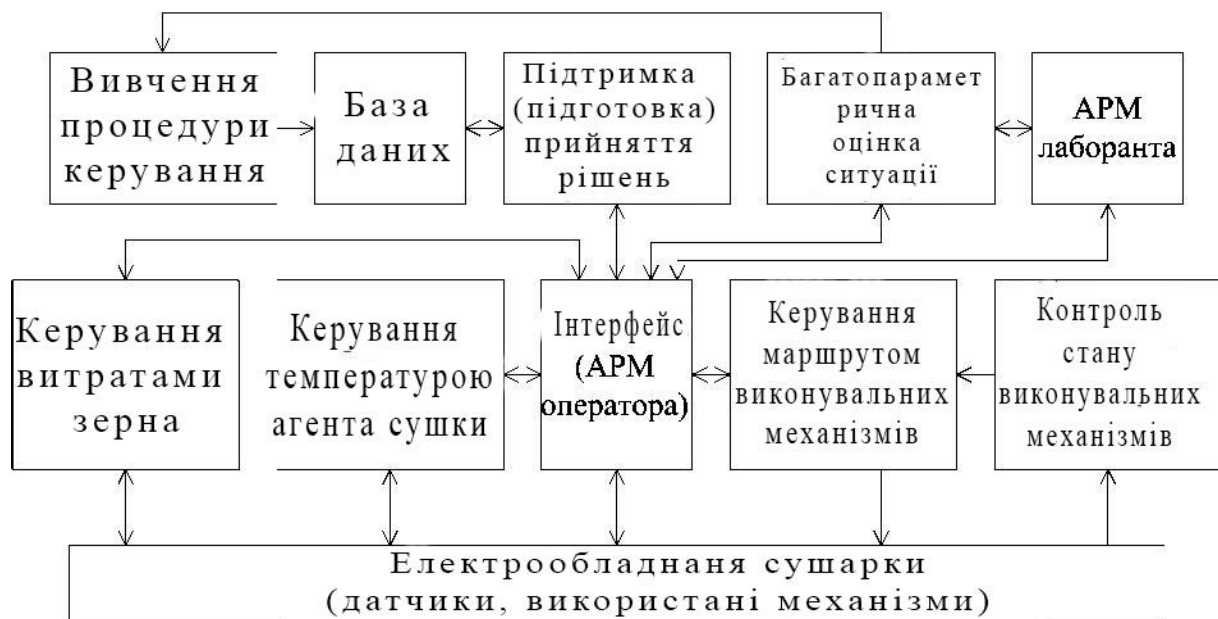


Рисунок 4.1 - Функціональна структура системи підтримки прийняття рішення щодо вибору режиму сушіння зерна.

Дана особливість дозволяє концептуально запропонувати для системи підтримки прийняття рішення два рівня. На верхньому рівні функціональної структури виконується підготовка (підтримка) прийняття рішення, навчання процедуреуправління, вносяться дані лабораторних аналізів, розташовуються

робочі місця інженера по знаннях, робочі місця відповідальних за технологічний процес на підприємстві. На нижньому рівні реалізується централізоване оперативне управління процесом сушіння в режимі реального часу, покладаються функції по інтерактивній(діалоговій) взаємодії з оператором. Функціональна структура системи підтримки прийняття рішення представлена на рис.4.1.

Підтримка прийняття рішень забезпечується за допомогою системи спеціальних динамічних інформаційних моделей [99], які дозволяють оцінювати поточні ситуації з можливістю виконання аналізу методом якнайшвидшого пуску, від загального до конкретного, і отримання в разі необхідності даних первинних документів. У системі реалізований санкціонований доступ до інформації. АРМ мають можливість доступу до будь-якої інформації яка причетна до даного питання (проблеми).

Структура комплексу технічних засобів з автоматизації прийняття рішення представлена на рис. 4.2.

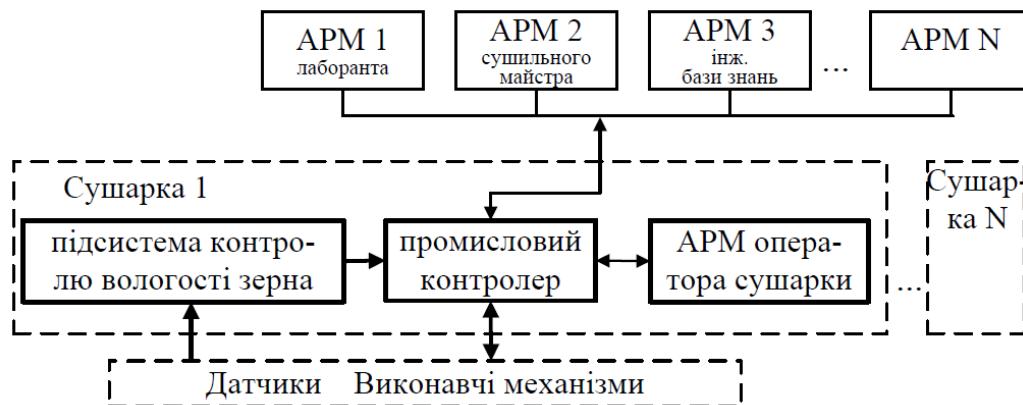


Рисунок 4.2 - Структура комплексу технічних засобів з автоматизації сушіння зерна

Нижній рівень комплексу технічних засобів містить підсистему контролю технологічних параметрів (ПКТП), промисловий контролер, пристрій введення-виведення реалізує автоматизоване робоче місце оператора. ПКТП вимірює технологічні параметри процесу сушіння: вологість потоку зерна, температуру агента сушіння в зоні 1, температуру агента сушіння в зоні 2, температуру нагрівання зерна, температуру зерна після сушіння. Промисловий контролер контролює стан, управляє виконавчими механізмами сушили, виконує команди оператора через пристрій вводу-виводу.

