

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

ННІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 681.5:664.1:636.082.474

ПОГОДЖЕНО

Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження
(назва ННІ)

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

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

_____ В.В. Каплун
(підпис) (ПІБ)

_____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

«__» _____ 2024 р.

«__» _____ 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

02.06.-КМР.1664"С".2024.09.26.013.ПЗ

на тему «ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ
АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМИ
РЕЖИМАМИ СУШІННЯ ЗЕРНА В БУНКЕРІ АКТИВНОГО
ВЕНТИЛЮВАННЯ»

Спеціальність:

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

Освітньо-професійна програма:

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

Гарант освітньої програми _____ І.М. Болбот, д.т.н., професор
(підпис) (П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

Виконав _____ Р.Д. Салантій
(підпис) (П.І.Б студента)

Керівник магістерської роботи _____ Н.А. Заєць, д.т.н., професор
(підпис) (П.І.Б, науковий ступінь та вчене звання)

КИЇВ-2024

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
автоматики та робототехнічних
систем ім. акад. І.І. Мартиненка
О.О. Опришко
« ____ » _____ 2024 р.

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

Салантію Руслану Денисовичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

Спеціальність:

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

Освітньо-професійна програма:

Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Тема магістерської роботи **«ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМИ РЕЖИМАМИ СУШІННЯ ЗЕРНА В БУНКЕРІ АКТИВНОГО ВЕНТИЛЮВАННЯ»**,

затверджена наказом ректора НУБіП України від 26.09.2024 року №1664«С»

Термін подання студентом магістерської роботи 15.11.2024 року

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

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

1. Аналіз і класифікація технологічних процесів збереження зерна в АПК.
2. Теоретичні передумови розробки раціональних енергозберігаючих режимів сушіння і активного вентиляювання зерна.
3. Розробка енергозберігаючих режимів активного вентиляювання зерна.
4. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань.
5. Розробка цифрової системи керування.
6. Схеми системи автоматизації.
7. Техніко-економічне обґрунтування.

Дата видачі завдання «27» вересня 2024 року

Керівник магістерської роботи _____

(Підпис)

Заєць Н.А.

(Прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____

(Підпис)

Салантій Р.Д.

(Прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Вступ	5
Розділ 1. Аналіз і класифікація технологічних процесів збереження зерна в АПК	7
1.1. Методи та основні технологічні операції обробки зерна	7
1.2. Способи та технологічні установки для сушіння зерна	10
1.3. Способи і методи зниження енерговитрат на сушіння зерна та часткова заміна рідкого палива електроенергією	16
Розділ 2. Теоретичні передумови розробки раціональних енергозберігаючих режимів сушіння і активного вентилявання зерна	23
2.1. Аналіз факторів, що впливають на енергоємність процесу сушіння зерна	23
2.2. Аналіз впливу засміченості зернового вороху на енерговитрати при обробці зерна активним вентиляванням	24
2.3. Розробка та дослідження математичної моделі зовнішнього тепло-і масообміну в процесі конвективного сушіння зерна в товстому шарі	27
Розділ 3. Розробка енергозберігаючих режимів активного вентилявання зерна	35
3.1. Обґрунтування раціональної структури режимів сушіння зерна активним вентиляванням	35
3.2. Енергетична ефективність застосування диференційних режимів	41
3.3. Основні технологічні вимоги до режимів роботи електричних тепловентиляційних установок	48
3.4. Функціональна схема автоматизації системи керування диференційованими режимами роботи установки активного вентилявання зерна	50
3.5. Визначення передатної функції бункера активного вентилявання зерна по каналу керування температурою зерна	54
Розділ 4. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань	57
4.1. Вибір алгоритму керування та визначення параметрів настройки регулятора	57
4.2. Реалізація алгоритму керування	59
4.2.1. Вибір промислових пристроїв керування	60
4.2.2. Вибір первинного вимірювального перетворювача САК	62
4.2.3. Вибір виконавчого механізму САК	67
4.2.4. Вибір частотного перетворювача	73
4.2.5. Вибір датчика рівня зерна	76
4.2.6. Вибір регулятора потужності для керування електронагрівачами	78
Розділ 5. Розробка цифрової системи керування	82
Розділ 6. Схеми системи автоматизації	90
6.1. Розробка схеми електричної принципової системи автоматичного	

керування диференційованими режимами активного вентилявання зерна в бункері БВ-40	90
6.2. Вибір апаратури захисту та керування	94
6.3. Вибір проводів та кабелів	97
6.4. Вибір щита керування	100
6.5. Розрахунок надійності системи автоматичного керування	101
Розділ 7. Техніко-економічне обґрунтування	102
Висновки	107
Список використаної літератури	109
Додатки	111

ВСТУП

Актуальність теми. 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% загальних витрат. Враховуючи низький тепловий ККД сучасних зерносушарок (до 50%), доцільним прийомом зниження витрат органічного палива є його часткова заміна електричною енергією.

Перспективним напрямом вирішення цієї проблеми, як показує світовий досвід, є реалізація (в господарствах) двостадійної технології зневоднення зерна: високотемпературне підсушування в зерносушарках та досушування до кондиції (14%) активним вентиляванням атмосферним або підігрітим повітрям за місцем зберігання. Термічно оброблене зерно із підсушеною поверхнею дозволяє збільшити строки його зберігання.

Але зменшення темпу сушіння зерна, при переході на примусове вентилявання, може призвести до накопичення зернової маси (після сушарки) і відповідного зростання потужності електричного обладнання.

При двостадійному сушінні зерна як складової технологічного процесу його тривалого зберігання у зерносховищах існують певні особливості. По-перше, сушіння зерна безпосередньо у зерносховищі є неможливим внаслідок дуже великої насипної щільності зерна. По-друге, у зерні в зерносховищі можуть виникати процеси саморозігрівання або внаслідок локального осередку більшої вологості зерна можливе його псування. Тому зерно із зерносховища за необхідності охолоджують та досушують.

Одним із ефективних способів зменшення енерговитрат (і питомої потужності обладнання) на досушування зерна є застосування імпульсно-періодичної роботи обладнання – обробки зерна сушильним агентом, що реалізується за принципом “сушіння-відлежування”, при диференційованих режимах проведення процесу. Позитивний досвід використання цього способу

в рециркуляційних зерносушарках може служити основою для оцінки доцільності його застосування.

Тому дослідження, спрямовані на енергетичне вдосконалення технології двостадійного сушіння зерна, підвищення ефективності використання електроенергії, обґрунтування раціональних параметрів та режимів роботи електрообладнання, є актуальними і своєчасними.

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

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

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

Для досягнення цієї мети сформульовані такі задачі:

- обґрунтувати перспективні напрямки підвищення енергоефективності процесів сушіння зерна і режимів роботи тепловентиляційних установок;
- обґрунтувати і оцінити енергетичну і технологічну ефективність режимів роботи електровентиляційних установок із диференціюванням за потужністю співвідношення нагрівання і транспортування повітря;
- удосконалити математичні моделі процесу видалення вологи із зерна в нерухомому шарі;
- обґрунтувати параметри електровентиляційного обладнання та режими його роботи.

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

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ І КЛАСИФІКАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЗБЕРЕЖЕННЯ ЗЕРНА В АПК

1.1. Методи та основні технологічні операції обробки зерна

В теперішній час існують різні технологічні прийоми збереження вологого зерна, що, з точки зору збереження якості, гарантують безпечне зберігання зерна до моменту його використання. Агробіологічною основою всіх наявних прийомів збереження зерна є управління головними факторами життєдіяльності зерна: вологістю, температурою, забезпечення киснем. Фізіолого-біохімічні і техніко-технологічні основи зберігання зерна розробляються протягом тривалого часу. Широко відомі роботи [1, 5, 6] автори яких виділяють основні способи зберігання зерна, які представлені на рисунку 1.1.

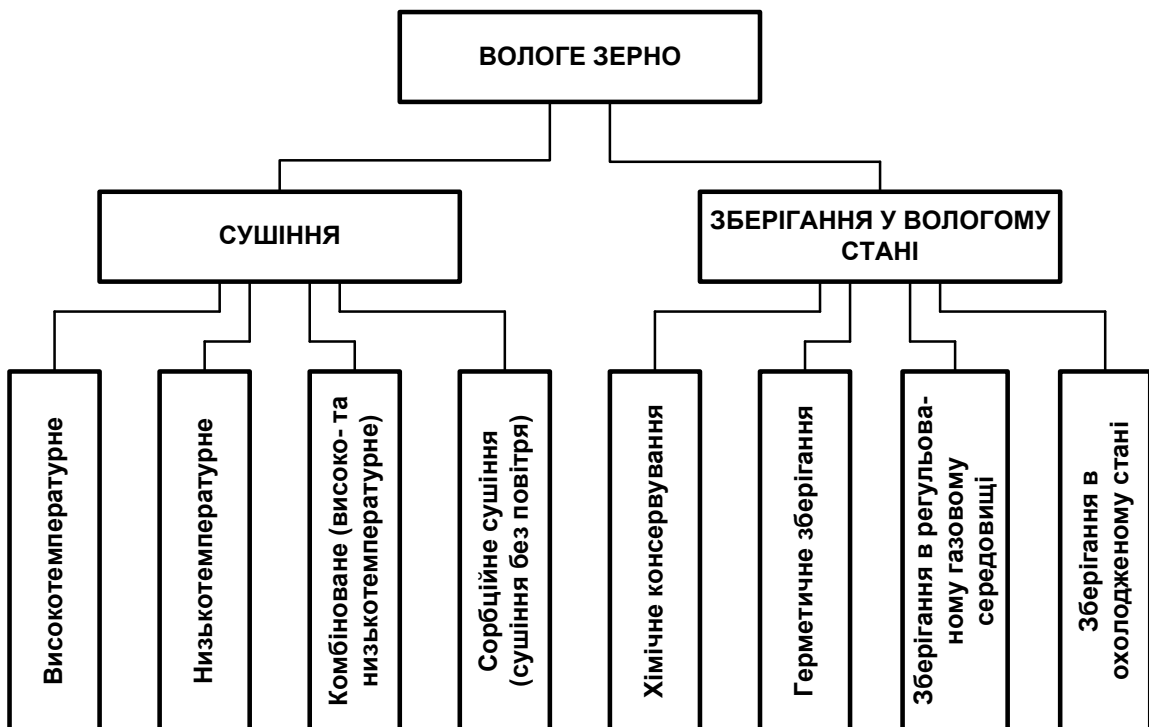


Рис. 1.1. Класифікація методів зберігання зерна

У світовій практиці втрати зерна в процесі зберігання знаходяться на рівні 10-15% при значних коливаннях, що пов'язано з рівнем виробничої бази, підготовки фахівців, кліматичними умовами.

Тому особливо важливим стає вибір адекватного методу консервації зерна, що визначається економічною доцільністю, матеріально-технічною базою господарства, а також призначенням і властивостями зернового матеріалу.

Технології зберігання зерна у вологому стані, а саме зберігання зерна у герметичному, хімічному, і газорегульованому середовищі зберігання, висвітлені в роботі [2]. Широкого розповсюдження ці методи в агропромисловому комплексі не отримали, оскільки, по-перше, дані технології обмежені кількістю споживачів фуражного зерна, по-друге, герметизація зерносховищ потребує значних капіталовкладень і постійного контролю [2].

Процес зберігання волого зерна в охолодженому стані досліджували [2], дана технологія вимагає машинних способів охолодження повітря: холодильних установок, теплових насосів. Для окупності цього устаткування необхідне його завантаження 800-1000 годин на рік, строк же навантаження обладнання для післязбиральної обробки зерна не перевищує 300 годин на рік. Тому для обробки зерна ця технологія в нашій країні широкого розповсюдження не набула.

В агропромисловому комплексі нашої держави у виробничих і зернопереробних галузях надається пріоритет сушінню зерна, як основному методу консервування [29]. Сушити зерно можливо, також, термічно або сорбційно.

Сушіння зерна без повітря – сорбційне сушіння шляхом підмішування до нього твердої речовини, що поглинає із зерна надлишкову вологу [3]. Сорбційне сушіння має ряд переваг в порівнянні з термічним сушінням, але за браком дешевої, твердої, некрихкої речовини, що легко зневоджується, регенерується, розповсюдження цей спосіб сушіння не отримав. Сорбційне

видалення вологи використовується в рециркуляційних сушарках як прийом енергозбереження, де реалізується шляхом змішування сухого зерна з сирим.

Термічне сушіння – основний і найбільш ефективний спосіб консервації вологого зерна, оскільки володіє цілим рядом переваг, які притаманні тільки йому.

Серед переваг цього методу консервування є наступні:

- універсальність (використання для насінневого, кормового, продовольчого зерна);
- якісна і довгострокова збереженість зерна;
- придатність обробленого зерна для багатоцільової реалізації;
- необмежена можливість споживання людьми, худобою, птицею.
- широкі можливості для регулювання пропускну здатності [9];
- можливість повної автоматизації процесу обробки [7].

Сухе зерно є найбільш стійке при зберіганні, транспортабельне і зручне для переробки.

Тому, проаналізувавши сучасні технології обробки зерна, можливо виділити такі основні операції післязбиральної обробки зерна (рис. 1.2).

Для забезпечення максимальної ефективності роботи наявного в господарствах обладнання післязбиральної обробки зерна особливо важливе значення має вибір раціональних режимів проведення технологічних процесів. Зокрема раціональні режими сушіння зерна повинні забезпечувати високу якість зерна після сушіння і найбільш високу техніко-економічну роботу сушильних установок. Режими сушіння нерозривно пов'язані із технологічною схемою, способом сушіння і конструктивними особливостями обладнання для сушіння.

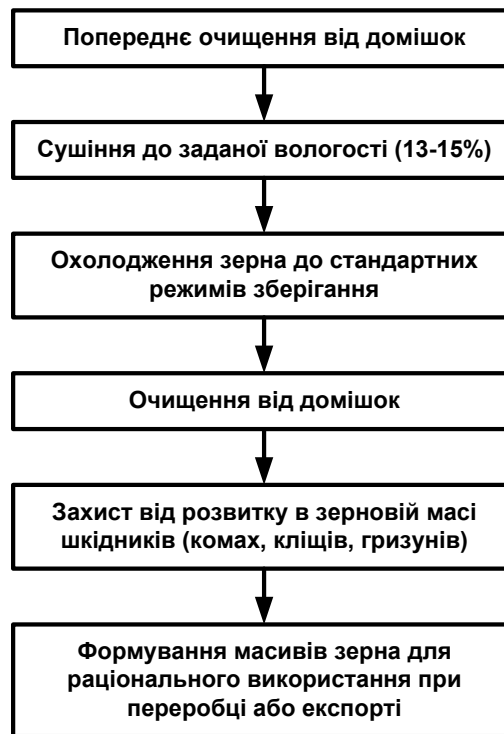


Рис. 1.2. Основні сучасні операції технологій прийому і обробки зерна

1.2. Способи та технологічні установки для сушіння зерна

Значимість і різноманітність технологій сушіння зерна призвела до розповсюдження сушильних установок для всіх видів зернових культур. Класифікація установок для сушіння за основними ознаками схематично зображена на рис. 1.3. Світова практика зерносушіння базується в основному на технології конвективного сушіння, оскільки інші методи енергопідводу в такому крупнотонажному виробництві, як сушіння, поки ще не є конкурентоздатними. Сушарки з кондуктивним підведенням теплоти мають невелику область застосування, в основному, при обробці насіннєвого зерна [20]. Спроби використання вакуумних, радіаційних, мікрохвильових сушарок [1] внаслідок технічної складності та високої вартості установок застосування в сільському господарстві не отримали. Найбільшого розповсюдження в

зернопереробній галузі АПК отримало зневоднення конвективним висушуванням при атмосферному тиску.

