

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**
ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ПОГОДЖЕНО

Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження
(назва ННІ)

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

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

проф., д.т.н. _____ **В.В. Каплун**
(підпис) (ПІБ)

доц., к.т.н. _____ **О.О. Опришко**
(підпис) (ПІБ)

«___» _____ 2026 р.

«___» _____ 2026 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: **«ДОСЛІДЖЕННЯ І РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ
СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ В ЗЕРНОСУШАРЦІ З
ВИКОРИСТАННЯМ КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ
ARDUINO»**

Спеціальність:

174 – «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»
(шифр і назва)

Освітня програма:

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(назва)

Орієнтація освітньої програми: освітньо-наукова
(назва)

Гарант освітньої програми

_____ **д.т.н., професор**
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Івашук В.В.
(П.І.Б)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

_____ **к.т.н., доцент**
(науковий ступінь та вчене звання)

_____ (підпис)

Лендєл Т.І.
(П.І.Б)

Виконав

_____ (підпис)

Гаєв Д.С.
(П.І.Б студента)

КИЇВ-2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

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

К.Т.Н., доц. _____ **О.О. Опришко**
« ____ » _____ 2024 р.

З А В Д А Н Н Я
ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ЗДОБУВАЧУ
Гаєву Дмитру Сергійовичу

Спеціальність:

174– «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-професійна програма:

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Орієнтація освітньої програми: освітньо-наукова

Тема магістерської кваліфікаційної роботи **«Дослідження і розробка автоматизованої системи керування температурою в зерносушарці з використанням комплексу технічних засобів Arduino»**,

затверджена наказом від 18.11.2024 року №2057«С»

Термін подання студентом магістерської роботи 15.05.2026 року

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

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Технологічний процес сушіння зерна як об'єкт автоматизації: закономірності, способи, обладнання.
2. Дослідження процесу сушіння зерна у шахтній зерносушарці.
3. Вибір регулятора і обґрунтування параметрів його налаштування.
4. Розробка цифрової системи керування.
5. Схеми системи автоматизації, SCADA-система, техніко-економічна ефективність.

Дата видачі завдання «19» листопада 2024 року

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

(Підпис)

Лендєл Т.І.
(Прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання

(Підпис)

Гаєв Д.С.
(Прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Вступ	4
РОЗДІЛ 1. Технологічний процес сушіння зерна як об'єкт автоматизації: закономірності, способи, обладнання.....	7
1.1. Основні закономірності і вимоги до теплового сушіння зерна	7
1.2. Способи сушіння (зневоднення) зерна і насіння	10
1.3. Класифікація зерносушарок конвективної дії	12
1.4. Шахтні зерносушарки: принцип дії, складові частини, переваги	16
1.4.1. Конструктивні особливості шахтних зерносушарок	20
1.4.2. Твердопаливний теплогенератор для зерносушарки	23
1.5. Функціональна схема автоматизації системи керування шахтною зерносушаркою	27
РОЗДІЛ 2. Дослідження процесу сушіння зерна у шахтній зерносушарці як об'єкта автоматизації	34
2.1. Експериментальні дослідження шахтної прямооточної зерносушарки	34
2.2. Розробка математичної моделі об'єкта автоматизації	43
2.3. Розробка та дослідження імітаційної моделі об'єкта автоматизації із використанням математичних пакетів MATLAB та MathCad	47
2.4. Визначення передатної функції шахтної зерносушарки для каналу керування температурою зерна	52
РОЗДІЛ 3. Вибір технічних засобів автоматики системи керування	56
3.1. Вибір мікропроцесорного пристрою.....	57
3.2. Вибір давачів температури зерна та агенту сушіння та визначення їх передатних функцій.....	58
3.3. Вибір давачів вологості зерна.....	58
3.4. Вибір давачів рівня зерна.....	60
3.5. Визначення передатної функції електродвигуна приводу вивантажувального шнеку як виконавчого механізму САК температурою зерна	62
3.6. Вибір частотного перетворювача.....	65
РОЗДІЛ 4. Розробка цифрової системи керування	69
4.1. Визначення періоду квантування сигналів ЦСК	69
4.2. Реалізація нейронної мережі	71
4.3. Реалізація SCADA системи	74
РОЗДІЛ 5. Електротехнічна частина системи автоматизації	78
5.1. Вибір пускозахисної апаратури	78

5.2. Вибір проводів і кабелів	81
5.3. Розробка принципової схеми	81
5.4. Розробка схеми електричних з'єднань	82
5.5. Розробка схеми електричних підключень	83
5.6. Розробка щита управління	84
5.7. Розрахунок показників надійності системи	85
РОЗДІЛ 6. Техніко-економічне обґрунтування	88
Висновки	91
Література	92
Додатки	94

ВСТУП

Актуальність теми. Для забезпечення надійного зберігання зерна і запобігання зниження його якісних та кількісних показників (як за кількістю, так за і якістю) здійснюють комплекс технологічних заходів для підготовки зернової маси до тривалого зберігання. Він полягає у: 1) підготовці току та зерносховищ до приймання зерна нового врожаю; 2) безпомилковому визначенні якісних показників зерна, що транспортується від польових комбайнів; 3) забезпеченні його очищення, сушіння або охолодження; 4) здійсненні хімічного консервування (якщо є така необхідність); 5) організації боротьби із хворобами і шкідниками; 6) контролі за якістю виконання технологічних процесів та зберігання.

Процес сушіння є основною технологічною операцією з доведення зерна та насіння до стійкого стану. Тільки після того, як із зібраної свіжої зернової маси видалено весь надлишок вологи і зерно доведено до сухої кондиції, можна розраховувати на подальшу тривалу збереженість продукції.

Сушіння сировини полягає у видаленні з неї будь-якої рідини, наслідком чого є збільшення відносного вмісту сухої частини.

Відомо [1], що у висушеній масі зерна всі живі компоненти, за виключенням комах і шкідників, перебувають в анабіотичному стані. Зберігання зерна в сухому стані є основним засобом підтримання високої життєдіяльності насіння в зернових партіях будь-якої культури, а також забезпечення високих продовольчих якісних показників зерна протягом тривалого терміну зберігання.

Існуючі способи сушіння зерна враховують його сорбційні та інші властивості. Якщо розглядати зерно як об'єкт сушіння – воно являє собою живий організм із капілярно-пористою структурою. Плодові оболонки насіння пронизані капілярами, тому вони проникні для водяної пари. Оболонки насіння і алеїроновий шар, навпаки, є відносно мало-проникними для пари води і за неправильного режиму сушіння можуть бути причиною

здуття зерна, спричиненого затримкою видалення вологи, яка накопичилась всередині ендосперму. Крім того, зародок містить альбуміни – дуже чутливі до температури водорозчинні білки. Наприклад, білки зародка пшениці при температурі, що перевищує $41\text{--}42^{\circ}\text{C}$, денатурують, тобто таке насіння втрачає схожість. Білкам клейковини характерна вища термостійкість, однак температура нагрівання нормальної клейковини пшениці не повинна перевищувати 50°C , міцної – 45°C , а слабкої за пружністю клейковини сильної пшениці – 55°C [2].

Сушіння являє собою складний технологічний тепломасообмінний процес, який повинен забезпечити збереженість усіх властивостей речовин у зерні, що можливо за умови дотримання оптимальних параметрів цього процесу. Термодинамічні та теплофізичні властивості зерна (наприклад, теплоємність, теплопровідність) постійно змінюються під час сушіння. Тому виникає потреба у суворому дотриманні рекомендованих параметрів і режимів сушіння насіння кожної культури залежно від його вологості та цільового призначення.

Трьома основними способами, що використовуються для сушіння (зневоднення) зерна у сільськогосподарському виробництві, є: 1) теплове (у тому числі вакуумне); 2) сорбційне (контактне); 3) механічне (відтискання, центрифугування). Серед багатьох способів теплового сушіння, які відрізняються способом передачі теплоти зерну, найбільшого поширення набув конвективний, коли теплота до зерна передається конвекцією за допомогою теплоносія, котрий вбирає вологу та видаляється в атмосферне середовище. На цьому принципі заснована робота шахтних, барабанних, рециркуляційних, стрічкових та інші типів зерносушарок.

Найбільша частина енерговитрат на виробництво зерна концентрується на стадіях післязбиральної обробки зерна, яка включає очищення, сушіння і зберігання. Затрати енергії на доведення зерна до кондиційного за вологістю стану складають до 70% від загальних витрат [3].

Тому дослідження, спрямовані на вдосконалення та підвищення енергоефективності технології сушіння зерна, обґрунтування раціональних параметрів та режимів роботи електрообладнання зерносушарок, є актуальними і своєчасними.

Об'єктом дослідження є процес сушіння зерна у шахтній прямоточній зерносушарці.

Предметом досліджень є залежності енергозатрат на процес сушіння від режиму і параметрів роботи зерносушарки.

Мета і задачі досліджень. Мета роботи полягає у підвищенні продуктивності роботи шахтної зерносушарки та якості вихідної продукції шляхом вдосконалення технологічного процесу сушіння, зокрема покращення температурного режиму сушіння.

Для досягнення цієї мети сформульовані такі задачі:

- дослідження особливостей сучасних систем автоматизації процесів керування температурним режимом сушіння зерна у шахтних зерносушарках;
- розробка функціональної схеми системи керування шахтною зерносушаркою і алгоритму її роботи;
- розробка і дослідження імітаційної моделі об'єкта автоматизації із використанням програмного пакету MatLAB;
- обґрунтування вибору алгоритму керування, комплексу технічних засобів автоматизації, визначення показників якості роботи системи керування;
- розробка схем системи автоматизації та системи керування та контролю сушіння зерна в потоці.

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

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС СУШІННЯ ЗЕРНА ЯК ОБ'ЄКТ АВТОМАТИЗАЦІЇ: ЗАКОНОМІРНОСТІ, СПОСОБИ, ОБЛАДНАННЯ

1.1. Основні закономірності і вимоги до теплового сушіння зерна

Зерно є живим організмом із власними процесами життєдіяльності, зокрема із процесами дихання.

При підвищеній вологості, температурі та засміченості інтенсивність дихання зерна зростає, внаслідок чого виділяється певна кількість теплоти і втрачається маса. Тому існують критичні значення вологості зерна, при яких з'являється вільна волога із різким зростанням інтенсивності дихання. Так, для зернових культур і злакових трав критичне значення вологості дорівнює 14,5–15,5%, для зернобобових і кормових бобових трав – 15,0–16,0%, для олійних культур – 8,0–11,0%. Для якісного тривалого зберігання вологість зерна повинна бути нижчою на 2–3% від критичної.

З метою видалення із зерна надлишків вологи, знищення шкідників, прискорення післязбирального дозрівання і збереження якості (схожості) насіння здійснюють сушіння зерна.

Під час сушіння (зневоднення) зерна відбуваються наступні фізичні явища: а) передача теплоти від агента сушіння (теплоносія) до зерна; б) випаровування вологи з поверхні зерна та дифузія її в навколишнє середовище; в) переміщення вологи від центральних шарів зерна до поверхневих; г) рух вологи при наявності температурного градієнта з потоком теплоти внаслідок температуро- та вологопровідності.

До закономірностей сушіння зерна відносять наступні:

1) чим вищою є початкова вологість зерна, тим більшою є швидкість сушіння в початковий період і тим він коротший. Механічно зв'язана волога сирого зерна видалається у першу чергу. Капілярна волога міцно зв'язана із

крохмалем і ще міцніше з білками зерна. Тому процес зневоднення зерна обмежується переважно сушінням білкового комплексу;

2) під час сушіння зерна швидкість його нагрівання є вищою за швидкість випаровування вологи. Ця різниця визначає доцільність використання рециркуляційного з відлежуванням способу зневоднення зерна;

3) сушіння стає можливим лише за умови, що тиск пари всередині зернівки вищий за тиск оточуючого середовища, тобто відбувається випаровування вологи. Якщо температура поверхні зерна дорівнює температурі середовища сушарки, процес випаровування вологи зупиняється;

4) із рухом вологи одночасно переміщуються і розчинені у ній мінеральні речовини, що призводить до збільшення зольності периферійної частини зернівки і зародка;

5) якщо частка органічної легкої домішки у зерновій масі перевищує 0,1%, можливе її загоряння у сушарці;

6) за умови зберігання зерна насипом висотою понад 4 м в анаеробному стані перед сушінням, в зернівках накопичується етиловий спирт, який при різкому нагріванні може призвести до загибелі зародків. В такому випадку для видалення спирту зерно необхідно провітрити;

7) швидкість процесу сушіння багато в чому залежить від вологості повітря. Так, 1м³ повітря з температурою 20°C здатне поглинути 17 г води, 30°C – 31 г, 50°C – 90 г, 70°C – 200–250 г, 90°C – 400 г.

Основними вимогами до процесу сушіння зерна є збереження його продовольчих та насінневих (схожості, енергії проростання) властивостей.

Основним фактором, від якого залежить процес сушіння зерна, є температура теплоносія: чим вона вища, то швидше висихає зернова маса. Вона обмежується допустимою температурою нагрівання зерна. Наприклад, температура теплоносія в сушарках шахтного типу для насінневого матеріалу зернових культур вологістю до 18% не має перевищувати 70°C, а вологістю 18–20% – 65°C. Під час сушіння продовольчого зерна вологістю до 26% температура теплоносія має становити 80–90°C. У сушарках барабанного

типу під час сушіння насіннєвого зерна температура теплоносія має бути 145–165°C, продовольчого – 180–210°C, а фуражного – 180–250°C.

Температура власне продовольчого зерна при нагріванні не повинна перевищувати 50–60°C, насіннєвого матеріалу зернових культур – 43–48°C, зернобобових 30–35°C (див. Додаток А1).

Нерівномірність нагрівання зернової маси не повинна перевищувати 3–4°C, допустима нерівномірність сушіння – 1%. Випаровування води за одноразовий процес сушіння не повинно перевищувати 5–6% для зернових, 3–4% для гречки, зернобобових, кукурудзи, проса. Після сушіння зерно і насіння охолоджують так, щоб температура їх не перевищувала температуру навколишнього повітря більше ніж на 10–15°C [4]. Після сушіння і охолодження не має бути підгорілих, підсмажених, надутих або з луснутими оболонками зерна та насіння.

Загалом, небезпечні фактори при тривалому зберіганні зерна можна поділити на 3 великі групи: фізичні, біологічні та хімічні [5]. Фізична група містить вологість і температуру зерна, його фізико-механічні властивості, зернові та інші домішки. Біологічні фактори – це комахи, пліснява, токсини та ін. До складу хімічної групи входять техногенні забруднення навколишнього середовища, порушення технології вирощування, обробки та зберігання зерна.

Основними факторами псування зерна є пліснява та комахи. Пліснява добре розвивається у теплом і вологом зерні. Для комах також необхідне середовище підвищеної температури. Хоча комахи можуть розвиватися і у досить холодному зерні, найкращі умови для їх розвитку спостерігаються при 15...38°C [6]. У будь-який момент при зберіганні зерна у вказаному діапазоні температур і при вологості, що перевищує оптимальну для безпечного зберігання, існує великий ризик розвитку плісняви, комах і хвороб.

Оскільки активний розвиток плісняви і комах відбувається за приблизно однакових умов оточуючого зернового простору, то пліснявіле

зерно стає привабливим об'єктом для комах, і навпаки, зерно із комахами починає пліснявіти. Деякі види комах живляться пліснявою і переносять спори плісняви. Внаслідок перелічених факторів малі осередки із комахами та пліснявою здатні стрімко перетворюватися у великі зони із підвищеними температурами, із вмістом грудок та запліснявілих корок, які поширюють неприємний запах.

Значення вологості зерна, при яких можна запобігти розвитку плісняви і комах, залежать від первинної якості зерна та виду культури, його температури, тривалості прогнозованого періоду зберігання (Додаток А2).

1.2. Способи сушіння (зневоднення) зерна і насіння

Сушіння (зневоднення) зерна базується на двох принципах:

- видалення вологи *без зміни її агрегатного стану*;
- видалення вологи *зі зміною її агрегатного стану* (тобто перетворення рідини на пару).

На першому принципі ґрунтуються *сорбційний* та *механічні* способи зневоднення зерна.

Сорбційний спосіб являє собою процес видалення вологи вологовбирними матеріалами або сухим зерном при змішуванні його із вологим. Цей спосіб вирізняється повільністю – триває від 1 до 2 тижнів. Використовують його тоді, коли під час нагрівання насіння і зерно втрачають свої властивості і розтріскуються (вика, горох, соя, квасоля тощо).

Механічні способи засновані на процесах видалення вологи без використання теплової енергії: при *пресуванні* зневоднення відбувається за рахунок стискання сировини, при *центрифугуванні* волога видаляється під впливом відцентрової сили.

На другому принципі ґрунтуються *конвективний, кондуктивний, радіаційний, електричний та сублімаційний* способи зневоднення зерна.

Конвективний спосіб реалізується за рахунок передачі теплової енергії під дією конвекції від газоподібного рухомого теплоносія. Теплоносій (нагріте повітря або повітряна суміш із продуктами згоряння палива) одночасно із передачею зерну теплоти вбирає його вологу. Цей спосіб покладений в основу роботи більшості зерносушарок.

Кондуктивний спосіб забезпечується за рахунок контактної передачі теплової енергії зерну від нагрітої поверхні. Він характеризується низькою продуктивністю, оскільки не забезпечує необхідну рівномірність сушіння та вимагає значних витрат палива.

За допомогою *радіаційного* способу сушіння зерна відбувається безконтактним його нагріванням сонячними променями (природне сушіння) або генераторами інфрачервоного випромінювання (штучне сушіння). Товщина шару зерна при цьому повинна становити 100 – 150 мм. При великих обсягах зернової маси використовувати не рекомендується, оскільки природне сушіння є нестабільним за рахунок можливої швидкої зміни погоди і потребує великих відкритих площ, а штучне сушіння має низький ККД за рахунок великих втрат енергії.

Електричний спосіб базується на застосуванні струму високої частоти (СВЧ). Перебуваючи у СВЧ-полі, молекули зерна, вібрують і за рахунок тертя виділяють теплоту. Оскільки діелектрична постійна води досить велика, теплота зосереджується у центрі зерна, де вологи найбільше. При використанні цього способу досягається висока швидкість сушіння.

Штучне сушіння ІЧ променями та електричне у СВЧ-полі використовують переважно в лабораторних дослідженнях.

Сублимаційний спосіб ґрунтується на застосуванні глибокого вакууму. За цих умов температура сировини зменшується, а волога у вигляді льодяних кришталіків виходить на її поверхню. Висушений матеріал при цьому зберігає свою структуру. Такий спосіб сушіння використовують переважно для фруктів і овочів, оскільки для великих зернових мас ці установки мають

складне конструктивне виконання із високою собівартістю і невеликою продуктивністю.

1.3. Класифікація зерносушарок конвективної дії

Оскільки дана магістерська кваліфікаційна робота присвячена автоматизації шахтної зерносушарки, в якій використовується конвективний спосіб сушіння, який є найпоширенішим у сільськогосподарському виробництві України, наведемо класифікацію зерносушарок саме конвективної дії.

Головною технологічною характеристикою зерносушарок є стан матеріалу в процесі сушіння і охолодження: існують зерносушарки із *рухомим* або *нерухомим* зерновим шаром, а також із псевдозрідженим та зваженим шаром зерна [4].

У зерносушарках із *рухомим* шаром зерна під час сушіння швидкість матеріалу більша нуля, а швидкість руху теплоносія менша за критичну швидкість переміщення зернової сировини. На цьому принципі ґрунтується робота *шахтних, рециркуляційних, барабанних, конвеєрних і вібраційних* зерносушарок безперервної дії.

Зерносушарки із *нерухомим* шаром зерна – бункери активного вентильовання – призначені для тимчасової консервації зерна або насіння, та періодичного його підсушування.

Крім того, зерносушарки класифікуються за наступними ознаками:

- за *характером процесу сушіння*: безперервної або періодичної дії;
- за *видом палива, що використовується для нагрівання теплоносія*: працюють на твердому, рідкому або природному газі;
- за *видом теплоносія*: повітряна суміш із паливними газами або чисте нагріте повітря;
- за *мобільним станом*: пересувні та стаціонарні;

- за **напрямком руху теплоносія відносно зернового потоку**:
прямоточні, протиточні, з перпендикулярним потоком, зі змішаним потоком;
- за **конструктивним виконанням**: шахті, барабанні, вібраційні, декові, камерні, пневмогазові із рециркуляцією, вентильовані бункери.

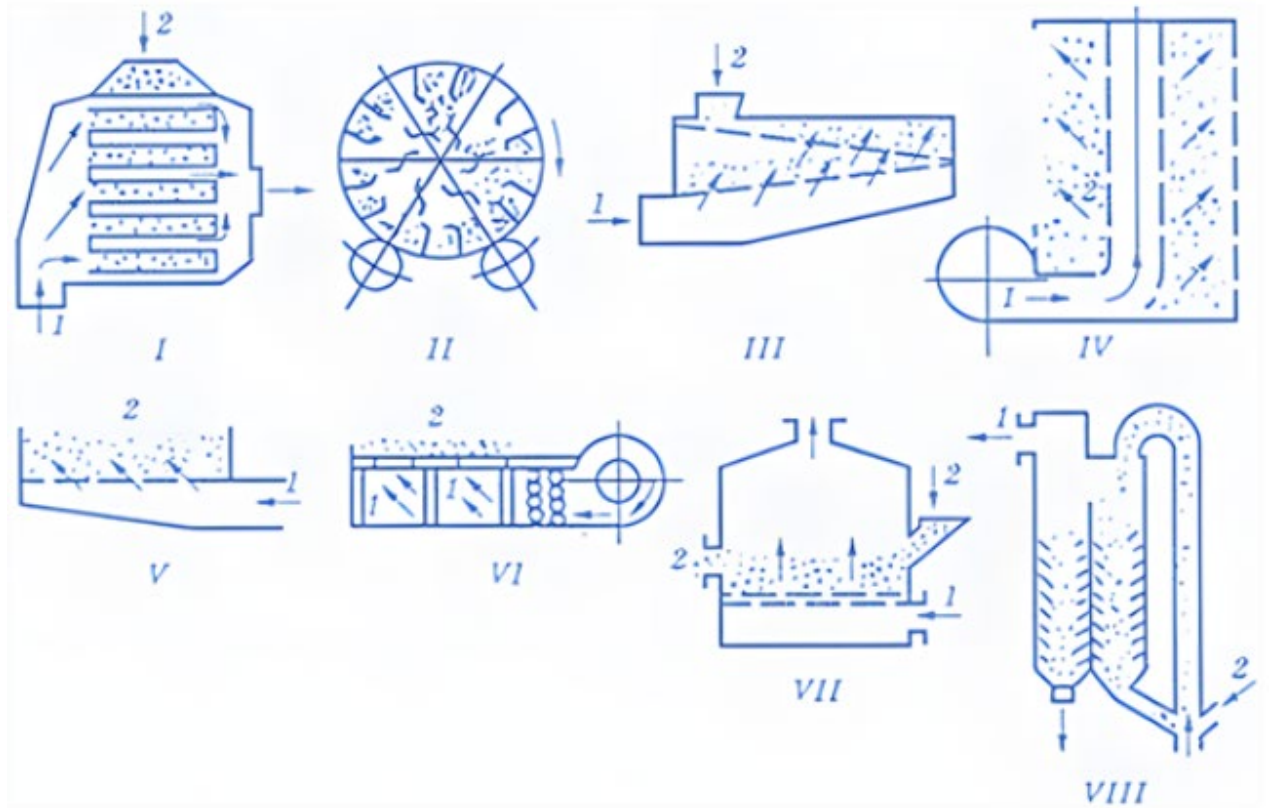


Рис. 1.1. Конструктивні виконання зерносушарок:

I – шахтна; *II* – барабанна; *III* – вібраційна; *IV* – бункер активного вентильовання; *V* – декова; *VI* – камерна; *VII* та *VIII* – пневмогазові із рециркуляцією; 1 – напрямок руху теплоносія або повітря; 2 – напрямок руху зерна

Шахтні зерносушарки (рис. 1.1. *I*) обладнані шахтами, всередині яких у шаховому порядку вмонтовані короби. Зерновий потік переміщується згори донизу під впливом сили тяжіння, а теплоносій – у поперечному і вертикальному напрямках.

Барабанні зерносушарки (рис. 1.1. *II*) мають сушильну камеру у вигляді порожнистого сталевого барабану (циліндру), всередині якого вмонтовані лопаті та полички різної конструкції. Під час його обертання лопаті піднімають і скидають зерно, яке пересипається з полички на поличку,

висушується теплоносієм і рухається в напрямку розвантажувальної камери барабану і охолоджувальної колонки із вентилятором.

У *вібраційних зерносушарках* (рис. 1.1. III) решета, які розміщені ярусами, за допомогою спеціальних механізмів приводяться в коливальний рух. Зерно, що вібрує на решетах, обдувається теплоносієм від низу до верху.

Бункер активного вентилявання (БАВ) (рис. 1.1. IV) складається з з металевого перфорованого бункера, відцентрового вентилятора, повітропроводу, що розміщений всередині бункера, та нагрівача вентиляційного повітря. Підігріте повітря пронизує шар вологого зерна, висушуючи його. БАВ використовують також для вентилявання зерна повітрям під час його охолодження і консервації.

До складу *декових зерносушарок* (рис. 1.1. V) входить топковий агрегат, вентилятор та кілька дек, виготовлених із перфорованого металевого листа. Нерухома зернова сировина на поверхні деки пронизується теплоносієм, втрачаючи при цьому вологу.