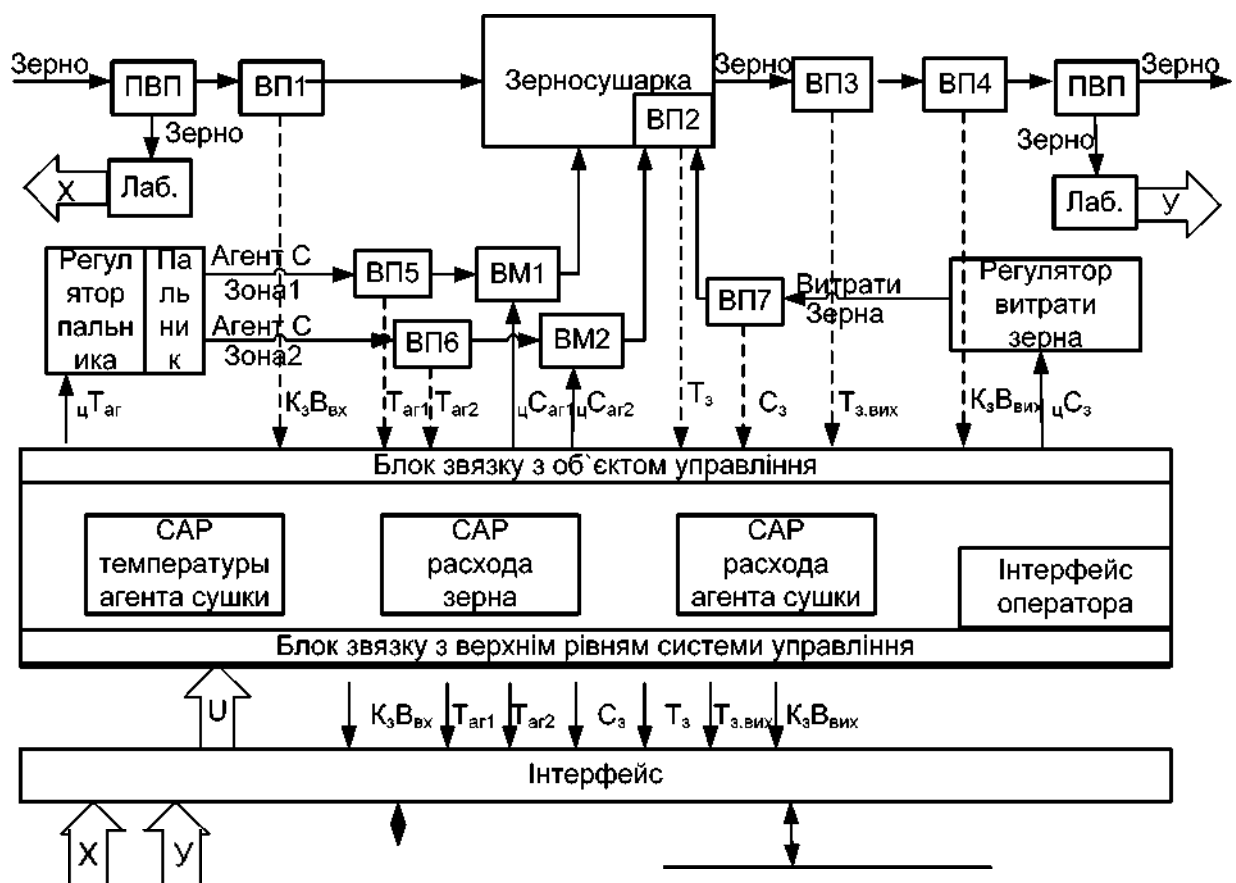


Рисунок 4.3 - Схема автоматизації процесу управління вологістю потоку зерна

де ПВП - прилад відбору проби для лабораторного аналізу, ВП -

вимірювальний пристрій, ВМ - виконавчий механізм, X - множина параметрів якості зерна на вході в сушарку, У - множина параметрів якості зерна після сушіння, і - множина керуючих впливів.

Верхній рівень структури комплексу технічних засобів містить автоматизовані робочі місця відповідальних виконавців за технологічний процес сушіння зерна. Основні функції верхнього рівня навчання і підтримка (підготовка) прийняття рішення по управлінню сушінням зерна. Формалізовані знання оператора зберігаються в базі знань з оцінкою результативності управління. Автоматизоване робоче місце (АРМ) лаборанта призначене для введення показників якості зерна зі входу і виходу сушарки, введення граничних значень параметрів, відображення значень параметрів режиму сушіння. АРМ сушильного майстра (інших відповідальних виконавців на підприємстві) призначене для контролю режиму сушки, обліку параметрів сушіння таких як витрати палива, витрати зерна та ін.

Розроблена схема автоматизації для заготівельного підприємства дозволяє враховувати всі можливі дії, що управляють для алгоритмізації процедури управління сушінням зерна в сушарках шахтного типу [100].

Програмно-технічна реалізація системи ППР сушки зерна є складовою частиною інтегрованої системи управління підприємством. АРМи мають можливість доступу до будь-якої інформації яка причетна до розглядаємого питання (проблеми). Так, наприклад, в разі необхідності можливий оперативний перегляд даних сушки зерна (протоколи сушки зерна і ін. документів за будь-який період часу). Основною перевагою інтегрованої АСУ, в порівнянні з автономними АСУ технологічним процесом і АСУ підприємством, є, що виникає як наслідок інтеграції, можливість використання загальносистемних чинників. Наприклад, визначення поточної рентабельності виробництва за будь-який період часу, що можливо тільки в інтегрованій АСУ при наявності відповідної інформації від всіх ланок АСУ технологічним процесом і АСУ підприємством

## 4.2. Принцип підсистеми контролю вологості потоку зерна

Метою створення підсистеми є підвищення оперативності контролю вологості потоку зерна, температури зерна, агента сушіння в зерносушарках шахтного типу. Призначенням системи є обчислення вологості потоку зерна на підставі діелектричної проникності і температури потоку зерна, вимір температури.

До загальносистемних вимог відноситься вимога по розробці підсистеми для застосування в зерносушарках шахтного типу, які отримали найбільше поширення на території України; вимога забезпечення довготривалої стабільності і змрюемого параметра; забезпечення інтерфейсу з оператором зерносушарки, що здійснює управління технологічним процесом сушіння зерна, а також з верхнім рівнем автоматизованої системи підтримки прийняття рішення сушки зерна для збереження параметрів технологічного процесу сушіння в базі даних.

### 4.2.1. Розробка підсистеми контролю вологості потоку зерна

Нижче представлена розроблена функціональна схема підсистеми контролю технологічних параметрів (в тому числі вологості) для зерносушарок.

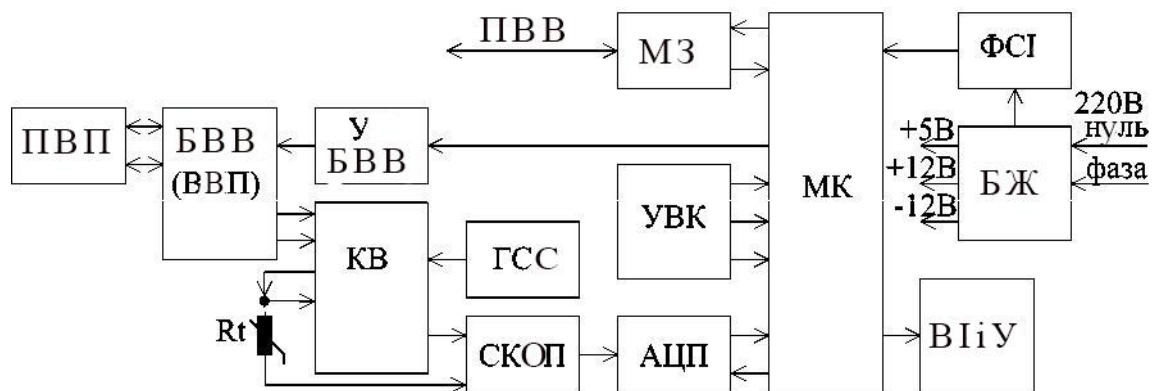


Рисунок 4.5 - Функціональна схема підсистеми контролю технологічних параметрів:

МК-мікроконтролер; БП-блок живлення; ФСІ-формувавч синхронізуючих імпульсів; УІУ-вузол індикації і управління; МС-модуль зв'язку з ПЕОМ; КВ комутатор входів; ГСТ-генератор стабільного струму; СКСП-схема компенсації опору проводів; АЦП-аналого-цифровий перетворювач; УУ БІВП - вузол управління блоком вимірювання вологості; БІВП (ВІП) –блок ізмерення вологості (вторинний перетворювач); ПІП-первинний вимірювальний перетворювач (вологості і температури).

Мікроконтролер (МК) управляє роботою підсистеми контролю вологості, відповідно до прикладним програмним забезпеченням, записаним в постійному пристрої, що запам'ятовує. В електронному перепрограмованому постійному пристрої, що запам'ятовує МК зберігаються параметри настройки, які можуть бути змінені в процесі експлуатації приладу. Прикладне програмне забезпечення реалізовано з використанням системи переривань. Блок живлення забезпечує живлення схеми стабілізованими напруженнями +5, +12 В, -12В, а також живлення блоку вимірювання вологості нестабілізованою напругою 18В. Пристрій для формування синхронізуючих імпульсів формує короткі імпульси позитивної полярності, прив'язані до початку кожного півперіоду напруги. Комутатор (КВ), керований МК по черзі підключає канал вимірювання ємності, канал вимірювання температури зерна до вимірювальної схемою. Генератор стабільного струму живить ланцюг вимірювання температури стабільним струмом, не залежних від її опору. Аналого-цифровий перетворювач виконаний за схемою подвійного інтегрування з автоматичною корекцією нуля і працює під управлінням МК. Для підвищення завадостійкості і стабільності результатів вимірювання запуск АЦП синхронізується з фазою напруги. Вузол вводу команд здійснює введення команд оператором. Вузол індикації і управління виконує виведення інформації на світлодіодні індикатори інтерфейсу оператора. Модуль зв'язку забезпечує передачу інформації в послідовному коді через гальванічну розв'язку з лінії зв'язку до МК і назад. Аналого-цифровий перетворювач виконаний за схемою подвійного інтегрування з автоматичною корекцією нуля і працює під управлінням МК. Для підвищення завадостійкості і стабільності результатів вимірювання запуск АЦП синхронізується з фазою напруги. Вузол

вводу команд здійснює введення команд оператором. Вузол індикації і управління виконує висновок інформації на світлодіодні індикатори інтерфейсу оператора. Модуль зв'язку забезпечує передачу інформації в послідовному коді через гальванічну розв'язку з лінії зв'язку до МК і назад. Аналого-цифровий перетворювач виконаний за схемою подвійного інтегрування з автоматичною корекцією нуля і працює під управлінням МК. Для підвищення завадостійкості і стабільності результатів вимірювання запуск АЦП синхронізується з фазою напруги. Вузол вводу команд здійснює введення команд оператором. Вузол індикації і управління виконує виведення інформації на світлодіодні індикатори інтерфейсу оператора. Модуль зв'язку забезпечує передачу інформації в послідовному коді через гальванічну розв'язку з лінії зв'язку до МК і назад. Вузол вводу команд здійснює введення команд оператором. Вузол індикації і управління виконує висновок інформації на світлодіодні індикатори інтерфейсу оператора. Модуль зв'язку забезпечує передачу інформації в послідовному коді через гальванічну розв'язку з лінії зв'язку до МК і назад. Вузол вводу команд здійснює введення команд оператором. Вузол індикації і управління виконує висновок інформації на світлодіодні індикатори інтерфейсу оператора. Модуль зв'язку забезпечує передачу інформації в послідовному коді через гальванічну розв'язку з лінії зв'язку до МК і назад.