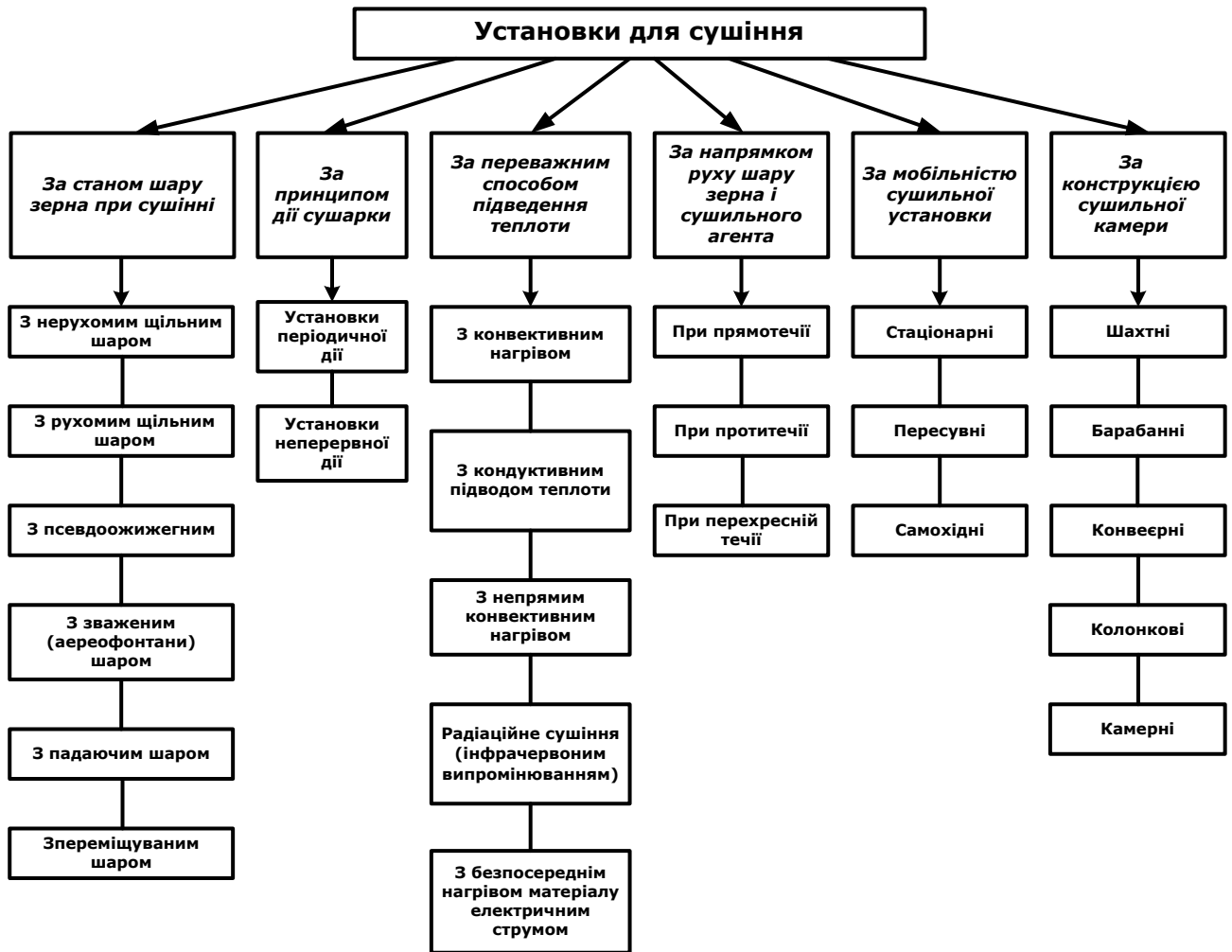


Рис. 1.3. Класифікація установок для сушіння зерна

Конвективне сушіння розділяють на дві основні групи:

- низькотемпературне;
- високотемпературне.

При конвективному способі сушіння шар зерна може бути: щільним нерухомим, щільним рухомим, падаючим, псевдозжиженим, у зваженому стані [27].

В щільному нерухомому шарі величина контактної поверхні зернівок і їх поверхні, що омивається агентом сушіння постійні. При сушінні зерна в

щільному нерухомому шарі температура сушильного агента обмежена і, як правило визначається допустимою температурою нагрівання зерна. Сушильне обладнання, в якому сушіння відбувається в щільному нерухомому шарі: сушарки камерні СКП-6, конвеєрні, тунельні, шахтні ВІС-2 або ВІС-42, установки активного вентилявання. Установки активного вентилявання широко застосовується для низькотемпературного сушіння зерна, сушильним агентом в яких є атмосферне або підігріте повітря [26]. Активне вентилявання є одним з найважливіших способів зберігання і покращення якості зерна, важливим засобом зменшення витрат на обробку і зберігання зерна. Практично вся американська технологія післязбиральної обробки зерна побудована на основі вентиляваних зерноскладищ.

Широкого розповсюдження у вітчизняних господарствах отримали вентилявані бункери з радіальним або вертикальним повітряним потоком. За часів СРСР господарства закупали бункери БВ-25, БВ-40 (рис. 1.4), С-50А, К850ФОЗ, УП-120А, УП-500, ЦЕМКПД-500, СНА-250 та інші.

Бункер активного вентилявання БВ-40 призначений для активного вентилявання насіння більшості зернових культур і є стаціонарною установкою циліндричної форми з конусоподібним дном. Процеси завантажування і розвантажування бункерів повністю механізовані, а процес вентилявання автоматизований.

Стінки бункера виготовлено із штампованої перфорованої сталі. В середині циліндра по центру вмонтовано циліндричний повітро-розподільник діаметром 750мм, в якому є поршень, що переміщується у вертикальному напрямку за допомогою лебідки, системи тросів і блоків у міру завантаження бункера. При повному завантаженні бункера зерном поршень перебуває у верхньому положенні.

При потребі повітря підігрівається в електрокалорифері, який монтується біля отвору вентилятора, що подає повітря в бункер. Бункер обладнаний двома пробовідбірниками, перетворювачем для контролю рівня зерна в бункері і трьома регуляторами вологості ВЦК. Регулятор вологості,

який вмонтований у нижню або середню частину зовнішньої стінки бункера, вмикає вентилятор при зниженні вологості зерна нижче заданої. Два інших регулятори вологості вмикають або вимикають електрокалорифер.

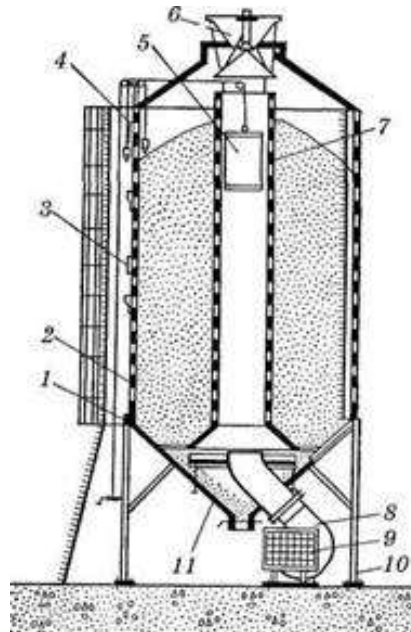


Рис. 1.4. Бункер активного вентилявання БВ-40:

1 – кільцева рама; 2 – корпус; 3 – регулятор вологості; 4 – вантажини; 5 – клапан; 6 – розподільник зерна; 7 – труба повітро-розподільвальна; 8 – вентилятор з електродвигуном; 9 – електрокалорифер; 10 – опори корпусу; 11 – регулювальне кільце

З чотирьох бункерів БВ-40 складається установка ОБВ-160 (рис. 1.5). Групу бункерів для вентилявання комплектують двома норіями, зернопроводами і чотирма пультами керування.

Також, використовують в господарствах, обладнання для напільного низькотемпературного сушіння: стаціонарні установки з горизонтальною підлогою – СВУ-1, СВУ-1М, СВУ-2, СВУ-63 та ін., з похилою підлогою установка “Каркас”, напільні переносні ГПЗП-48, ГПЗП-55, ТВУ-2 [26].

Сьогодні на ринку України представлені металеві вентилявані зерносховища типу СМВУ виробництва ТПК „ЛОРД” (м. Миколаїв); зерносховища з активною вентиляцією марки СЗ, Харківського об’єднання “Зернобуд”; зерносховища для досушування ДЗ-100, ДЗ-200 виробництва ОАО “НИИфермаш”; зерносховища закордонного виробництва.



Рис. 1.5. Зовнішній вигляд установки ОБВ-160

Таблиця 1.1.

Характеристика бункерів активного вентилявання зерна

Показник	Марка бункера					
	К-878	БВ-6	БВ-12,5	БВ-25	БВ-40	СЕЦ-1,5
Місткість бункера, м ³	38,0	8,5	17,5	35,0	50,0	1,5
Маса пшениці, т	32,5	6,0	12,5	25,0	40,0	1,3
Діаметр бункера, м	3,0	1,8	1,8	3,2	3,1	1,4
Габаритні розміри, м:						
Висота	8,8	5,8	8,4	7,8	11,0	3,2
Ширина	3,2	3,5	3,5	4,5	3,5	1,5
Довжина	5,1	3,5	3,5	4,5	4,4	2,5
Подача повітря, тис. м ³ /год.	11	3,3	5,6	11,3	11,3	0,16
Встановлена потужність, кВт:						
На підігрів повітря до 6°С	26,0	9,0	17,5	25,5	54,0	3,3
Без підігрівання повітря	8,0	3,0	5,5	7,5	11,0	1,0
Маса бункера, т	2,4	0,8	1,8	1,5	2,9	0,2

Високотемпературне сушіння в основному реалізується у рухомому щільному шарі зерна. Сушіння в псевдорозрідженому шарі широкого розповсюдження в АПК не отримали внаслідок низьких техніко-економічних показників.

Рухомий щільний шар формується при неперервній подачі зерна в сушильну камеру і створення необхідного підпору в нижній частині. В рухомому щільному шарі використовують режими з високою температурою

агента сушіння. Товщина шару складає 0,1–0,5 м. Великі питомі витрати агента сушіння до $5000\text{м}^3/(\text{т}\cdot\text{год.})$ в поєднанні з невеликою товщиною шару забезпечує рівномірне висушування всього шару [6].

Сушильні камери з рухомим щільним шаром отримали найбільше розповсюдження в АПК. До них відносяться шахтні і колонкові зерносушарки неперервної дії.

На підприємствах галузі хлібопродуктів (елеватори) в основному експлуатують 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 із-за періодичного завантаження – вивантаження зерна.

В сільському господарстві для високотемпературного сушіння зерна використовують також універсальні зерносушарки: барабанні СЗПБ-2.5, СЗСБ-8, СЗСБ-8А.

Для сушіння зерна в умовах фермерських господарств за кордоном широко використовують енергоекономні пересувні зерносушарки. В Україні з пересувних сушарок використовують: К4-УСА і К4-УС2-А. Пересувні сучасні зерносушарки на ринку представлені закордонними фірмами “МЕРУ”, “ТОФОРА”.

У високотемпературних сушарках температура зерна на останніх стадіях сушіння наближається до граничної температури нагрівання, що для продовольчого зерна складає $50\text{--}55^\circ\text{C}$. Тому більшість зерносушарок мають вмонтований охолоджувач, охолодження в якому відбувається атмосферним повітрям.

Важливим напрямком удосконалення технології сушіння є раціональне поєднання високотемпературного і атмосферного сушіння, зокрема двостадійне сушіння.

При двостадійному сушінні основне видалення вологи відбувається у високотемпературних сушарках, а досушування – активним вентилуванням

атмосферним повітрям в процесі зберігання. Тобто технологія двостадійного сушіння виключає операцію охолодження зерна в сушарці на вмонтованих або виносних охолоджувачах, які мають низьку технологічну і експлуатаційну ефективність, а здійснюється за місцем зберігання. Високий енергетичний, техніко-економічний, технологічний ефект, як показано в роботах [11], досягається за рахунок використання теплоти, акумульованої зерном в сушарці, і сушильного потенціалу атмосферного повітря, яким вентилюється зерно за місцем зберігання.

1.3. Способи і методи зниження енерговитрат на сушіння зерна та часткова заміна рідкого палива електроенергією

Першочерговою проблемою первинної обробки зерна є зменшення енерговитрат. На стадіях післязбирального обробітку енерговитрати складають до 70% від необхідності на повне виробництво. В структурі енерговитрат найбільшу частину займає термічне сушіння [17].

Напруженість паливно-енергетичного балансу господарств вимагає пошуків техніко-технологічних заходів зниження витрат традиційних видів палива. Класифікуючи способи зниження енергоспоживання на сушіння, які викладено в роботах [18], на основі аналізу взаємодії системи: матеріал – енергоносій – обладнання – технологія, можна відмітити, що за методами досягнення кінцевого ефекту, всі розглянуті способи енергозбереження можна розділити на п'ять основних груп (рис. 1.6).

До першої групи, “зміна початкового стану матеріалу, що подається на сушіння”, відносяться прийоми, які можуть носити агротехнічний, технологічний або суто технічний характер.