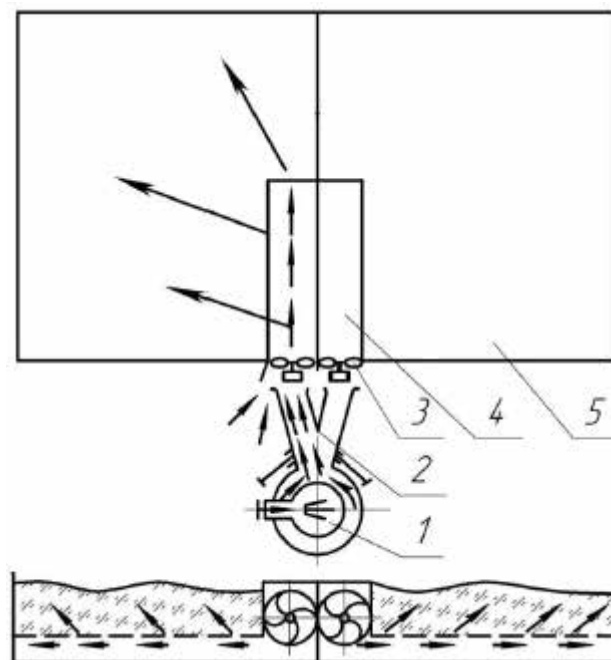


Рис. 1.2. Двокамерна сушарка для насіння:

- 1 – теплогенератор; 2 – патрубков-трійник із заслінками; 3 – вентилятор;
4 – повітропровід; 5 – сушильна камера

Камерна сушарка є найпростішою за конструктивним виконанням (рис. 1.1, VI, рис. 1.2). Її монтують під дахом з подвійною підлогою: верхня є повітророзподільними ґратами, а нижня – суцільною і щільною. Просвіти між підлогами мають різну відстань для рівномірного напору агенту сушіння в усіх ділянках. Оптимальний розмір майданчиків 30...60 м², що дає змогу одночасно завантажувати 20...30 т зерна шаром 0,5...0,6м, максимум 0,7...0,8м.

Пневмогазові зерносушарки із рециркуляцією (рис. 1.1., VII, VIII) за декілька секунд теплоносієм, що подається із великою швидкістю, нагрівають зерновий матеріал до потрібної температури. Зерно трубою піднімається в шахту. У верхній частині шахти витримується деякий час і спрямовується в її нижню частину, яка розділена вертикальною перегородкою на дві зони. Із правої зони зерно знову потрапляє в сушильну трубу (тобто, відбувається рециркуляція), де перемішується з вологим. Сухе зерно спрямовується у ліву зону, звідки виводиться назовні.

В сушарках із *псевдозрідженим шаром* здійснюється сушіння зерна, яке перебуває на поверхні решета у псевдозрідженому (киплячому) стані під впливом швидкості потоку теплоносія. При цьому піднімальна сила потоку близька до сили тяжіння окремих зерен, тому вони не тиснуть одне на одне. За вказаних умов відбувається рух та перемішування зерен, а сухі зерна впливають на поверхню і вивантажуються із сушарки.

В Україні на підприємствах зернопереробної галузі найбільш поширеними є *шахтні зерносушарки*.

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

1.4. Шахтні зерносушарки: принцип дії, складові частини, переваги

В Україні добре зарекомендували себе шахтні зерносушарки СЗШ-16, ДСП50, а також закордонні LAW, Strahl (із суб-виробниками Mulmix та Kika), Ravaro, Buhler, Stela, Petkus, двохзонні Satig і Scolari шахтні сушарки.

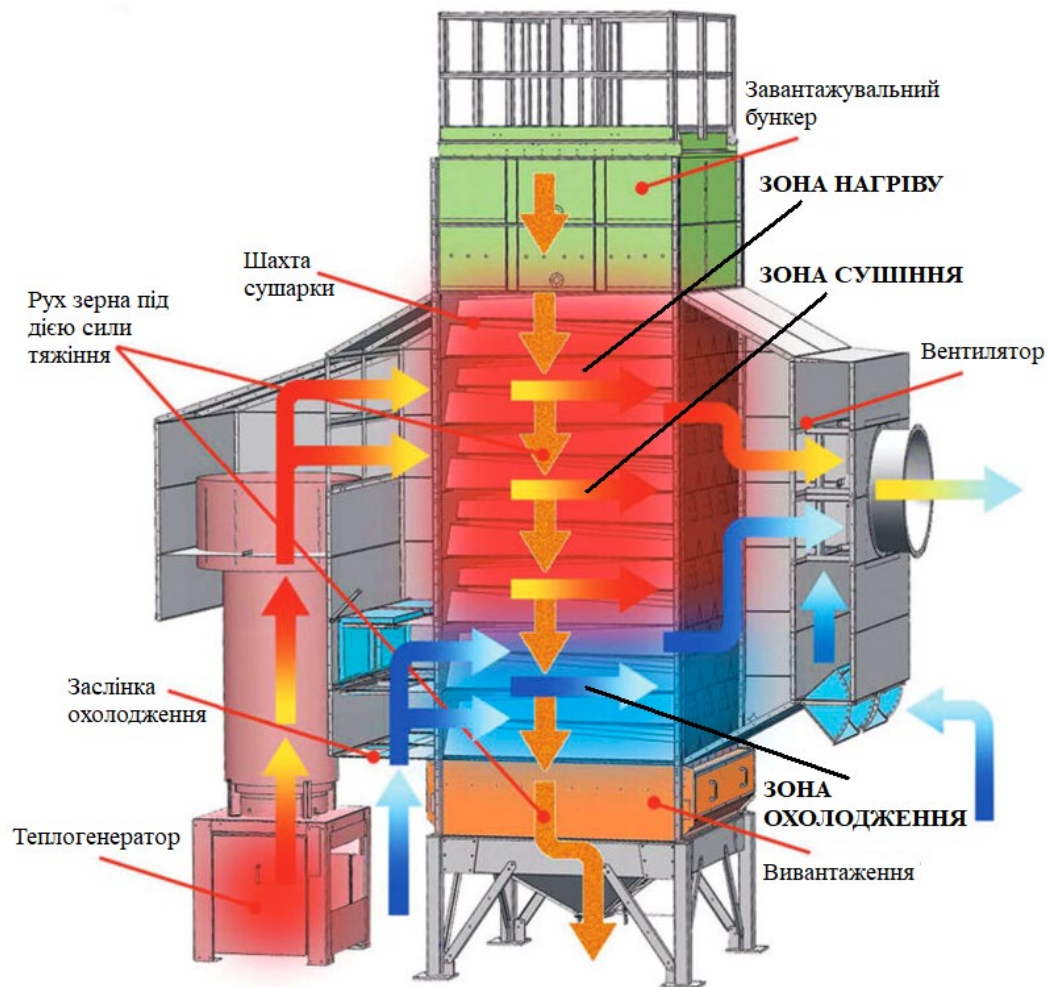


Рис. 1.3. Схема роботи шахтної зерносушарки

Шахтна сушарка (рис. 1.3) являє собою вертикальну конструкцію, що складається із сушильних колон або шахт, через які проходить зернова маса. Основний принцип роботи ґрунтується на поступовому сушінні зерна за рахунок впливу гарячого повітря, яке рівномірно розподіляється по всьому об'єму сировини. Це дозволяє ефективно видаляти вологу, зберігаючи при цьому якість і структурну неушкодженість зерна.

Процес починається із завантаження сировини у верхню частину сушарки. Зерно під дією сили тяжіння повільно переміщується вниз через сушильні шахти. В цей час гаряче повітря, нагріте теплогенераторами, подається через короби повітророзподільної системи (рис. 1.4, 1.5). Повітряний потік проникає у зернову масу, нагріває її і випаровує зайву вологу. Температуру та швидкість подачі повітря ретельно регулюють залежно від типу культури, початкової вологості та необхідних параметрів кінцевого продукту.

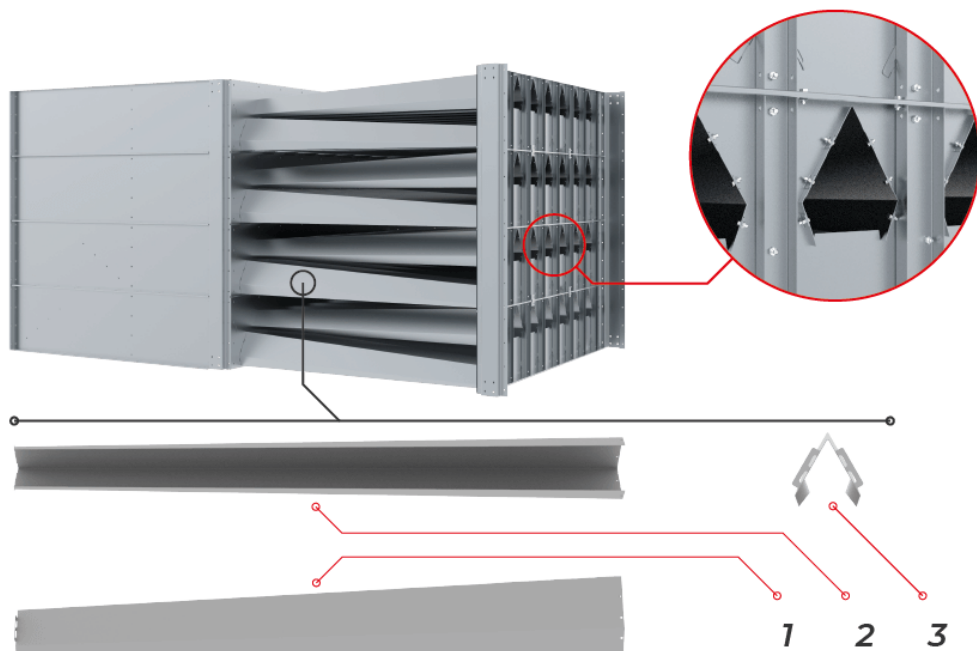


Рис. 1.4. Конструкція коробів шахтної сушарки:

1 – вигляд з боку; 2 – вигляд знизу; 3 – фронтальний вигляд

Короб являє собою канал із відкритою нижньою частиною, через яку теплоносій входить у зернову масу або виходить із неї (рис. 1.4). Під нижньою відкритою частиною коробка зерно розташовується під кутом природнього відкосу. Одна з торцевих сторін кожного коробу відкрита, інша – закрита. Короба підведення відкриті з боку входу теплоносія і закриті з боку його виходу із шахти. Короба відведення навпаки, закриті з боку входу і відкриті з боку виходу теплоносія із шахти (рис. 1.5). Короба виготовляють з листової оцинкованої сталі товщиною 1,5...2 мм.

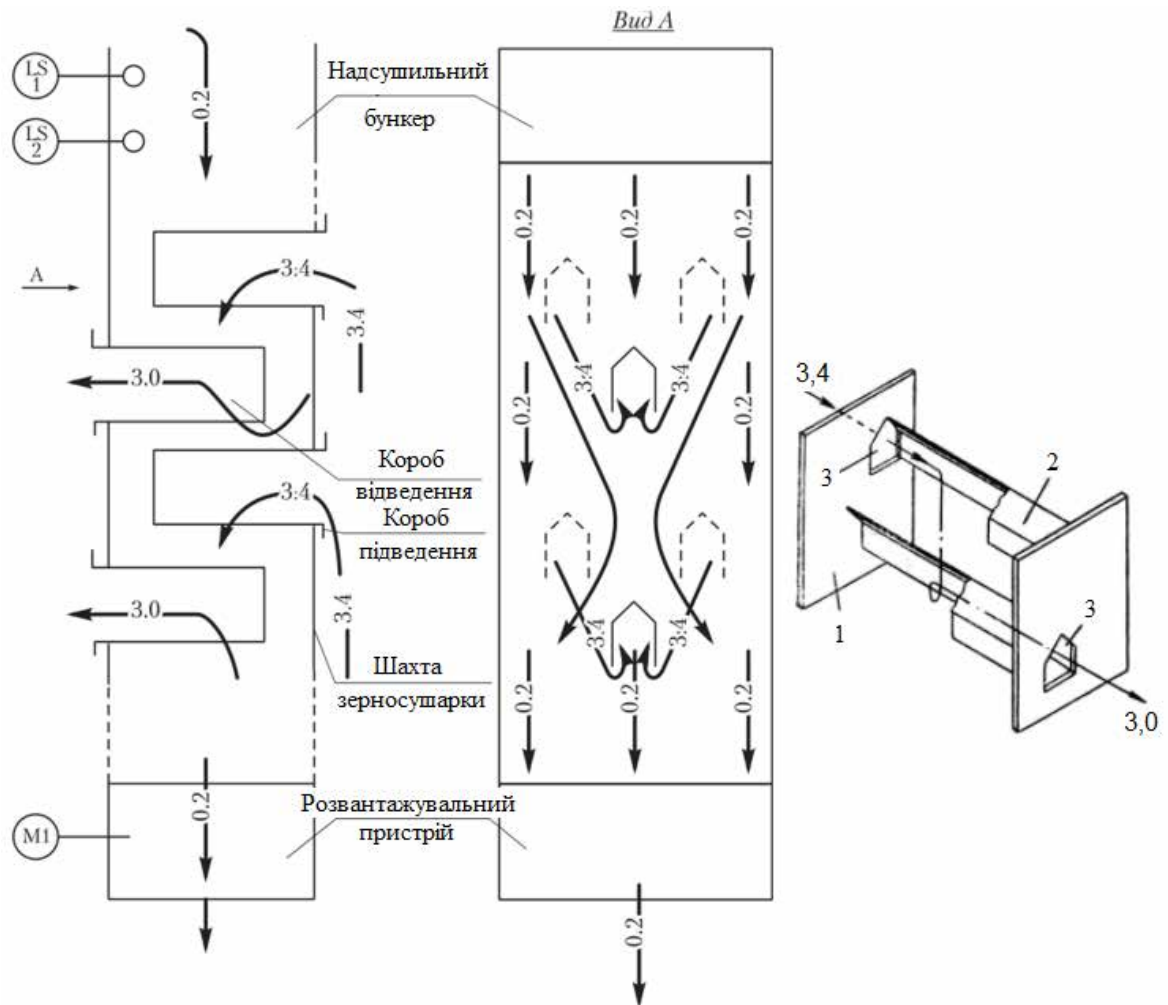


Рис. 1.5. Схема руху теплоносія і зерна у шахтній зерносушарці:
1 – стінка шахти; 2 – сушильний короб; 3 – вхідний та вихідний отвори;

Матеріальні потоки:

0,2 – зерно; 3,4 – теплоносій; 3,0 – відпрацьований теплоносій

Після проходження зони нагріву і зони сушіння, зерно потрапляє в камеру охолодження, де його температура поступово знижується до рівня, наближеного до температури навколишнього середовища. Цей етап є *критично важливим*, оскільки запобігає конденсації вологи на поверхні зерна, що може призвести до псування при зберіганні. Охолодження також сприяє стабілізації структури зерна, мінімізуючи ризики появи тріщин або ушкоджень.

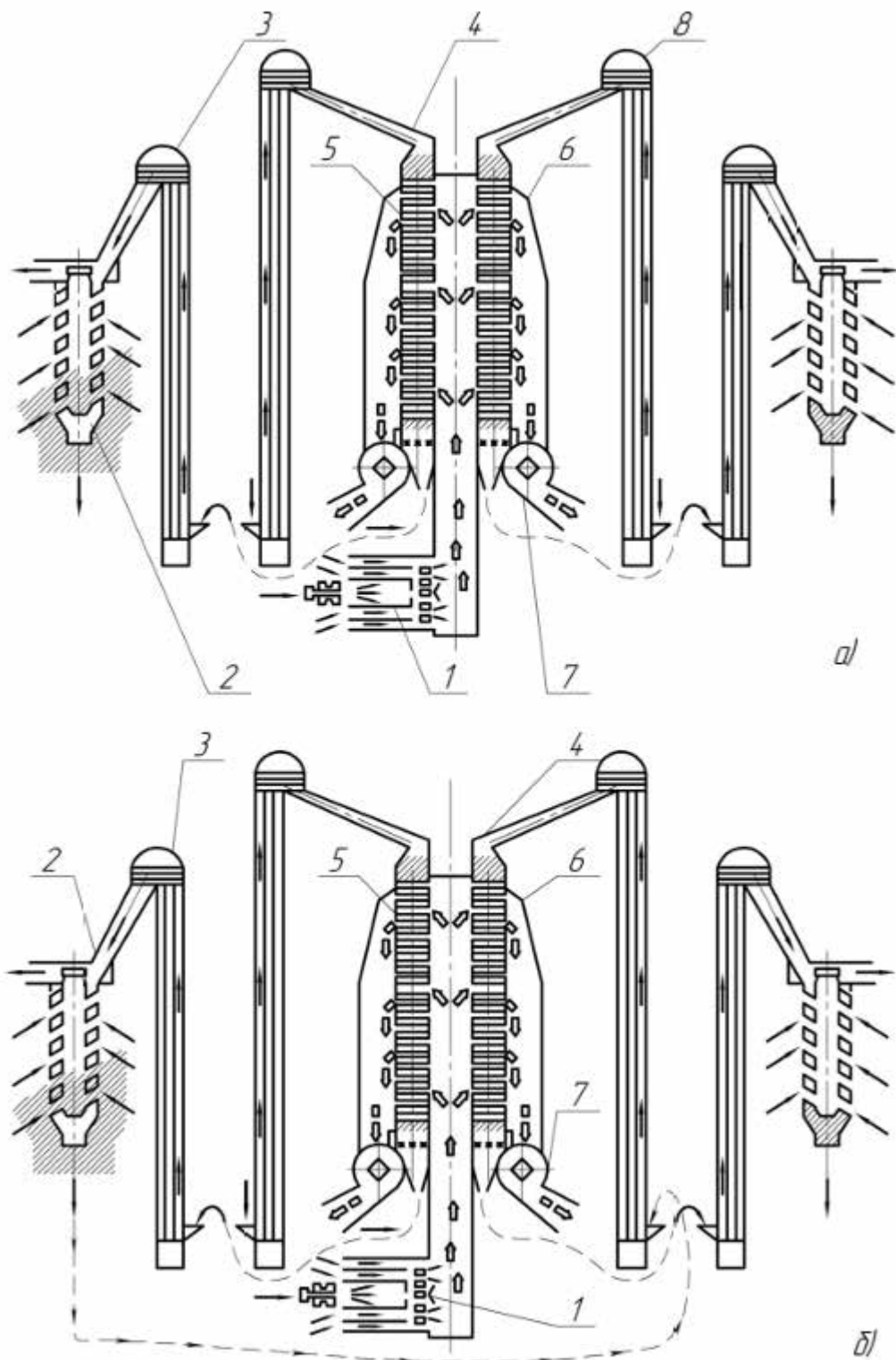


Рис. 1.6. Технологічна схема шахтної сушарки СЗШ-16:

а – паралельна робота шахт; б – послідовна робота шахт;

1 – топка; 2 – охолоджувальна колонка; 3 – норії; 4 – надсушильний бункер;

5, 6 – шахти; 7 – вентилятори

Стационарна шахтна сушарка СШЗ-16 (рис. 1.6) має дві шахти, розміщені на загальній станині на відстані 1 м одна від одної [7]. Залежно від початкової вологості і призначення партії шахти включають у технологічну схему *послідовно* або *паралельно*. Кожна шахта складається з двох секцій, у яких установлені чотиригранні короби. Агент сушіння потрапляє з топки в простір між шахтами, що є дифузором. Зерно охолоджується в окремо поставлених охолоджувальних колонках. При *паралельній* роботі вихідна зернова маса завантажується в обидві шахти, а при *послідовній* – в одну. Підсушене зерно в одній шахті надходить до охолоджувальної колонки, а з неї – до іншої шахти. Сушарка має топку металевої конструкції. Камера згоряння екранована, в неї вмонтовано фотоопори, що здійснюють контроль за полум'ям. Конструкція випускного пристрою забезпечує безперервне випускання зерна малими порціями і періодично – великими. Рівень зерна в шахті контролюють сигналізатори. Якщо рівень насипу зернової маси в шахті нижчий від допустимого, то двигун випускного пристрою вимикається і на пульті загоряється сигнальна лампочка. Під час роботи шахти сушарки весь час мають бути повністю завантажені зерном і не мати підсмоктування зовнішнього повітря. Випускання зерна відбувається безперервно. На початку роботи сушарки виходить недосушене зерно, що вдруге подається в шахту.

1.4.1. Конструктивні особливості шахтних зерносушарок

Для сучасних шахтних зерносушарок розроблені та впроваджені технологічні рішення, які підвищують їх енергоефективність та зручність експлуатації (див. Додаток А3).

Сушильні шахти є основним елементом цих агрегатів, де власне і відбувається процес сушіння. Шахти виготовляються із міцних матеріалів, які є стійкими до впливу високих температур та корозії. Перфоровані стінки забезпечують рівномірний розподіл повітряних потоків.

Вентилятори та розподільчі повітропроводи забезпечують подачу, циркуляцію та рециркуляцію гарячого повітря через зернову масу. Сучасні системи дозволяють регулювати тиск та швидкість потоку повітря для оптимізації процесу сушіння, оснащуються розсікачами та іскрогасниками. Витяжні вентилятори встановлюються або у бічній стінці сушарки (рис. 1.3), або у верхній її частині (рис. 1.7).

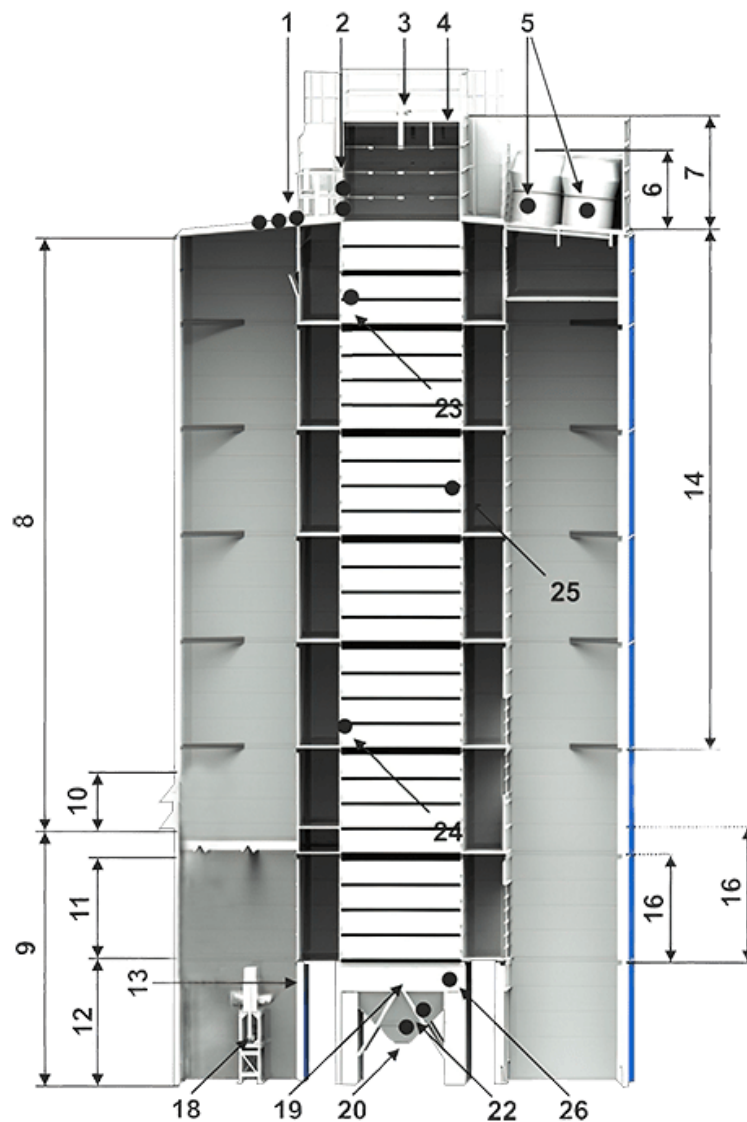


Рис. 1.7. Шахтна зерносушарка із верхнім розташуванням витяжних вентиляторів серії GrainDry

На рис. 1.7. прийняті наступні позначення: 1) давач температури, термостат безпеки та регульований термостат; 2) давачі рівня (мін. та макс.) завантажувального бункера; 3) завантажувальні отвори сушарки; 4) огорожа;

5) давачі температури відпрацьованого повітря; 6) витяжні вентилятори; 7) буферні секції; 8) розподільчий повітропровід гарячого повітря; 9) камера із пальником (теплогенератор); 10) забір холодного повітря для пальника; 11) канал гарячого повітря над пальником; 12) пальник; 13) забір холодного повітря для системи охолодження; 14) сушильні секції; 16) секції охолодження; 18) камера лінійного газового пальника; 19) вивантажувальний пристрій; 20) вихід зерна із вивантажувального бункера; 22) давачі рівня у вивантажувальному бункері (мін. та макс.); 23) верхній давач температури сушильної секції (зона нагрівання зерна); 24) нижній давач температури сушильної секції (зона сушіння); 25) середній давач температури сушильної секції (зона сушіння); 26) давач температури зерна у вивантажувальному бункері.

Системи нагрівання повітря – теплогенератори – працюють на різних видах палива (природній газ, дизельне паливо, висушена органічна сировина: щепи деревини, пелети та ін.), перетворюють повітря на теплоносії. Деякі моделі комплектуються теплообмінниками для підвищення безпеки та запобігання контакту зерна із продуктами згоряння (див. п.1.4.2).

Охолоджувальні камери розташовані у нижній частині сушарки і призначені для поступового зниження температури зернової маси.

Системи автоматизації, до складу яких входять давачі температури (рис. 1.7), вологості, тиску у поєднанні із програмованими контролерами, програмним забезпеченням та системами диспетчерського контролю та керування дозволяють впливати на процес сушіння зерна в реальному часі.

Системам рекуперації тепла при проектуванні сучасних моделей сушарок приділяється особлива увага. Відпрацьоване гаряче повітря, що містить остаточне тепло, використовується для попереднього нагріву свіжого повітря, що подається у шахту сушарки (Додаток А4). Це знижує енергоспоживання на 15–30% і підвищує загальну продуктивність обладнання.

1.4.2. Твердопаливний теплогенератор для зерносушарки

Одним з основних робочих органів шахтних зерносушарок є теплогенератори, які за конструктивним виконанням бувають *прямої* та *непрямої* дії. В теплогенераторах прямої дії теплоносії отримують за рахунок безпосереднього змішування топкових газів із повітрям, тому головною вимогою до них є згоряння палива повністю (дим і зола не повинні потрапити в сушильну камеру). У теплогенераторах непрямої дії утворення теплоносія здійснюється за допомогою теплообмінників.