Пристрій управління блоком вимірювання вологості управляє роботою блоку вимірювання вологості (включення режимів вимірювання та калібрування). Блок вимірювання вологості потоку зерна являє собою перетворювач ємність-напруга, який реалізує діелектричний метод вимірювання вологості.

Підсистема контролю вологості потоку зерна (вторинний вимірювальний перетворювач) має наступні функціональні можливості:

- 1) підключення двох вимірювальних електродів датчика вологості, що дозволяє виміряти середнє значення вологості.
- 2) видалення обчислювального блоку від вимірювального електрода на 1,5 - 2 метра, що знижує можливість виходу з ладу через перегрів при загорянні

- сушарки;
- 3) компенсація паразитних ємностей сполучних кабелів і вимірювальних електродів;
  - 4) періодична калібрування «нуля» і коефіцієнта передачі вимірювального каналу виконується автоматично, що виключає їх вплив на достовірність вимірювання вологості потоку зерна;
  - 5) Вимірювання температури зерна безпосередньо в зоні вимірювання вологості, що забезпечує корекцію результатів вимірювання вологості в широкому температурному діапазоні.

Конструктивно розроблювана підсистема контролю вологості потоку зерна містить вимірювальний перетворювач (електрод), що встановлюється в корпусі зерносушарки і обчислювальний блок, який встановлюється на загальному пульті управління процесом сушіння. Відстань між вимірювальним перетворювачем і обчислювальним блоком може становити до декількох десятків метрів. Структурна схема передбачає, щоб одна частина підсистеми (датчики з вимірювальним перетворювачем) розташовувалася в корпусі зерносушарки і забезпечувала перетворення вимірюваних величин - вологості і температури зерна - в електричні сигнали, що передаються для обчислення параметрів, в іншу частину системи - обчислювальний блок по дротах.

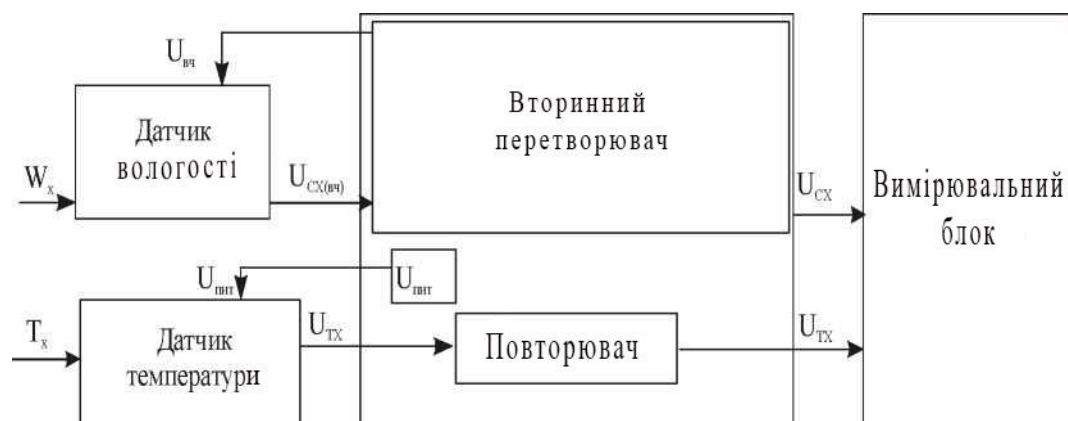


Рисунок. 4.6 - Схема структури автоматизованої підсистеми контролю вологості потоку зерна

Вторинний вимірювальний перетворювач забезпечує живлення датчиків ємності і температури, виділення інформаційного сигналу, передачу інформаційних сигналів на обчислювальний блок.

Обчислювальний блок повинен здійснювати аналогово-цифрове перетворення, математичну обробку що надходять електричних сигналів з метою обчислення параметрів вологості і температури зерна, інтерфейс з оператором зерносушарки і верхнім рівнем системи підтримки прийняття рішення.

Сигнали з вимірювального перетворювача надходять на канали комутатора, який по команді мікроконтролера підключає відповідний канал комутатора (інформаційний сигнал з датчика) до входу аналого-цифрового перетворювача. Дискретний сигнал (двійковий код) з аналого-цифрового перетворювача по шині даних надходить в мікроконтролер, що обчислює параметри температури і вологості зерна. Вологість зерна обчислюється згідно залежностям на дану зернову культуру (наведені в розділі 3). Отримані параметри зберігаються в пам'яті звідки вони передаються на індикатор і схему перетворення інтерфейсів для передачі даних в автоматизовану систему підтримки прийняття рішення.

Розміщення високочастотної частини електричної схеми (вторинний вимірювальний перетворювач) в безпосередній близькості від датчика і її характеристики дозволяють забезпечити практично необмежену видалення вимірювального перетворювача від місця установки первинного перетворювача та відсутність необхідності підгонки під довжину кабелю після монтажу обладнання.

В основу розробки перетворювача поставлена задача підвищення достовірності параметра вологості сипучих матеріалів в потоці зменшення впливу ємності проводів, які підводять до перетворювача і активної складової опору сипучого матеріалу в потоці, і за рахунок цього підвищення ступеня достовірності вимірювання.

Завдання виконується в такий спосіб. Датчик вологості сипучих матеріалів

в потоці складається з вимірювального електрода, що проводить струм, тримача і ізолюючої пластини з охоронними електродами. Між вимірювальним електродом і тримачом є вторинний перетворювач (див. рис. 4.7), який містить генератор синусоїдального сигналу, пов'язаний з керованим фазообертачем і трансформатором, який, в свою чергу, з'єднаний з двома ідентичними каналами, кожен з яких включає послідовно з'єднані підсилювач заряду, фазочутливий випрямляч (ФВ), фільтр низьких частот (ФНЧ). Вихід першого каналу з'єднаний з керованим фазообертачем, вихід якого з'єднаний з фазочутливим випрямлячем обох каналів, а трансформатор послідовно з'єднаний з вимірювальним і охоронними електродами екранованим проводом [104, 105].