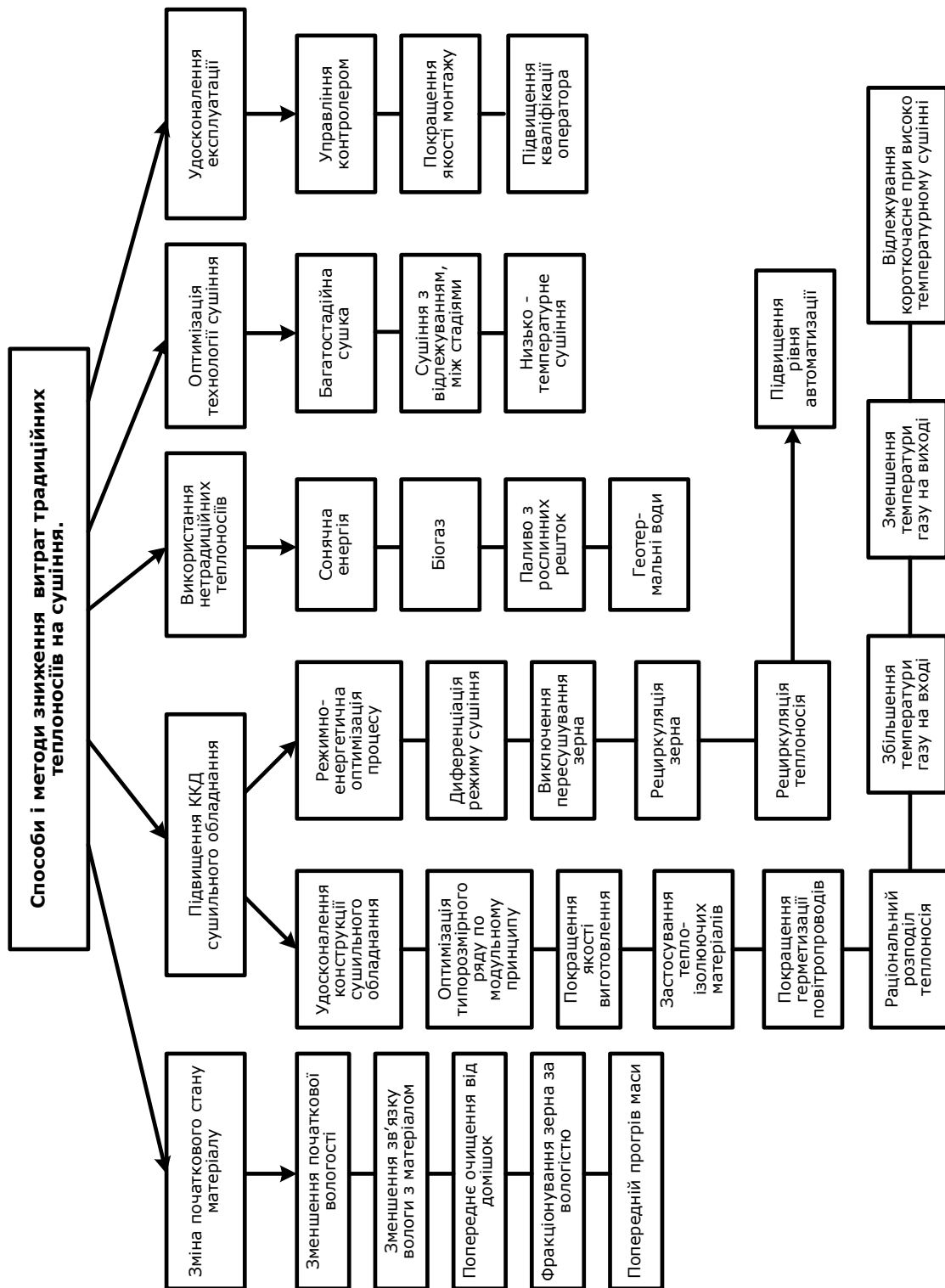


Рис. 1.6. Класифікація способів і методів зниження енергоємності процесу сушіння

Попередній прогрів зернової маси переслідує мету стабілізації температури зерна на межі гранично допустимої (для даної вологості) температури і одночасне випаровування вологи до 30-40% від загальної кількості [27], що видаляється з зерна у процесі сушіння. В результаті нагрівання інтенсифікується процес дифузії вологи із внутрішніх шарів до його поверхні під час сушіння, при цьому зменшуються витрати теплоти на випаровування вологи, що і виправдовує затрати на нагрівання. Крім цього попереднє нагрівання зерна в рециркуляційно-ізотермічних умовах забезпечує значне скорочення кількості циклів рециркуляції, що також зменшує енерговитрати. Теплообмін при попередньому прогріванні може бути кондуктивним – в радіаторах; конвективним – в псевдозрідженому або падаючому шарі [27].

Попереднє нагрівання проводять в спеціальних стаціонарних пристроях або безпосередньо в надсушильних бункерах за рахунок утилізації відпрацьованого теплоносія.

При сушінні попередньо нагрітого зерна витрати теплоти на сушіння зменшуються від 15 до 20% порівняно із сушінням без попереднього нагрівання [23].

До другої групи віднесені методи, основані на підвищенні ККД сушильного обладнання, які в свою чергу, можливо розділити на: способи удосконалення конструкцій сушильних апаратів; режимно-енергетичну оптимізацію процесу сушіння.

Існують два підходи до режимно-енергетичної оптимізації: у першому випадку експлуатують тепло-масообмінні властивості зернівки і зернової маси, як об'єктів сушіння, для розробки раціональних режимів; другі спрямовані на створення умов для максимального використання теплоти енергоносіїв, та покращення контролю над процесом.

Більш широке застосування отримала друга група методів зменшення енерговитрат на сушіння, зокрема, утилізація теплоти відпрацьованого теплоносія. В практиці зерносушіння використовують різні способи утилізації

теплоти відпрацьованого теплоносія, втрати якої можуть досягати 60% невиробничих затрат в зерносушарках [23]. Тому утилізація теплоти відпрацьованого сушильного агенту дозволяє отримати найбільшу економію теплової енергії при сушінні зерна на всіх типах сушильних установок.

Найбільшого розповсюдження набув спосіб, при якому відпрацьований теплоносій використовують повторно у сушильному циклі – рециркуляція. Існують дві можливості організації рециркуляції в установках, які використовують як сушильний агент повітря: перший – частина відпрацьованого повітря повертається в зону перед підігрівачем так, що вся кількість сушильного агента (свіже і відпрацьоване повітря) підігрівається на вході в сушарку, другий – частина відпрацьованого повітря подається в зону підігрівача, змішується з нагрітим повітрям і далі безпосередньо подається в сушарку. Останній варіант потребує підвищених витрат повітря і має меншу економічність.

Найбільше розповсюджена перша схема, при реалізації якої можливо зменшити витрати палива до 30% [28].

Перспективними є способи зменшення енерговитрат шляхом підвищення контролю і можливості регулювання температури, вологості, подачі зерна і теплоносія, що досягається за рахунок автоматизації процесу [8]. Це дає можливість зменшити проміжки часу непродуктивної роботи обладнання (пересушування і перегрівання зерна), а також використовувати обладнання з максимальною продуктивністю і якістю виходу кінцевого продукту [21].

Підвищення технологічної і економічної ефективності процесу сушіння можливо досягти також на основі закономірностей міграції вологи в усій оброблюваній масі і в кожній зернівці окремо. Зокрема в процесі відлежування зерна, за законами міграції вологи зовнішня поверхня підсушених зерен починає зволожуватись за рахунок більш високої вологості внутрішніх шарів.

Імпульсно-періодичну подачу агенту сушіння використовують як енергозберігаючий прийом і при високотемпературному сушінні, і при низькотемпературному.

В практиці зерносушіння застосовується відлежування однорідного за вологістю і температурою зерна в умовах послідовного пропускання його крізь паралельно розташовані шахти однієї і тієї ж сушарки, або через шахти двох паралельно розташованих зерносушарок; час відлежування обмежується місткістю надсушильних бункерів і не перевищує 10-15хв. [27].

Відлежування багатокомпонентної за вологістю і температурою суміші зерна, яке дозволяє частково перерозподілити вологу між вологими і сухими компонентами зернової суміші і одночасно зрівняти їх температуру, використовується для сушіння за двостадійною технологією, тривалість відлежування може досягати 6-12 годин [11].

Диференціація режимів сушіння за температурою теплоносія та витратою, дозволяє інтенсифікувати процес сушіння і уникнути перегрівання зерна. Диференціацію проводять за висхідними, або низхідними режимами.

Значні можливості зниження енергоємності і забезпечення високої якості зерна містяться у виборі адекватної технологічної схеми проведення процесу сушіння. Витрати енергії при низькотемпературному сушінні атмосферним повітрям, при сприятливих погодних умовах, визначаються тільки витратами на вентилявання і складають в середньому 25-30 кВт-год/т [26]. Сюди ж відноситься перспективний спосіб сушіння сировини в нерухомому шарі зі зворотною продувкою і видаленням висушеної частини шару.

При низькотемпературному сушінні широкі можливості для економії традиційних теплоносіїв дає використання поновлюваних джерел енергії.

Аналізуючи дослідження [10] із застосування сонячної енергії для сушіння можна зробити висновок про перспективність їх застосування в першу чергу в установках активного вентилявання, де сушіння відбувається при низьких температурах.

Одним із заходів зменшення затрат традиційних видів палива є використання палива з рослинних решток (солома: лушпиння, тощо). Перетворення такого палива в теплоносії здійснюється в водонагрівних котлах, які дозволяють отримати теплоносії (повітря, рідина) з температурою 60...90°C. Доцільність використання низько температурних теплоносіїв для нагрівання сушильного агента в зерносушарках досліджувалась в ННЦ “ІМЕСГ”[18].

Зниження енерговитрат можливо досягти і за рахунок удосконалення технології сушіння шляхом комбінованого поетапного використання зерносушарок і вентиляованих сховищ. За цією технологією зерно інтенсивно підсушують в сушарках до 16-18% вологості і далі досушують за місцем зберігання до кондиційної вологості атмосферним або підігрітим на декілька градусів повітрям.

Реалізація цієї технології може зменшити витрати енергії на сушіння на 30-40% в залежності від початкового стану матеріалу, що подається на сушіння [23]. Поєднання сушіння і вентилявання забезпечує кращі посівні якості насіння в порівнянні із сушінням в зерносушарці.

П'ята група способів зниження енергоємності процесів сушіння поєднує методи з удосконалення прийомів експлуатації сушильного обладнання, в тому числі і за рахунок автоматизації. Автоматизація забезпечує управління процесом з використанням раціональних режимів проведення процесів, тобто безперервну зміну параметрів процесу у відповідності зі зміною стану матеріалу або зовнішнього середовища, в результаті цього кожний етап (умовний етап) сушіння проводять з максимальною інтенсивністю і мінімальними витратами енергії. При цьому “виключається” витрата енергії на перегрів або пересушування матеріалу і мінімізуються теплові втрати. Реалізується автоматизація на сучасному етапі з використанням ЕОМ, що в автоматичному режимі здійснює управління вентилятором і підігрівачем.

Аналізуючи літературні джерела, щодо вибору технологічних параметрів та режимів проведення сушіння активним вентиляванням, зустрічаємо різні рекомендації. Зокрема рекомендації з вибору ступеню підігріву сушильного агента можна розділити на дві групи. До першої відносяться ті, що рекомендують підігрівати повітря на 2-7°C [7], тобто тільки для досягнення гігроскопічної рівноваги між сухим зерном і повітрям, що крізь нього продувається; до другої підігрів на 7-20°C. Діапазон вибору кількості витрат повітря, за різними літературними джерелами, при сушіння активним вентиляванням однієї планової тони зерна коливається від 30 до 525 м³/т·год., аерації зерна від 7 до 30 м³/т·год.

При сушінні атмосферним або дещо підігрітим повітрям тривалість процесу вологовітдачі складає декілька діб, а у вологу погоду і при великій початковій вологості зерна до декількох тижнів, що підвищує небезпеку псування зерна.

За таких умов при розробці нової техніки доцільно орієнтуватись на реалізацію двостадійної технології: в період жнив, як найбільш напружений, здійснювати операції необхідні для забезпечення збереження урожаю, а в післязбиральний період - доведення його до потрібних кондицій.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ РОЗРОБКИ РАЦІОНАЛЬНИХ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ РЕЖИМІВ СУШІННЯ І АКТИВНОГО ВЕНТИЛЮВАННЯ ЗЕРНА

2.1. Аналіз факторів, що впливають на енергоємність процесу сушіння зерна

Технологія двостадійного сушіння передбачає високотемпературне сушіння в сушарці до певної вологості W , і досушування на установках активного вентиляювання (бункери активного вентиляювання, склади з напілними повітропроводами), як це зображено на схемі (рис. 2.1).

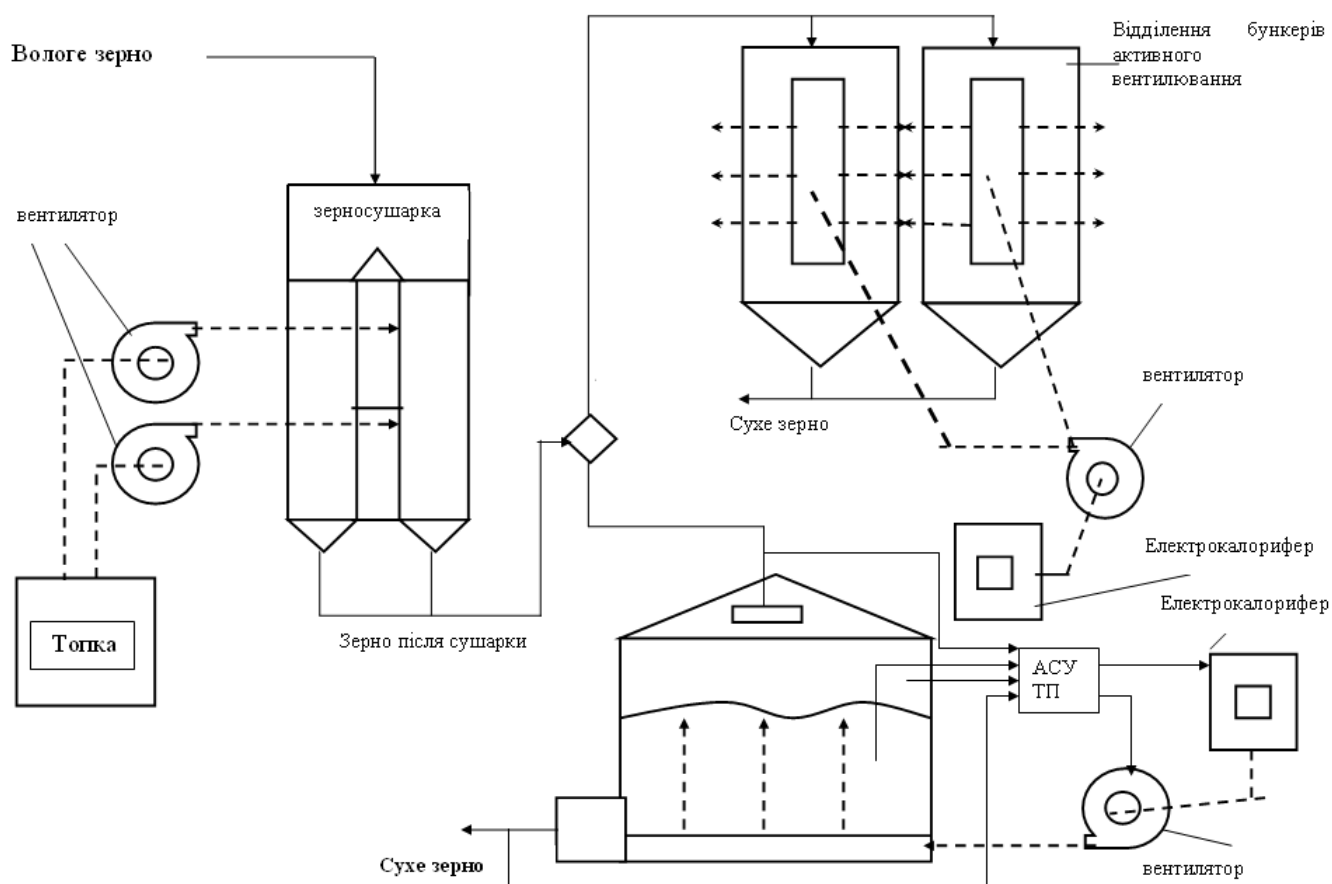


Рис. 2.1. Схема реалізації процесу двостадійного сушіння

Енергоємність процесу E сушіння залежить від сумарної кількості використаної теплової енергії Q_T (енергія палива) і електричної Q_e :

$$E = Q_T + Q_e \quad (2.1)$$

Як для високотемпературної стадії сушіння, так і для низькотемпературної, важливими характеристиками, від яких залежить енергоємність процесу сушіння, є характеристики зернової маси як матеріалу, з якого необхідно виділити вологу. До них відносяться початкова вологість зерна, теплофізичні характеристики зерна, забрудненість зернової маси соломною, насінням і стеблами бур'янів (останнє стало особливо актуальним в останній час, оскільки забур'яненість посівів зернових значно зросла).