У даній кваліфікаційній магістерській роботі, враховуючи світові тенденції до стрімкого зростання цін на природний газ та нафтопродукти, а також дефіцит вказаних видів палива, передбачається використати твердопаливний теплогенератор непрямої дії типу NET українського виробника "Новий Елеватор" (рис. 1.8) [8].



Рис. 1.8. Твердопаливний теплогенератор для зерносушарки з пальником "NET" (Виробник "Новий Елеватор", Україна)

Твердопаливні теплогенератори для сушіння зерна серії NET на пелетах та деревних трісках розроблені для задоволення потреб малого та середнього агробізнесу, сільськогосподарських та фермерських господарств в Україні (табл. 1.1).

Таблиця 1.1.

Модельний ряд за сферою застосування та теплопродуктивністю
теплогенераторів NET

Модель теплогенератора	Сфера застосування	Теплова продуктивність, кВт
NET 350	Сушарки малих агропідприємств	80 – 400
NET 700	Сушарки невеликих с.г. компаній	175 – 800
NET 1400	Сушарки середніх фермерських господарств	350 – 1550
NET 2000	Сушарки середніх агрокомпаній	500 – 2200
NET 2500	Сушарки середніх агрокомпаній	500 – 2700

Теплогенератор для зерносушарки з твердопаливним пальником NET – це надійний та економічний теплогенератор для сушіння зерна на альтернативному паливі, який працює на пелетах та відходах деревини (тріски). Щепи є технологічним відходом лісопромисловості, є в достатку по всій території України і стабільно дешевшає, на відміну від інших видів палива.

Деревина є паливом, яке має нульовий баланс вуглекислого газу CO₂ – тобто це насправді екологічне відновлюване паливо.

Теплогенератори NET призначені для нагрівання повітря до + 125 °C об'ємом від 25 000 до 120 000 м³/год.

Використовується для зерносушарок різних типів. Теплогенераторами NET можна легко переобладнати зерносушарки LAW, SUKUP, Methews, Brock, Agro Star, GSI, Grono, Сапфір, ЗавАгроТех та ін. на тверде паливо.

Будова теплогенератора зображена на рис. 1.9, а основні технічні характеристики наведені в табл. 1.2 та 1.3.

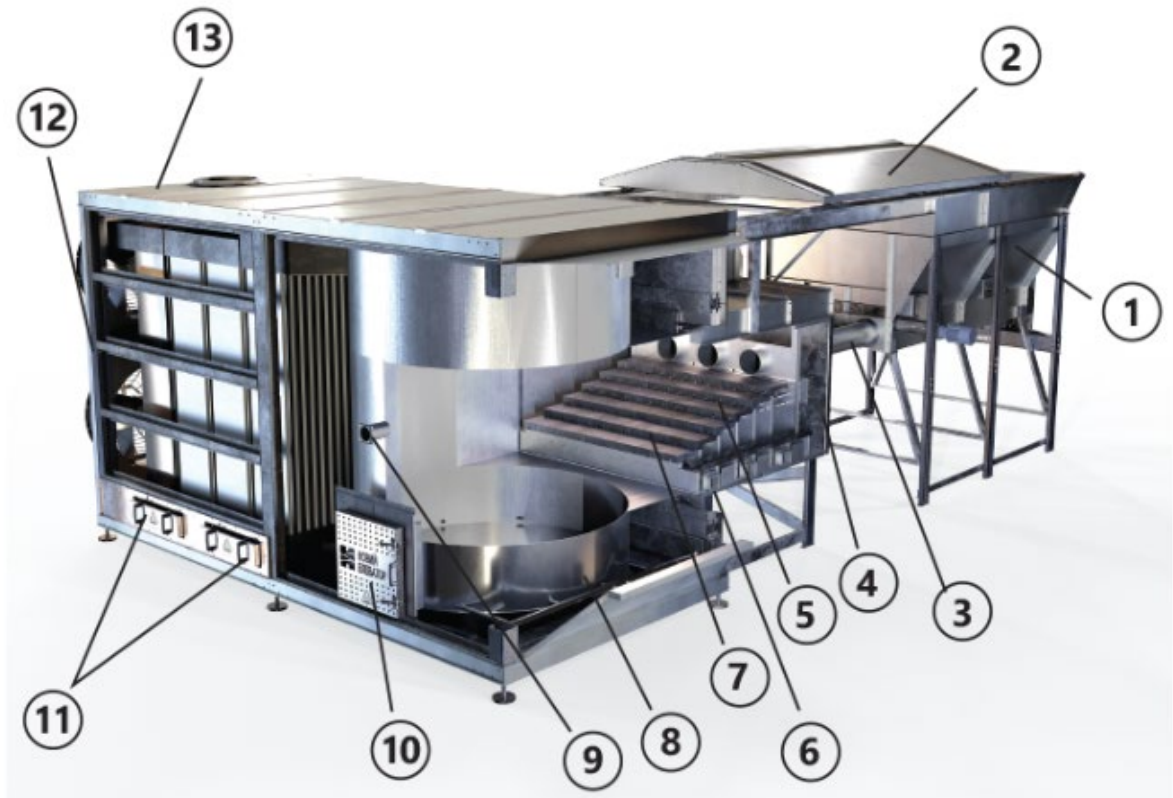


Рис. 1.9. Будова тепло-генеруючого комплексу NET:

1 – бункер автоматичного завантаження палива; 2 – кришка бункера; 3 – шнеки подачі палива; 4 – пальник; 5 – штовхачі золи; 6 – система вентиляції пальника; 7 – каскад чавунних колосників пальника; 8 – камера допалювання; 9 – оглядовий люк зони горіння; 10 – люк ревізії камери допалювання; 11 – люки ревізії теплообмінника; 12 – утеплення корпусу сендвіч-панелями; 13 – теплообмінник

Таблиця 1.2.

Паливні характеристики теплогенераторів NET

Показник	NET 350	NET 700	NET 1400	NET 2000	NET 2500
Види палива	Пелета, тріска				
Вимоги до тріски	Розмір 30...50мм, вологість матеріалу до 40%				
Витрата палива при номінальній потужності для <i>пелети</i> , кг/годину, до	120	230	450	650	800
Витрата палива при номінальній потужності для <i>тріски</i> , м³/годину, до	1	2	3	4	5
Витрата тріски на 1 тн%, м³	0,022				
Собівартість тріски для сушки 1 тн% (для кукурудзи) в цінах 2024 р., грн.	15,4				

Основні технічні характеристики теплогенераторів NET

Показник	NET 350	NET 700	NET 1400	NET 2000	NET 2500
Продуктивність по теплу, кВт	80-400	175-800	350-1550	500-2200	500-2700
Вид теплоносія	Повітря				
Температура теплоносія, °C	До 125				
Продуктивність системи подачі повітря, м³/год., до	15000	30000	60000	85000	120000
Встановлена потужність електрообладнання, кВт	7,4	13,5	23,2	32,7	32,7
Площа теплообміну, м²	43	80	150	230	284
Вага теплогенератора, т	2,8	4,4	7,9	11,2	12,7
Габаритні розміри: висота, м	2,3	2,3	2,8	2,8	2,8
ширина, м	6,5	6,5	8,0	8,5	8,5
довжина, м	4,0	5,0	5,0	6,0	7,0
Вид теплоізоляції	Нержавіючі сендвіч-панелі з базальтовою ватою 50мм				
Наявність іскровловлювачів	За замовленням			Наявні	
Комплектування теплогенератора	Теплообмінник, палиник, бункер пального, кабельна продукція, шафа керування			Теплообмінник, палиник, бункер пального, іскроуловлювач димаря, кабельна продукція, шафа керування	

Теплогенераторам NET характерні такі переваги:

- завдяки роботі на трісці та пелеті мають найнижчу собівартість витрат на паливо, оскільки дрова – найдоступніший на сьогоднішній день вид палива, відходи переробки завжди доступні у великій кількості;
- конструкція повноцінного пластинчатого теплообмінника повністю виключає контакт зерна з топковим газами та продуктами горіння;
- працюють без втрати потужності до температури –5°C;
- перевірені часом технології та якісні європейські комплектуючі гарантують надійну тривалу роботу;
- для зберігання твердопаливних елементів потрібна мінімальна кількість вільного простору.

1.5. Функціональна схема автоматизації системи керування шахтною зерносушаркою

У моїй магістерській кваліфікаційній роботі розглядається шахтна зерносушарка французької компанії CFCAi моделі LAW SBC-8LE (рис. 1.10).



Рис. 1.10. Шахтна зерносушарка LAW типу SBC-LE

Зерносушарки цього модельного ряду відрізняються економічністю, точно розрахованими аеродинамічними характеристиками, повну теплоізоляцію, заслінки проти пилу, повністю закриту зону нагріву, драбини та майданчики для технічного обслуговування та ін. Зерносушарки виготовляються з нержавіючої сталі із спеціальним міцним алюмоцинковим покриттям (стійкість корозії перевищує у 5 разів по відношенню над звичайним оцинкованим покриттям). Технічні характеристики деяких зерносушарок модельного ряду LAW SBC-LE наведена у таблиці 1.4 [9].

Технічні характеристики зерносушарок LAW SBC-LE

Параметр	Модель сушарки				
	SBC 8LE	SBC 10LE	SBC 15LE	SBC 20LE	SBC 24LE
Загальна висота сушарки, мм	11328	13093	18400	22816	26352
Ширина сушарки, мм	3894	3894	3894	3894	3894
Довжина сушарки, мм	8002	8002	8482	9496	9496
Теплова потужність пальника, кВт	1x3700	1x3700	1x4600	2x3700	2x3700
Потужність вентилятора зон нагріву і сушіння, кВт	1x15,0	1x22,0	2x15,0	2x22,0	3x18,5
Потужність вентилятора зони охолодження, кВт	1x9,0	1x11,0	1x18,5	2x9,0	2x18,5
Об'єм сушарки, м ³	44,6	54,0	83,0	106,4	125,1
Продуктивність, (пшениця, 18-14%, 90°C), т/год.	22,0	29,0	45,0	62,0	78,0

Виходячи з технологічних вимог до процесу сушіння зерна в шахтній зерносушарці необхідно забезпечити контроль та керування наступними параметрами:

- рівень зерна у надсушильному бункері (для забезпечення рівномірного стабільного завантаження зерна, запобігання пересипання зерна або роботи сушарки при недовантаженій шахті);
- температура та вологість зерна, що подається у надсушильний бункер;

- температуру агента сушіння (запобігання роботи шахти "в холосту": прогону зернової маси без агенту сушіння, або при відхиленні роботи теплогенератора від номінального режиму);
- температуру зерна в зоні сушіння (для запобігання його перегріву);
- температуру і вологість зерна на виході з сушарки (вологість на виході як кінцевий результат сушіння; температура зерна – контроль системи охолодження зерна);
- керування завантажувальною та вивантажувальною норіями;
- керування розвантажувальним шнеком, чим власне і регулюється час знаходження зернової маси у шатній сушарці.

Функціональна схема автоматизації системи керування шахтною зерносушаркою зображена на рис. 1.11.

Як пристрій керування згідно із завданням на магістерську роботу передбачається використати програмований контролер ARDUINO.

Таким чином, реалізується наступна структура керування процесом сушіння зерна у шахтній зерносушарці (рис. 1.12).

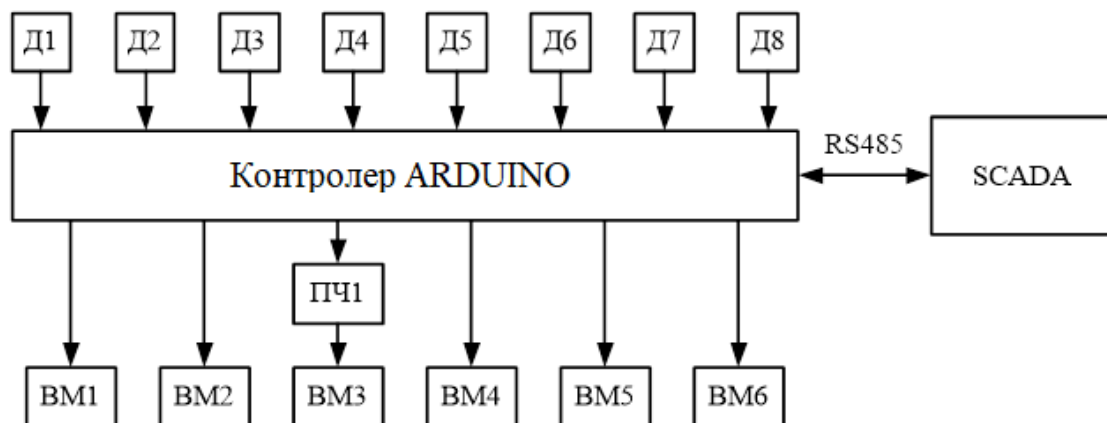


Рис. 1.12. Структура комп'ютерно-інтегрованої САК шахтною зерносушаркою

На рис. 1.12 прийняті наступні позначення, що відповідають функціональній схемі автоматизації, (таблиця 1.4.)

Специфікація умовних позначень елементів автоматизації

Позначення на схемі (рис. 3.2)	Функціональний код за ДСТУ (рис. 3.1)	Опис та технологічна роль елемента
Д1	LE (1-1)	Давач верхнього граничного рівня зерна в надсушильному бункері
Д2	LE (1-2)	Давач нижнього граничного рівня зерна в надсушильному бункері
Д3	TE (1-3)	Давач первинного вимірювання температури зерна в надсушильному бункері
Д4	ME (1-4)	Давач первинного вимірювання вологості зерна в надсушильному бункері
Д5	TE (1-5)	Давач температури агента сушіння (теплоносія)
Д6	TE (1-6)	Давач температури зернового матеріалу в зоні термообробки (сушіння)
Д7	TE (1-7)	Давач фінішного контролю температури зерна на виході з шахти
Д8	ME (1-8)	Давач фінішного контролю вологості вивантажуваного зерна
ВМ1	-	Електродвигун приводу відцентрового вентилятора подачі агента сушіння
ВМ2	-	Електродвигун приводу вентилятора подачі охолоджувального повітря з контуром часткової рекуперації тепла в зону сушіння
ВМ3	-	Електродвигун приводу розвантажувального шнека
ПЧ1	SIC (1-14)	Перетворювач частоти для динамічного регулювання експозиції сушіння
ВМ4	-	Електродвигун приводу завантажувальної дії
ВМ5	-	Електродвигун приводу вивантажувальної дії

Алгоритм функціонування системи керування наступний.

Реалізація технологічного процесу в контролері Arduino здійснюється за дискретно-логічним алгоритмом, що містить такі послідовні етапи:

Етап 1. Ініціалізація системи.

Ініціалізація та запуск виконання керуючої програми в пам'яті контролера Arduino. Перевірка вихідного стану давачів.

Етап 2 (тривалість 10 хв.). Попереднє вентилявання.

Активація електроприводів відцентрових вентиляторів ВМ1 (подача теплоносія) та ВМ2 (подача атмосферного повітря в зону охолодження) для продувки конструктивних каналів шахти. Тривалість етапу становить 10 хв.

Етап 3. Завантаження шахти.

Комутація контролером Arduino реле для запуску електродвигуна ВМ4 завантажувальної норії. За наявності сигналу від давача верхнього рівня Д1 (LE 1-1) ініціюється процес гравітаційного заповнення робочих секцій сушильної шахти.

Етап 4. Генерація теплового потоку. Синхронно із завантаженням сировини здійснюється запуск теплогенератора. Агент сушіння спрямовується у технологічні зони нагріву та термообробки шахти.

Етап 5. (Затримка 30 хв.). Запуск рециркуляції.

Із часовою затримкою у 30 хвилин після початку нагріву контролер Arduino активує електродвигун ВМ3 розвантажувального шнека. Зернова маса подається на рециркуляційний контур перемикача потоків (ВМ5).

Етап 6. Моніторинг та частотна корекція.

Поточні значення температури та вологості безперервно транслюються з давачів ДЗ–Д8 до входів контролера. Керування експозицією сушіння здійснюється за зворотнім зв'язком шляхом зміни вихідної частоти ПЧ1 (SIC 1-14), що корегує кутову швидкість вала двигуна ВМ3 розвантажувального шнека.

Етап 7. Рециркуляційний цикл.

Транспортування зернового матеріалу через рециркуляційну норію назад до завантажувального елемента (ВМ4). Контур замикається і функціонує в такому режимі до моменту досягнення кондиційного рівня вологості на виході (контроль за давачем Д8).

Етап 8. Переведення у режим вивантаження.

У разі фіксації цільового значення вологості за давачем Д8 (МЕ 1-8), контролер Arduino видає команду на перемикання виконавчого механізму ВМ5 у положення вивантаження готової продукції з одночасним пуском вивантажувальної норії ВМ6. Електродвигун ВМ4 вимикається із затримкою у 2 хвилини для повної зачистки короба норії від залишків матеріалу. Процес вивантаження триває до моменту спрацювання давача нижнього рівня Д2 (LE 1-2) з фінальною затримкою 2 хвилини на повне спорожнення агрегату.

Етап 9. Технологічний зупин.

Після завершення повного вивантаження матеріалу контролер деактивує теплогенератор та вимикає двигуни вентиляторів та шнека (ВМ1, ВМ2, ВМ3). Транспортні лінії вивантаження (ВМ5, ВМ6) зупиняються через 2 хвилини після цього. Повний цикл сушіння завершено, система переходить у стан очікування.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА У ШАХТНІЙ ЗЕРНОСУШАРЦІ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

2.1. Експериментальні дослідження шахтної прямооточної зерносушарки

Моделювання та розробка систем автоматичного керування засновані на інформації про статичні та динамічні характеристики об'єктів керування. З метою її отримання виконано експериментальні дослідження шахтної прямооточної зерносушарки LAW SBC-8LE.

Для вимірювання температури та вологості зерна сушильну камеру забезпечили перетворювачами температури та пробовідбірниками, які розмістили у семи зонах по її висоті. Підтримка температури теплоносія та експозиції сушіння на постійному рівні здійснили автоматичними регуляторами [12].

Методом типових збурень отримали реалізації перехідних процесів по каналів керуючих впливів сушильної камери (рис. 2.1). Прийнято такі позначення: W_0 , W – початкова та кінцева вологість зерна; ϑ_{30} та ϑ_3 – початкова та кінцева температура зерна; ϑ_T – температура теплоносія; ω – частота коливань вивантажувального апарату.

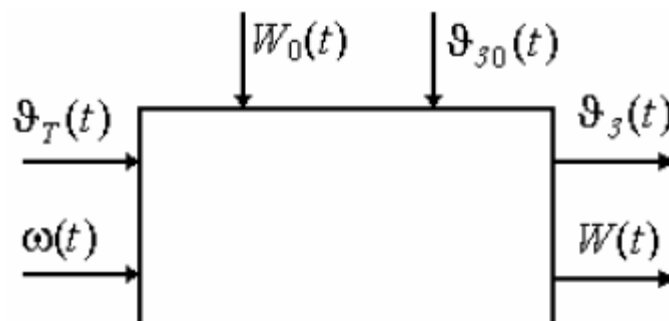


Рис. 2.1. Параметрична схема сушильної камери

На рис. 2.2 представлений вид перехідного процесу каналом $\vartheta_T - W$ і показаний результат його апроксимації рівняннями динамічних ланок першого та другого порядку. Похибку апроксимації оцінили за максимальним відносним відхиленням експериментальних даних від модельованих. Для ланки першого порядку вона становила 18 – 22%, для ланки другого порядку – 6 – 9%. Подальше ускладнення апроксимуючого виразу не призвело до суттєвого зменшення похибки, тому рівняння ланки другого порядку із запізненням використовували як основний апроксимуючий вираз.

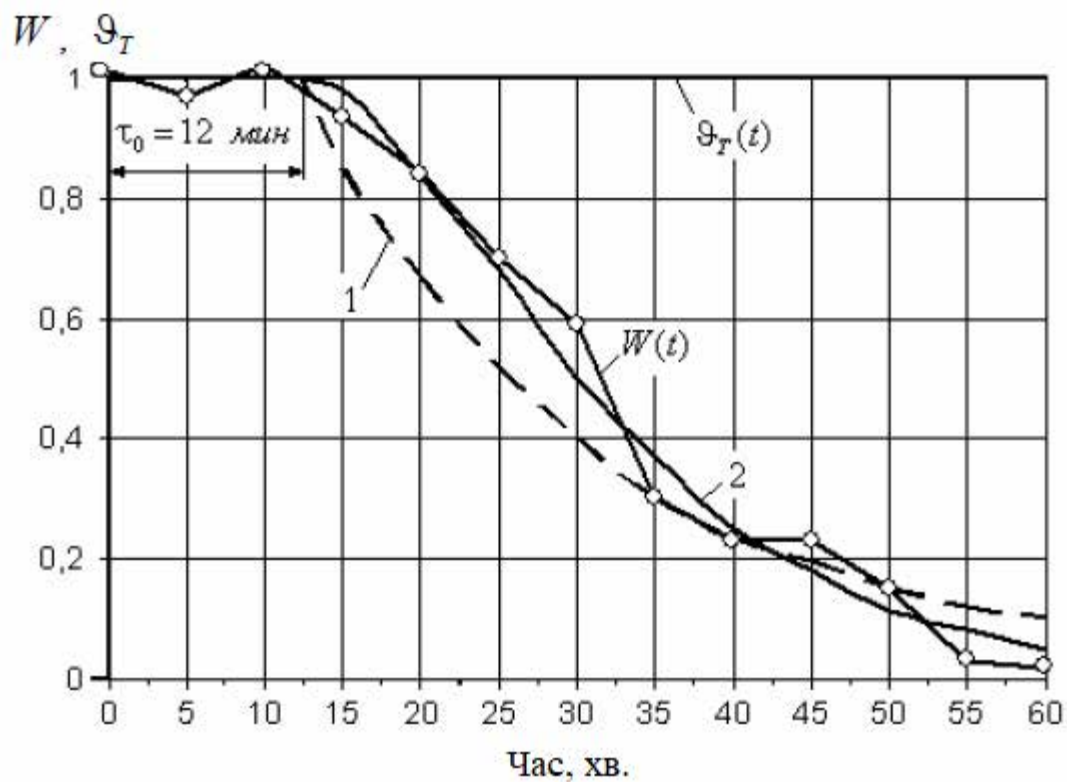


Рис. 2.2. Перехідний процес по каналу $\vartheta_T - W$ для 15 ряду коробів та його апроксимація рівняннями динамічних ланок:
1 – першого порядку; 2 – другого порядку

Динамічні властивості по каналам передачі збурюючих впливів $W_0 - W$, $W_0 - \vartheta_T$, $\vartheta_{30} - \vartheta_3$ апроксимували рівнянням підсилювальної динамічної ланки з чистим запізненням. В результаті досліджень визначили вид та

значення параметрів передатних функцій сушильної камери по прямим та перехресним каналах передачі керуючих та збурюючих впливів (табл. 2.1).

Таблиця 2.1.

Вид та значення параметрів передатних функцій сушильної камери
по прямим та перехресним каналах передачі

Канал передачі сигналу	Передатна функція	
	2 - 4 ряд коробів	6 - 15 ряд коробів
$\vartheta_T - \vartheta_{\zeta}$	$\frac{K_{\vartheta_T \vartheta_{\zeta}} \cdot e^{-\tau_{01} \cdot p}}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$	$\frac{K_{\vartheta_T \vartheta_{\zeta}} \cdot e^{-\tau_{01} \cdot p}}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$
$\omega - W$	$\frac{K_{\omega W} \cdot e^{-\tau_{02} \cdot p}}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$	$\frac{K_{\omega W} \cdot e^{-\tau_{02} \cdot p}}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$
$\vartheta_T - W$	$\frac{K_{\vartheta_T W} \cdot e^{-\tau_{03} \cdot p}}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$	$\frac{K_{\vartheta_T W} \cdot e^{-\tau_{03} \cdot p}}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$
$\omega - \vartheta_{\zeta}$	$\frac{K_{\omega \vartheta_{\zeta}}}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$	$\frac{K_{\omega \vartheta_{\zeta}} (T'' \cdot p^2 + T' \cdot p + 1)}{T_3^3 \cdot p^3 + T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$
$W_0 - \vartheta_{\zeta}$	$K_{W_0 \vartheta_{\zeta}} \cdot e^{-\tau \cdot p}$	$K_{W_0 \vartheta_{\zeta}} \cdot e^{-\tau \cdot p}$
$W_0 - W$	$K_{W_0 W} \cdot e^{-\tau \cdot p}$	$K_{W_0 W} \cdot e^{-\tau \cdot p}$
$\vartheta_{\zeta 0} - \vartheta_{\zeta}$	$K_{\vartheta_{\zeta 0} \vartheta_{\zeta}} \cdot e^{-\tau \cdot p}$	—

З даних таблиці випливає, що динамічні властивості різних за висотою сушильної камери зон описуються передатними функціями різного виду. Така відмінність динамічної структури об'єкта за висотою обумовлена якісними відмінностями процесів, які протікають у зазначених зонах. Наведені дані відображають багатозв'язковість сушильної камери як об'єкта керування та наявність у ній внутрішніх перехресних зв'язків між окремими каналами передачі сигналів. Межі зміни параметрів передатних функцій представлені у табл. 2.2, а статичних коефіцієнтів передачі у табл. 2.3.

Встановлено, що постійні часу передатних функцій змінюються по висоті сушильної камери, що характеризує її як розподілений динамічний об'єкт. На рис. 2.3 представлені залежності зміни постійних часу для каналу $\vartheta_T - \vartheta_{\zeta}$. З протікання залежностей видно, що у напрямку збільшення ряду

коробів постійні часу зростають. Цим підтверджується їхня залежність від експозиції сушіння.

Таблиця 2.2.