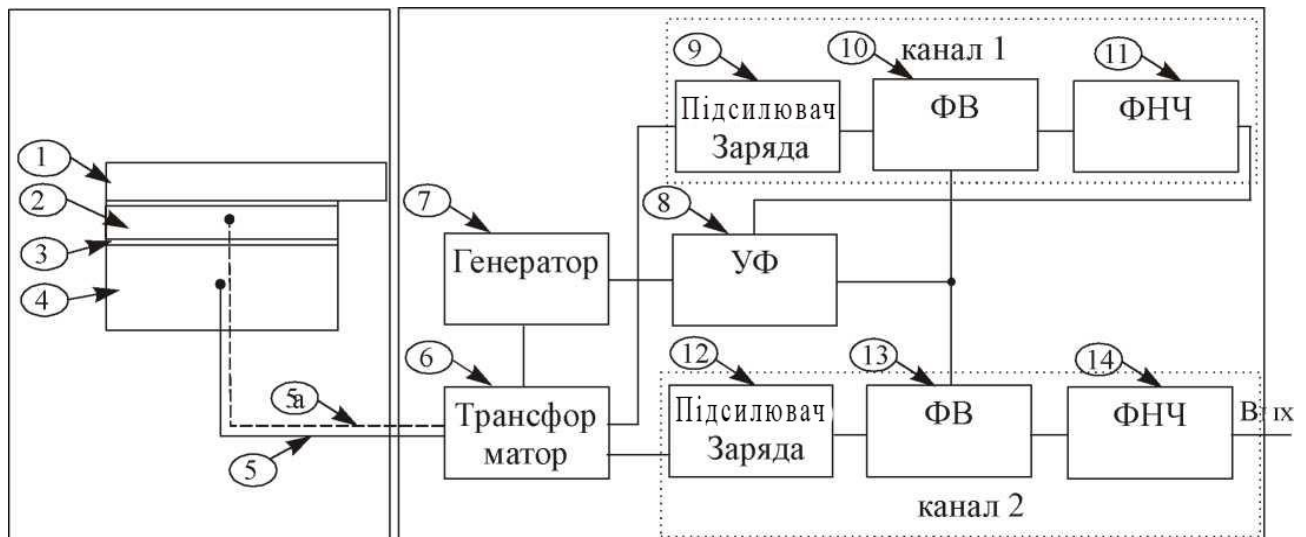


Рисунок 4.7 - Схема функціональна перетворювача вологості сипучих матеріалів в потоці, де УФ - керований фазообертач; ФВ - фазочутливий випрямляч; ФНЧ - фільтр низьких частот

Датчик вологості сипучих матеріалів в потоці складається з первинного перетворювача, який містить вимірювальний електрод (4) з матеріалу, який проводить струм, власника (1), і ізолюючої пластини (3) з охоронними електродами (2) між вимірювальним електродом (4) і утримувачем (1). Вторинний перетворювач містить генератор синусоїдального сигналу (7), пов'язаний з керованим фазовращателем (8) і трансформатором (6), який, в

свою чергу, з'єднаний з двома ідентичними каналами. Будь-який з них включає послідовно з'єднані підсилювач заряду (9, 12), фазочувствительного випрямителя (10, 13), фільтр низьких частот (11,14). При цьому вихід першого каналу з'єднаний з керованим фазовращателем (8), вихід якого з'єднаний з фазочувствительним випрямлячем (10, 13) обох каналів, а трансформатор (6) з'єднаний з вимірювальним (4) і охоронними (2) електродами екранованим проводом (5, 5 а).

Перетворювач працює наступним чином: генератор (7) через трансформатор (6) створює змінну напругу на вимірювальному (4) і охоронних (2) електродах. Ємнісний струм вимірювального електрода (4), пропорційний виміряній ємності перетвориться підсилювачем заряду (12) в змінну напругу, яка випрямляється ФВ (13), згладжується ФНЧ (14) і служить вихідним сигналом датчика.

Наявність рівного за величиною напруги на екрані (5а) (охоронному електроді (2)) і екранованому дроті (5) (вимірювальний електрод (4)) зводить до мінімуму вплив паразитних ємностей проводів, які підводять, і вплив власника (1) на результат вимірювання вологості потоку матеріалу. ФВ (10) пригнічує активну складову вхідного сигналу, обумовлену наявністю активного опору сипучого матеріалу. Канал 1 і керуючий фазообертач (8) утворюють негативний зворотний зв'язок по фазі, яка забезпечує стабілізацію фазового зсуву на керуючому вході ФВ (13) каналу 2.

На прикладі зерносушарок шахтного типу існує проблема складності сполучення датчика вологості в потоці з конструкцією сушильної камери. Відомі датчики розміщують поза сушильної камери зерносушарки, що знижує вірогідність вимірювання параметра вологості потоку сипучого матеріалу.

### 4.3 Висновки за розділом

1. Розроблення системи інтелектуальної ППР сушки зерна спрощує прийняття рішення оператору в умовах невизначеності, підвищує ефективність,

кількість якісно просушеного зерна за рахунок формалізованого досвіду управління сушінням, збереженого в базі знань, і оперативного контролю вологості потоку зерна. Система інтелектуальної ППР сушки зерна адаптується (навчається), в тому числі, відповідно до сезонних особливостями якості зерна, конструктивними особливостями сушарки.

2. Удосконалено датчик вологості сипучих матеріалів в потоці, який включає вимірювальний електрод з матеріалу, який проводить електричний струм, який відрізняється тим, що містить тримач і ізолюючу пластину з охоронними електродами, яка закріплена між вимірювальним електродом і власником.

3. Удосконалено датчик вологості сипучих матеріалів в потоці, який містить первинний перетворювач включає вимірювальний електрод з матеріалу, який проводить електричний струм, власника і ізолюючої пластини з охоронними електродами, яка закріплена між вимірювальним електродом і власником, який відрізняється тим, що в нього додатково включено вторинний перетворювач. Вторинний перетворювач містить генератор синусоїдального сигналу, з'єднаний з керованим фазовращателем та трансформатором, який з'єднаний з двома ідентичними каналами, кожен з яких містить послідовно з'єднані підсилювач заряду, фазочувствительного випрямляч і фільтр низьких частот. При цьому вихід першого каналу з'єднаний з керованим фазовращателем, вихід якого з'єднаний з фазочувствительного випрямлячами обох каналів.

4. Розроблено систему інтелектуальної підтримки прийняття рішень при сушінні зерна, яка адаптується відповідно до сезонних особливостями, якості зерна та конструктивними особливостями сушарки на основі недетермінованої моделі нечітких множин.

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі проведено дослідження процесу управління сушінням зерна в шахтних зерносушарках, виявлено, що ефективність процесу значною мірою залежить від кваліфікації оператора та рівня автоматизації. Аналіз існуючих детермінованих та імовірнісних моделей показав їхню обмежену придатність для управління через складність математичного опису, велику кількість параметрів та специфічність до конкретного обладнання.

Запропоновано недетерміновану багатопараметричну модель на основі нечітких множин, яка дозволяє формалізувати знання операторів та враховувати як вимірювані, так і суб'єктивно оцінювані параметри: вологість, температуру, колір, запах і якість оболонки зерна. Розроблена система інтелектуальної підтримки прийняття рішень адаптується до сезонних особливостей зерна та конструктивних характеристик сушарки, забезпечує оперативний контроль вологості потоку зерна та підвищує ефективність процесу.

У роботі удосконалено методи контролю вологості та датчики сипучих матеріалів у потоці, що дозволяє зменшити вплив обурюючих факторів, підвищити точність вимірювань і кількість якісно висушеного зерна. Практична реалізація розроблених рішень забезпечує підвищення продуктивності, економії енергоресурсів і якісних показників зерна, що має значення для підприємств зернопереробної галузі України.

Таким чином, запропонований підхід інтегрує досвід операторів, сучасні методи контролю та інтелектуальне управління, що дозволяє підвищити надійність, оперативність і ефективність процесу сушіння зерна.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) Бондаренко О.І. Теорія і практика сушіння зерна: навчальний посібник. Київ: Урожай, 2019. – 256 с.
- 2) Гнатюк В.П., Ковальчук С.М. Автоматизація зерносушарок: принципи та методи. Львів: ЛНУ, 2018. – 312 с.
- 3) Дорошенко П.О. Системи управління сільськогосподарськими технологічними процесами. Харків: ХНАУ, 2020. – 224 с.
- 4) Єфремов М.В. Сушіння сипучих матеріалів: методи і моделі. Київ: Наукова думка, 2017. – 288 с.
- 5) Жуков В.П. Інтелектуальні системи керування технологічними процесами. Одеса: ОНУ, 2021. – 304 с.
- 6) Климчук С.В. Моделі та методи оптимізації процесів сушіння. Чернівці: ЧНУ, 2019. – 192 с.
- 7) Левченко В.Д. Технології післязбиральної обробки зерна. Київ: Урожай, 2018. – 336 с.
- 8) Павленко А.А., Романенко В.С. Нечіткі множини та системи підтримки прийняття рішень. Харків: ХПІ, 2020. – 248 с.
- 9) Сидоренко О.М. Енергозбереження в зерносушарках. Київ: Наукова думка, 2021. – 216 с.
- 10) Шевченко І.І. Теорія автоматичного управління: навчальний посібник. Київ: Ліра-К, 2017. – 320 с.
- 11) Кузьменко В.О. Прилади та системи контролю в сільському господарстві. Харків: ХНАУ, 2020. – 200 с.
- 12) Тарасов С.В., Литвиненко М.П. Моделювання технологічних процесів: навчальний посібник. Київ: Вища школа, 2018. – 288 с.
- 13) Дубровський А.А. Системи автоматичного керування на основі нечітких множин. Одеса: ОНУ, 2019. – 256 с.
- 14) Степаненко П.П. Електроприводи та автоматизація зерносушарок. Харків: ХПІ, 2021. – 304 с.