При складанні математичної моделі із всієї сукупності параметрів технологічного процесу враховували найбільш суттєві з точки зору впливу на енергоспоживання, причому число параметрів визначило рівень моделі. До вибраних параметрів віднесли: температуру і витрати сушильного агента, кінцеву і початкову вологість зерна, забрудненість зернового насипу, режими роботи обладнання для сушіння і активного вентилявання, тепломасообмінні характеристики зернівки, як матеріалу, що подається на сушіння.

2.2. Аналіз впливу засміченості зернового вороху на енерговитрати при обробці зерна активним вентиляванням

Витрати теплоти Q на сушіння зернової маси під час сушіння, дорівнюють:

$$Q = m \cdot q_m, \quad (2.2)$$

де q_m – питомі витрати теплоти на одиницю зернової маси;

m – маса зерна, що висушується.

Питомі витрати теплоти визначити із очевидного співвідношення:

$$q_m = \frac{L \cdot \gamma \cdot C_t \cdot (t - t_0) \cdot \tau_m}{A} \quad (2.3)$$

де L – подача теплоносія $\text{м}^3/\text{год}$; γ – густина теплоносія $\text{кг}/\text{м}^3$; C_t – теплоємність теплоносія $\text{кДж}/\text{кг}\cdot\text{град}$; t – температура теплоносія, град; t_0 – початкова температура теплоносія до проходження підігрівача, град; τ_m – час сушіння зернової маси, год; A – місткість сушильної камери, кг.

Зернова маса неоднорідна, вона складається з чистого зерна масою m_z , і домішок масою m_d .

$$m = m_z + m_d, \quad (2.4)$$

де m_z – маса зерна

m_d – маса домішок (солома; стебла, насіння бур'янів)

З урахуванням (2.2) та (2.4), вираз (2.3) можна записати у вигляді:

$$q_m = \frac{L \cdot \gamma \cdot C_t \cdot (t - t_0) \cdot \left[\tau_z + \left[\left(\frac{m_d}{m_z} \right) \cdot (\tau_d - \tau_z) \right] \right]}{A} \quad (2.5)$$

де τ_z – час сушіння зерна, год;

τ_d – час сушіння домішок, год.

Величину m_d/m_z позначимо літерою S – забрудненість зернової маси:

$$S = \frac{m_d}{m_z} \quad (2.6)$$

Підставимо (2.6) в (2.5) отримаємо залежність питомих витрати теплової енергії на сушіння від забрудненості зернової маси:

$$q_m = \frac{[L \cdot \gamma \cdot C_t \cdot (t - t_0)] \cdot [\tau_z + S \cdot (\tau_d - \tau_z)]}{A} \quad (2.7)$$

З формули (2.7) очевидно, що залежність питомих витрат є функцією від (S, τ_z, τ_d) , оскільки $\tau_z(W_0)$, $\tau_d(W_{0d})$ де W_0 – початкова вологість зерна, W_{0d} – початкова вологість домішок, отже, щоб виявити тенденцію зміни q_m потрібно знати залежність часу сушіння зернової маси $\tau_m(S, \tau_z, \tau_d)$.

На рис. 2.2, 2.3 наведені результати чисельних експериментів, виконаних з використанням методу сіток в модифікації Єсакова Ю.В. [12] для

умов сушіння засміченого зерна в шарі значної (1.5–2.5м) висоти, характерної для установок активного вентилявання.

При розрахунках приймали: початкова вологість зерна W_0 – 20%, соломи W_c – 26%, бур'янів W_t – 40%, кінцева вологість зернової маси W_k – 15%, вологовміст d теплоносія (повітря) є нерегульованим параметром (як правило d – 7 г вологи/кг сухого повітря); питома подача теплоносія L – 400 м³/год. на тону вологого матеріалу; навантаження матеріалу P – 175 кг/м², рівень нагріву повітря Δt – 2, 4°C.

Аналіз представлених результатів свідчить, що енергозатрати збільшуються на 5% (при засміченості 7% і підігріванні повітря на 2-4°C в порівнянні із засміченістю 2%), і зростають на 12% і 7% при засміченості 13% і підігріванні повітря на 2°C, 4°C відповідно.

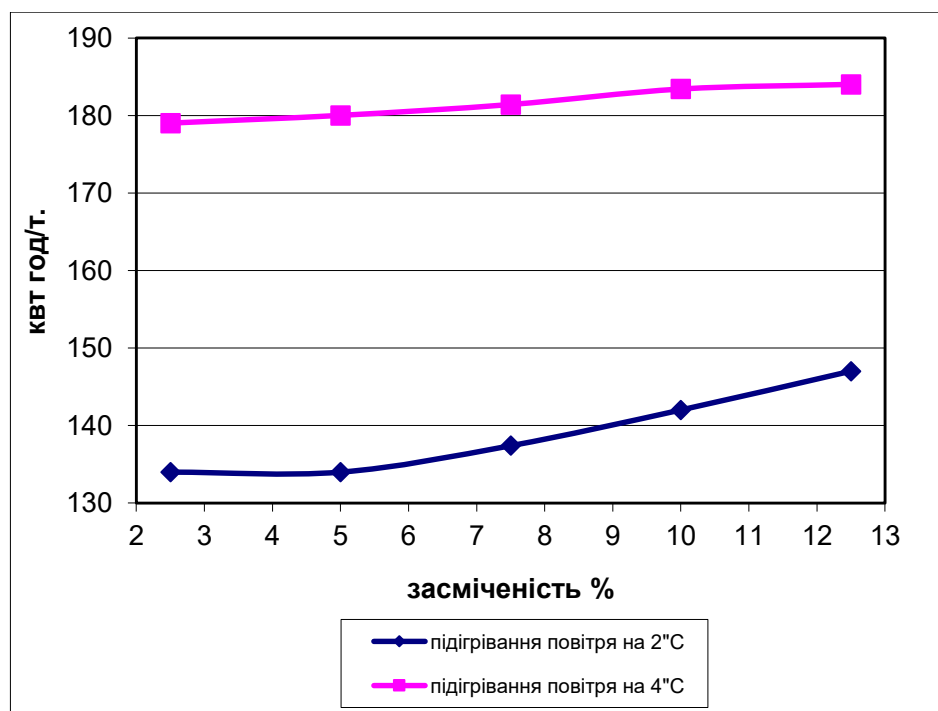


Рис. 2.2. Залежність витрат електричної енергії на активне вентилявання від засміченості при доведенні зерна $W_0 = 20\%$ до кондиційної вологості 14%

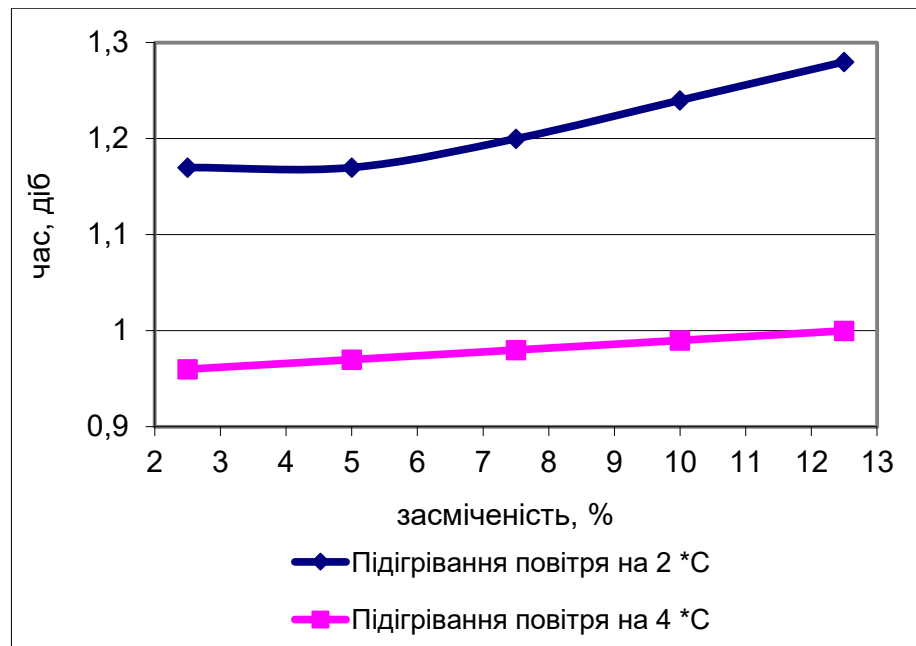


Рис. 2.3. Залежність часу обробки від засміченості при доведенні зерна $W_0 = 20\%$ до кондиційної вологості 14%

2.3. Розробка та дослідження математичної моделі зовнішнього тепло- і масообміну в процесі конвективного сушіння зерна в товстому шарі

Аналітичний розгляд зовнішньої задачі тепло-масообміну в процесах сушіння зерна з урахуванням взаємного впливу багаточисельних визначальних факторів досить складний. Це обумовлено труднощами з визначення кінетичних коефіцієнтів і сил, що рухають реальні процеси сушіння [22].

Основою теоретичних досліджень процесу конвективного сушіння товстого шару матеріалу є опис процесу диференціальними рівняннями. Точність розв'язку рівнянь залежить від прийнятих спрощень і умов, що компенсуються в ряді випадків введенням в математичні вирази експериментальних коефіцієнтів з використанням основних положень теорії теплопровідності і теплопереносу.

Тому для вирішення прикладних задач тепло- і масообміну при описі сушіння щільного шару матеріалу, використовують спрощений механізм тепло- масообміну, який можна описати системою диференціальних рівнянь.

Для врахування теплоти, що виділяється внаслідок процесу самозігрівання зернового насипу [14], в перше рівняння системи введемо доданок, що враховуватиме цю теплоту. Отримаємо:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + 3600 \cdot V \frac{\partial t}{\partial \tau} + \tau \cdot (a + \exp(b + pW + j\theta)) = -\frac{\gamma_z \cdot C_z}{\gamma_v \cdot C_v} \cdot \frac{\partial \theta}{\varepsilon \cdot \partial \tau} - \frac{\gamma_z r'}{\gamma_v C_v \varepsilon} \frac{\partial W}{\partial \tau} \cdot \frac{1}{100} \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = -\frac{\gamma_a}{10 \cdot \gamma_v} \cdot \left(\frac{\partial d}{\partial \tau} + 3600 \cdot V \frac{\partial d}{\partial x} \right); \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + 3600 \cdot V \frac{\partial t}{\partial x} = -\frac{a_q \cdot \gamma_z}{\gamma_v C_v \cdot \varepsilon} \cdot (t - \theta); \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = -K(t, V, W_0, \varphi) \cdot (W - W_p) \quad (2.11)$$

де t – температура сушильного агента, °С; d – вологовміст сушильного агента, г/кг сухого повітря; W – вологість зерна, %; θ – температура зерна, °С; V – швидкість сушильного агента, м/с; c_z , c_v – теплоємність зерна і повітря, кДж/кг·°С; ε – порозність зернового шару; r' – прихована теплота пароутворення, кДж/кг; a_q – коефіцієнт тепловіддачі, ккал/кг·год·°С; γ_z – об'ємна маса зерна, кг/м³; γ_v – питома вага повітря, кг/м³; K – коефіцієнт сушіння; 1/год.; W_p – рівноважна вологість зерна, кг/кг с.р.; x – просторова координата, м; τ – час, год.; a , b , p , j – сталі коефіцієнти, що характеризують потужність джерела теплоти внаслідок самозігрівання зернового насипу.

Система рівнянь (2.8)-(2.11) досить точно описує процес низькотемпературного досушування зерна в товстому шарі. Для високотемпературного сушіння доданком, що характеризує самозігрівання, можна знехтувати, тоді систему рівнянь (2.8-2.11) можна дещо спростити.

Якщо має місце повільне вентилявання товстого шару матеріалу, то в цьому випадку сушіння протікає у вузькій області, а не по всій висоті сушарки, хоча і при різних швидкостях. Характер протікання такого процесу сушіння представлений на рис. 2.4.