Постійні часу передатних функцій

Постійна часу	Межі зміни по каналам передачі, хв.			
	$\vartheta_T - W$	$\vartheta_T - \vartheta_3$	$\omega - W$	$\omega - \vartheta_3$
T_1	14,38 – 32,32	10,06 – 19,53	15,9 – 31,39	-25,83 – (-14,24)
T_2	6,66 – 15,36	4,49 – 9,23	6,76 – 15,56	7,69 – 14,39
T_3	–	–	–	-7,98 – (-4,61)
T'	–	–	–	-2,19 – 68,21
T''	–	–	–	69,14 – 42,12
τ_0	11,3 – 12,9	3,7 – 5,1	6,7 – 16,7	–

Таблиця 2.3.

Статичні коефіцієнти передачі

Канал передачі	Одиниця виміру	Межі вимірювання
$\vartheta_T - \vartheta_3$	°C / °C	0,035 – 0,351
$\omega - W$	% / хв. ⁻¹	-0,034 – 0,349
$\vartheta_T - W$	% / °C	0,007 – 0,05
$\omega - \vartheta_3$	°C / хв. ⁻¹	-1,13 – 0,785
$W_0 - \vartheta_3$	°C / %	-1,769 – 1,009
$W_0 - W$	% / %	0,507 – 0,932

Виявлено залежність параметрів передатних функцій від характеристик оброблюваного зернового вороху та режиму сушіння. На рис. 2.3 показано залежність постійних часу від початкової вологості W_0 зерна, а на рис. 2.4 – від частоти ω коливань випускного апарату. З них видно, що більшим значенням W_0 і ω відповідають менші значення постійних часу, що вказує на те, що шар зерна, який є більш вологим і таким, що швидко переміщується, нагрівається швидше. Це пояснюється зменшенням об'ємної теплоємності рухомого шару зерна при збільшенні його вологості та швидкості переміщення сушильною камерою.

Зміна числових значень постійних часу під впливом W_0 і ω у межах їх можливих змін досягає 20% и більше. Між процесами нагрівання та зміни

вологості зерна в сушильній камері помітний зв'язок, враховуючи яку перехідний процес зміни температури ϑ_z зерна при збуренні за температурою ϑ_T теплоносія можна інтерпретувати в такий спосіб, як це зображено на рис. 2.5. Після збурення перехідний процес протікає у два періоди. Перший характеризується інтенсивним підвищенням температури ϑ_z зерна. Швидкість зміни температури в цьому період визначається тільки теплоінерційними властивостями зернового шару, оскільки зміна його вологості W через велику інерційність є незначною і практично не впливає на збільшення температури ϑ_z . Тривалість періоду становить 20-25 хвилин.

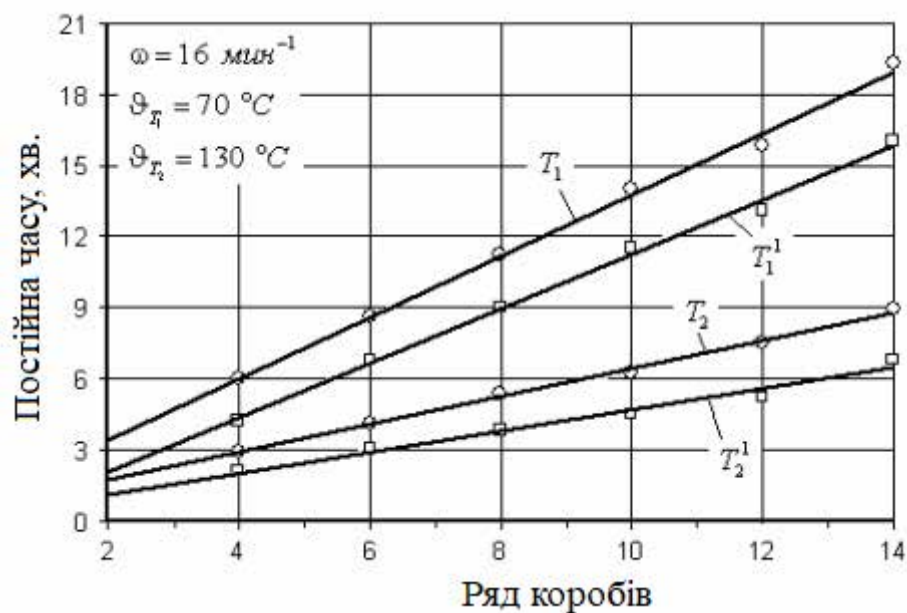


Рис. 2.3. Зміна постійних часу по висоті сушильної камери для каналу $\vartheta_T - \vartheta_z$ при різних значеннях W_0 :

T_1 та T_2 – при $W_0 = 18\%$; T_1^1 та T_2^1 – при $W_0 = 26\%$

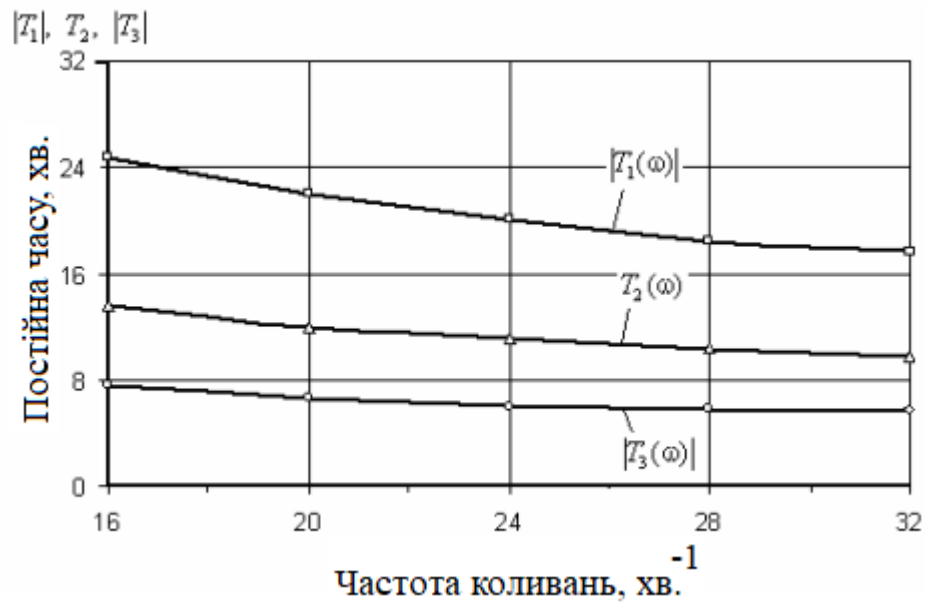


Рис. 2.4. Залежність постійних часу по каналу $\omega - \vartheta_3$ від ω для 15 ряду коробів: $W_0 = 26\%$, $\vartheta_T = 100^\circ\text{C}$

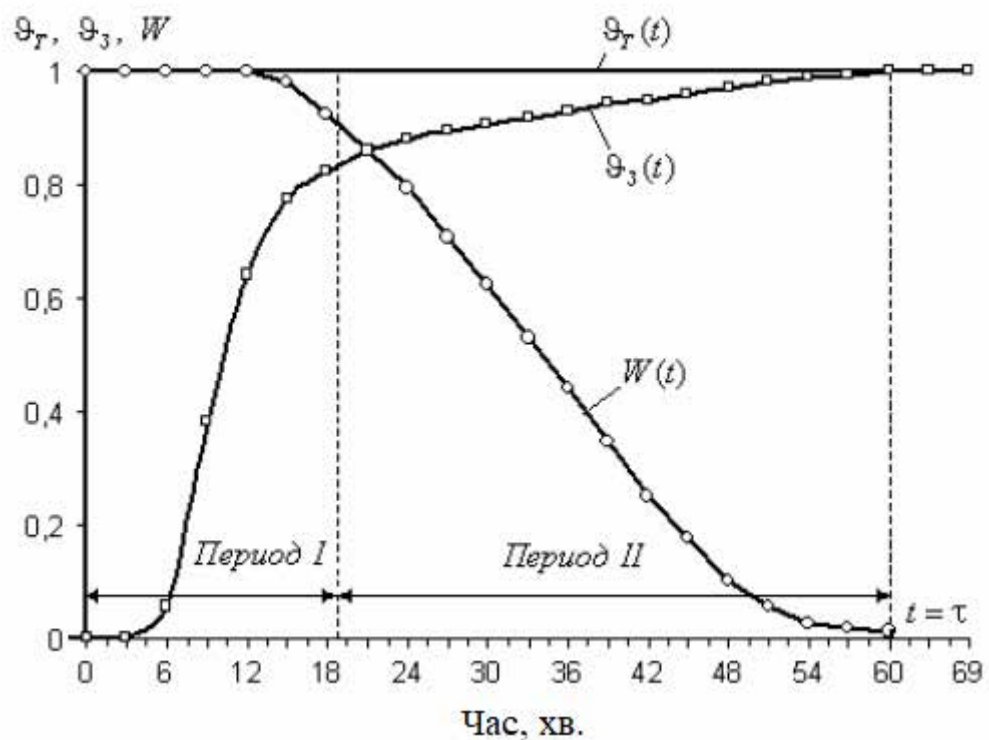


Рис. 2.5. Перехідні процеси по каналам $\vartheta_T - \vartheta_3$, $\vartheta_T - W$, для 15 ряду коробів при $W_0 = 26\%$, $\omega = 24 \text{ хв.}^{-1}$, $\vartheta_{T1} = 70^\circ\text{C}$, $\vartheta_{T2} = 130^\circ\text{C}$

У другому періоді починається інтенсивна зміна вологості W , що призводить до поступового перерозподілу складових теплового балансу процесу сушіння. Частка теплоти, що витрачається на випаровування вологи із зерна, зростає, тому процес його нагріву суттєво сповільнюється.

Подальша зміна температури ϑ_z зерна повністю визначається інерційністю поля його вологовмісту та характером взаємного зв'язку процесів тепло- та масопереносу. Тому, час закінчення перехідних процесів каналами $\vartheta_T - \vartheta_z$, $\vartheta_T - W$ – практично однаковий і визначається *експозицією сушіння* τ .

Для розробки систем автоматичного регулювання температури зерна важливо правильно оцінити інерційні властивості сушильної камери по каналу регулювання $\vartheta_T - \vartheta_z$. Розрахунок регулятора за підвищеними даними веде до зниження швидкодії системи, а безпідставне заниження – до втрати стійкості. Щодо каналу $\vartheta_T - \vartheta_z$, обґрунтованим, з точки зору максимальної швидкодії системи, є вибір постійних часу передатної функції на основі інформації про час згасання перехідних процесів, обумовлених теплоінерційними властивостями зернового шару. На основі отриманих даних постійні часи можна прийняти такими, що змінюються в діапазоні $T_1 = 4,9 \dots 6,1$ хв., $T_2 = 2,3 \dots 3,1$ хв. Причому їх менші значення відповідають великим значенням вологості ($W_0 \geq 22\%$) та швидкостям переміщення ($\omega \geq 24$ хв.⁻¹) зерна по сушильній камері.

Аналіз перехідних процесів (рис. 2.6), по каналу $\omega - \vartheta_z$ також підтверджує існування зв'язку між процесами зміни температури та вологості зерна. При стрибкоподібній зміні ω зміна ϑ_z протікає в *два періоди*.

У *першому періоді* причиною зміни ϑ_z є різка зміна стану рухомого зернового шару. Так збільшення ω веде до розуцільнення та зниження аеродинамічного опору рухомого шару зерна. Це викликає збільшення подачі теплоносія в сушильну камеру і, при незмінності його температури, веде до збільшення кількості теплоти, що підводиться до зерна. Внаслідок цього збільшується його температура. Вологість W зерна через велику інерційність у цьому періоді практично не змінюється і не впливає на процес нагрівання.

Інерційність перехідного процесу каналом $\omega - \vartheta_z$ у першому періоді визначається теплоінерційними властивостями шару зерна. Це припущення підтверджується близькістю тривалостей перших періодів перехідних процесів по каналам $\vartheta_T - \vartheta_z$ (рис. 2.5) і $\omega - \vartheta_z$ (рис. 2.6).

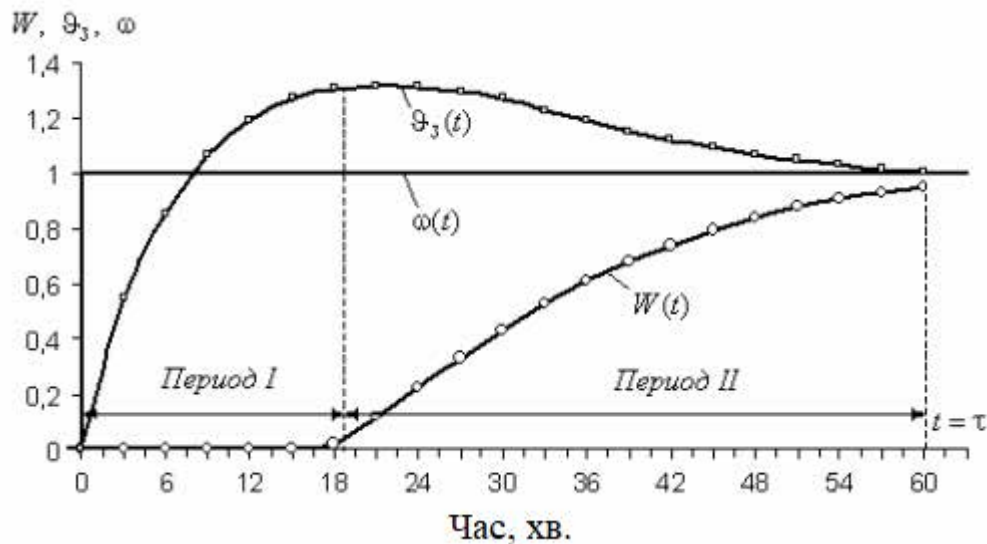


Рис. 2.6. Перехідні процеси по каналам $\omega - W$ та $\omega - \theta_3$ для 10 ряду коробів:
 $W_0 = 22\%$, $\theta_T = 100^\circ\text{C}$, $\omega_1 = 16 \text{ хв.}^{-1}$, $\omega_2 = 32 \text{ хв.}^{-1}$

У другому періоді помітно змінюється вологість W зерна, що призводить до поступового перерозподілу складових теплового балансу процесу сушіння та зміни температури θ_3 зерна. Зі збільшенням вологості температура зерна поступово знижується. Тривалість перехідних процесів по каналам $\omega - W$ та $\omega - \theta_3$ однакова і дорівнює експозиції сушіння τ .

Збільшення частоти ω супроводжується короткочасним підвищенням температури зерна у початковому періоді процесу. Перевищення температури θ_3 для практично використовуваних режимів сушіння може досягати $2...8^\circ\text{C}$ і стати небезпечним для насінневої і продовольчої якості зерна. Причому великі значення перевищень θ_3 відповідають великим значенням вологості W та швидкості (ω) переміщення зерна по сушильній камері.

Істотний вплив на характер перебігу перехідних процесів каналом $\omega - \theta_3$ надає вологість W_0 зерна. На рис. 2.7 представлені перехідні процеси, що відповідають різним значенням вологості W_0 . З їхнього протікання видно, що при високих значеннях вологості ($W_0 > 24\%$) температура зерна, що встановилася в кінці перехідного процесу, може бути вищою за початкову, а при менших ($W_0 < 24\%$) – менше. Це є наслідком знакозмінності статичного коефіцієнта передачі сушильної камери каналом $\omega - \theta_3$ (табл. 2.3).

Неоднозначні припущення температури $\Delta \vartheta_3$ зерна при змінах частоти ω свідчать про неможливість використання змінної ω як керуючого впливу каналу управління температурою зерна в сушильній камері. Динамічні властивості сушильної камери каналом $\omega - \vartheta_3$ апроксимовані рівнянням динамічної ланки третього порядку з похибкою 8-12%.

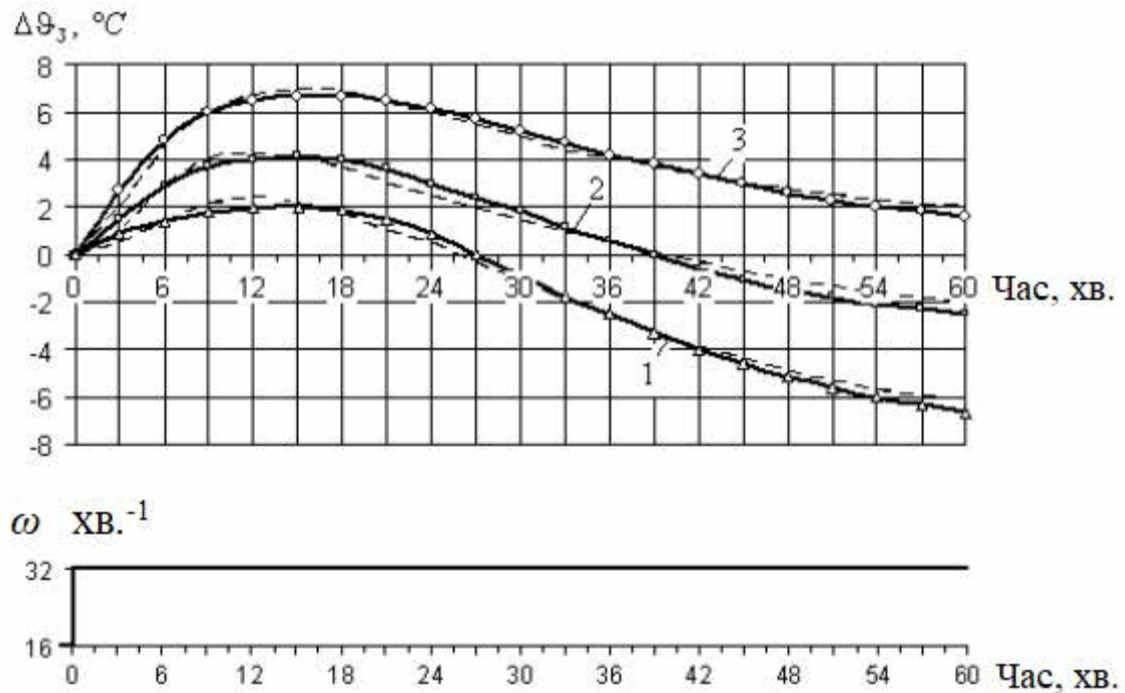


Рис. 2.7. Перехідні процеси по каналу $\omega - \vartheta_3$ для 15-го ряду коробів при різних значеннях W_0 та їх апроксимація рівнянням динамічної ланки третього порядку:

$$\vartheta_T = 100^\circ\text{C}, 1 - W_0 = 18\%; 2 - W_0 = 22\%; 3 - W_0 = 26\%;$$

Таким чином, отримані дані характеризують сушильну камеру як складний розподілений динамічний об'єкт із змінною структурою за висотою та наявністю внутрішніх перехресних зв'язків між каналами передачі сигналів. Параметри її передатних функцій залежать від характеристик зерна та режимів його обробки, а значення постійних часу та часу запізнення підтверджують її значну інерційність як об'єкт управління.

2.2. Розробка математичної моделі об'єкта автоматизації

Процес сушіння поділяється на два етапи. На першому етапі видаляється волога, яку можна розглядати, як випарювання вологи з вільної поверхні. На другому етапі видаляється зв'язана волога. В цей період тиск водяної пари на поверхні матеріалу стає функцією від температури матеріалу і його вологості на поверхні. По табличних даних [13] було отримане рівняння залежності тиску насиченої водяної пари від температури, мм. рт. ст.:

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

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

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

де: 0,622 – відношення мольних мас водяної пари і повітря;

φ - відносна вологість повітря;

Pb – загальний (барометричний) тиск парогазової суміші.

Розглянемо процес сушіння зерна в статичному режимі у вигляді матеріальних і енергетичних балансів. Математична модель сушіння у вигляді «чорного ящика» [13] показана на рис. 2.8.

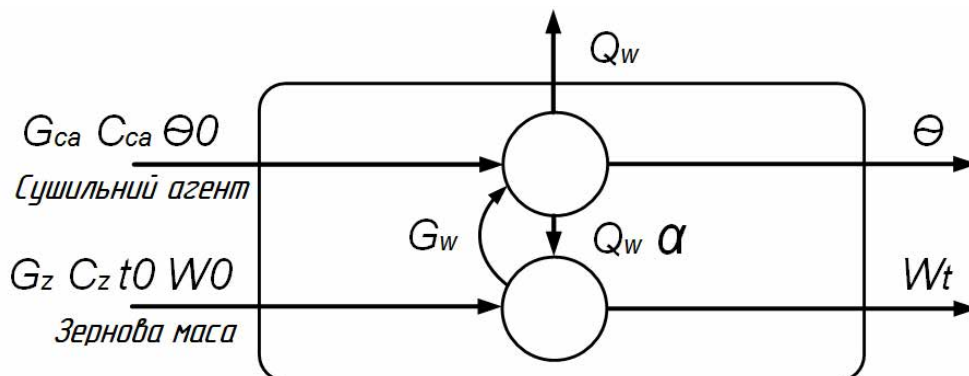


Рис. 2.8. Структурна схема процесу сушіння зерна

В структурній схемі процесу сушіння: G_{ca} , G_z – витрати сушильного агенту і зерна, C_{ca} , C_z – теплоємність сухого повітря і зерна, t_0 і θ_0 – початкові значення температури зерна і сушильного агенту, t і θ – температури цих самих продуктів на виході сушарки, W_0 і W – початковий і кінцевий вологовміст зерна, G_w – випарена волога із зерна, Q_n і Q_w – витрати тепла на нагрівання зерна і випарювання вологи, α – коефіцієнт тепловіддачі від повітря до зерна.

Наведемо рівняння енергетичних балансів по сушильному агенту, гарячому повітрю і зерну. Вважаємо, що тепло нагрітого повітря витрачається на підігрівання зерна і випарювання вологи з нього:

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

Матеріальний баланс по зерну:

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

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

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

Швидкість сушіння тоді матиме вигляд:

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

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

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

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

де: R – визначальний геометричний розмір зернини, яке висушуємо, м;

β – коефіцієнт зовнішнього вологообміну, м/с.;

a_m – коефіцієнт потенціалопровідності масопереносу, м²/с.

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

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

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

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

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

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

Розглянемо процес сушіння в сушарці безперервної дії. Математична модель сушарки буде спрощеною і не враховувати першого етапу сушіння, етапу нагрівання зерна. Коефіцієнт тепловіддачі від сушильного агенту до зерна також буде вважатися постійною величиною. Значення змінних в

рівняннях для визначення коефіцієнту сушіння K , рівноважного вологовмісту Wp використані по даних вчених, які вивчали процес сушіння зерна.

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

$$Wp = 0.01 \cdot \left[\frac{|\ln(1 - \varphi)|}{5.47 \cdot 10^{-6} \cdot (t + 273)} \right]^{0.435} \quad (2.9)$$

Значення відносної вологості повітря знаходимо з рівняння:

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

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

$$K = \frac{5.55 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 0.00796 \cdot t}{3600} \quad (2.11)$$

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

Приведемо рівняння:

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

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

$$\frac{dW}{d\tau} = -K \cdot (W - Wp) \quad (2.13)$$

де σ – питома поверхня зерна m^2/kg ;

α – коефіцієнт тепловіддачі від повітря до зерна, $Вт/m^2$ град;

r – теплота пароутворення, $Дж/kg$.

2.3. Розробка та дослідження імітаційної моделі об'єкта автоматизації із використанням математичних пакетів MATLAB та MathCad

Вихідними даними для імітаційного моделювання процесу сушіння зерна є наступні:

- витрати зерна на сушіння складають $G_z = 2,1$ кг/с;
- температура зерна $t_0 = 23$ °С;
- теплоємність зерна $C_z = 2300$ Дж/(кг °С);
- початковий вологовміст $W_0 = 0,175$.

Сушильний агент, гаряче повітря, подається в кількості $G_{ca} = 1,5$ кг/с з температурою $\theta_0 = 70$ °С, і теплоємністю $C_{ca} = 1150$ Дж/(кг °С).

Прийнято, що питома поверхня зерна $\sigma = 2,47$ м²/кг [13];

- вологовміст пароводяної суміші в сушарці $dn = 0,006$ кг пари/кг сухого повітря,

- теплота пароутворення $r = 2500 \cdot 10^3$ Дж/кг;
- барометричний тиск $P_b = 750$ мм рт. ст.;
- коефіцієнт тепловіддачі від повітря до зерна $\alpha = 15,3$ Вт/(м² °С).

Розробимо модель в середовищі Simulink MATLAB. Так як модель достатньо громіздка, розіб'ємо її на дві частини. В основній частині (рис. 2.9) розмістимо рівняння, які представляють із себе систему диференціальних рівнянь і розраховують температуру зерна, температуру повітря і вологовміст зерна.

Для допоміжних рівнянь, які рахують тиск насиченої водяної пари, відносну вологість повітря, рівноважний вологовміст і коефіцієнт сушіння створимо підсистему (рис. 2.10).