- 15) Коваль С.І. Технологія обробки зерна та контроль якості. Київ: Урожай, 2017. – 280 с.
- 16) ДСТУ 4305:2004. Зерно. Методи визначення вологості, чистоти та інших показників. Київ: Мінстандарт, 2004. – 48 с.
- 17) ДСТУ ISO 9001:2015. Системи менеджменту якості. Вимоги. Київ: Мінекономіки, 2015. – 56 с.
- 18) Bala, B. K. *Drying and Storage of Cereal Grains*. 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2016. – 432 p.
- 19) Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W., Hall, C. W. *Drying and Storage of Grains and Oilseeds*. New York: Springer-Verlag, 1992. – 450 p.
- 20) Jian, F., Jayas, D. S. *Grains: Engineering Fundamentals of Drying and Storage*. Boca Raton: CRC Press, 2022. – 398 p.
- 21) Mujumdar, A. S. *Handbook of Industrial Drying*. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2014. – 1200 p.
- 22) Ratti, C. *Advances in Food Dehydration*. London: Academic Press, 2001. – 312 p.
- 23) Fellows, P. *Food Processing Technology: Principles and Practice*. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. – 704 p.
- 24) Sablani, S. S., Rahman, M. S. *Drying of Foods: Principles and Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2009. – 350 p.
- 25) Datta, A. K., Raghavan, G. S. V. *Food Process Engineering and Technology*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2019. – 528 p.
- 26) Singh, R. P., Heldman, D. R. *Introduction to Food Engineering*. 5th ed. Boston: Academic Press, 2014. – 704 p.
- 27) Barbosa-Cánovas, G. V.,
- 28) Fellows, P. *Food Processing Technology: Principles and Practice*. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. – 704 p.
- 29) Sablani, S. S., Rahman, M. S. *Drying of Foods: Principles and Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2009. – 350 p.

# ДОДАТКИ

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій

**Інтелектуальна система прийняття рішення в процесі  
керування сушінням зерна**

Кваліфікаційна робота магістра



**Виконав:**

**Курилко Я. С.**

**Керівник:**  
к.т.н., доц.

**Галай В. М.**

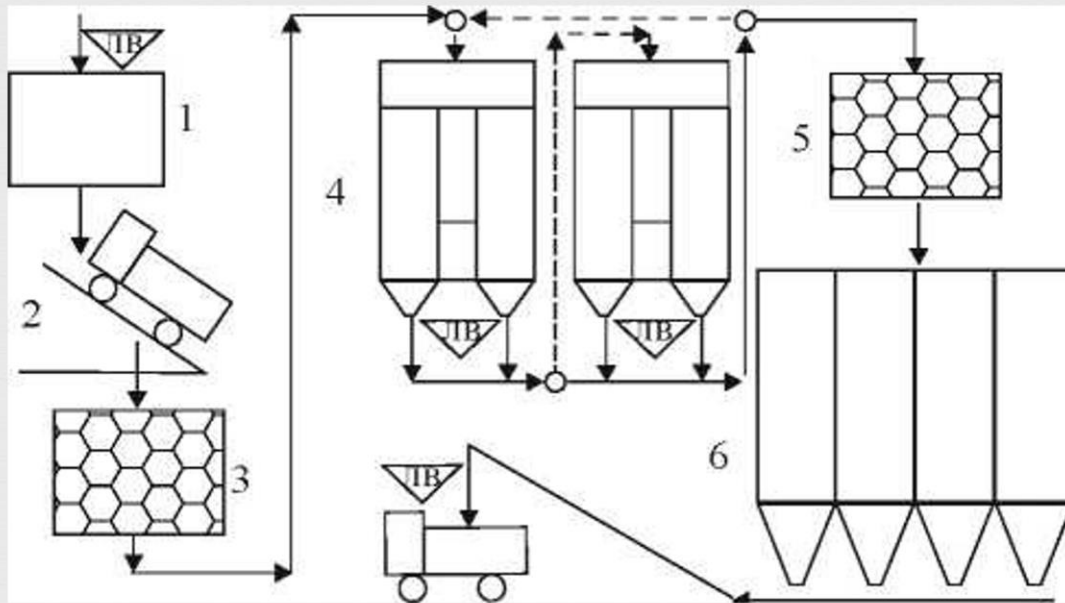
Полтава 2025

**Метою магістерської роботи** є підвищення ефективності сушіння зерна шляхом удосконалення методів і моделей автоматизованого управління на підставі застосування нечітких множин та регресії в складі системи інтелектуальної підтримки прийняття рішень (ППР) сушінням зерна в сушарках.

**Об'єкт дослідження** – процес управління сушінням зерна в сушарках шахтного типу.

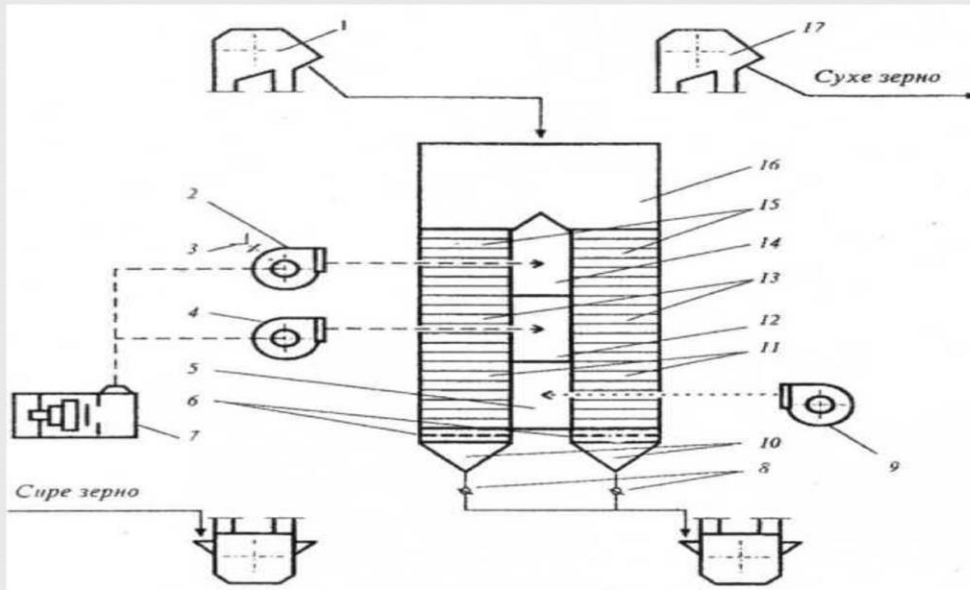
**Предметом дослідження** є – методи і моделі управління сушінням зерна в сушарках шахтного типу. х кварцитів, її структура, алгоритми функціонування та характеристики.