Таким чином, при вентиляванні товстого шару вологого зерна, зона сушіння повільно просувається від входу місця подачі повітря до виходу. При незначній інтенсивності вентилявання, коли має місце локальна рівновага вологості зерна і повітря, то баланси маси і енергії в системі (2.8–2.11) зводяться до системи рівнянь, наведених нижче (оскільки градієнт температури зерна (∇t) досить малий і ним можна знехтувати [15]) :

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = -\frac{\gamma_s}{10 \cdot \gamma_z} \cdot \left(\frac{\partial D}{\partial \tau} + 3600 \cdot V \frac{\partial D}{\partial x} \right); \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + 3600 \cdot V \frac{\partial t}{\partial x} = -\frac{a_q \cdot \gamma_z}{\gamma_s C_s \cdot \varepsilon} \cdot (t - \theta). \quad (2.13)$$

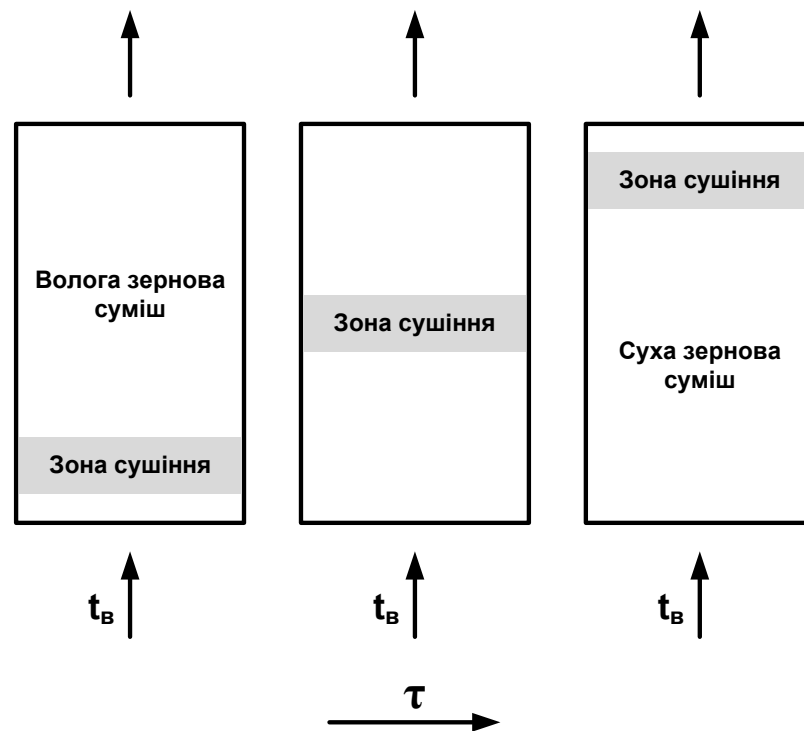


Рис. 2.4. Схема переміщення зони сушіння у шарі зерна

Тобто температура зернової маси швидко вирівнюється (в порівнянні з вологістю зернової маси) і стає рівною температурі мокрого термометра, що підтверджують дослідження [14].

Якщо установка активного вентилявання гарно ізольована (наприклад зерносковище з товстими стінами) і повітря рівномірно розподіляється в шарі

зерна, що піддається сушінню, то в довільний момент часу вологовміст зерна змінюється лише в напрямку руху сушильного агента.

Як відмічено в роботі [15], локальний коефіцієнт масообміну по висоті сушарки незначно відрізняється від середнього і якщо можливо знехтувати граничними ефектами біля стін, то для локальної швидкості сушіння можливо використовувати рівняння Ликова:

$$\frac{\partial W(\tau)}{\partial \tau} = -K(t, V, W_0, \varphi) \cdot (W(\tau) - W_p(t, D)). \quad (2.14)$$

Баланс маси в області нескінченно малої товщини шару зерна Δx , на протязі дуже малого проміжку часу $\Delta \tau$ можна визначити так:

$$-\Delta W \cdot 10 \cdot \gamma_3 \cdot \Delta x - \Delta D \cdot \varepsilon \cdot \lambda_6 \cdot \Delta x = 3600 \cdot V \cdot \Delta \tau \cdot \Delta D. \quad (2.15)$$

Вологовміст повітря за товщиною шару Δx змінюється значно менше, ніж у матеріалі, і тому другим членом в правій частині рівняння (2.15) можна знехтувати.

Для знаходження залежності рівноважної вологи зерна W_p від температури сушильного агента(повітря) t і вмісту вологи в сушильному агенті d (г/кг сухого повітря), за даними [13], отримана емпірична залежність виду:

$$W_p = 129.22 \cdot t_a^{-1.18} \cdot d^{0.72}. \quad (2.19)$$

Приймаючи, що параметри повітря змінюються тільки за висотою шару зерна (відповідно до (2.12) та (2.13)) з урахуванням виразу (2.11) із системи рівнянь (2.8-2.11) отримаємо нову систему рівнянь:

$$-\frac{\partial U}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial d}{\partial x}; \quad (2.20)$$

$$-\frac{\partial U}{\partial \tau} = k \cdot (U - b \cdot d^m); \quad (2.21)$$

$$q_3 \cdot G_3 - G_3 \cdot c_3 \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = -\alpha \cdot F \cdot (t - \theta) - G_0 \cdot r \cdot \frac{\partial U}{\partial \tau}; \quad (2.22)$$

$$\rho_6 \cdot L \cdot c_p \cdot \partial t = -\alpha \cdot F \cdot (t - \theta) \cdot \partial x, \quad (2.23)$$

$$\text{де } a = -\frac{\rho_6}{\rho_3} \cdot \frac{3600}{1000} \cdot V \cdot \varepsilon; \quad V_6 = \frac{L}{F_n}.$$

Використовуючи критерій Ребіндера:

$$Rb = \frac{c \cdot d\theta}{r \cdot dU}, \quad (2.24)$$

будемо мати:

$$\frac{d\theta}{dU} = \frac{r}{c} Rb \quad (2.25)$$

Перетворюючи (2.22) до виду:

$$\alpha \cdot F \cdot (t - \theta) + q_3 \cdot G_3 = -G_3 \cdot \left(r - c_3 \cdot \frac{\partial \theta}{\partial U} \right) \cdot \frac{\partial U}{\partial \tau} \quad (2.26)$$

з урахуванням (2.25) отримаємо:

$$\alpha \cdot F \cdot (t - \theta) + q_3 \cdot G_3 = -r \cdot G_3 \cdot (r - Rb) \cdot \frac{\partial U}{\partial \tau}. \quad (2.27)$$

Із рівнянь (2.23) та (2.26) будемо мати:

$$-L \cdot c_n \cdot \frac{\partial t}{\partial x} + q_3 G_3 = B_1 \cdot \frac{\partial U}{\partial \tau}, \quad (2.28)$$

де $B_1 = -r \cdot G_0 \cdot (1 - Rb)$.

Приймаючи до уваги те, що в залежності $U_p = f(t, d)$ в межах значення вологості повітря, яке використовується для активного вентилявання зерна ($\varphi = 0.5 \div 0.65$) можна знайти відрізок значень d , в якому U_p залежить від d лінійно (для $t = \text{const}$), лінійізуємо рівняння (2.21), тобто приймемо $m=1$. Тоді рівняння (2.21) буде мати вигляд:

$$-\frac{\partial U}{\partial \tau} = k \cdot (U - b \cdot d); \quad (2.29)$$

а його рішення за умов: $\tau=0$; $U=U_0$, (де U_0 – початковий вологовміст зерна) можна записати у вигляді:

$$U = b \cdot D + (U_0 - b \cdot d) \cdot e^{-k \cdot \tau}. \quad (2.30)$$

Диференціюючи вираз (2.30) і порівнюючи отримане рівняння з рівнянням (2.20) отримаємо нове рівняння:

$$-a \frac{\partial D}{\partial x} = k \cdot (U_0 - b \cdot d) \cdot e^{-k \cdot \tau}; \quad (2.31)$$

Розв'язок рівняння (2.31) за граничних умов: $d|_{x=x_0} = d_0$, (d_0 – значення вологовмісту повітря на вході в шар зерна) можна представити у вигляді:

$$d = \frac{U_0}{b} - \left(\frac{U_0}{b} - d_0 \right) \cdot e^{-A \cdot b \cdot x}; \quad (2.32)$$

де $A = \frac{k}{a} \cdot \exp(-k \cdot \tau)$.

Підставляючи (2.32) в (2.30) та після перетворень будемо мати:

$$U = U_0 \cdot e^{-k\tau} + (1 - e^{-k\tau}) \cdot [U_0 - (U_0 - b \cdot d_0) \cdot e^{-Abx}] \quad (2.33)$$

Рівняння (2.33) дає можливість визначити змінення вологовмісту зерна за висотою шару i в часі.

Диференціюючи рівняння (2.32), будемо мати:

$$\frac{\partial d}{\partial x} = A \cdot b \cdot \left(\frac{U_0}{b} - d_0 \right) \cdot e^{-Abx}. \quad (2.34)$$

Підставляючи значення $\frac{\partial U}{\partial \tau}$ з (2.20) в рівняння (2.28) отримаємо рівняння:

$$-L \cdot c_n \cdot \frac{\partial t}{\partial x} + q_3 \cdot G_3 = -a \cdot B_1 \cdot \frac{\partial d}{\partial x}. \quad (2.35)$$

Порівнюючи рівняння (2.24) та (2.25) будемо мати:

$$-L \cdot c_n \cdot \frac{\partial t}{\partial x} + q_3 \cdot G_3 = -a \cdot B_1 \cdot A \cdot \left(\frac{U_0}{b} - d_0 \right) \cdot e^{-Abx}. \quad (2.36)$$

Розв'язок рівняння (2.34) за граничних умов: $x=0$, $t=t_0$ після перетворень представимо у вигляді:

$$t = t_0 + \frac{q_3 \cdot G_3}{L \cdot c_n} \cdot x + \frac{B_1 \cdot a \cdot B'}{A \cdot b \cdot L \cdot c_n} \cdot (1 - e^{-Abx}) \quad (2.37)$$

$$\text{де } B' = A \cdot b \cdot \left(\frac{U_0}{b} - d_0 \right).$$

Прирівнюючи рівняння (2.34) з (2.20) отримаємо рівняння:

$$-\frac{\partial U}{\partial x} = a \cdot A \cdot b \cdot \left(\frac{U_0}{b} - d_0 \right) \cdot e^{-Abx}. \quad (2.38)$$

Підставляючи (2.38) в (2.22) отримаємо рівняння для змінення температури зерна, яке після перетворень можна записати у вигляді:

$$T \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = n - \theta; \quad (2.39)$$

де

$$n = -\frac{G \cdot r}{\alpha \cdot F} \cdot a \cdot A \cdot b \cdot \left(\frac{U_0}{b} - d_0 \right) \cdot e^{-Abx} + \frac{q_3 \cdot G_3}{\alpha \cdot F} + t; \quad T = \frac{G_3 \cdot c_3}{\alpha \cdot F}, \quad (2.40)$$

Значення t у виразі (2.40) визначається за формулою (2.37).

Розв'язок рівняння (2.39) при початкових умовах: $\theta|_{\tau=0} = \theta_0$ (де θ_0 – початкове значення температури зерна) представимо у вигляді:

$$\theta = n - (n - \theta_0) \cdot e^{-\tau/T} \quad (2.41)$$

Таким чином отримані рівняння (2.39) та (2.41) дозволяють визначити змінення температури та вологовмісту зерна за часом і координатою (висотою, шириною шару зерна) при різних режимах сушіння і охолодження в залежності від початкової вологості і температури. Рівняння (2.32) та (2.37) дозволяють визначити профілі температури та вологовмісту повітря в шарі зерна в залежності від режимів проведення процесів.

Графічна інтерпретація отриманих рішень з урахуванням змінення коефіцієнтів і сталих, що характеризують зерно (його параметри), у часі і за координатою (виконана на основі використання математичного середовища Mathcad) наведено на рис. 2.6 та 2.7.

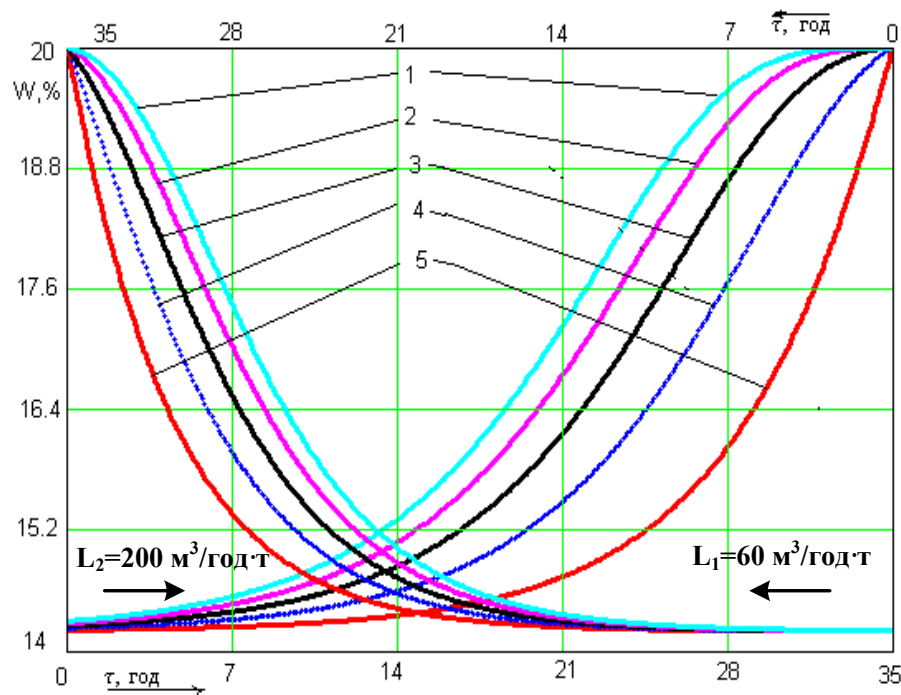


Рис. 2.6. Залежність експозиції сушіння зерна від товщини шару зерна і питомих витрат повітря ($L_1=60 \text{ м}^3/\text{год}\cdot\text{т}$; $L_2=200 \text{ м}^3/\text{год}\cdot\text{т}$; 1 – $h = 1.2\text{м}$; 2 – $h = 0.9\text{м}$; 3 – $h = 0.6\text{м}$; 4 – $h = 0.3\text{м}$; 5 – $h = 0.02\text{м}$.)

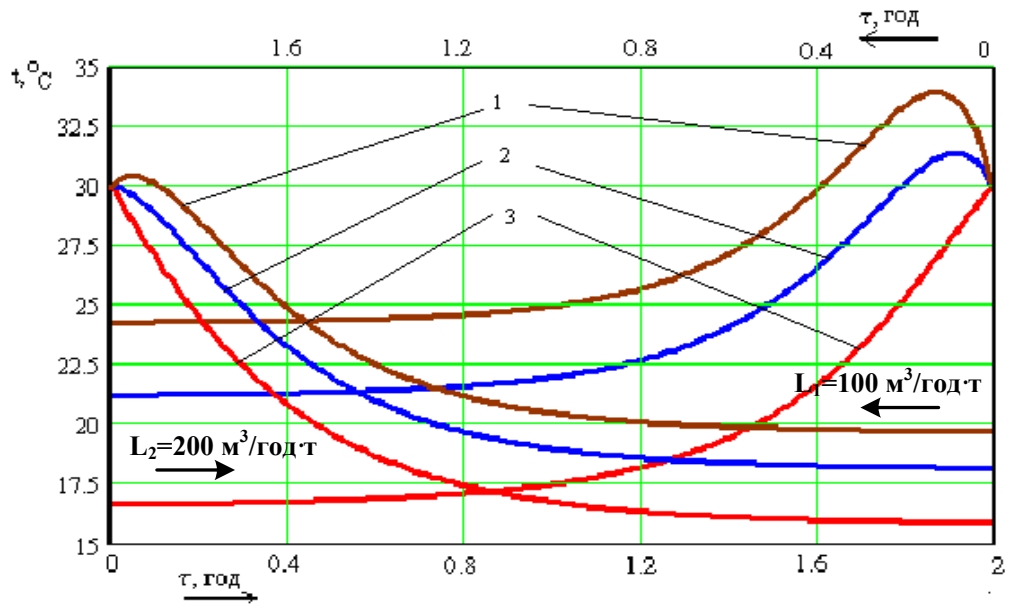


Рис. 2.7. Залежність експозиції охолодження зерна від товщини шару зерна і питомих витрат повітря ($L=100 \text{ м}^3/\text{год}\cdot\text{т}$; $L=200 \text{ м}^3/\text{год}\cdot\text{т}$; 1 – $h = 1.2\text{ м}$; 2 – $h = 0.6\text{ м}$; 3 – $h = 0.02\text{ м}$.)