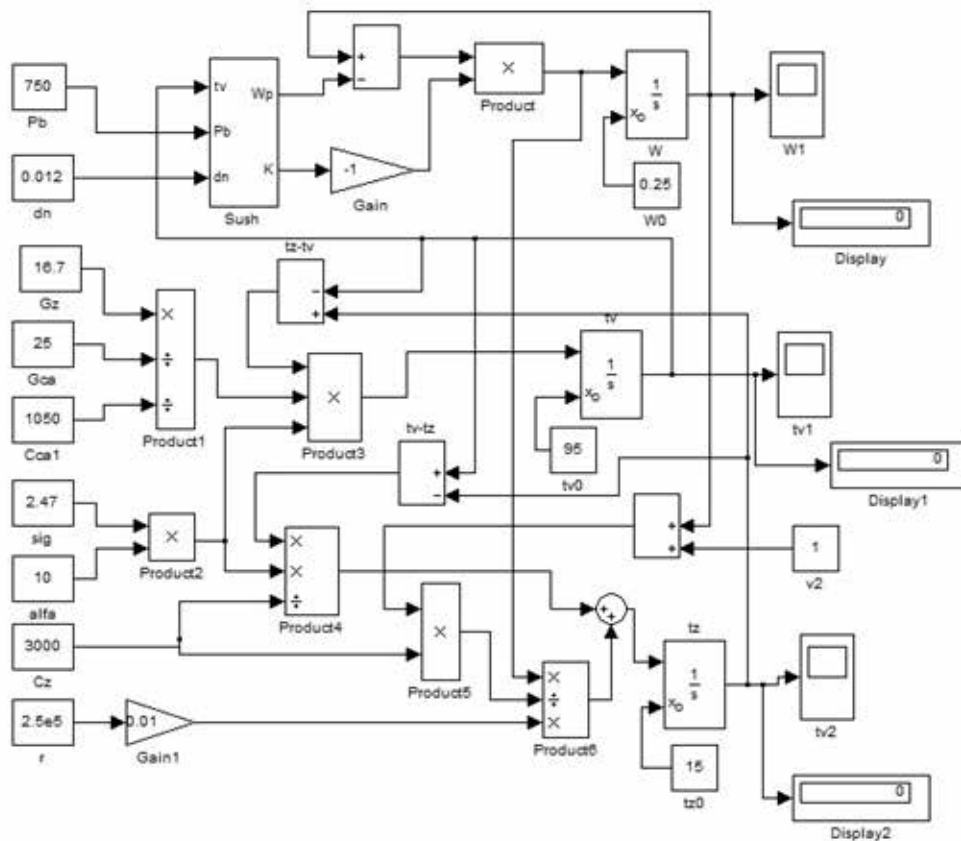


Рис. 2.9. Схема імітаційної моделі сушарки у середовищі Simulink MATLAB

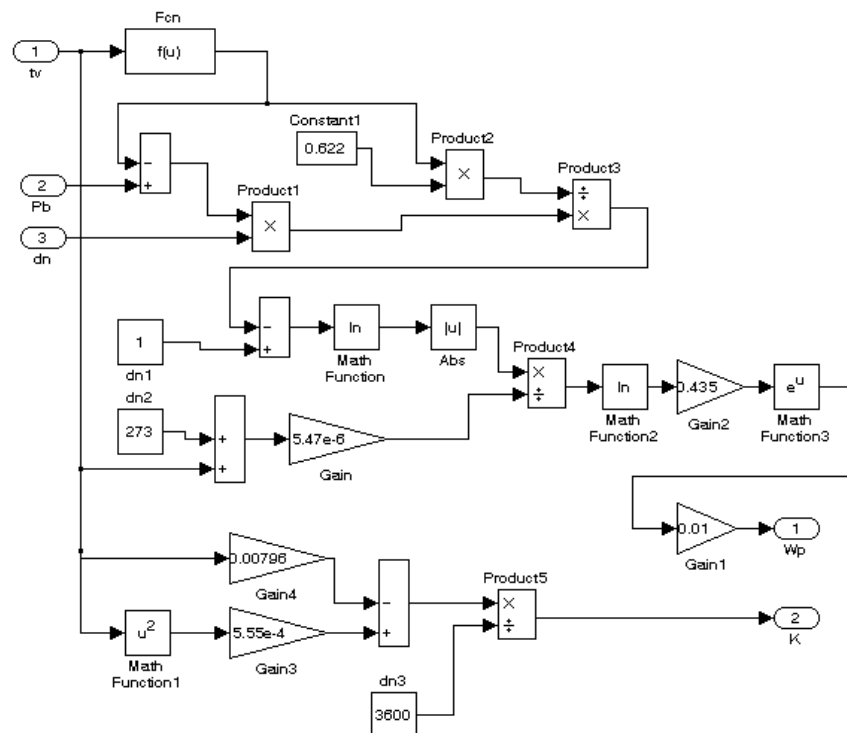


Рис. 2.10. Імітаційна модель підсистеми моделі сушарки в середовищі Matlab Simulink

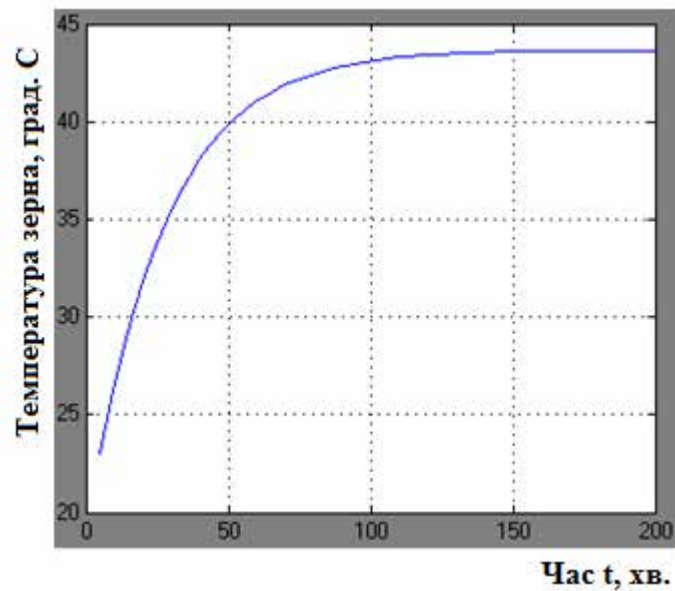


Рис. 2.11. Зміна температури зерна під час сушіння

В результаті проведеної операції отримаємо розгінні криві температур зерна (рис. 2.11) і сушильного агента під час сушіння (рис. 2.12) і криву зміни вологовмісту зерна (рис. 2.13).

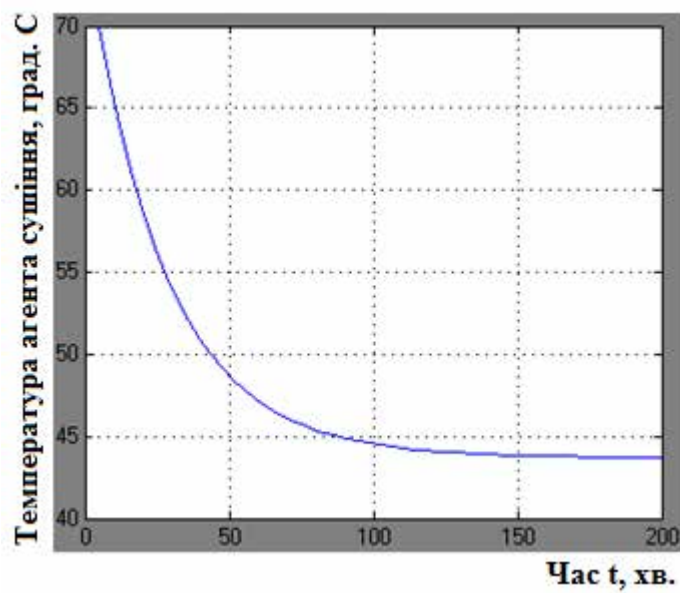


Рис. 2.12. Зміна температури агента сушіння

Дослідимо вплив витрат вологого зерна на температуру сушильного агента, вологовміст на виході при постійному початковому вологовмісті $W_0=0,175$ та зміну температури сушильного агента під час сушіння при постійній витраті вологого зерна $G_z = 2,1$ кг/с.

Температура сушильного агента змінюватиметься у межах від 50°C до 83°C.

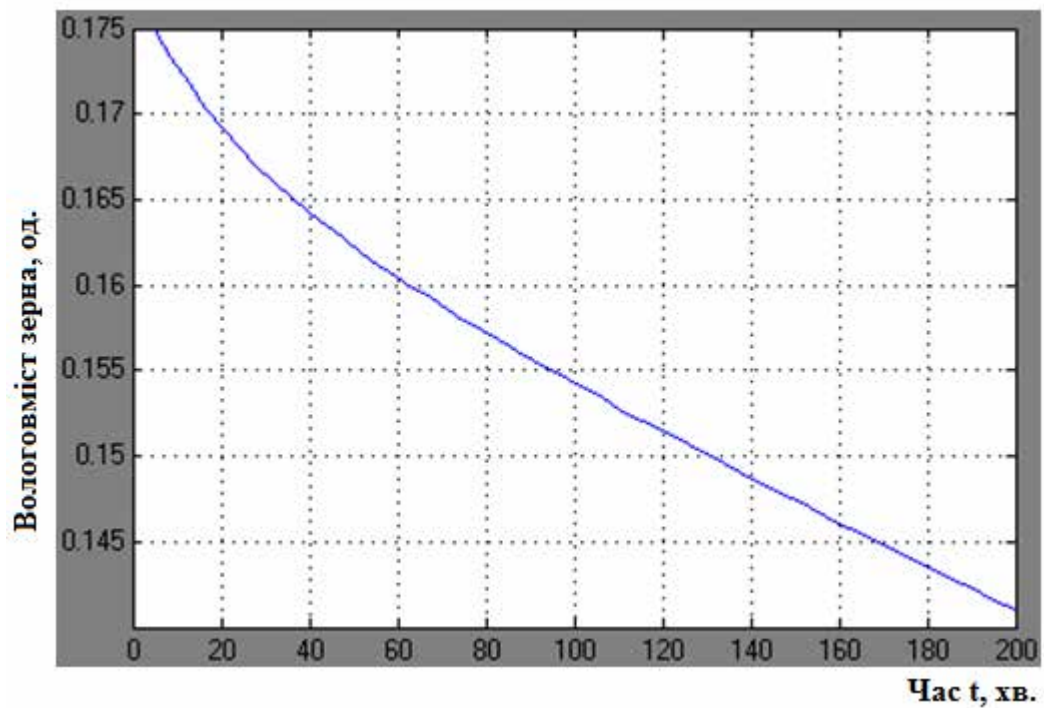


Рис. 2.13. Зміна вологовмісту зерна під час його сушіння

Дані для побудови графіків отримані за допомогою імітаційної моделі (блоки Display, Display1, Display2) (рис. 2.9).

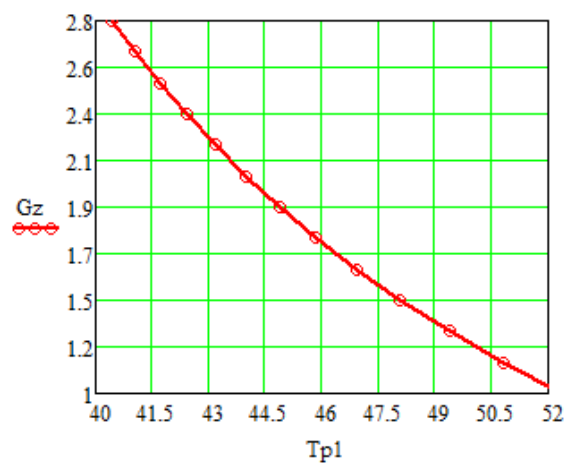


Рис. 2.14. Вплив витрат вологого зерна на температуру сушильного агента

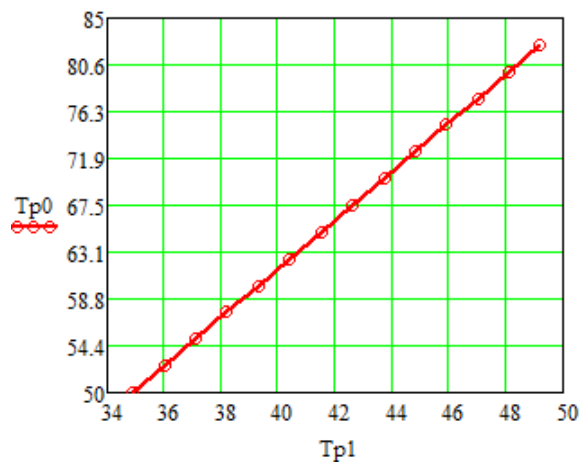


Рис. 2.15. Зміна температури сушильного агента під час сушіння при постійній витраті вологого зерна $G_z = 2,1$ кг/с

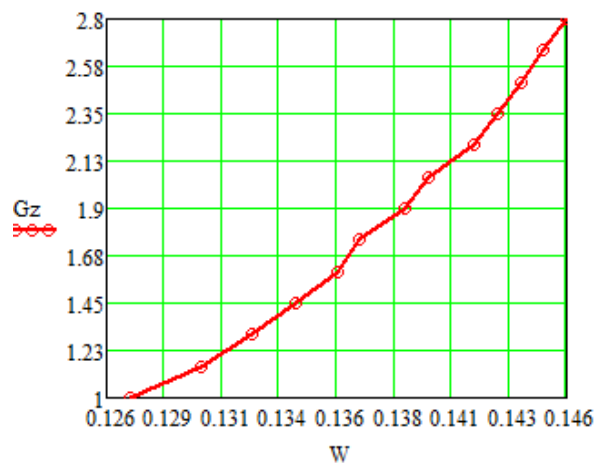


Рис. 2.16. Вплив витрат вологого зерна на вологовміст на виході при постійному початковому вологовмісті $W_0 = 0,175$

При доведенні температури зерна від 15°C до майже граничного допустимого значення 54°C (при граничному значенні $55\dots 60$) зміна температури зерна і агента сушіння виглядають наступним чином (рис. 2.17).

Провівши дане дослідження, можна зробити певні висновки щодо впливу збурюючих факторів на об'єкт дослідження. З рис. 2.14 бачимо, що при збільшенні витрат вологого зерна температура сушильного агента значно знижується, при цьому вологовміст на виході буде збільшуватись. Можемо керуватися цими параметрами для підтримання необхідної температури сушіння і вологовмісту на виході, оскільки для зерна пшениці, початковий вологовміст якої становить $17,5\%$ ($W_0 = 0,175$), початкова температура зерна

23°C, щоб забезпечити необхідну вологість на виході, а саме 14%, потрібно встановити витрату зерна на виході з шахти на рівні $G_z = 2,1$ кг/с. Обмежимося допустимою для даної культури температурою теплоносія на рівні 70°C. В результаті матимемо вологовміст зерна на виході $W_0 = 0,141$, при цьому нагрівання зерна буде знаходитись у межах допустимої норми $T_z=43,4^\circ\text{C}$.

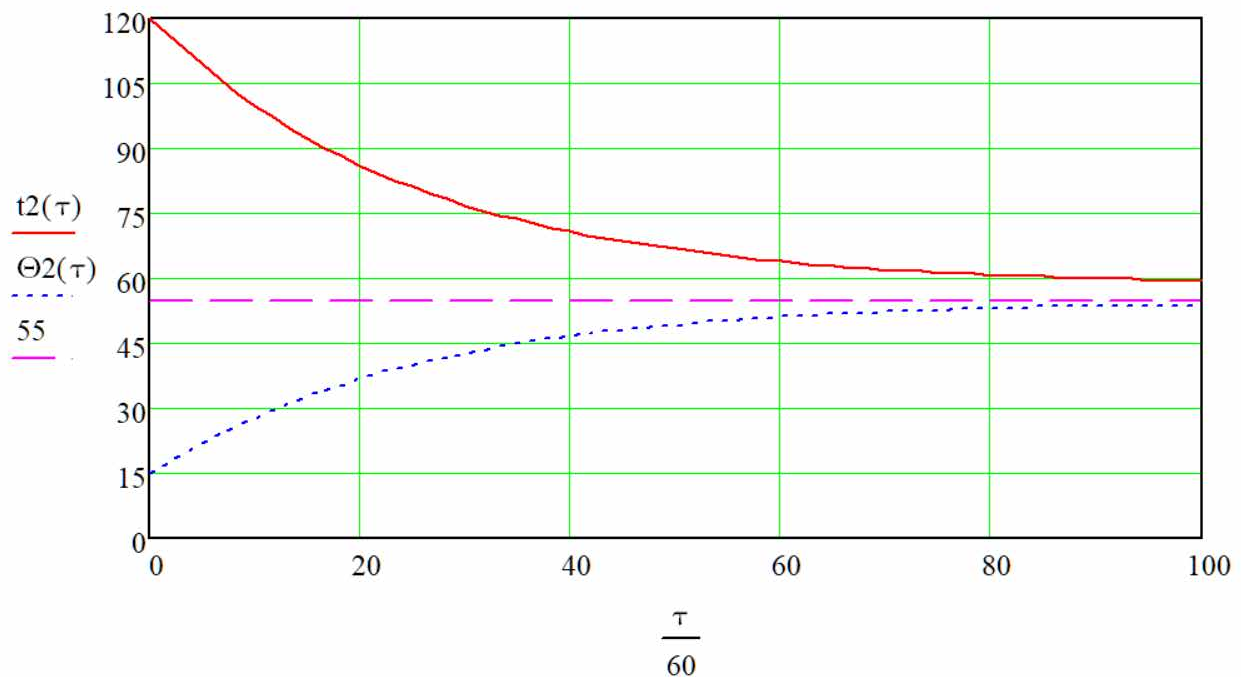


Рис. 2.17. Зміна температури агента сушіння у шахтній зерносушарці при нагріванні зерна від 15°C до 54°C

2.4. Визначення передатної функції шахтної зерносушарки для каналу керування температурою зерна

Для визначення динамічних характеристик шахтної зерносушарки як об'єкта управління була використана його розгінна характеристика, яка представляє собою залежність температури зернової маси від часу, при ступінчастій зміні керуючої дії: зменшенні експозиції (тривалості) сушіння за

рахунок збільшення витрати зерна на виході з сушарки. Розгінна характеристика побудована за даними (рис. 2.17). При цьому час із хвилин переведено у секунди.

Для визначення передатної функції шахтної зерносушарки для каналу керування був використаний графічний метод [14,15].

Для цього розгінна характеристика була пронормована за виразом

$$\frac{y(t_i) - y(t_0)}{y(\infty) - y(t_0)} = \frac{y(t_i) - 15}{54 - 15} \quad (2.14)$$

Результати розрахунку занесені в таблицю (Додаток Б1), нормована розгінна характеристика шахтної зерносушарки для каналу керування зображена на рис. 2.18.

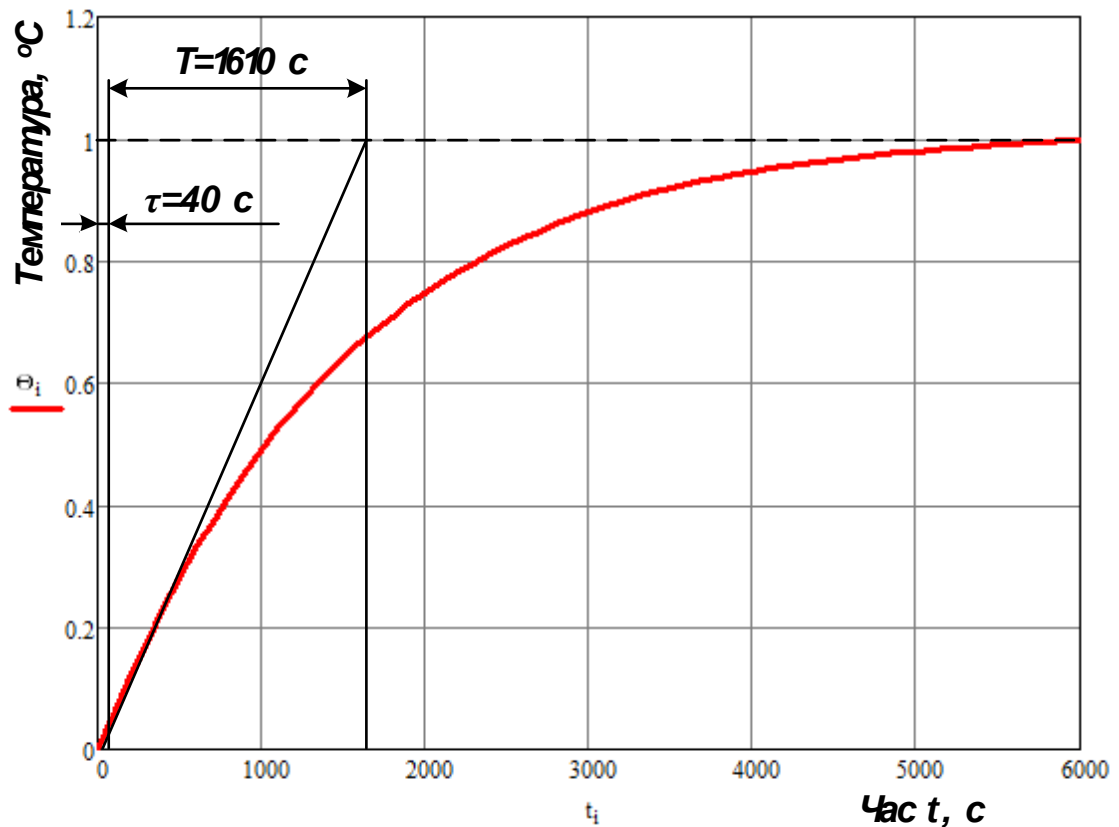


Рис. 2.18. Нормована розгінна характеристика шахтної зерносушарки для каналу керування температурою сушіння зерна

Для статичних об'єктів передатна функція, отримана за кривою розгону, представляється у вигляді інерційної ланки із запізненням

$$W(s) = \frac{k_{oy} \cdot e^{-\tau_{oy} \cdot s}}{T_{oy} \cdot s + 1}, \quad (2.15)$$

де k_{oy} - коефіцієнт передачі об'єкта;

T_{oy} - постійна часу об'єкта, що характеризує його інерційність, с;

τ_{oy} - час чистого запізнення, с.

Чисельне значення постійної часу T_{oy} та часу запізнення τ_{oy} об'єкта знаходять за допомогою дотичної, яку проводять до точки перегину розгінної характеристики (рис. 2.18). Точка перегину відповідає середині відрізка часу, на якому спостерігається максимальний приріст ординати кривої розгону.

Коефіцієнт передачі об'єкта керування визначаємо за формулою

$$k_{oy} = \frac{T_K - T_{\Pi}}{L_K - L_{\Pi}}, \quad (2.16)$$

де T_K та T_{Π} – відповідно кінцева та початкова температура повітря зерна при сушінні у шахтній зерносушарці, °С;

L_K та L_{Π} – відповідно кінцеве та початкове відносне значення продуктивності системи розвантаження шахтної зерносушарки, %.

$$T_K = 54^{\circ}\text{C}, T_{\Pi} = 15^{\circ}\text{C}; \quad L_K = 100\%, L_{\Pi} = 0\%.$$

$$k_{oy} = \frac{54 - 15}{100 - 0} = \frac{39}{100} = 0,39 \left[\frac{^{\circ}\text{C}}{\% \text{ продуктивн.}} \right]$$

Значення постійної часу та часу чистого запізнення визначені з нормованої розгінної характеристики. Час чистого запізнення визначається часом, що необхідний на проходження повітря повітропроводом шахтної зерносушарки та початку сушіння.

$$T_{oy} = 1610 \text{ с}, \quad \tau_{oy} = 40 \text{ с}.$$

Отримаємо передатну функцію бункера для каналу керування температурою сушіння

$$W_{oy}(s) = \frac{0,39 \cdot e^{-40 \cdot s}}{1610 \cdot s + 1}.$$

РОЗДІЛ 3

ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИКИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Згідно з функціональною схемою автоматизації система керування складається з:

- програмованого контролера ARDUINO, який отримує інформацію від давачів рівня (верхній та нижній) зерна у надсушильному бункері, давачів температури та вологості у різних зонах шахтної зерносушарки відповідно до технологічних вимог процесу сушіння (докладно розглянуто у п.1.5), передає дані на ПК, який у свою чергу формує сигнали керування відповідним виконавчим механізмам (частотним перетворювачем та електродвигунами);
- перетворювача частоти, який за алгоритмом здійснює безпосереднє керування швидкістю обертання валу електродвигуна приводу вивантажувального шнеку, чим регулюється експозиція сушіння зерна (час проходження зернової маси через усі зони шахти сушарки);
- електрообладнання для керування відповідними електродвигунами (електродвигунів приводу відцентрових вентиляторів подачі агента сушіння у зону нагріву та сушіння, подачі повітря у зону охолодження зерна, електродвигунів приводу норій та транспортера).

Детальний вибір електрообладнання для пуску та захисту електродвигунів, комутації кіл керування, ручного керування та світлової сигналізації, реалізація людино-машинного інтерфейсу розглядається у наступних розділах магістерської роботи, а вибір програмованого контролера ARDUINO, а також давачів температури, вологості та рівня викладений у подальшому матеріалі.

3.1. Вибір мікропроцесорного пристрою

В процесі розробки проекту використовується модель «Arduino Mega2560» – яка має всі потрібні технічні засоби і зовнішні елементи для підключення.

Arduino Mega побудована на мікроконтролері ATmega2560. Плата має 54 цифрових входів/виходів (15 з яких можуть використовуватися як виходи ШІМ), 16 аналогових входів, 4 послідовних порти UART, кварцовий генератор 16 МГц, USB коннектор, роз'єднувач живлення, роз'єднувач ICSP і кнопка перезавантаження/

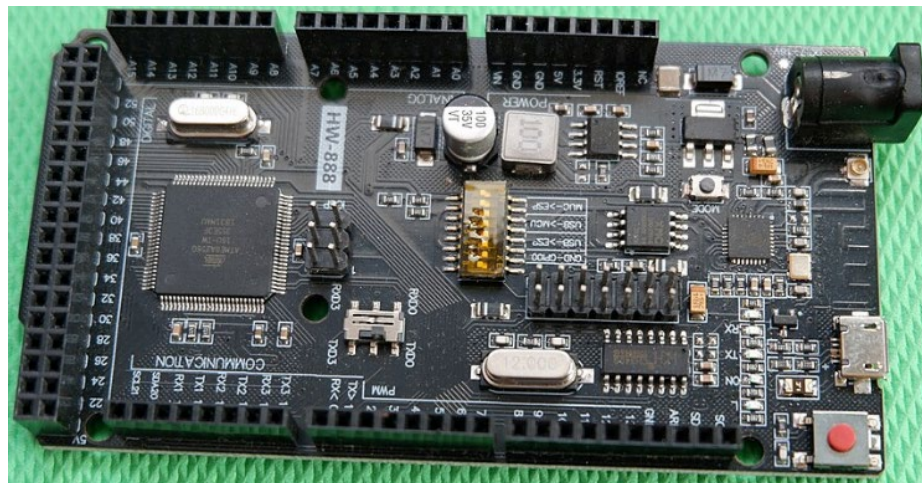


Рис. 3 Плата Arduino Mega2560

Плата з мікроконтролером. За допомогою неї можна створювати і управляти абсолютно різними проектами.