Схема післязбиральної обробки зерна на заготівельному підприємстві:



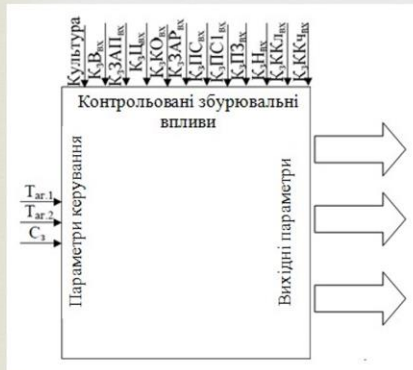
1 - автомобільні ваги; 2 – автомобілерозвантажувач; 3 - зерноочисна машина (для попереднього очищення); 4 – зерносушарки прямоточні ДСП; 5 - зерноочисна машина (для вторинного очищення); 6 - елеватор

Схема прямої шахтної зерносушарки типу ДСП



1 - норія сирого зерна; 2, 4 - вентилятори сушильних зон; 3 - патрубок з дросельною заслінкою; 5 - повітророзподільна камера охолоджувальної зони; 6 - випускні механізми; 7 - топка; 8 - заслінки; 9 - вентилятор охолоджувальної зони; 10 - підсушуючи бункера; 11 - охолоджувальна зона; 12 - газорозподільна камера другої зони; 13 - друга сушильна зона; 14 - газорозподільна камера першої зони; 15 - перша сушильна зона; 16 - надсушительний бункер; 17 - норія сухого зерна

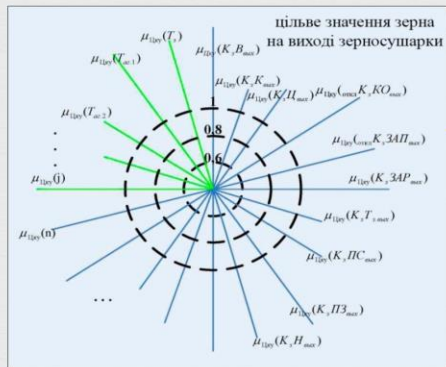
## Характеристики вимірювальної інформації



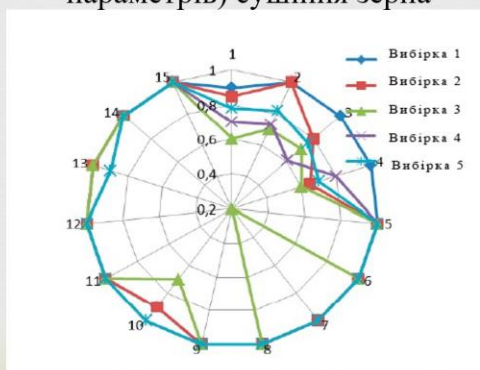
Структура об'єкта керування

№ п / п	Найменування контрольованих параметрів	Період циклу контролю		Час дії оператора, с	критерій цінності інформації	ранги цінності параметрів
		Контрольні значення Тц.о., хв	Розрахункові значення Тц.р., хв			
1	Вологість зерна, що надходить	120	80,1	300	0,025	7
2	Вологість зерна після сушіння	60	17,713,3i)	300	0,122	1
3	Температура теплоносія в сушарці	26	8,5	126	0,047	5
4	Температура зерна в сушарці	26	14,8	126	0,034	6
5	Відносна вологість зовнішнього повітря		34,6	140	0,087	2
6	Рівень зерна в надсушильному бункері	24,8	24,8	125	0,051	4
7	Наявність факела в топці сушарки	29,7	29,7	125	0,021	8
8	Стан електродвигунів приводу	480	480	940	0,072	3

### Графічне представлення приналежності ситуації до цільового значення

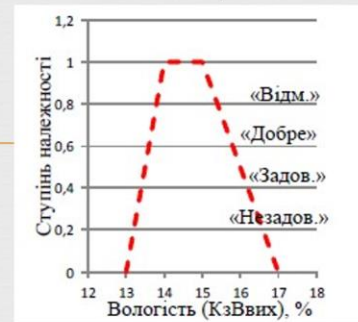


### Графічне представлення вибірок (15 параметрів) сушіння зерна

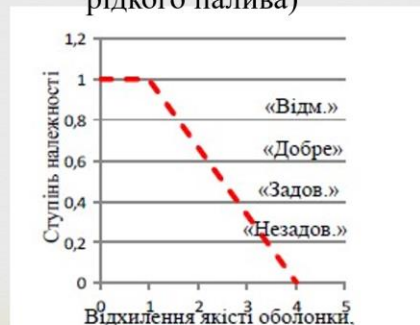


### Функція приналежності параметра «Вологість. Після сушіння»

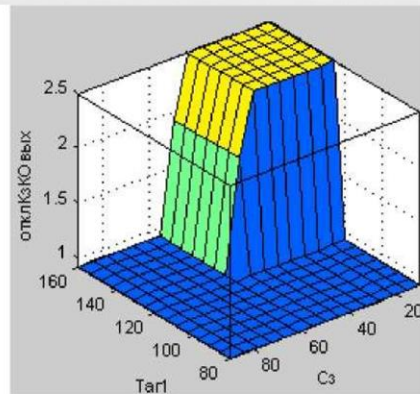
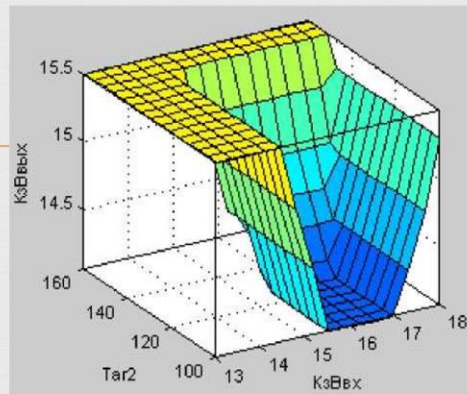
6



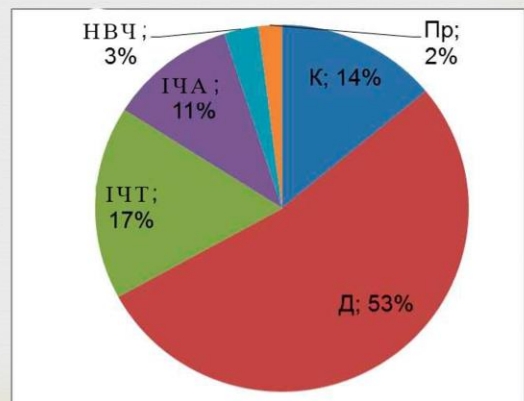
### Функція приналежності параметра откл $K_3 ЗАП_{\text{вих}}$ : «Запах зерна» (наявність запаху диму або сірчистого газу або рідкого палива)



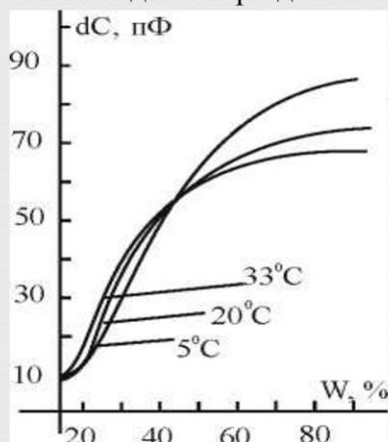
Аксонометричне тривимірне представлення результатів моделювання сушіння зерна



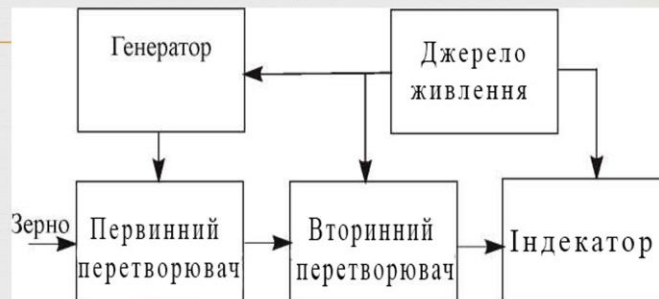
Діаграма розподілу вологомірів по використаних методах, де К - кондуктометричні; Д - діелькометричні, високочастотні; ІКС - інфрачервоні термогравіметричні; ІКА - інфрачервоні аналізатори; СВЧ - надвисокочастотні; Пр-інші вологоміри



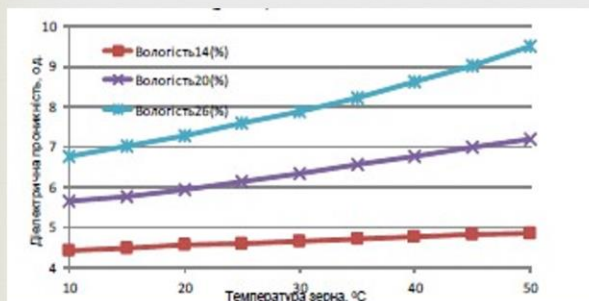
Вплив вологості і температури контрольованого продукту на ємність конденсатора-датчика