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ РЕЖИМІВ АКТИВНОГО ВЕНТИЛЮВАННЯ ЗЕРНА

3.1. Обґрунтування раціональної структури режимів сушіння зерна активним вентиляванням

Переваги низькотемпературного сушіння зерна шляхом продування атмосферного або нагрітого на 5-10°C повітря крізь нерухомий шар зерна (активне вентилявання) полягають в низьких затратах теплоти (за рахунок використання теплоти атмосферного повітря), рівності висушеного зерна за вологістю, в простоті технічних засобів реалізації, можливості автоматизованого управління процесом [2]. Споживання електроенергії при сушінні активним вентиляванням в залежності від кліматичної зони складає в середньому 1520 кДж на 1кг видаленої вологи у південних зонах і до 2500 кДж/кг у районах підвищеного зволоження.

Для досягнення кондиційної вологості зерна (13,5-14%) відносна вологість повітря, яке використовують як сушильний агент, за умов гігроскопічної рівноваги повинна бути в межах 65-68% [2].

При сушінні атмосферним повітрям тривалість процесу вологовіддачі становить декілька діб, що пов'язано з ризиком втрати якості зерна (самозігрівання, пліснявіння, тощо). Тому режими вентилявання і підігрівання повітря треба вибирати із умов, щоб експозиція сушіння не перевищувала часу зберігання, який залежить від температури і поточної вологості зерна.

Результат статистичного аналізу характеру змінення параметрів атмосферного повітря під час жнив (середнє значення годинних температур знаходиться в межах від 9,3 до 24,2°C, а вологість 50-85% - рис. 3.1) і аналіз

закономірностей сушіння зерна активним вентиляванням дозволив визначити наступні особливості проведення процесу досушування зерна.

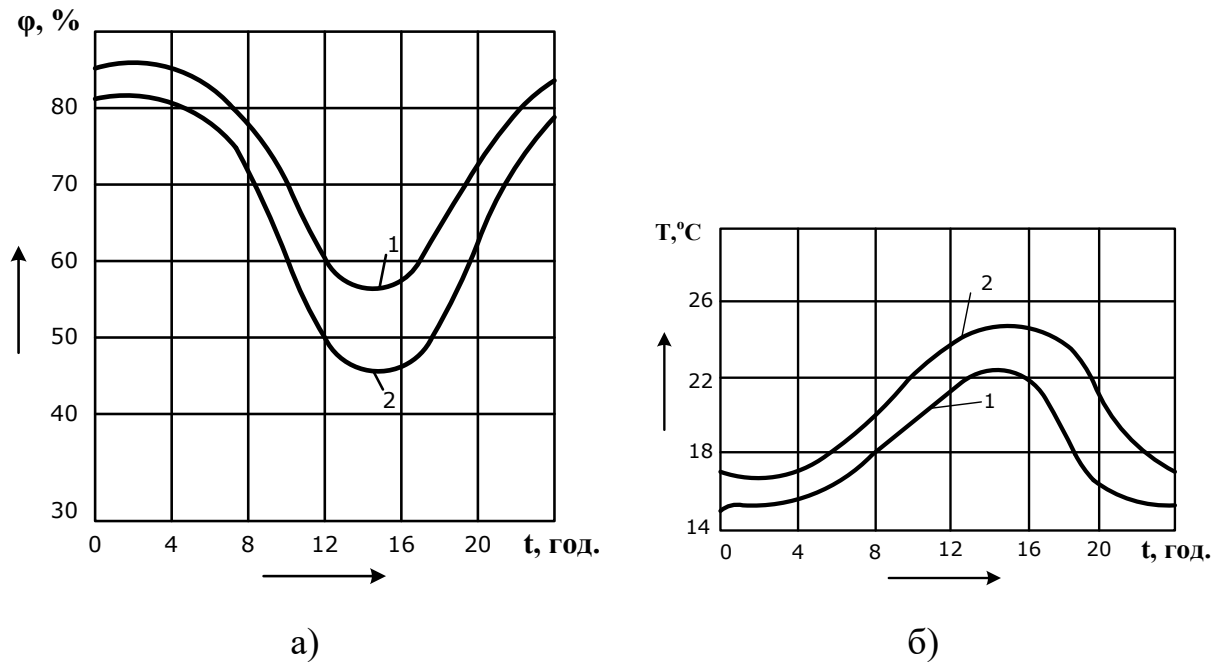


Рис. 3.1. Зміна протягом доби відносної вологості (а) і температури (б) повітря в серпні місяці (1 – Київська обл., 2 – Чернігівська обл.)

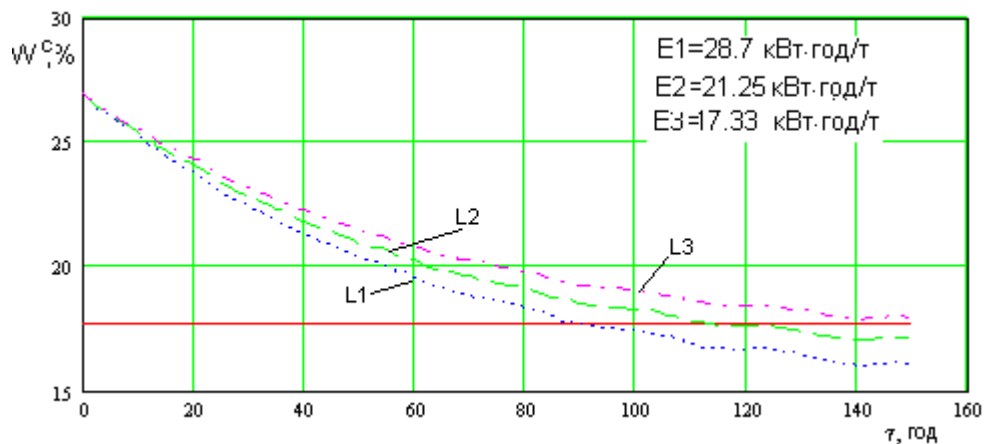


Рис. 3.2. Кінетика сушіння зерна неперервним активним вентиляванням атмосферним повітрям, в залежності від питомих витрат повітря ($L1=400$ м³/т·год., $L2=300$ м³/т·год., $L3=200$ м³/т·год.)

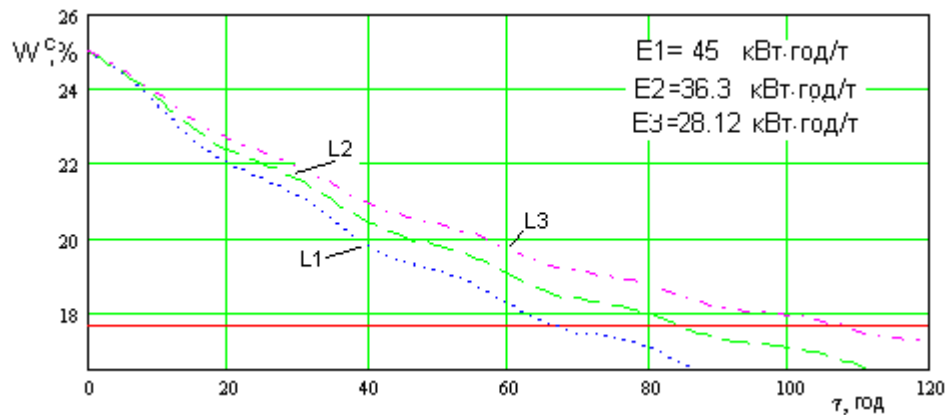


Рис. 3.3. Кінетика сушіння зерна неперервним активним вентиляванням підігрітим на 3°C повітрям, в залежності від питомих витрат повітря (L1=400 м³/т·год., L2=300 м³/т·год., L3=200 м³/т·год.)

В процесі сушіння зерна, як можна бачити з графіків (рис. 3.2-3.3), при зниженні його вологості відбувається зниження інтенсивності видалення вологи, обумовлене зниженням кількості вологи та вологовмісту зерна U , і вологе повітря може відбирати вологу тільки у певні "пікові" години доби. В інші проміжки часу сушіння не відбувається, а маса зерна все ще не втратила здатність самозігрівання, що може призвести до втрат якості і псування зерна.

Вентилювання зерна атмосферним повітрям для його зневоднення може відбуватися в період доби, що дорівнює 12-13 год. (від 8 до 21 год.). Тобто вимушена перерва у вентиляванні припадає на нічні години доби. Середня температура повітря в цей період складає 14-16°C (Київська обл.). Вологість повітря складає в середньому 80-82%.

Враховуючи, що нагрівання повітря на 1°C дозволяє знизити його вологість приблизно на 5%, практично достатньо на 3-4°C нагріти повітря і здійснити цілодобове вентилявання і сушити зерно з різною в часі інтенсивністю.

Але нагрівання повітря в періоди добового підвищення вологості пов'язане із збільшенням потужності електронагрівальних приладів.

Крім того нагрівання повітря в нічні години доби малоефективне з точки зору інтенсифікації сушіння, так як температура повітря сушильного агенту має менший сушильний потенціал.

Тому задача мінімізації енерговитрат на сушіння зерна вирішувалась пошуком раціональної структури режимів нагрівання повітря і вентиляванням зерна, за умов, що забезпечують оптимальне співвідношення кількості повітря і ступеня його нагріву.

Основними параметрами процесу, якими можна управляти, є питома витрата повітря і температура нагріву, і змінюючи їх значення за часом, можна реалізувати такий режим, що експозиція сушіння буде мінімальною, і відповідно зменшаться загальні енерговитрати.

Сумарні енерговитрати на вентилявання і нагрів повітря у відповідності до однієї тони сухого зерна визначаються співвідношенням:

$$E = E_B + E_H = (N_B + N_H) \tau \cdot \frac{1}{G_3}, \quad (3.1)$$

або у розгорнутому вигляді:

$$E = \frac{L \Delta H \cdot h + c_p L \cdot \rho_n \Delta t_H}{3600 \cdot G_3} \tau, \quad (3.2)$$

де E_B , E_H - відповідно, затрати енергії на вентилявання і нагрів повітря;

c_p - теплоємність зерна;

N_B, N_H - потужність приводу вентилятора і електронагрівача;

τ - експозиція сушіння;

$L \cdot \rho_n$ - витрати повітря (питомі);

$\Delta P \cdot h$ - тиск вентилятора;

G_3 - маса зерна, що висушується.

Як показано [19], мінімізувати функцію (3.2) не вдається, оскільки ступінь зменшення експозиції сушіння за рахунок нагріву більше ступеня зменшення енерговитрат (так при нагріванні на 4°C експозиція сушіння

зменшується в 2 рази, а потужність електронагрівачів збільшується в 2,5 рази).

Тому вираз для енергії на сушіння перепишемо у вигляді:

$$E = \frac{L\Delta H \cdot h + c_p L \cdot \rho_n \Delta t_H}{3600 \cdot G_3} \tau, \quad (3.3)$$

де τ_B, τ_H - час роботи вентилятора і нагрівача повітря.

Відповідно до (3.3) для визначення раціональної структури режимів роботи електрообладнання можна варіювати чотирма параметрами: N_B, N_H, τ_B, τ_H . При цьому час кондиціонування зерна τ не повинен перебільшувати часу можливого зберігання зерна без порчі, тобто $\tau \leq \tau_{cp}$.

Величина τ залежить від параметрів режиму проведення процесу: Δt_H та L , а також від параметрів навколишнього середовища $t_3(\tau), \varphi_3(\tau)$, як функцій часу, а також початкового вологовмісту зерна U_0 і його змінення в часі $U(\tau)$.

Аналіз даних графічних залежностей (рис. 3.4-3.5) показує, що при зменшенні вологовмісту зерна до $\omega^c = 19-18\%$ збільшення витрат повітря практично не впливає на інтенсивність видалення вологи і зменшення експозиції сушіння зерна.