Для створення проекту на КТЗ Arduino використовувались навички схемотехніки, електроніки, основ програмування на мові C++ та інших мов програмування. Показана вище плата не є єдиною платою в модельному ряді виробника.

Характеристики Arduino Mega2560:

Мікроконтролер ATmega2560;

Робоча напруга 5 В;

Вхідна напруга (рекомендована) 7-12 В;
Вхідна напруга (гранична) 6-20 В;
Цифрові входи / виходи 54 (15 з яких можуть працювати також як виходи ШІМ);
Аналогові входи 16 ;
Постійний струм через вхід/вихід 40 мА;
Постійний струм для виведення 3.3 50 мА;
Флеш-пам'ять 256 КБ (з яких 8 КБ використовуються для завантажувача);
ОЗУ 8 КВ;
Енергонезалежна пам'ять 4 КБ;
Тактова частота 16 МГц.

3.2. Вибір давачів температури зерна та агенту сушіння та визначення їх передатних функцій

Як сприймаючий елемент був використаний датчик температури який широко використовується в комплексі з Arduino, а саме датчик серії DS18B20.

До технічних характеристик давача належить:

- діапазон вимірювань - 55..+120, °C;
- точність 98, %;
- діапазон напруги 3,0-5,0, В;
- час вимірювання 750, мс;

3.3. Вибір давачів вологості зерна

Для вимірювання вологості зерна обраний давач вологості PCE-A-315 (рис. 3.1).

Мікрохвильовий вологомір зерна PCE-A-315 призначений для неперервного вимірювання вологості зернових, бобових та олійних культур.

Вимірювання відбувається неперервно у потоці і не залежить від щільності матеріалу. Вологомір відкалібрований заводом-виробником і не потребує повторного калібрування, оскільки при мікрохвильових вимірюваннях природне дрейфування відсутнє. Вологомір оснащений такими інтерфейсами передачі даних, як 4...20мА, RS-232, RS-485, що дозволяє використовувати його у якості реєстратора або датчика у системах автоматичного керування.

Принцип вимірювання приладу заснований на різниці між надвисокою частотою, діелектричними властивостями зерна та води. Вологомір використовує малопотужні мікрохвилі для проникнення на поверхню кожні 0,2с і отримань показів вологості без будь-яких ушкоджень.

Технічні характеристики мікрохвильового вологоміра зерна РСЕ-А-315 наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1.

Технічні характеристики мікрохвильового вологоміра РСЕ-А-315

Діапазон вимірювання вологості при неперервному масовому потоці	5...40%
Макс. абсолютна похибка вимірювання вологості	$\pm 0,5\%$ (5...18%); $\pm 1,0\%$ (>18%)
Діапазон робочої температури	+5...+55°C
Режим роботи	Неперервний
Живлення	24В пост. струму
Споживана потужність	5Вт
Вхідний сигнал	4...20мА
Вихідні сигнали	4...20мА; RS-232, RS-485
Час прогрівання при запуску	60 хв.
Вага	6,5 кг



Рис. 3.1. Мікрохвильовий вологомір зерна PCE-A-315

3.4. Вибір давачів рівня зерна

Як датчик нижнього та верхнього рівня зернової маси у надсушильному бункері шахтної зерносушарки вибраний датчик рівня типу ДПУ-10 (рис. 3.2).

Датчик (сигналізатор) рівня вібраційного типу ДПУ-10 призначений для контролю граничного рівня сипких продуктів, що знаходяться у ємностях.



Рис. 3.2. Давач граничного рівня сипких матеріалів ДПУ-10

Принцип роботи датчика ДПУ-10 наступний: так звана "виделка" датчика вібрує на власній резонансній частоті під впливом п'єзоелектричних елементів, які встановлені в середині корпусу. При зануренні "виделки" в контрольований продукт або при звільненні від нього здійснюється зміна амплітуди коливань, що, в свою чергу, реєструється контролером, який видає команду на спрацювання сигналізації та включення/виключення навантаження, що підводиться до контактів реле електронного блоку.

Технічні характеристики датчика рівня ДПУ-10 наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2.

Технічні характеристики датчика рівня сипких продуктів ДПУ-10

Принцип дії	вібраційний
Температура контрольованого матеріалу	від -40°C до +60°C
Робочий тиск	1 атм.
Робочий температурний діапазон	від -40°C до +85°C
Вага	до 2,5 кг
Матеріал резонатора датчика	нержавіюча сталь
Матеріал корпусу контролера	Сталь із антикорозійним покриттям/алюмінієвий сплав

Кліматичне виконання	УХЛ1.1
Ступінь захисту	IP65
Клас за способом захисту від ураження електричним струмом	I
Живлення	100-240 V AC, 24±10% V DC
Струм споживання	60мА
Навантаження комутації	$I_{\text{макс}} = 8\text{A}$, $U_{\text{макс AC}} = 250\text{ В}$, $U_{\text{макс DC}} = 24\text{ В}$
Режим спрацювання (верхня або нижня межа)	перемичка на платі: не встановлена – верхній рівень; встановлена – нижній рівень
Сигналізація спрацювання	Вмикання світлодіоду на платі
Час спрацювання	2-3 сек.

3.5. Визначення передатної функції електродвигуна приводу вивантажувального шнеку як виконавчого механізму САК температурою зерна

Як було зазначено, експозиція сушіння зерна (тобто час проходження зернової маси через зони шахти зерносушарки) регулюється за допомогою зміни швидкості обертання валу електродвигуна приводу розвантажувального шнеку. Визначимо передатну функцію цього електродвигуна як виконавчого механізму САК.

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

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

з якого видно, що швидкість ω_0 є прямо пропорційною частоті f напруги, що підводиться до обмоток статора.

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

Тоді відносна швидкість поля

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

де швидкість ω_0 пов'язана з частотою мережі виразом (3.2).

Введемо поняття фіктивного ковзання

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

Дійсна швидкість обертання при частоті f_V

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

Підставляючи у (3.5) значення ω_{1V} із (3.3) з урахуванням (3.4), визначимо

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

Для малих значень ковзання обертаючий момент двигуна пропорційний ковзанню

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

Підставляючи (3.6) та (3.7) у вихідне рівняння

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

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

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

Цей вираз можна представити як

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

Якщо за вхідну величину прийняти відносну швидкість поля v , а за вихідну – відносне ковзання $\sigma = \frac{s_\phi}{s_H}$, то вираз (3.10) матиме вигляд

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

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

Тоді передатна функція асинхронного електродвигуна при частотному керуванні

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

На практиці при частотному керуванні часто використовують іншу методику визначення передатної функції.

Передатна функція асинхронного електродвигуна у цьому випадку

$$W_{BM}(s) = \frac{k_{BM}}{T_{BM} \cdot s + 1}, \quad (3.13)$$

$$k_{BM} = \frac{\omega_H}{f}; \quad (3.14)$$

$$T_{BM} = \frac{J_{3B}}{\beta}, \quad (3.15)$$

де J_{3B} - зведений момент інерції електродвигуна та робочої машини (в даному випадку – вентилятора);

β - жорсткість механічної характеристики;

$$\beta = \frac{2 \cdot M_{KP}}{\omega_0 \cdot s_{KP}}, \quad (3.16)$$

де M_{KP} - критичний момент електродвигуна;

s_{KP} - критичне ковзання електродвигуна.

Розрахуємо необхідні величини для визначення передатної функції за виразами (3.13) – (3.16). Вихідні дані – каталожні значення для електродвигуна АИР100S4У3 [12].

$$M_H = 9550 \cdot \frac{P_H}{n_H} = 9550 \frac{3}{1410} = 20,32 \text{ } H \cdot \text{ } м. \quad (3.17)$$

$$M_{KP} = M_H \cdot \mu_{KP} = 20,32 \cdot 1,6 = 32,51 \text{ } H \cdot \text{ } м. \quad (3.18)$$

$$S_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{1500 - 1410}{1500} = 0,06. \quad (3.19)$$

$$\mu_1 = \frac{\mu_{KP}}{\mu_{ПВСК}} = \frac{1,6}{1,4} = 1,14. \quad (3.20)$$

$$S_{KP} = \frac{S_H + \sqrt{S_H \cdot \frac{\mu_{KP} - 1}{\mu_1 - 1}}}{1 + \sqrt{S_H \cdot \frac{\mu_{KP} - 1}{\mu_1 - 1}}} = \frac{0,06 + \sqrt{0,06 \cdot \frac{1,6 - 1}{1,14 - 1}}}{1 + \sqrt{0,06 \cdot \frac{1,6 - 1}{1,14 - 1}}} = 0,35 \quad (3.21)$$

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1500}{60} = 157 \text{ } рад./с. \quad (3.22)$$

$$\omega_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_H}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1410}{60} = 147,6 \text{ } рад./с. \quad (3.23)$$

$$J_{ПП} = J_{ДВ} + J_{РМ} = 0,01 + 0,09 = 0,1 \text{ } кг \cdot \text{ } м^2. \quad (3.24)$$

Тоді

$$\beta = \frac{2 \cdot M_{KP}}{\omega_0 \cdot S_{KP}} = \frac{2 \cdot 32,51}{157 \cdot 0,35} = 1,18 \frac{H \cdot \text{ } м}{рад/с}.$$

$$T_{BM} = \frac{J_{ЗВ}}{\beta} = \frac{0,1}{1,18} = 0,085 \text{ } с. \quad k_{BM} = \frac{\omega_H}{f} = \frac{147,6}{50} = 2,95 \frac{рад./с}{Гц}.$$

Отже, передатна функція електродвигуна АИР100S4УЗ при частотному керуванні

$$W_{BM}(s) = \frac{k_{BM}}{T_{BM} \cdot s + 1} = \frac{2,95}{0,085 \cdot s + 1}.$$

3.6. Вибір частотного перетворювача

У системі автоматичного керування шахтною зерносушаркою в якості пристрою для керування електродвигуном приводу розвантажувального

шнеку вибраний частотний перетворювач серії **Altivar ATV312** фірми **Schneider Electric** (рис. 3.3).

Промисловий перетворювач частоти Altivar ATV312 відноситься до серії продуктів Altivar Process ATV300 компанії Schneider Electric і розроблений для керування моментом обертання, плавного пуску та зупинки синхронних та асинхронних трифазних електродвигунів. Перетворювач частоти Altivar ATV312 використовується у різних галузях промисловості та сільського господарства: у нафтогазовій, металургії, харчовій, у системах водопостачання та водовідведення, у вентиляційних системах.

Ці перетворювачі оснащені вбудованим модулем реалізації ПІД-алгоритму керування.

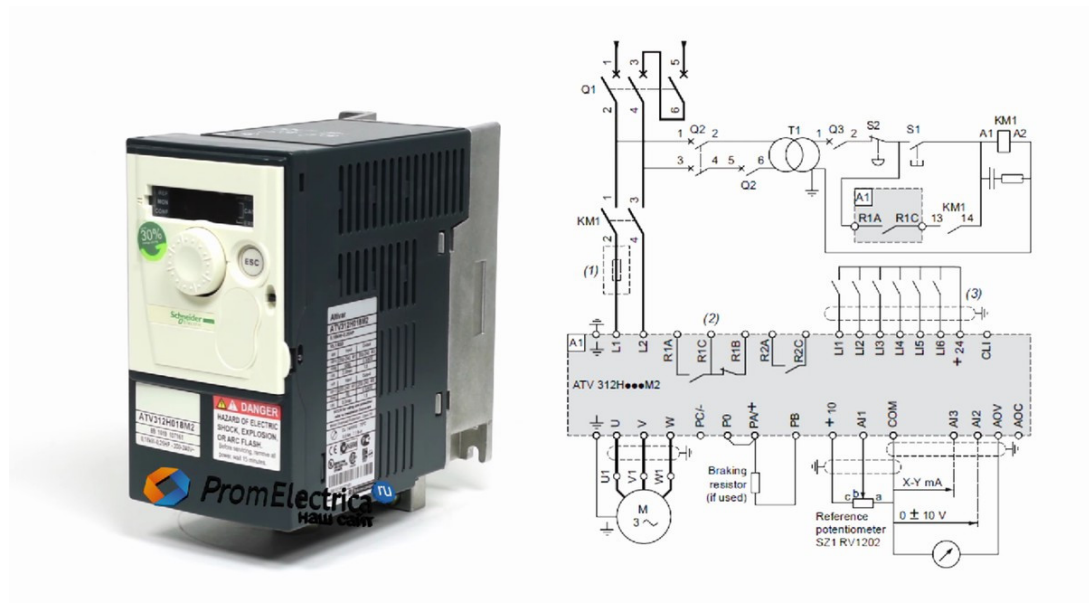


Рис. 3.3. Зовнішній вигляд перетворювача частоти
Altivar ATV312 фірми Schneider Electric

Частотні перетворювачі (інвертори) призначені для плавного, безступінчастого регулювання швидкості трифазних асинхронних електродвигунів. Регулювання відбувається за рахунок створення на виході трифазного струму змінної частоти. Перетворювач дозволяє відстежувати і відображати на цифровому табло основні параметри –

задану швидкість, вихідну частоту, струм і напругу двигуна, вихідну потужність і момент, стан дискретних входів, загальний час роботи перетворювача і т.д.

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

Можливості перетворювача Altivar ATV312:

- діапазон вихідних частот: 0,2-400 Гц;
- 15 програмованих установок швидкості;
- векторне керування із самоналагодженням на двигун або U/f - керування (поєднання векторного керування та функції компенсації ковзання дозволяє забезпечувати не менше 150% від початкового моменту двигуна, починаючи з частоти 1 Гц);
- функція оптимізації часу розгону/гальмування;
- вбудований ПІД-регулятор (із прямою та зворотною характеристикою) може бути використаний, наприклад, для регулювання температури, витрати або тиску;
- передбачено два способи зупинки двигуна: контрольованим гальмуванням або вільним вибігом;
- автоматичний перезапуск після провалу живлення із можливістю пуску на двигун, що обертається;
- вбудований інтерфейс RS-485 зв'язку з ПК (швидкість обміну даними складає до 19500 бод).
- види захисту електродвигуна або групи двигунів:
 - вимикання при перевищенні крутного моменту;
 - захист від перевантаження, обриву/перекосу фаз;
 - захист від перегріву;
 - захист від коротких замикань.

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

Перетворювач Altivar ATV312 дозволяє не тільки вимірювати кількість спожитої електроенергії із похибкою менше 5%, але і проконтролювати відхилення енергоспоживання системи від номінальних значень. Причому розрахунок витрати спожитої енергії перетворювач частоти ATV312 виконує без додаткового датчика і у тих одиницях вимірювання, що вибрані користувачем.

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

Потужність перетворювача частоти, або необхідна їх кількість для живлення усіх електродвигунів приводу вентиляторів, визначається за таблицею 3.3.

Таблиця 3.3.

Технічні характеристики моделей перетворювачів частоти
типу Altivar ATV312 фірми Schneider Electric

Номер за каталогом	Потужність, кВт	Струм в усталеному режимі, А	Перевантаження за струмом, 60 сек., А	Габарити, ВхШхГ	Маса, кг
ATV312HU075N4	0,75	2,2	2,4	143x107x150	2
ATV312HU15N4	1,50	3,7	4	143x107x150	2
ATV312HU22N4	2,20	5,1	5,6	143x107x150	2
ATV312HU30N4	3	7,2	7,9	184x142x150	3,350
ATV312HU40N4	4	9,1	10	184x142x150	3,350
ATV312HU55N4	5,5	12	13,2	184x142x150	3,350
ATV312HU75N4	7,5	16	17,6	232x180x170	6,450
ATV312HD11N4	11	22,5	24,8	232x180x170	6,450
ATV312HD15N4	15	30,5	33,6	232x180x170	11,650
ATV312HD18N4	18,5	37	40,7	330x245x190	11,650
ATV312HD22N4	22	43,5	47,9	330x245x190	26,400

Оскільки для приводу розвантажувального шнеку використовується асинхронний трифазний електродвигун АИР100S4У3 потужністю 3,0 кВт, згідно з табл. 3.3 необхідно використати частотний перетворювач Altivar ATV312HU30N4.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Цифрові системи керування – це системи, в яких безперервні сигнали перетворюються в цифрові коди і керування здійснюється з використанням алгоритмів обробки цифрової інформації.



Рис. 4.1. Схема замкнутої цифрової системи

Цифрові системи керування передбачають в собі перетворення безперервних сигналів у цифрові коди та зворотне перетворення цифрових кодів у безперервні сигнали. Такі перетворення здійснюють за допомогою аналогово-цифрових (АЦП) і цифро-аналогових (ЦАП) перетворювачів. У цих перетворювачах здійснюється квантування, як за часом, так і за рівнем.

4.1 Визначення періоду квантування сигналів ЦСК

Дискретизація (квантування) – заміна неперервного сигналу тими чи іншими дискретними значеннями. Існують такі види дискретизації:

- за часом
- за рівнем
- одночасна дискретизація за рівнем і за часом

Виникає проблема пошуку раціонального часу квантування T_k , який задовольнив би всі потрібні вимоги технологічного процесу. Правильно підібраний для раціонального використання періоду квантування T_k є основною задачею реалізації ЦСК. При збільшенні часу квантування, втрачається важлива інформація про отриманий сигнал, що може також

призвести до неможливості відтворення вихідного сигналу за дискретними вибірками.

При водночас зменшенні часу керування, точність керування цифровою системою значно збільшується, але при цьому зростає додаткове штучне завантаження мікро-ЕОМ.

Теорема Котельникова стверджує: якщо сигнал не містить в собі частот вище, ніж w_c рад/с, він повністю описується своїми значеннями, виміряними у дискретні моменти часу за інтервалом $T = \pi / w_c$. Для можливості безпомилкового відтворення сигналу, як показує аналіз амплітудних спектрів імпульсної системи, найменша частота квантування повинна дорівнювати $2w_c$, де w_c – найвища частота вихідного сигналу, яка має місце в амплітудно-частотній характеристиці неперервної частини системи.

Визначення передаточної функції неперервної частини розімкнутої системи:

$$W_{\text{роз.}}(s) = \frac{K_B}{T_B \cdot s + 1} \cdot \frac{K_0}{T_0 \cdot s + 1} = \frac{K_B \cdot K_0}{T_B \cdot T_0 \cdot s^2 + (T_B + T_0)s + 1}, \quad (4.1)$$

Визначаємо передаточну функцію неперервної частини замкненої системи:

$$W_{\text{зам.}}(s) = \frac{W_{\text{роз.}}(s)}{1 + W_{\text{роз.}}(s)} = \frac{K_B \cdot K_0}{[T_B + T_0 \cdot s^2 + (T_B + T_0)s + 1] + K_B \cdot K_0}, \quad (4.2)$$

Визначення АЧХ неперервної частини замкненої системи:

$$W_{\text{зам.}}(jw) = \frac{K_B \cdot K_0}{[T_B + T_0 \cdot (j \cdot w)^2 + (T_B + T_0) \cdot (j \cdot w) + 1] + K_B \cdot K_0}, \quad (4.3)$$

У результаті розв'язання рівняння:

$$A(w) = \frac{K_B \cdot K_0}{\sqrt{(-T_B \cdot T_0 \cdot w^2 + 1 + K_B \cdot K_0)^2 + (T_B + T_0)^2 \cdot w^2}}, \quad (4.4)$$

Отримаємо значення частоти зрізу:

$$w_c = 1.36$$

і значення часу квантування:

$$T_k = \frac{\pi}{w_c} = \frac{\pi}{1.36} = 2.308$$

Вказаний час дискретизації враховується у алгоритмі роботи апаратного забезпечення Arduino.

4.2 Реалізація нейронної мережі

При розробці алгоритму керування процесом сушіння зерна слід враховувати багатокритеріальність означеного процесу, а саме: температура зерна, температура агенту сушіння, зміна вологовмісту зерна.

Враховуючи означене та визначивши математичну модель ОК за каналом температури зерна прийнято рішення реалізувати нейронну мережу (НМ) для керування технологічним процесом сушіння зерна. Як базу знань при розробці алгоритму роботи НМ використано математичну модель, яку реалізовано в пакеті MATLAB (рис.2.10) та дослідні дані технологічного процесу, які наведено на рисунках 2.11-2.17.

За означеними даними, що входять у свою чергу в базу знань, виконується керування технологічного процесу сушіння зерна з урахуванням зміни температури агента сушіння.

Для реалізації НМ було використано програмний продукт MATLAB. Як наслідок реалізовано двошарову НМ (верхній шар та вихідний шар).

Функціонування НМ пояснюється виразами [20-22]:

$$y=g(W^{(2)}f(W^{(1)}x+b^{(1)})+b^{(2)})$$

де

$x \in R^n$ — вхідний вектор;

$W^{(1)}, b^{(1)}$ — ваги і зсуви прихованого шару;

$W^{(2)}, b^{(2)}$ — ваги і зсуви вихідного шару;

$f(\cdot)$ — активаційна функція прихованого шару;

$g(\cdot)$ — активаційна функція виходу;

При цьому обчислення першого шару виконується за виразом:

$$z^{(1)}=W^{(1)}x+b^{(1)}$$

Обчислення вихідного шару виконується за виразом:

$$z^{(2)} = W^{(2)}h + b^{(2)}$$

де h - обчислення виходу прихованого шару нейронної мережі.

Реалізована структура НМ показана на рис. 4.1.

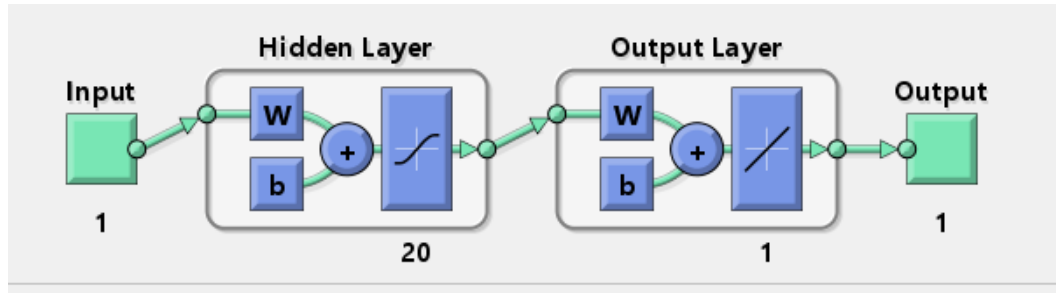


Рис. 4.1 Структура нейронної мережі

Навчання НМ виконується до досягнення найменших за своїм значенням похибок навчання, перевірки та тестування. Виконано визначену кількість ітерацій навчання НМ за дослідними даними. Результат навчання показано рис. 4.2.

Progress				
Epoch:	0	9 iterations	1000	
Time:		0:00:00		
Performance:	2.58e+03	1.19e-25	0.00	
Gradient:	1.00	2.61e-13	1.00e-10	
Mu:	0.00100	1.00e-06	1.00e+10	
Validation Checks:	0	0	6	

Рис. 4.2 Скрін результату навчання нейронної мережі

Відгук роботи НМ для керування температурою зерна з урахуванням зміни температури агенту сушіння показано на рисунку 4.3.

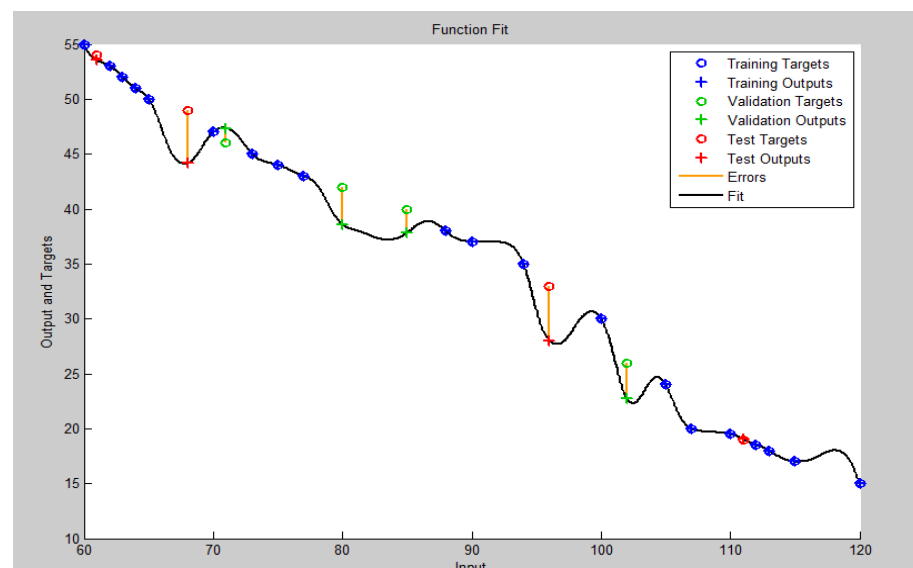


Рис. 4.3 Відгук роботи нейронної мережі

Перевірку результатів роботи НМ виконано за значенням коефіцієнта детермінації для значень навчання, перевірки і тестування. Результати перевірки показано на рис. 4.4. З рис. 4.4 видно, що за наведеним коефіцієнтом детермінації 98% модель добре пояснює технологічний процес.