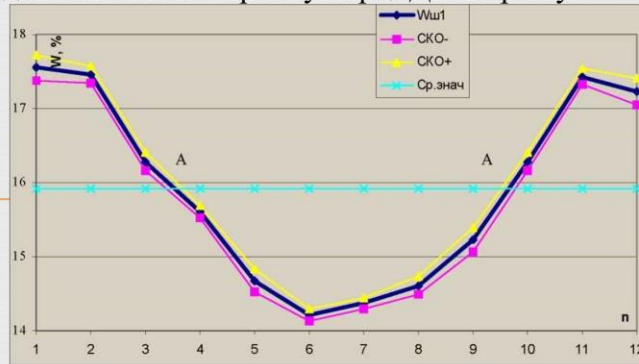
Функціональна структура вимірювача діелектричної проникності



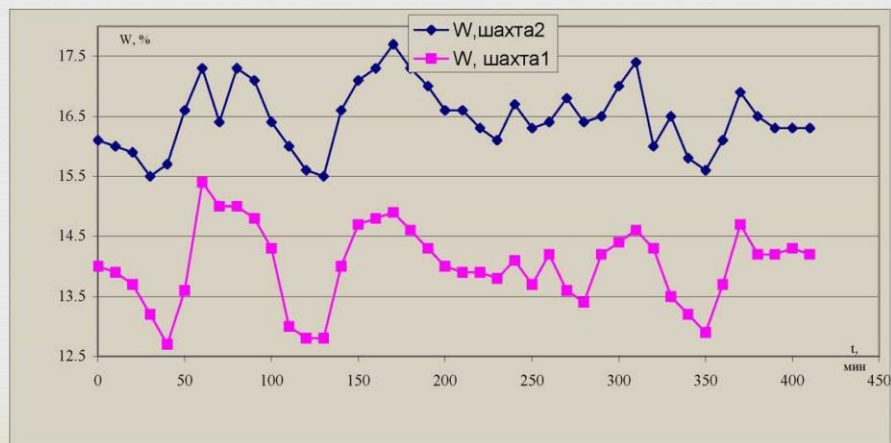
Залежність діелектричної проникності від температури при різній вологості для зерна пшениці



## Розподіл вологості в зерносушарці ДСП при сушінні пшениці

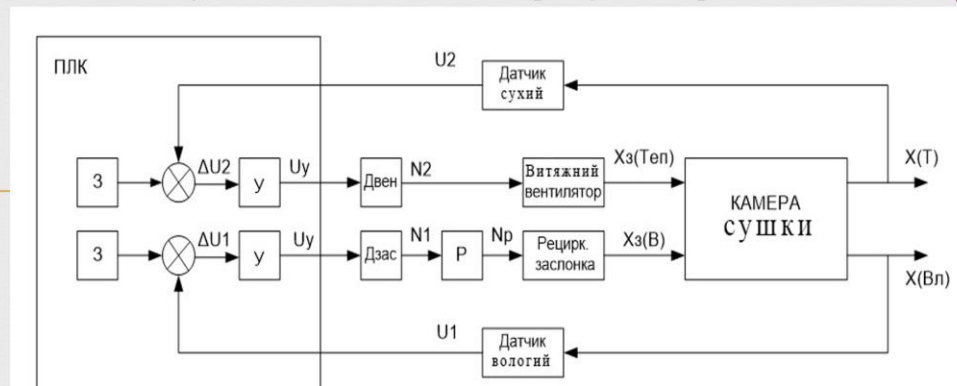


## Розподіл вологості між шахтами ДСП-2 при сушінні пшениці

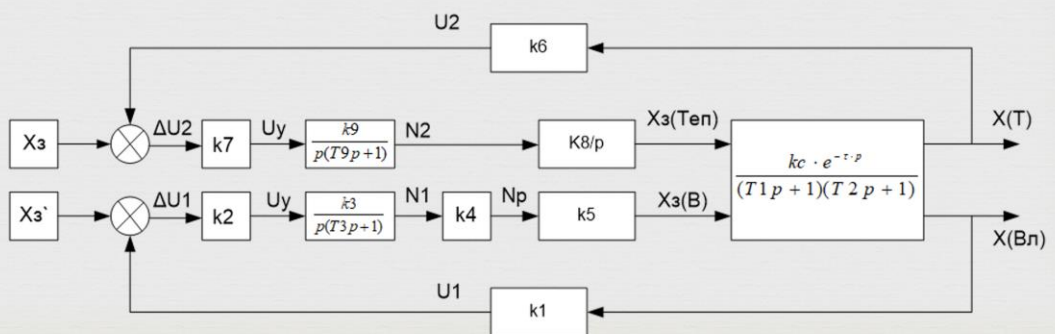


## Функціональна схема камери сушки зерна

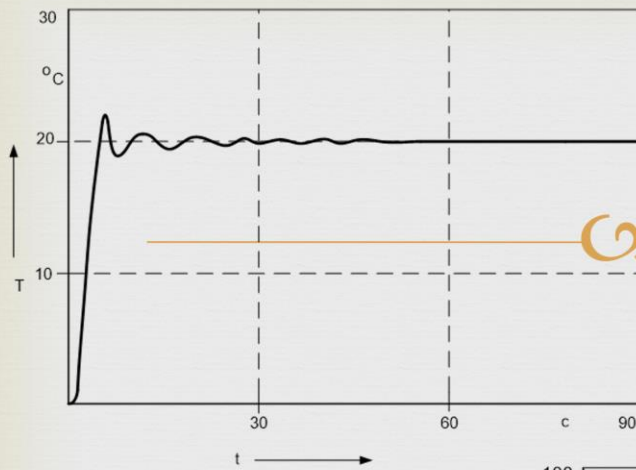
10



## Структурна схема камери сушки

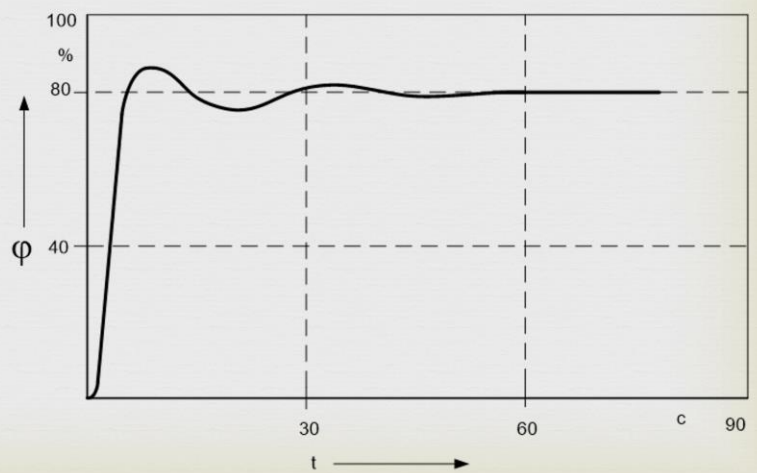


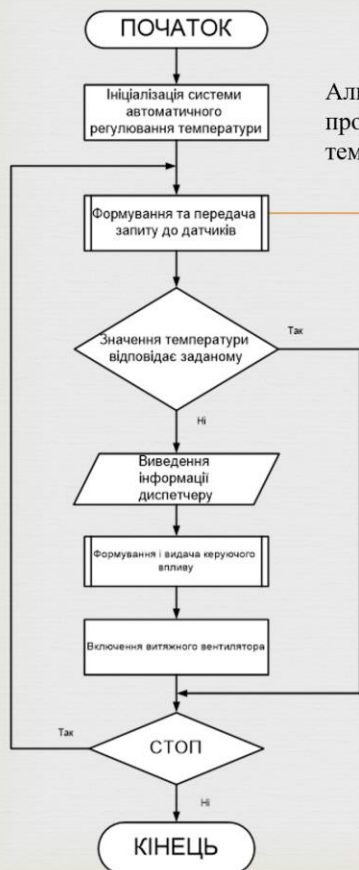
11



Графік перехідного процесу контуру регулювання температури при подачі східчастого керуючого впливу

Графік перехідного процесу в контурі регулювання вологості при подачі ступінчатого керуючого впливу