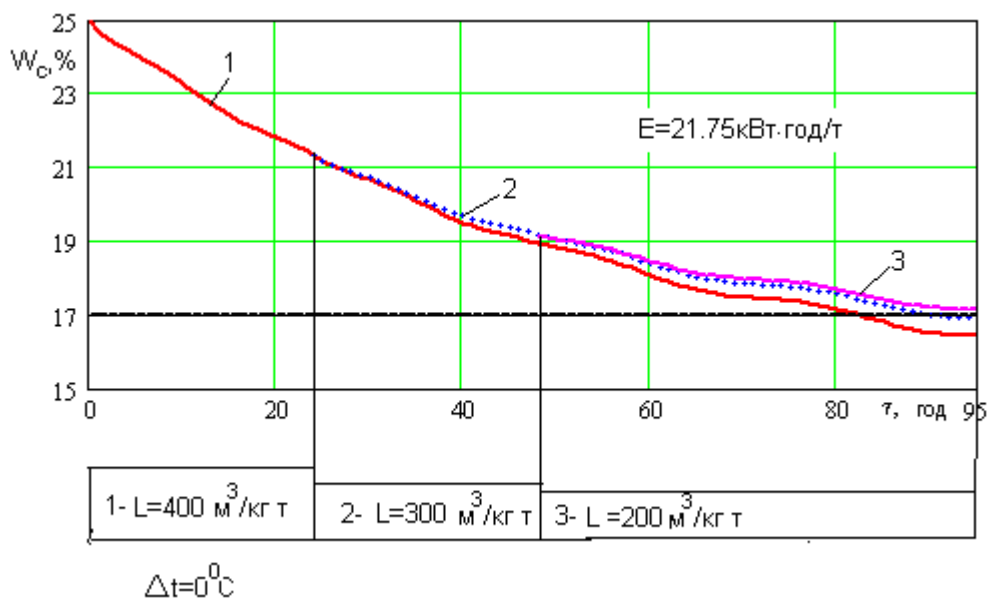


Рис. 3.4. Залежність змінення вологи зерна при диференційованому режимі подачі атмосферного повітря

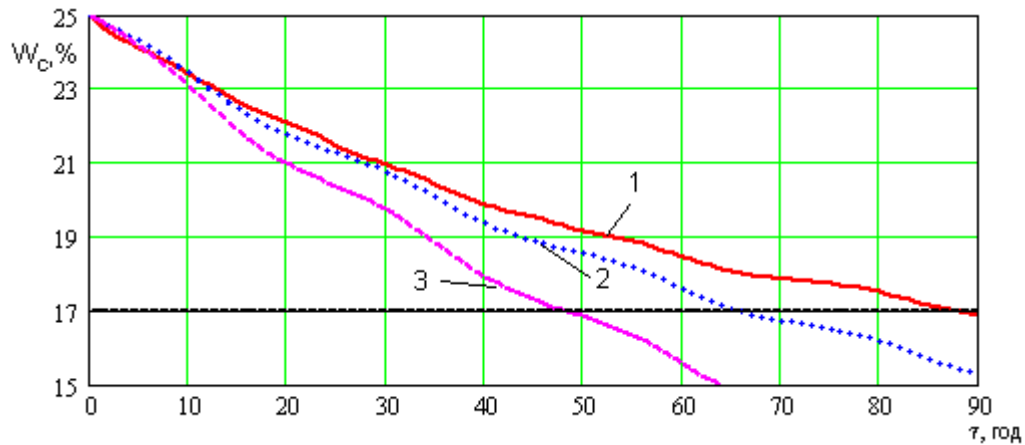


Рис. 3.5. Залежність змінення вологи зерна від часу і технологічного регламенту ($L=300 \text{ м}^3/\text{кг}\cdot\text{т}$, 1- підігрів повітря $\Delta t=0^\circ\text{C}$, 2 - підігрів повітря $\Delta t=3^\circ\text{C}$, 3 - підігрів повітря $\Delta t=6^\circ\text{C}$)

При цьому (на останньому етапі досушування) кількість вологи, яка підлягає видаленню, зменшується з 24 до 8 кг/т зерна. Тому є реальна можливість зменшити питомі витрати повітря на величину ΔL , яка може дорівнювати $2/3$ від початкового значення L , тобто пропорційно зменшенню вологи в зерні.

“Вивільнена” потужність на транспортуванні повітря $\Delta P_B = \frac{\Delta L \cdot h \Delta P_h}{\eta_B}$

може бути використана на нагрівання повітря, тобто $\Delta P_H = \Delta P_B$ (де ΔP_H - додаткова потужність нагрівальних елементів, яка може бути використана для збільшення температури повітря на Δt_H^1).

Ступінь додаткового нагрівання повітря визначиться співвідношенням:

$$\Delta t_H = \frac{\Delta L \cdot \Delta P_h \cdot h}{c_p L - \Delta L c_p} \quad (3.4)$$

Збільшення температури повітря при одночасному зменшенні його витрат призводить до зменшення експозиції сушіння (інтенсифікує вологовидалення) і, відповідно, призводить до зменшення енерговитрат на величину

$$\Delta E = (P_H^1 + P_B^1) \Delta \tau,$$

де $\Delta\tau$ - зменшення експозиції роботи електрообладнання;

P_H^1, P_B^1 - поточні значення потужності.

3.2. Енергетична ефективність застосування диференційних режимів

Для визначення основних параметрів електронагрівального і вентиляційного обладнання необхідно мати дані про експозицію вентиляювання і вологопоглинальну здатність атмосферного повітря з урахуванням часового змінення кліматичних умов (температура, вологість, тощо).

Кількість повітря для досушування зерна активним вентиляюванням, як відомо [00], залежить від величини поглинальної здатності повітря і може бути визначена із співвідношення:

$$\alpha = \frac{W \cdot 10^3}{\Delta d(\varphi, t)} \quad (3.5)$$

де $\Delta d(\varphi, t)$ - поглинальна здатність повітря, що використовують, як сушильний агент;

α - кількість повітря, що необхідно для поглинання вологи, видаленої із зерна в кількості W , кг .

Тоді продуктивність через питомі витрати повітря (яка визначається вологістю зерна) і експозицією вентиляювання – час роботи вентилятора:

$$L = \frac{W \cdot 10^3}{\Delta d \cdot \rho_n \cdot \tau_B} \quad (3.6)$$

Вологопоглинальна здатність повітря при сушінні зерна залежить від відносної вологості (кількості водяної пари в повітрі) і може бути визначена емпіричною формулою: $\Delta d = (5 - 5,45 \cdot \varphi)$, де φ - відносна вологість повітря в долях одиниці.

Враховуючи співвідношення між кількістю видаленої вологи та початковим і кінцевим вологовмістом зерна, отримаємо співвідношення, що визначає продуктивність вентиляційної установки:

$$L = \frac{(U_0 - U_K) \cdot 10^3}{(1 - U_K) G_3 (5 - 5,45\varphi) \cdot \tau_B} \quad (3.7)$$

де U_0, U_K - початковий і кінцевий (кондиційний) вологовміст зерна.

Величина $\tau_B = f(U_0, t, L)$ визначається регресійним рівнянням із рівняння кінетики сушіння, яке можна представити у формі

$$\tau_B = \frac{1}{K_1} \text{Ln} \frac{U_{0i} - U_p}{U_K - U_p} \quad (3.8)$$

Коефіцієнт сушіння K_1 - може бути визначено для кожного проміжного значення U_{0i} вологовмісту зерна із рівняння отриманого, за експериментальними даними:

$$K_1 = [-2,45 + 0,000747L \cdot t + 0,0142t^2] 10^{-3} \quad (3.9)$$

$t = t_3 + \Delta t_H$, де Δt_H - ступінь нагріву повітря в калорифері.

Підставивши рівняння (3.9) в (3.8), а (3.8) в (3.7) і розв'язавши отриману залежність відносно L , отримаємо залежність для визначення продуктивності вентилятора. Результати обрахунків представлено графічно у вигляді залежності питомої продуктивності вентилятора від поточного вологовмісту (вологості) зерна в процесі його сушіння та відносної вологості повітря, яке подається в шар зерна (рис. 3.6).

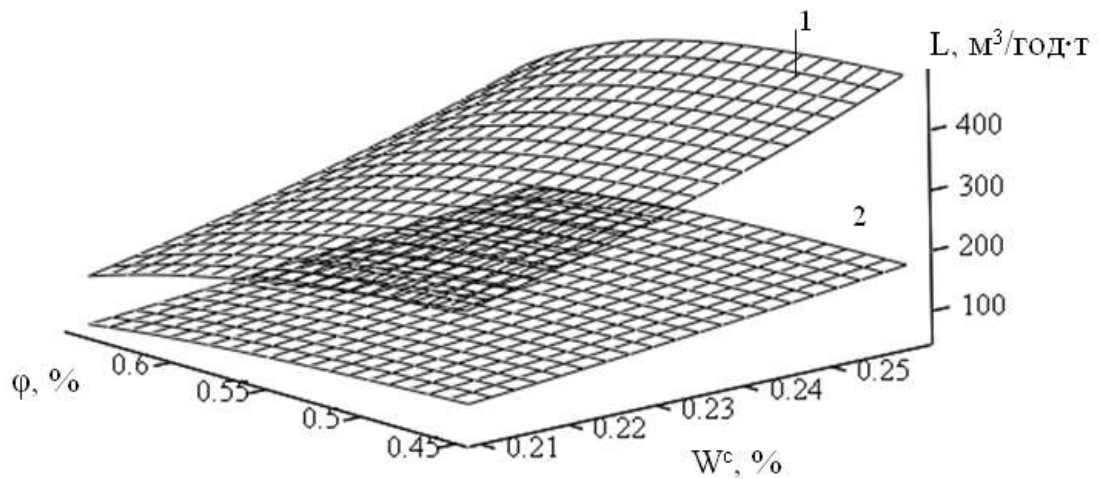


Рис. 3.6. Залежність необхідної продуктивності вентилятора від початкової вологості зерна (при вологості і температурі повітря: 1– $t_n=22$, 2– $t_n=18$)

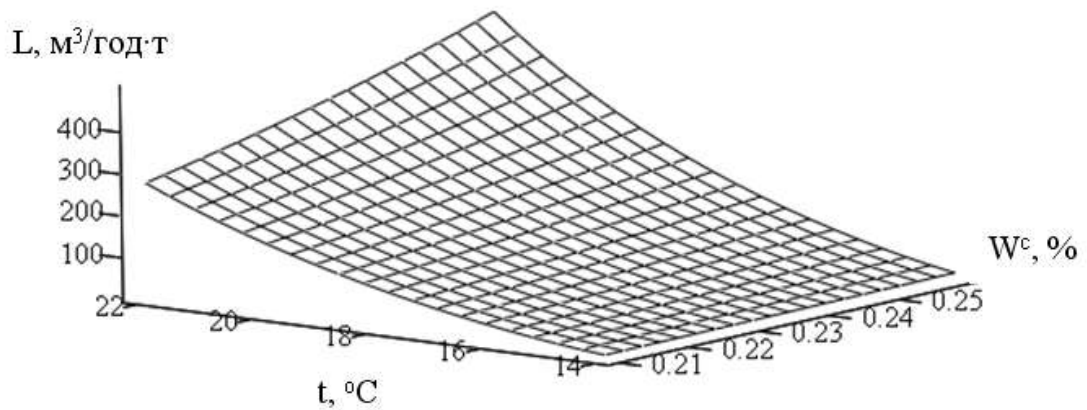


Рис. 3.7. Залежність необхідної продуктивності вентилятора від температури повітря і початкової вологості зерна, що подається на сушіння

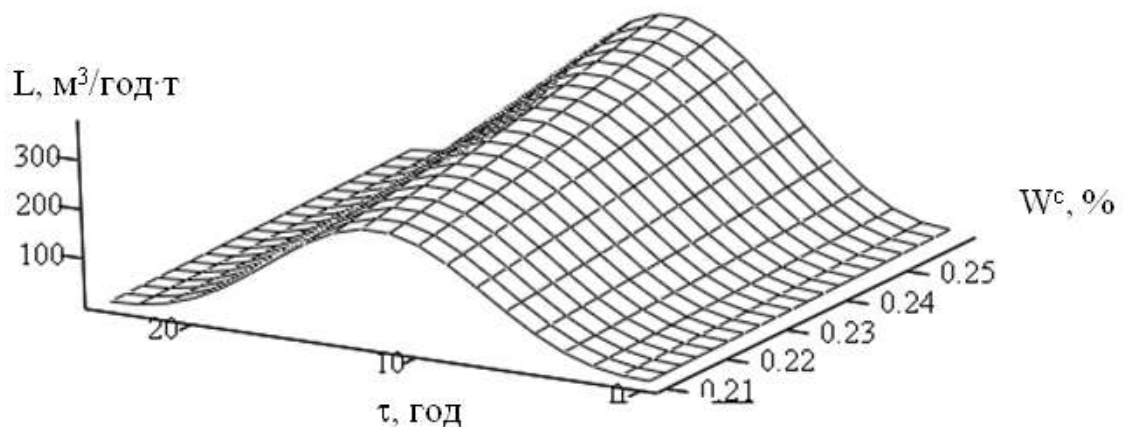


Рис. 3.8. Залежність необхідної продуктивності вентилятора від добових коливань температури і вологості повітря, початкової вологості зерна

Графіки $L(U_0, \varphi)$ ілюструють реальну можливість зниження витрат повітря (продуктивності вентилятора) в процесі сушіння зерна за мірою зниження його вологості, а рівняння (3.7)-(3.9) є записом алгоритму змінення продуктивності вентилятора.

На рис. 3.9 наведена графічна залежність питомої потужності вентилятора від питомих витрат повітря і висоти шару зерна на досушування зерна в установках активного вентилявання, а на рис. 3.10 – залежність питомої потужності нагрівачів від питомих витрат і температури підігріву.

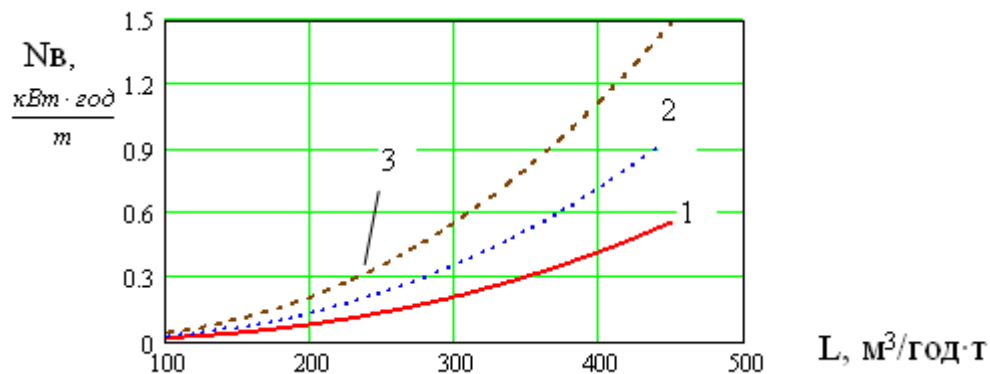


Рис. 3.9. Залежність питомої потужності вентилятора від питомих витрат повітря і висоти шару зерна (1- $h=0.8\text{м}$, 2 - $h=1\text{м}$, 3 - $h=1.2\text{м}$)

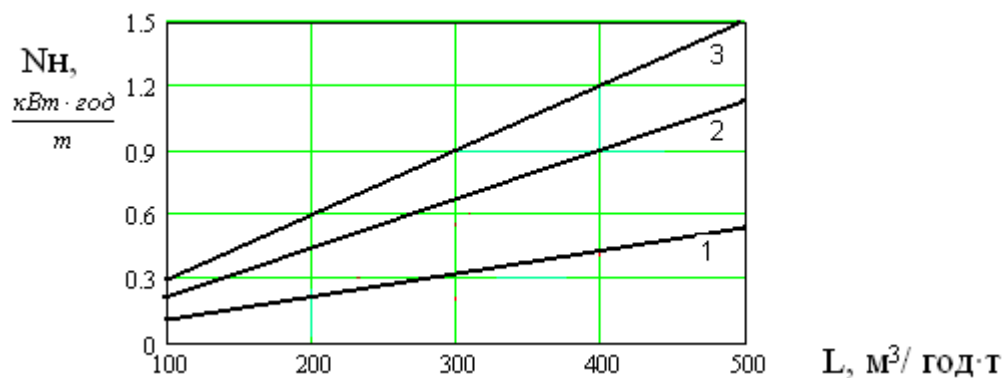


Рис. 3.10. Залежність питомої потужності калорифера від питомих витрат повітря і ступеню підігріву повітря (1 - $\Delta t=3^\circ\text{C}$, 2 - $\Delta t=6^\circ\text{C}$, 3 - $\Delta t=9^\circ\text{C}$)

Співставляючи залежності $L(\omega, \varphi)$ та $N_B(L)$ можна зробити висновок про реальну можливість зменшення встановленої потужності вентиляційної установки активного вентилявання зерна застосуванням диференційних режимів роботи вентиляційної установки.