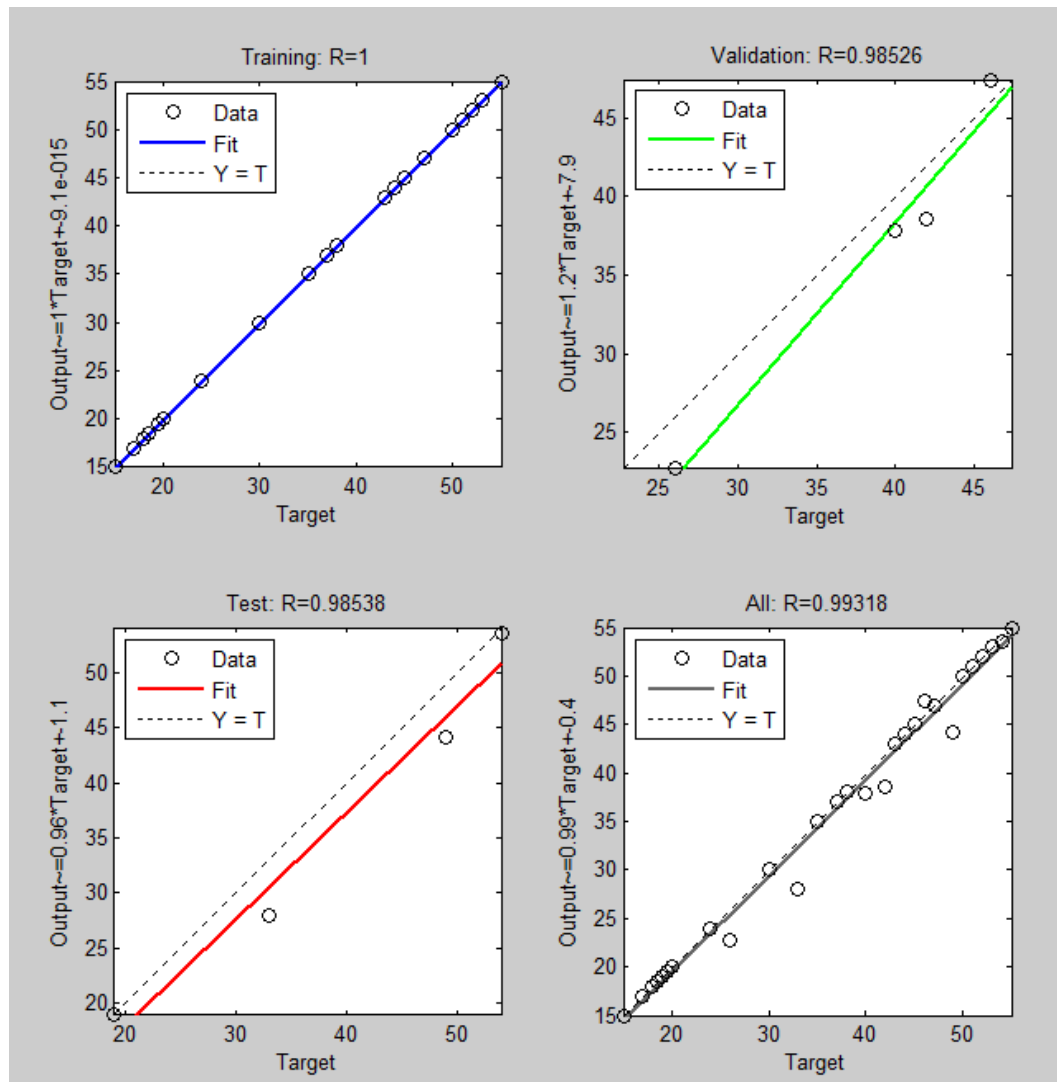


Рис. 4.4 Скрін вікна перевірки роботи нейронної мережі

За результатами перевірки роботи НМ визначено похибки роботи НМ, що наведено на рис. 4.5

Results			
	 Samples	 MSE	 R
 Training:	20	1.18718e-25	9.99999e-1
 Validation:	4	7.17867e-0	9.85258e-1
 Testing:	4	12.08613e-0	9.85379e-1

Рис. 4.5 Похибки функціонування нейронної мережі

За результатами досліджень, як приклад, середньоквадратична похибка перевірки складає 7%, що є прийнятним рівнем для біотехнічних об'єктів.

4.3 Реалізація SCADA системи

SCADA (від англ. *Supervisory Control And Data Acquisition*) — це система для моніторингу, збору даних і керування технологічними процесами в реальному часі. До основних функцій належить: виконання візуалізації, створення людино-машинного інтерфейсу для оператора, зберігання історії ходу процесу, індикація сигналізації.

У роботі реалізовано людино-машинний інтерфейс в програмному продукті LabVIEW. LabVIEW — це середовище програмування для створення систем збору даних, автоматизації та керування, розроблене компанією National Instruments (NI).

У вказаному програмному продукті виконується візуально-блокове програмування у вікні проєкту блок діаграми (рис. 4.6). При цьому людино-машинний інтерфейс реалізовується на фронтальній панелі (рис. 4.7).

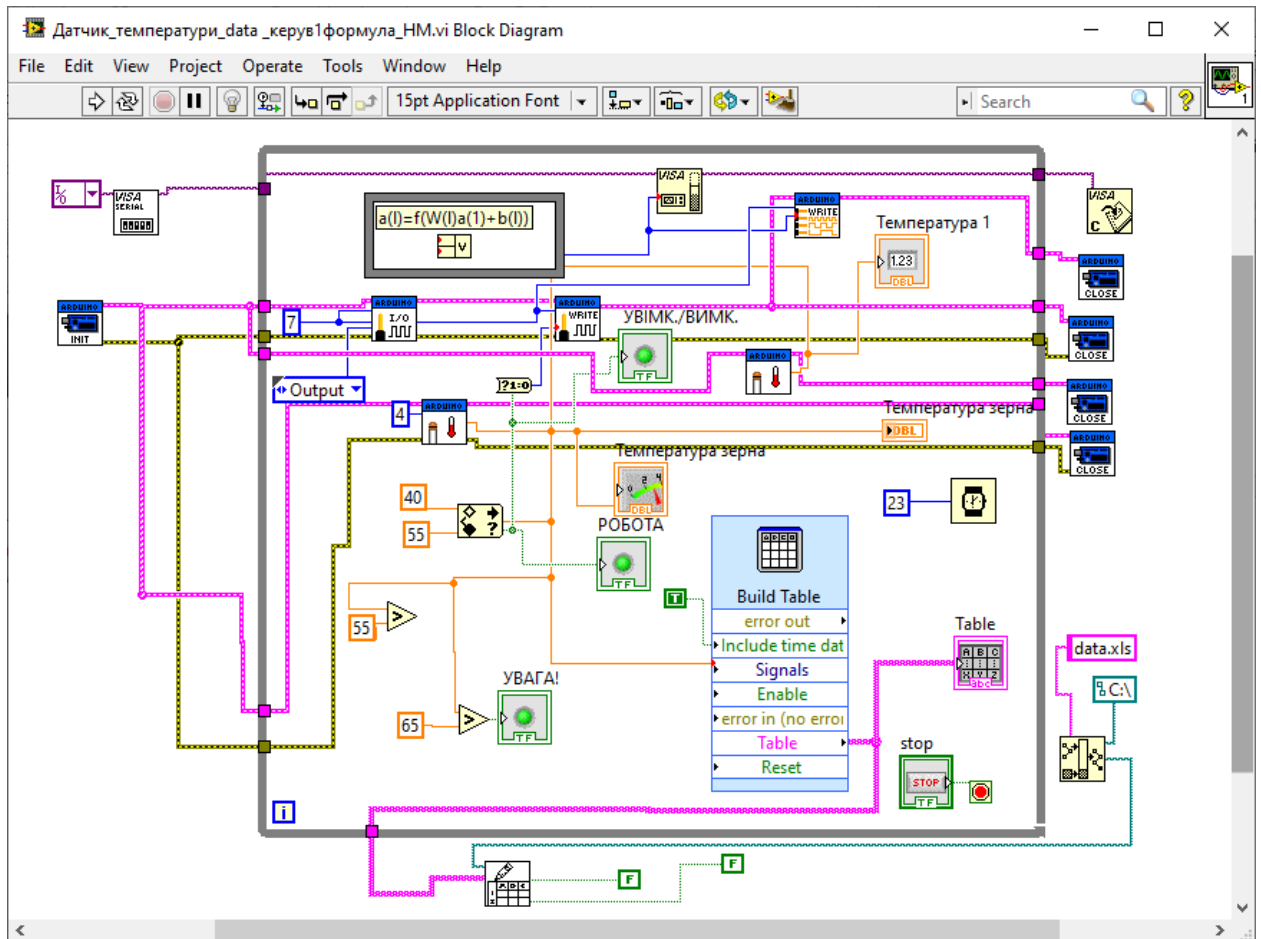


Рис. 4.6 Вікно блок діаграми

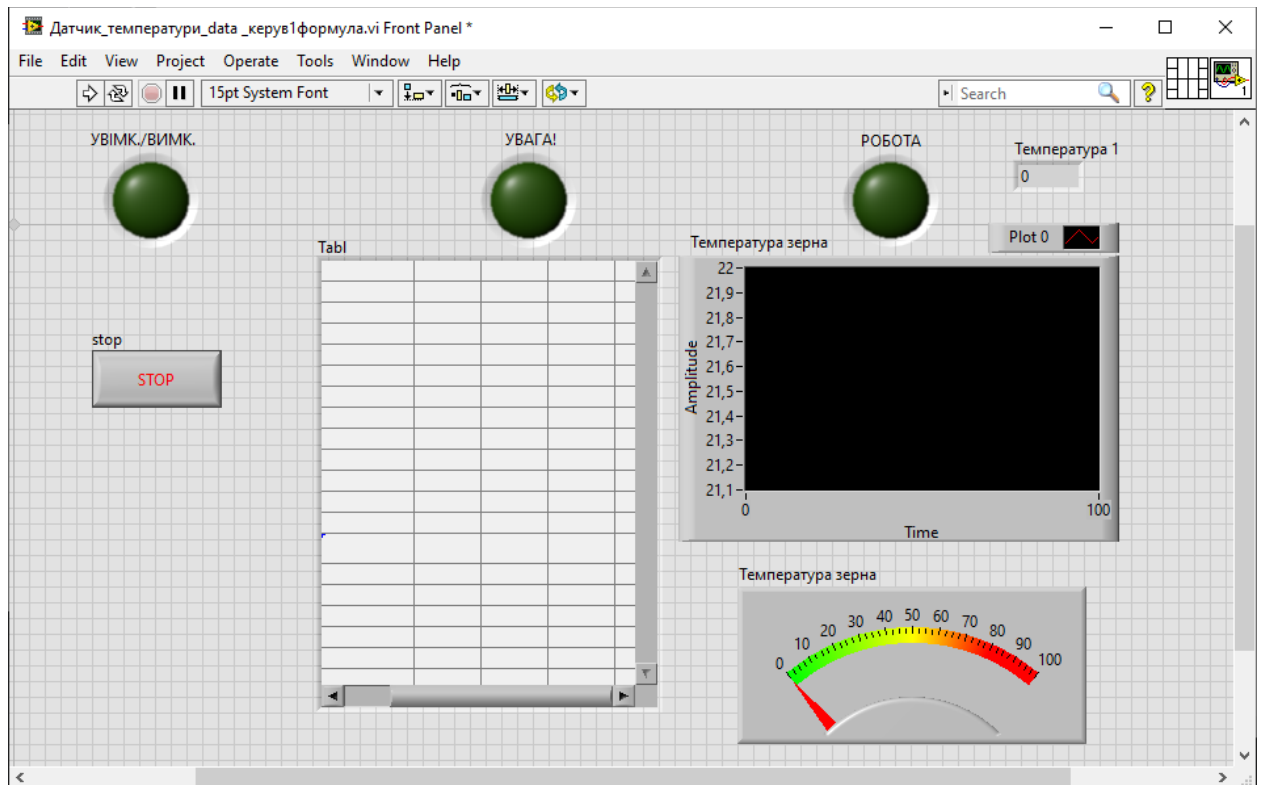


Рис. 4.7 Вікно фронтальної панелі (людино-машинний інтерфейс)

Виконано перевірку програмно-апаратного забезпечення у вигляді виконання моніторингу температури (рис. 4.8). При цьому слід зауважити, що хід технологічного процесу у системі реального часу зберігається на ПК, а саме диску «C://». Дані зберігаються та конвертуються в форматі «*.xls», що дозволяє опрацьовувати виміряні дані в пакеті MS Office, а саме – MS Excel.

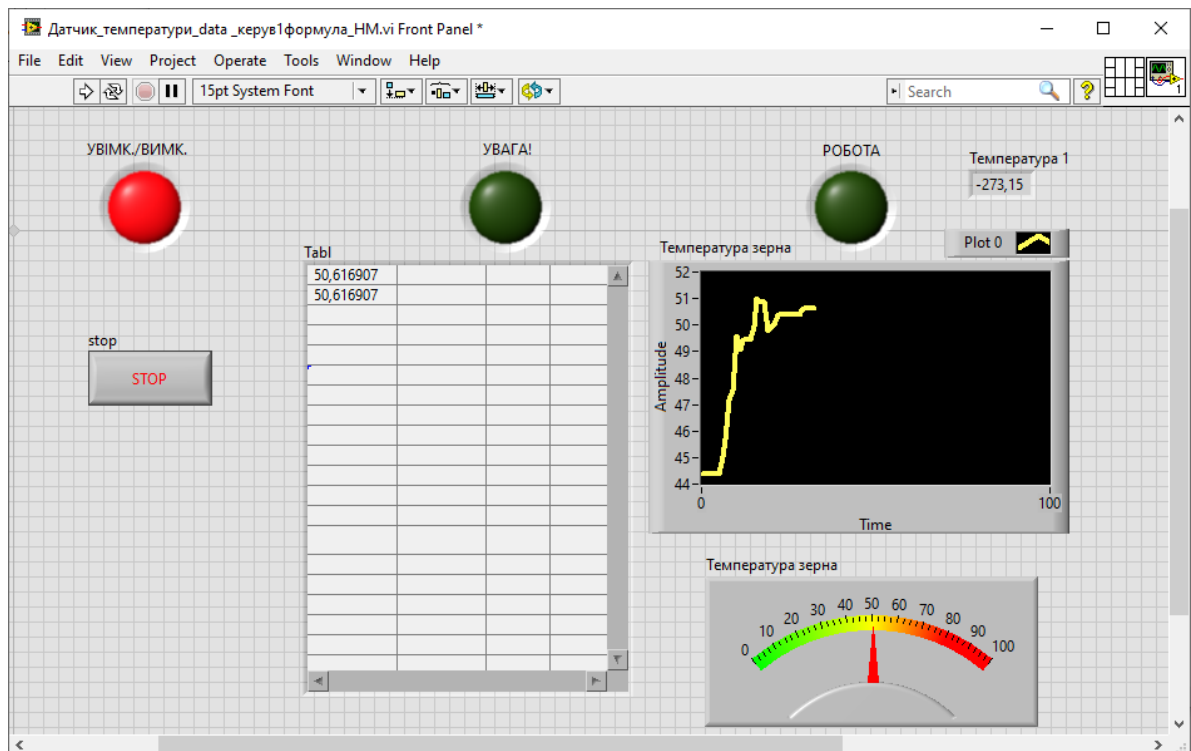


Рис. 4.8 Випробування моделі програмного забезпечення (моніторинг температури)

У ході процесу апаратною платформою Arduino виконується вимірювання контрольованих параметрів та передача до ПК. Відповідно від ПК надсилаються команди до апаратної платформи Arduino. Остання за керуючою дією формує команди «старт/стоп» керування та широтно-імпульсну модуляцію для керування частотним перетворювачем виконавчого механізму. Підключення Arduino Mega 2560 до частотного перетворювача через протокол RS-485 (Modbus RTU). З'єднання Arduino Mega 2560 до частотного перетворювача виконується через модуль (конвертер) MAX485,

який передає команди «старт/стоп». Для ШІМ керування до цифрових контактів Arduino Mega 2560 необхідно під'єднувати RC-фільтр.

У програмному забезпеченні, а саме у блоці діаграм, для керування частотним перетворювачем у режимі «старт/стоп» використовується функція «Digital Write Pin» (рис. 4.9). Остання використовується для передачі рівню сигналу (керуючої дії), а саме для запуску і зупинки ВМ.

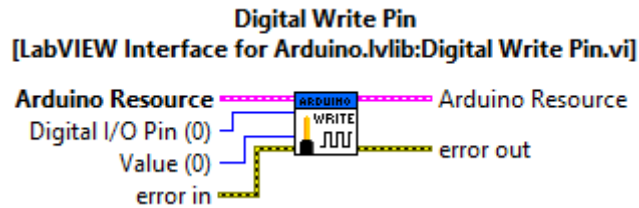


Рис. 4.9 Функція «Digital Write Pin»

При цьому керування за допомогою ШІМ виконується введеною функцією «PWM Write Port», в основу якої вкладено метод створення прямокутних імпульсів зі змінною шпаруватістю, тобто співвідношенням часу, коли сигнал є увімкненим, до часу його вимкнення. У вказаних підходах значення напруги для ШІМ варіюється від 0 до 255.

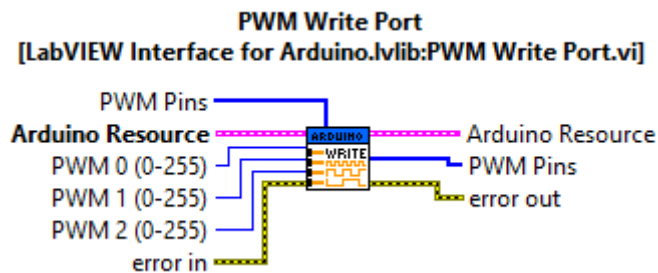


Рис. 4.10 Функція «PWM Write Port»

РОЗДІЛ 5

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Розроблено систему керування з реалізації локального (нижнього) рівня керування технологічних параметрів та верхнього рівня, де передбачається візуалізація технологічних параметрів та їх запис із можливою в подальшому реалізацією бази даних.

Загальна структура системи керування зображена на рисунку 5.1.

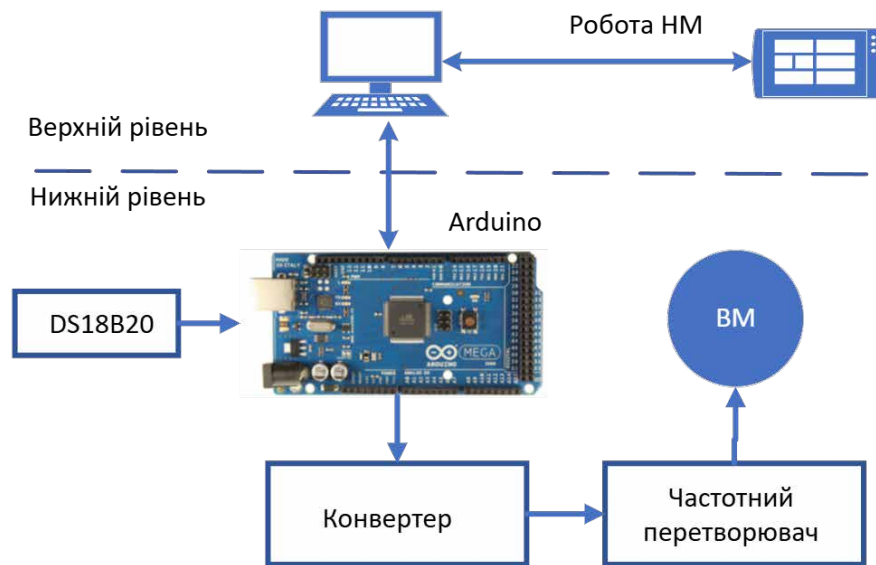


Рис. 5.1 Структура комп'ютерно-інтегрованої системи керування

5.1 Вибір пускозахисної апаратури

Вибрано автоматичний вимикач Promfactor FMC5-3U-450A



Рис.5.2 Автоматичний вимикач Promfactor FMC5-3U-450A

$$U_{\text{ном.авт.}} = 380/400\text{В};$$

$$I_{\text{ном.авт.}} = 4.5 \text{ кА};$$

$$I_{\text{макс.}} = I_{\text{пуск.}} = K_i \cdot I_{\text{ном.дв.}} = 6 \cdot 25,6 = 153,6\text{А};$$

$$I_{\text{т.р.}} = 5 \cdot I_{\text{ном.авт.}} = 5 \cdot 3 = 15\text{кА};$$

$$I_{\text{ел.маг.}} = K_i \cdot I_{\text{ном.авт.}} = 10 \cdot 3 = 30\text{кА}.$$

Перевірка умов вибору:

$$U_{\text{ном.авт.}} = 380\text{В} = U_{\text{мер.}} = 380\text{В};$$

$$I_{\text{ном.авт.}} = 3\text{кА} > I_{\text{ном.дв.}} = 25,6\text{А};$$

$$I_{\text{т.р.}} = 15\text{кА} > I_{\text{ном.дв.}} = 25,6\text{А};$$

$$I_{\text{ел.маг.}} = 30\text{кА} > I_{\text{макс.}} = 153,6\text{А}.$$

Ступінь захисту оболонки вимикача- IP20.

Для дистанційного керування роботою двигуна вибираємо магнітний пускач серії Promfactor PMM-6 250 220.



Рис.5.3 Зовнішній вигляд магнітного пускача Promfactor PMM-6 250 220

$$U_{\text{пуск.}} \geq U_{\text{мереж.}};$$

$$I_{\text{ном.пуск.}} \geq I_{\text{ном.дв.}};$$

$$I_{\text{ном.пуск.}} \geq \frac{I_{\text{дв.пуск.}}}{6}.$$

У наведених формулах:

$U_{\text{пуск.}}$ – номінальна напруга пускача, В;

$I_{\text{ном.пуск.}}$ – номінальний струм пускача, А;

$I_{\text{дв.пуск.}} = I_{\text{макс.}} = 50\text{А.}$

Перевіримо умови вибору:

$U_{\text{пуск.}} = 660\text{В} > U_{\text{мереж.}} = 380\text{В};$

$I_{\text{ном.пуск.}} = 50\text{А} > I_{\text{ном.дв.}} = 25,6\text{А};$

$I_{\text{ном.пуск.}} 50 \geq 25,6 / 6 = 25,6 \text{ А.}$

Пускач без теплового реле, неререверсивний; ступінь захисту IP65;

Отже, умови вибору виконуються.

Вибір блока живлення для мікроконтролера.

Блок живлення для Arduino - Вхідна напруга 100-240В, вихідна 9В / 1А



Рис. 5.4 Блок живлення AC/DC ADAPTOR Model 10

Вхід: 100 В-240 В 50/60 Гц

Вихід: DC 9В 1А / 1000mA

Розмір штекера: 5.5 мм х 2.1 мм

Довжина кабелю: 110 см

5.2 Вибір проводів і кабелів

Провід вибиратимемо за найбільшим струмом електричного споживача.

Провід повинен бути вибраний по поперечному перерізу та по способу прокладання. Дані кабелів і проводів наведено в таблиці.

Таблиця 5.1 Технічні характеристики кабелів і проводів

Призначення	Тип кабелю	Переріз
Під'єднання двигунів та магнітних пускачів	ВВГнг-LS	3x120 мм ² + 1x50 мм ² [24]
Під'єднання живлення реле	ВВГнг-LS-П	3x1.5 мм ² [25]
Під'єднання систем керування та індикації	КВВГнг-LS	3x0.75 мм ² [26]

5.3 Розробка принципової схеми

Розробка електричної принципової схеми виконувалась з урахуванням структури системи автоматизованого керування, побудованої на базі мікроконтролера Arduino. У схемі реалізовано керування виконавчими механізмами через електромагнітні контактори (KM1–KM5), проміжні реле (KV1–KV5), а також вхідні пристрої – кнопкові пости (SB1–SB12), сигнальні лампи (HL1–HL5) та дисплей LCD2004 з інтерфейсом I2C.

Живлення схеми організовано через автоматичний вимикач QF1, що виконує функцію захисту від перевантаження та короткого замикання. Для обмеження живлення трансформаторів низької напруги передбачено додаткові вимикачі QF2 та QF3, які забезпечують селективність захисту та можливість роздільного керування частинами кола.

Кожна кнопка (SB1–SB12) виконує окрему логічну функцію: запуск, зупинку, скидання аварії, ручне перемикавання режимів тощо. Сигнали з кнопок подаються безпосередньо на цифрові входи Arduino, обробляються

програмно, після чого формується логічне керування силовими реле. Проміжні реле (KV1–KV5), які керуються через транзисторні ключі, забезпечують гальванічну розв'язку та переключення контактів для запуску контакторів KM1–KM5, що безпосередньо живлять навантаження.

Інформація про стан системи виводиться на дисплей LCD2004 I2C, який підключений до Arduino через двопровідну шину SDA/SCL. Додатково передбачено світлову індикацію – сигнальні лампи HL1–HL4, що сигналізують про включення живлення, активність каналів або аварійний стан (Додаток).

5.4 Розробка схеми електричних з'єднань

Схема електричних з'єднань побудована на основі розробленої електричної принципової схеми, що реалізує логіку керування виконавчими механізмами за допомогою мікроконтролера Arduino. Усі виконавчі елементи – контактори (KM1–KM5), реле (KV1–KV5), сигнальні лампи (HL1–HL5) та кнопкові пости (SB1–SB12) – мають відповідне адресне позначення згідно з ГОСТ 2.702-75 та ГОСТ 2.710-81. Це дозволяє забезпечити однозначність з'єднань і уніфікацію монтажу.

Усі силові кола моторів виконано через контактори, які керуються сигналами з цифрових виходів Arduino через проміжні реле. Такий підхід дозволяє забезпечити гальванічну розв'язку між логічною частиною керування та виконавчими силовими ланцюгами. Кожне реле керується через транзисторний ключ і живиться від стабілізованого джерела 12 В. Сигнали від кнопкових постів та перемикачів подаються на відповідні входи мікроконтролера і програмно обробляються відповідно до логіки роботи об'єкта.

Окрему увагу приділено реалізації індикації станів роботи – сигнальні лампи HL1–HL4 показують увімкнення обладнання, стан живлення, аварійні умови тощо. Візуалізація реалізована через стандартні світлодіоди,

які керуються через цифрові виходи мікроконтролера. На передній панелі щита передбачено місце для дисплея (LCD2004 I²C), що забезпечує зчитування поточних параметрів, часу роботи або повідомлень про стан системи (Додаток).

5.5 Розробка схеми електричних підключень

Схема електричних з'єднань виконавчих механізмів включає підключення трьохфазних електродвигунів до силової та керувальної частини системи автоматизації. Живлення виконавчих пристроїв здійснюється через контактори КМ1–КМ5, керування якими реалізовано за допомогою проміжних реле КV1–КV5, що з'єднані з цифровими виходами контролера Arduino.