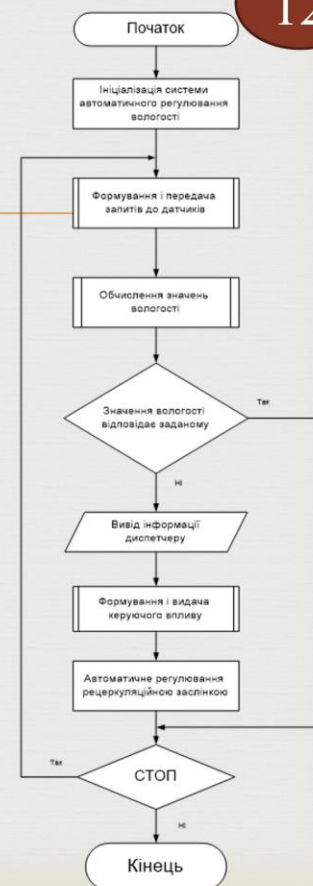




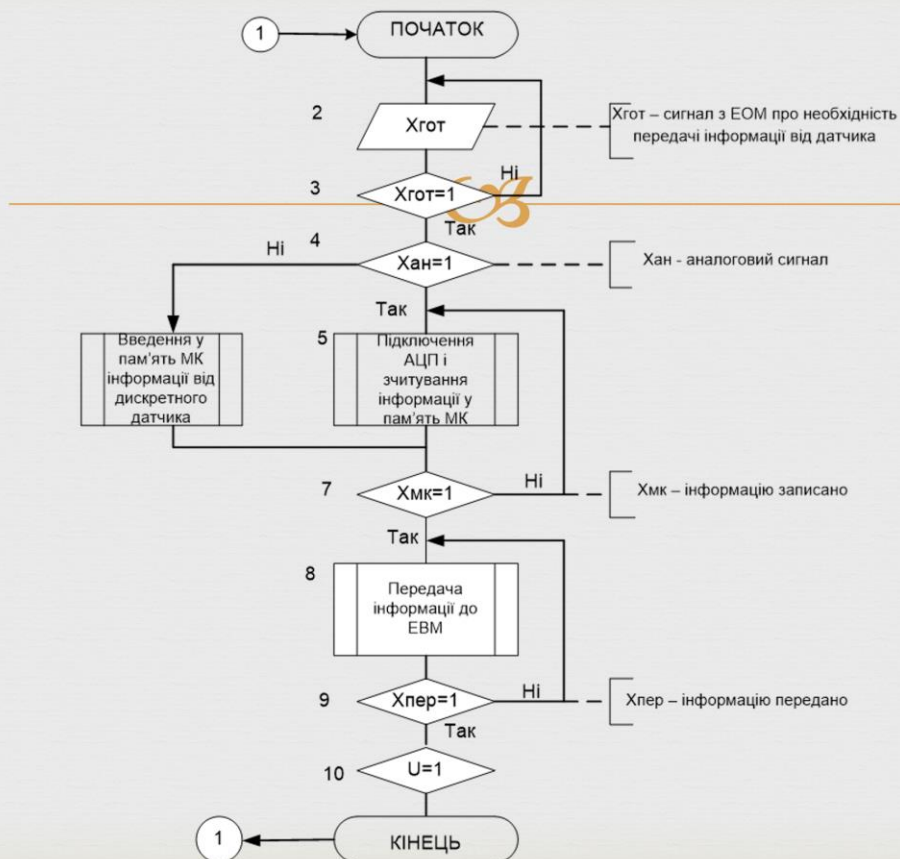
Алгоритм управління процесом регулювання температури



Алгоритм управління процесом регулювання вологості

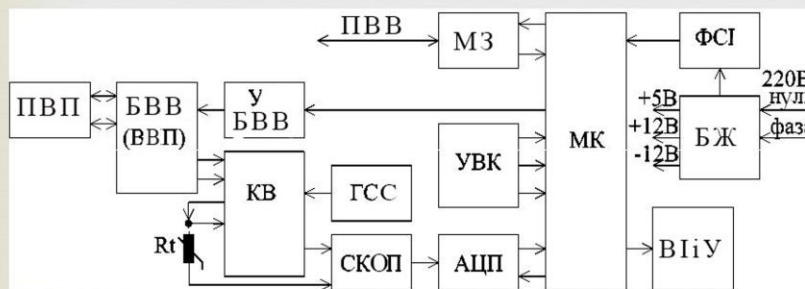


## Блок-схема алгоритму передачі інформації



## Функціональна схема підсистеми контролю технологічних параметрів

14

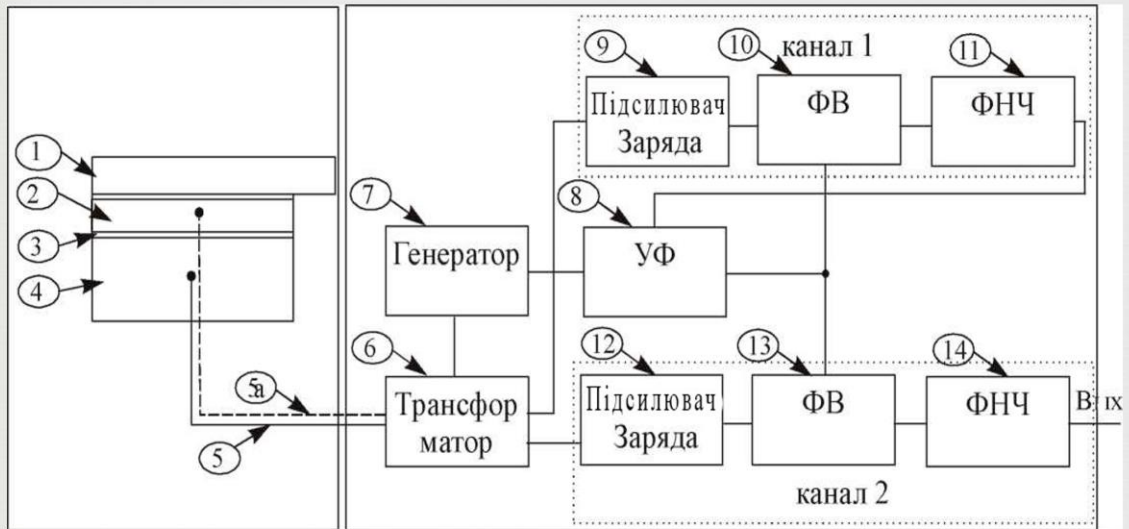


МК-мікроконтролер; ФСІ-формувавч синхронізуєчх імпульсів; МС-модуль зв'язку з ПЕОМ; КВ комутатор входів; ГСТ-генератор стабільного струму; СКСП-схема компенсації опору проводів; АЦП-аналого-цифровий перетворювач; УУ БВВП - вузол управління блоком вимірювання вологості; БВВП (ВВП) - блок вимірювання вологості; ППП-первинний вимірювальний перетворювач (вологості і температури)

Схема структури автоматизованої підсистеми контролю вологості потоку зерна



Схема функціональна перетворювача вологості сипучих матеріалів в потоці



УФ - фазообертач; ФВ - фазочутливий випрямляч;  
ФНЧ - фільтр низьких частот

## Висновки

16

У магістерській роботі *проведено* дослідження процесу управління сушінням зерна в шахтних зерносушарках, виявлено, що ефективність процесу значною мірою залежить від кваліфікації оператора та рівня автоматизації. Аналіз існуючих детермінованих та імовірнісних моделей показав їхню обмежену придатність для управління через складність математичного опису, велику кількість параметрів та специфічність до конкретного обладнання.

*Запропоновано* недетерміновану багатопараметричну модель на основі нечітких множин, яка дозволяє формалізувати знання операторів та враховувати як вимірювані, так і суб'єктивно оцінювані параметри: вологість, температуру, колір, запах і якість оболонки зерна. Розроблена система інтелектуальної підтримки прийняття рішень адаптується до сезонних особливостей зерна та конструктивних характеристик сушарки, забезпечує оперативний контроль вологості потоку зерна та підвищує ефективність процесу.

У роботі *удосконалено* методи контролю вологості та датчики сипучих матеріалів у потоці, що дозволяє зменшити вплив збурюючих факторів, підвищити точність вимірювань і кількість якісно висушеного зерна. Практична реалізація розроблених рішень забезпечує підвищення продуктивності, економії енергоресурсів і якісних показників зерна, що має значення для підприємств зернопереробної галузі України.

*Таким чином*, запропонований підхід інтегрує досвід операторів, сучасні методи контролю та інтелектуальне управління, що дозволяє підвищити надійність, оперативність і ефективність процесу сушіння зерна.