Двигуни підключаються до трифазної мережі змінного струму через відповідні контактори, які забезпечують безпечну комутацію. У колах живлення кожного двигуна передбачено захист від короткого замикання і перевантаження за допомогою автоматичного вимикача QF1, що встановлений на вході щита керування. Для кожного двигуна передбачено індивідуальний контактор (наприклад, КМ1 для М1, КМ2 для М2 тощо), що дозволяє окремо вмикати або вимикати приводи за командою з мікроконтролера.

Кожен виконавчий механізм (двигун) підключено відповідно до адресного принципу – усі ланцюги промарковані згідно з функціональним призначенням, що значно спрощує монтаж, перевірку та обслуговування системи. Фізично виконавчі елементи розміщуються на об'єкті, а їх підключення до шафи керування виконується через клемні ряди, де окремо виведено сигнальні та силові лінії

5.6 Розробка щита управління

Щит керування є центральною ланкою системи автоматизації, яка забезпечує оператору можливість локального або віддаленого керування технологічним процесом. Його конструкція визначається виходячи з кількості встановлених апаратів, умов експлуатації, вимог ергономіки та електробезпеки. Загальний вигляд щита формується з урахуванням електричної принципової схеми, схеми електричних з'єднань і компоновки виконавчих пристроїв.

Під час проєктування було прийнято рішення розмістити щит у безпосередній близькості до об'єкта керування – для зручного доступу обслуговчого персоналу та мінімізації довжини сигнальних і силових кабелів. Усередині щита передбачено монтаж усіх елементів керування, живлення, індикації, захисту та виконавчих пристроїв. Функціональна компоновка побудована за зональним принципом: окремо виділено ділянки для силових апаратів (контактори, реле, автоматичні вимикачі), слабкострумової частини (контролер, сигнальні лінії, дисплей LCD2004), а також інтерфейсних елементів (кнопки SB1–SB12, лампи HL1–HL4).

Щит розміщено у металевому корпусі із ступенем захисту IP54, що забезпечує надійний захист апаратури від пилу та бризок у промисловому середовищі. Враховуючи температурні умови експлуатації (від +5 до +40 °C) і відсутність агресивного середовища, корпус щита обрано з готової серії – зокрема, рекомендовано використати металевий щит Типу Cetinkaya Rano (600×800×300) або аналог, відповідно до ГОСТ 36.13-76.

Усередині передбачено монтажну панель з DIN-рейками для встановлення модульного обладнання, клемних рядів для зовнішніх підключень, а також організацію кабельних трас із урахуванням зручності обслуговування. На дверцятах щита встановлюються органи оперативного керування – кнопки, перемикачі, індикатори, дисплей – що забезпечують оператору доступ до основних функцій без відкривання корпусу

5.7 Розрахунок показників надійності системи

Для розрахунку надійності системи керування ми спочатку складаємо таблицю складових системи та визначаємо результуючу інтенсивність на відмови.

Таблиця 5.2 Інтенсивність відмов

№	Найменування	Кількість	Інтенсивність	Рез. інтенсивність
1	Контакти	25	0.25	6.25
2	Автоматичні вимикачі	2	0.13	0.26
3	Інтегральна плата	1	6.25	6.25
4	Електро двигуни	1	5.24	5.24
5	Реле	1	0.25	0.25
			Заг.	16.12

Результуюча інтенсивність відмови всіх елементів буде становити:

$$\lambda_p = 16.12 \cdot 10^{-6}, \text{ год}^{-1}.$$

Беремо, що термін експлуатації системи становитиме $i=16.12 \cdot 10^3$ год, тобто результуючу ймовірність безвідмовної роботи системи визначимо за виразом

$$P := e^{-1 \cdot 16.12 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4} = 0.851.$$

Видно, що $P_3(t)=0.96 < P_{\text{рез}}(t)=0.851$. Щоб підвищити надійність схеми, що розглядаємо, застосовуємо метод навантаженого резервування. Резервувати будемо не всю схему, а лише її частину.

$$p_3(t) = p_1(t) - p_2(t) \quad (5.1)$$

де: $p_1(t)$ - ймовірність безвідмовної роботи схеми, що резервується;

$p_2(t)$ - те саме, але тієї частини схеми, що резервуванню не підлягає.

Аналізуючи схему, знаходимо:

$$p_{\text{AA}} := e^{-1(2 \cdot 0.26 + 0.25) \cdot 10^{-6} \cdot 10^4} = 0.992, \\ p_1(t) = p_3(t) / p_2(t) = 0.96 / 0.99 = 0.97. \quad (5.2)$$

Пам'ятаючи, що навантажене резервування - це паралельне з'єднання

однотипних елементів, матимемо:

$$\lambda_1 = (25 \cdot 0.25 + 1 \cdot 10.25 + 1 \cdot 5.24) \cdot 10^{-6} = 2.174 \cdot 10^{-5} \quad (5.3)$$

де λ_1 - сумарна інтенсивність відмов елементів тієї частини схеми, що підлягає резервуванню.

Отже, щоб забезпечити задану надійність для всієї схеми, досить трьох однотипних елементів (для К,М), з'єднаних паралельно.

РОЗДІЛ 6

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Економічна ефективність автоматизації вимірюється ступенем зменшення загальної сукупної живої та минулої праці, що витрачається для виробництва одиниці продукції. При автоматизації сільськогосподарських виробничих процесів вартість капітальних затрат зазвичай зростає, а експлуатаційні витрати на одиницю продукції скорочуються. [5]

Загальна вартість технічних засобів автоматизації становить:

$$K_3 = K_{TO} + K_d + K_p + K_{щ}, \quad (6.1)$$

Де:

$K_{TO} = 50403$ грн. – вартість технологічного обладнання;

$K_d = 160$ грн. – вартість датчика температури;

$K_p = 600$ грн. – контролер «Arduino»;

Отже, $K_3 = 50403 + 160 + 600 = 51163$ грн.

Торгівельно-транспортні витрати будуть становити:

$$K_{TT} = 0,11 \cdot K_3, \quad (6.2)$$

$$K_{TT} = 0,11 \cdot 51163 = 5628 \text{ грн}$$

Витрати на монтаж технічних засобів становлять:

$$K_M = 0,17 \cdot K_3, \quad (6.3)$$

$$K_M = 0,17 \cdot 51163 = 8698 \text{ грн.}$$

Інші капітальні витрати будуть становити 2% від суми капітальних вкладень:

$$K_{KB} = 0,02 \cdot 51163 = 1023,26 \text{ грн.} \quad (6.4)$$

Капітальні витрати визначаємо за формулою:

$$K = K_3 + K_{TT} + K_M + K_{KB}, \quad (6.5)$$

$$K = 51163 + 5628 + 8698 + 1023,26 = 66512,26 \text{ грн.}$$

Визначивши суму капіталовкладень, можна знайти відрахування на амортизацію:

$$C_a = 0,142 \cdot K, \quad C_a = 0,142 \cdot 66\,512,26 = 9\,444,74 \text{ грн.}$$

Витрати на поточний ремонт будуть становити:

$$C_{\text{ПР}} = 0,18 \cdot K, \quad C_a = 0,18 \cdot 66\,512,26 = 11\,972,2 \text{ грн.}$$

Витрати на енергоресурси будуть становити :

$$C_e = P \cdot \Gamma \cdot 1,9 \quad (6.6)$$

Де: $P = 24$ кВт - потужність автоматизації;

$\Gamma = 135 \cdot 24 = 3240$ год. - кількість годин роботи

$$\text{Отже: } C_e = 24 \cdot 3240 \cdot 1,9 = 147\,744 \text{ грн.}$$

Витрати на оплату праці персоналу, що пов'язаний з експлуатацією системи автоматизації (в нашому випадку 1 оператор), становить:

$$C_3 = 1 \cdot 46 \cdot 8 \cdot 135 = 49\,680 \text{ грн, де } 1 - \text{кількість операторів;}$$

146 грн/год. – ставка оператора; 8 - години роботи на добу; 135 - кількість діб роботи на рік.

Отже річні експлуатаційні витрати будуть становити:

$$C = 9\,444,74 + 11\,972,2 + 147\,744 + 49\,680 = 218\,840,94 \text{ грн.} \quad (6.7)$$

Розрахунок основних показників економічної ефективності. Знайшовши річні експлуатаційні витрати і капітальні вкладення можна знайти зведені витрати:

$$B_{\text{ЗВ}} = C + E_H \cdot K \cdot B_{\text{ЗВ}} = 218\,840,94 + 0,15 \cdot 66\,512,26 = 228\,717,779 \text{ грн.}$$

Тоді чистий прибуток буде визначатись за формулою:

$$\text{Ч}_{\text{ПР}} = \Delta C_3 + \Delta C_B, \quad (6.8)$$

ΔC_B - прибуток за рахунок економії електричної енергії;

$$\Delta C_3 = C_3 - (1,2 \cdot \Gamma \cdot 1,6), \quad (6.9)$$

$$\Delta C_3 = 49\,680 - (1,2 \cdot 3240 \cdot 1,6) = 43\,459 \text{ грн.}$$

$$\Delta C_B = C_e - (P \cdot \Gamma \cdot 1,6 \cdot \Delta\Pi), \quad (6.10)$$

$$\Delta C_B = 147744 - (25 \cdot 3240 \cdot 1,6 \cdot 0,4) = 95904 \text{ грн.}$$

$\Delta\Pi = 40\% = 0,4$ - економія часу енергоспоживання при автоматизації.

$$\text{Ч}_{\text{пр}} = 43459 \text{ грн} + 95904 \text{ грн} = 139363 \text{ грн.}$$

Термін окупності установки визначається за формулою:

$$T_{\text{окуп}} = K/\text{Ч}, \quad (6.11)$$

$$T_{\text{окуп}} = 66\,512,26 / 139363 = 0,47$$

Отже, термін окупності автоматизації об'єкта складає приблизно 5 місяців, а чистий місячний прибуток складає 139363 грн.

ВИСНОВКИ

При виконанні магістерської кваліфікаційної роботи було вдосконалено систему автоматизації технологічного процесу сушіння зерна у шахтній прямоточній зерносушарці LAW SBC-8LE.

Виконали дослідження об'єкта керування на основі математичної моделі за каналом температури зерна та температури агента сушіння. При побудові математичної моделі враховувалася динаміка зміни технологічних параметрів та зміна вологовмісту зерна.

На основі дослідних даних побудовано алгоритм керування технологічним процесом на основі роботи створеної нейронної мережі. Виконали навчання нейронної мережі. Виконано перевірку роботи нейронної мережі за визначеними середньоквадратичними похибками, де похибка навчання не перевищує 3% та похибка випробування не більше 7%

Розроблено структуру верхнього та нижнього рівнів керування. До верхнього рівня відносяться апаратне забезпечення, що функціонує за алгоритмами керування на основі роботи нейронної мережі. Для роботи нижнього рівня вибрано контролер Arduino, який виконує функцію опитуваннясприймаючих елементів і передає вимірювання на верхній рівень системи керування, при цьому отримує керуючу дію для керування виконавчими механізмами.

Електротехнічна частина проекту охоплює розробку електричної принципової схеми, схеми з'єднань виконавчих механізмів і загального вигляду щита керування. Основу апаратної реалізації становить мікроконтролер Arduino.

У техніко-економічному розділі доведено доцільність впровадження автоматизованої системи: термін окупності системи становить 0,47 роки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Зберігання і переробка продукції рослинництва. / Г.І. Подпрятков, Л.Ф. Скалецька, А.М. Сеньков, В.С. Хилевич. – К.: Мета, 2002. – 495 с.
2. Активне вентилування та сушіння зерна: навч. посіб. / О.І. Гапонюк, М.В. Остапчук, Г.М. Станкевич, І.І. Гапонюк. – Одеса: ВМВ, 2014. – 326 с.: табл., рис.
3. Котов Б.І., Калініченко Р.А. Визначення впливу технологічних режимів двостадійного сушіння на енергетичні показники процесу // Зб.наук.пр. "Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин". Кіровоград. – 2003. – Вип. 33.- С.60-66.
4. Агротехнічні вимоги до роботи зерносушарок. URL: <https://vukladach.pp.ua/MyWeb/manual/agroinjenerija.htm> (дата звернення: 20.04.2025)
5. Технологія та проектування елеваторів: навч. посібн. / О.І. Шаповаленко, О.О. Євтушенко, Т.І. Янюк, В.А. Почеп; за ред. О.І. Шаповаленко. Нац. ун-т харч. технол. – Херсон: Олді-плюс, 2015. – 416 с.
6. Мерко І.Т. Наукові основи і технологія переробки зерна: підручник / І.Т. Мерко, О.В. Моргун. – Одеса: Друк, 2001. – 348 с.
7. Хомик Н.І. Механізація переробки та зберігання сільськогосподарської продукції: курс лекцій / Н.І. Хомик, В.П. Олексюк, О.П. Цьонь – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2016. – 288с.
8. Твердопаливний теплогенератор для зерносушарок. URL: <https://new-elevator.com.ua/products/teplogenerator/> (дата звернення: 14.02.2026)
9. Економічні зерносушарки LAW із рециркуляцією. URL: <https://kaltes.lv/ru/primary-grain-processing/grain-dryers/mine-type-grain-dryers/economical-grain-dryers/#prev> (дата звернення: 17.02.2026)
10. Енергоефективні технології та техніка сушіння харчової сировини: навчальний посібник / М.І. Погожих, В.О. Потапов, А.О. Пак, М.В. Жеребкін. – Х.: ХДУХТ, 2016. – 234 с.
11. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв: навчальний посібник / О.В. Дацишин, А.І. Ткачук, О.В. Гвоздєв та ін.; ред. О.В. Дацишин. – Вінниця: Нова Книга, 2009. – 488 с.
12. Shah R.K., Sekulic D.P. Fundamental of Heat Exchanger Design. – John Wiley & Sons, Inc, 2003. – 976 p.
13. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів / В. Лисенко, Є. Чернушенко, В. Решетюк, В. Мірошник, Н. Заєць, І. Цигульов – К.:Аграр Медіа Груп, 2016. – 476 с.
14. В.П. Лисенко, І.М. Болбот, В.А. Наливайко, К.В. Наконечна, Т.І. Лендел, Д.Є. Жук. Проектування систем автоматизації для АПК: Підручник. – Київ: ФОП Ямчинський О.В., 2022. – 626 с.

15. В.П. Лисенко, І.М. Болбот, С.А. Шворов, В.В. Коваль, Н.А. Заєць, Т.І. Лендел, К.В. Наконечна, А.І. Болбот. Основні методи та методики підготовки кваліфікаційної роботи магістрів: Навчальний посібник. – Київ: ФОП Ямчинський О.В., 2023. – 462 с.
16. Карта елеваторів України [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://elevatorist.com/karta-elevatorov-ukrainy>. (дата звернення: 19.04.2026)
17. КМЗ. ПРОЗОРИЙ ЕЛЕВАТОР: ЯК ВИГЛЯДАЄ РОЗУМНА ОПТИМІЗАЦІЯ [Електронний ресурс] / КМЗ. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://kmzindustries.ua/ua/news/prozrachnyy-elevator-kak-vyglyadit-umnaaya-optimizaciya>. (дата звернення 19.04.2026)
18. Зерносушарка моделі GSI [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: (<http://gsu.com.ua/ru/fotogalereya>. (дата звернення 19.04.2021)
Agritech Unit. Платформа для розвитку інновацій в агросекторі України та Східної Європи, 2017 Режим доступу до ресурсу: <http://agritech.unit.city/guide/ua#fullreport> (Дата звернення 11.03.2026)
- 19 Dudnyk, A., Lysenko, V., Zaets, N., Komarchuk, D., Lendiel, T., & Yakymenko, I. (2018, October). Intelligent control system of biotechnological objects with fuzzy controller and noise filtration unit. In *2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)* (pp. 586-590). IEEE.
- 20 Lysenko, V., Lendiel, T., Bolbot, I., & Nakonechnyy, I. (2022, October). Neural network structures for energy-efficient control of energy flows in greenhouse facilities. In *2022 IEEE 9th international conference on problems of infocommunications, science and technology (PIC S&T)* (pp. 21-26). IEEE.
- 21 Сімон, К. А., & Ніколюк, П. К. (2023). Нейронні мережі. *Комп'ютерні технології обробки даних*, 170-173.
- 22 Лопатко, О., & Микитин, І. (2016). Нейронні мережі як засіб прогнозування значення температури за перехідним процесом. *Вимірювальна техніка та метрологія*, (77), 65-70.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А1

**Максимальні значення температур сушильного агента і зерна
в шахтних зерносушарках**

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

ДОДАТОК А2

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

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

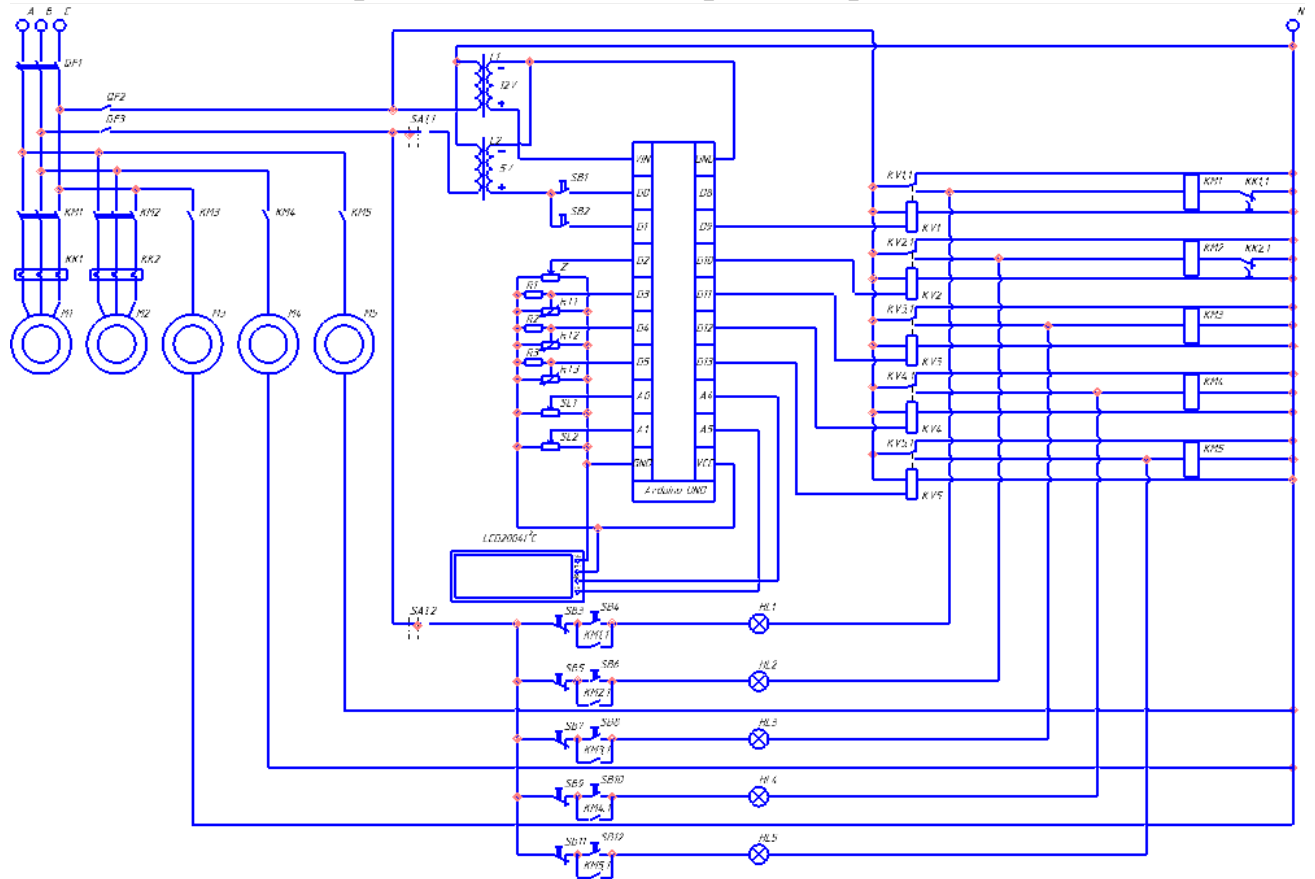
ДОДАТОК Б

**Розрахункові дані для побудови розгінної та нормованої розгінної
характеристики шахтної зерносушарки
для каналу керування температурою сушіння зерна**

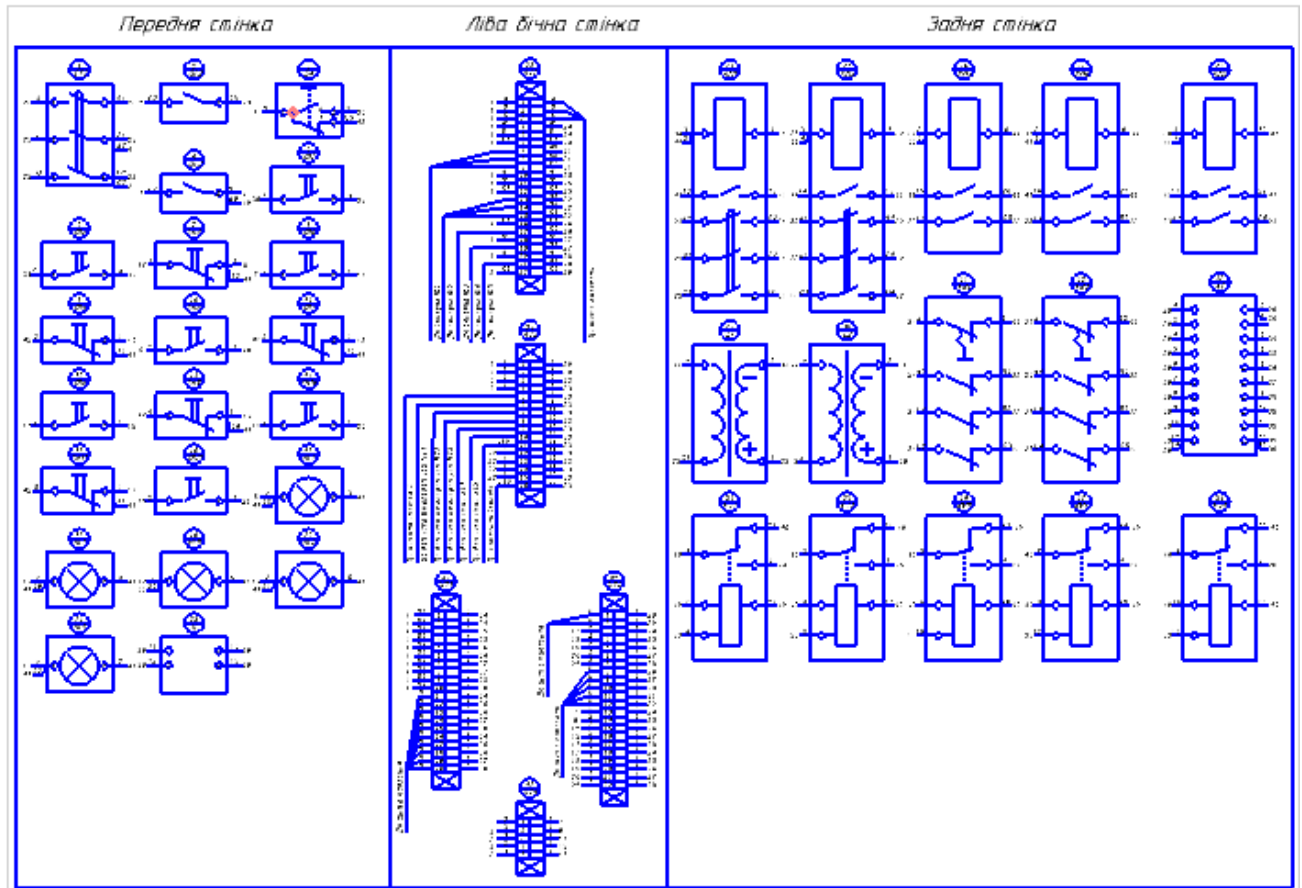
<i>Час t_i, с</i>	<i>Температура $T, ^\circ C$</i>	$y(t_i)$	<i>Час t_i, с</i>	<i>Температура $T, ^\circ C$</i>	$y(t_i)$
0	15,000	0	3100	49,653	0,889
100	17,126	0,055	3200	49,980	0,897
200	19,556	0,117	3300	50,286	0,905
300	21,830	0,175	3400	50,572	0,912
400	23,957	0,230	3500	50,839	0,919
500	25,947	0,281	3600	51,090	0,925
600	27,807	0,328	3700	51,324	0,931
700	29,548	0,373	3800	51,542	0,937
800	31,175	0,415	3900	51,747	0,942
900	32,698	0,454	4000	51,938	0,947
1000	34,122	0,490	4100	52,118	0,952
1100	35,453	0,524	4200	52,285	0,956
1200	36,699	0,556	4300	52,442	0,960
1300	37,864	0,586	4400	52,588	0,964
1400	38,954	0,614	4500	52,725	0,967
1500	39,973	0,640	4600	52,853	0,971
1600	40,926	0,665	4700	52,973	0,974
1700	41,818	0,688	4800	53,085	0,977
1800	42,651	0,709	4900	53,190	0,979
1900	43,431	0,729	5000	53,288	0,982
2000	44,161	0,748	5100	53,380	0,984
2100	44,843	0,766	5200	53,466	0,986
2200	45,481	0,782	5300	53,546	0,988
2300	46,078	0,797	5400	53,621	0,990
2400	46,636	0,811	5500	53,691	0,992
2500	47,158	0,825	5600	53,757	0,994
2600	47,647	0,837	5700	53,818	0,995
2700	48,103	0,849	5800	53,876	0,997
2800	48,531	0,860	5900	53,929	0,998
2900	48,930	0,870	6000	53,999	0,999
3000	49,304	0,880	6100	54,000	1,000

ДОДАТОК В

Фрагмент схеми електричної принципової



Фрагмент схеми електричних з'єднань



Фрагмент схеми електричних підключень