Але при цьому повинна використовуватись умова не перебільшення експозиції вентилявання строку безпечного зберігання зерна

$$\sum_1^4 \tau_{Vi} \leq \tau_{KP} \quad (3.10)$$

де τ_{KP} - крайове значення строку зберігання.

Як показує аналіз співвідношень (3.8)-(3.9) при зменшенні питомих витрат повітря збільшується експозиція, тому для виконання умови (3.10) необхідне додаткове нагрівання повітря, особливо на кінцевих етапах сушіння. Так при досягненні зерном вологості 20% і зниженні питомих витрат з 400 м³/т·год до 200 м³/т·год швидкість сушіння знижується в 1,8 рази. Але потужність встановленого приводу вентилятора (рис. 3.9) зменшена з 14 до 6 кВт. Використання "вивільненої" потужності 8 кВт на нагрівання дозволяє підвищити температуру повітря на 2,6°C, що призводить до збільшення швидкості сушіння в 2,2 рази. Із зменшенням експозиції вентилявання при постійній величині встановленої потужності приводить до зменшення загальної енергоємності процесу.

На графіках (рис. 3.11, 3.12) наведені криві сушіння зерна за різними схемами реалізації процесу.

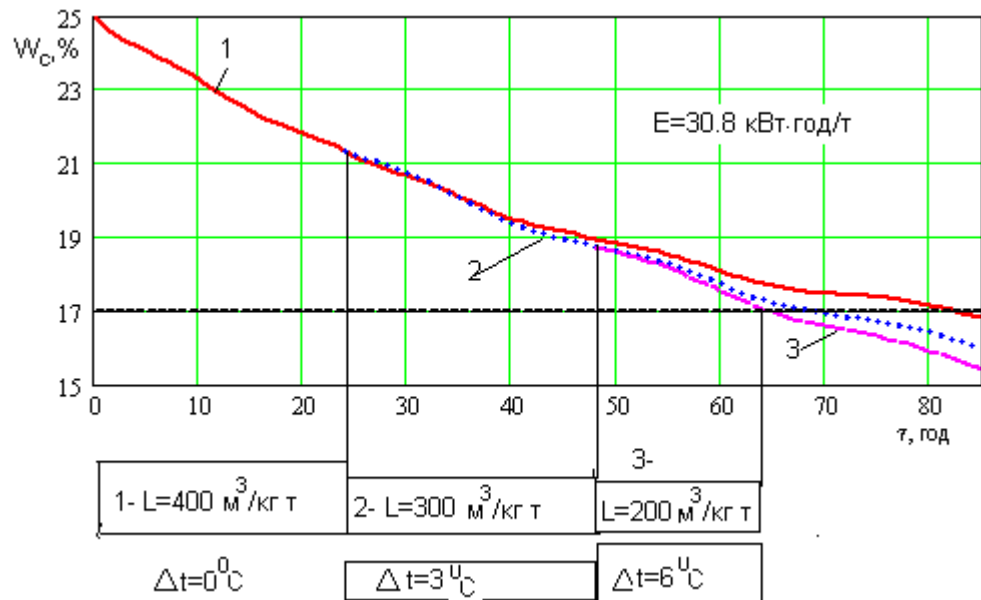


Рис. 3.11. Залежність змінення вологи зерна в часі і технологічного регламенту (добова зміна температури апроксимована рівнянням $t_{\text{пов}}=18 - 4\cos(\pi\tau/12)^\circ\text{C}$).

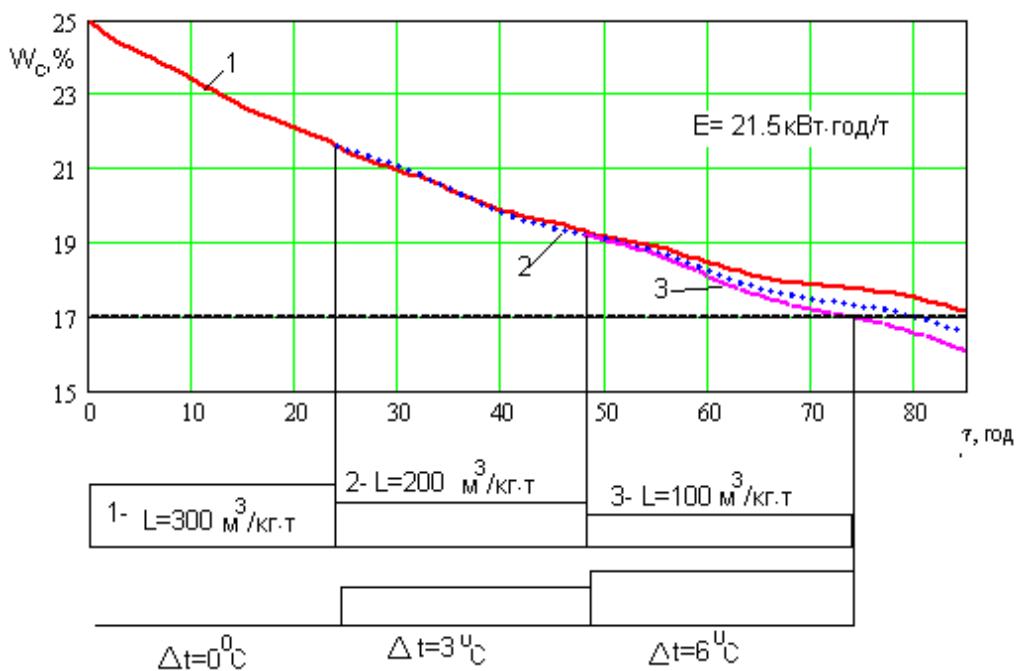


Рис. 3.12. Залежність змінення вологи зерна в часі і технологічного регламенту (добова зміна температури повітря апроксимована рівнянням $t_{\text{пов}}=18 - 4\cos(\pi\tau/12)^\circ\text{C}$).

Аналізом проведення числових експериментів (на основі даних, визначених експериментально) встановлено, що найбільшу економію

електроенергії 21.5-23.8 кВт·год/т забезпечують диференційовані режими при ступінчастому змінненні витрат і температури підігріву повітря.

Це дозволило визначити (на прикладі досушування зерна пшениці) раціональний регламент проведення процесу, при початковій вологості $W^c = 25\%$ (рис. 3.13, таблиця 3.1):

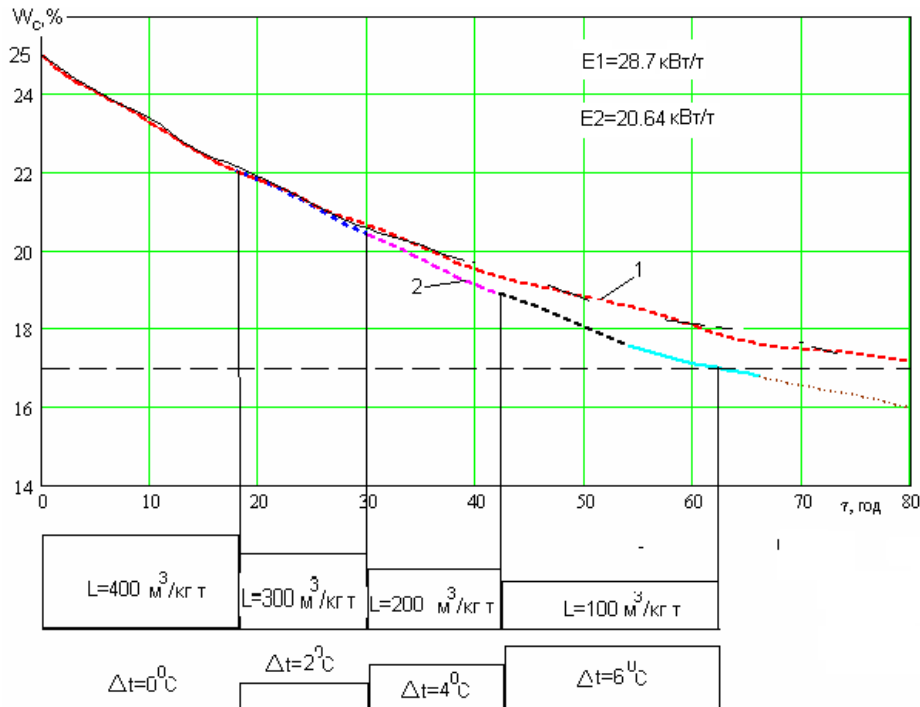


Рис. 3.13. Залежність змінення вологості зерна в часі і технологічного регламенту (добова зміна температури повітря апроксимована

$$\text{рівнянням } t_{\text{пов}} = 18 - 4\cos(\pi\tau/12) \text{ } ^\circ\text{C})$$

- 1- неперервне вентилування без підігріву повітря $L=400 \text{ м}^3/\text{год}\cdot\text{т}$;
 2 - диференційовані режими при денному вентилуванні.

1. Вентилування починають при витраті повітря $L=400 \text{ м}^3/\text{год}\cdot\text{т}$ без нагріву до вологості 22%.
2. При вологості (W_0^c), що менша за 22%, зменшують витрати повітря до $300 \text{ м}^3/\text{год}\cdot\text{т}$ і вентилують до вологості 20.5% при $\Delta t=2^\circ\text{C}$.
3. При $W_0^c \leq 20.5\%$, витрати повітря зменшують до $200 \text{ м}^3/\text{год}\cdot\text{т}$ і вентилують до вологості 19% при $\Delta t=4^\circ\text{C}$.
4. Далі при $W_0^c \leq 19\%$ і до 16.5-17% витрати повітря зменшують до $100 \text{ м}^3/\text{год}\cdot\text{т}$ при $\Delta t=6^\circ\text{C}$.

Питомі витрати енергії при цьому зменшуються з 28,7 кВт·год./т при традиційному режимі сушіння зерна в бункерах активного вентиляювання до 20,7 кВт·год./т при диференційному, тобто енерговитрати зменшуються на 30%.

Таблиця 3.1.

Регламент роботи теплового та вентиляційного обладнання при реалізації диференційованих режимів активного вентиляювання

Активне вентиляювання із використанням диференційованих режимів									
Витрати повітря L_p , м ³ /год·т	Підігрів повітря Δt , °C	Період вентиляювання, год.	Загальна експозиція вентиляювання, год.	Потужність вентилятора, кВт/т	Потужність нагрівачів, кВт/т	Загальні витрати електроенергії, кВт·год/т	Витрати енергії на вентиляювання, кВт·год/т	Витрати енергії на нагрів повітря, кВт·год/т	Віднош. потужн. нагріву до вентиляювання
400	0	18	62	0,35		20,64	12,24	8,4	2,85
300	2	12		0,25	0,2				
200	4	12		0,175	0,3				
100	6	20		0,07	0,2				
Неперервне вентиляювання без підігріву повітря									
400		82	82	0,35	0	28,7	28,7		

Методика визначення придатності атмосферного повітря для охолодження зерна, придатності повітря для зневоднення зерна, доцільності нагрівання повітря і ступеню його підігріву наведені в додатку А.

3.3. Основні технологічні вимоги до режимів роботи електричних тепловентиляційних установок

Основні вимоги до технічної реалізації енергозберігаючих режимів роботи установок активного вентиляювання зерна (УАВЗ) можна сформулювати так:

- максимальна продуктивність установки, тобто мінімальна тривалість періоду зниження вологості зерна до кондиційного значення ($W_k=14\%$);
- максимальна економічність процесу активного вентиляювання зерна, тобто система реалізації режимів повинна забезпечувати мінімальні витрати енергії;
- максимальне збереження продовольчих, кормових і насінневих властивостей зерна.

Для виконання останньої умови вводяться такі обмеження:

1. Строк зниження вологості зерна до кондиційного значення не повинен перевищувати крайового терміну безпечного зберігання зерна, тобто:

$$\tau_{\text{вент}} |_{W_k=14\%} \leq \tau_{\text{кр}}, \quad 3.11$$

де $\tau_{\text{кр}}$ – термін стійкого зберігання зерна, який залежить від його вологості та температури і може бути визначений із рівняння, яке отримано апроксимацією даних таблиць безпечного зберігання зерна [2]:

$$\tau_{\text{кр}}(W, \theta) = -27.557 + \text{EXP}(8.48 - 0.187 \cdot W - 0.061 \cdot \theta). \quad 3.12$$

2. Температура зерна не повинна перевищувати 30-35°C за умов її підвищення шляхом самозігрівання або внаслідок впливу сушильного агенту підвищеної температури.

3. За умов відсутності вентиляювання вологість повітря у міжзерновому просторі шару зерна не повинна перевищувати значення 70-75%, оскільки при більшому значенні вологості має місце найбільш інтенсивний розвиток грибів [2].

3.4. Функціональна схема автоматизації системи керування диференційованими режимами роботи установки активного вентилявання зерна

Задачею керування роботою електротепловентиляційного обладнання, що забезпечує мінімізацію енергоспоживання, є забезпечення у кожний момент часу рівності між кількістю енергії, що витрачається на транспортування і нагрівання повітря (як охолоджуючого або сушильного агенту), та кількістю вологи, що видаляється із зерна. При цьому повинні підтримуватись на заданому рівні параметри, що забезпечують нормальне протікання процесу: температура зерна; вологість повітря, що подається в зерно.

Керування роботою вентиляторів і нагрівачів повітря потребує наявності апаратури контролю і керування електрообладнання.

До апаратного оформлення управління процесом досушування відносяться способи і засоби визначення контрольованих величин, значення яких використовують при здійсненні оперативного управління технологічними процесами досушування і охолодження зерна, а також, для економічної роботи електрообладнання.

Технологічному контролю підлягають такі параметри:

- температура зерна, усереднена за об'ємом;
- вологість зерна (середньо-об'ємна);
- відносна вологість повітря, що подається в шар зерна (вологість повітря на вході у повітророзподільний канал);
- вологість повітря в шарі зерна (в між зерновому просторі), яка відповідає рівноважному стану зерна;
- питомі витрати повітря, що подаються в установку активного вентилявання зерна.

Управління роботою електрообладнання УАВЗ здійснюється дистанційно шляхом дії на окремі пристрої (вентилятори, нагрівачі) у автоматичному або ручному режимі.

Таким чином, система реалізації енергозберігаючих режимів роботи вентиляторних і нагрівальних установок повинна виконувати такі основні завдання:

- забезпечення автоматичного поточного контролю параметрів процесу низькотемпературного сушіння (температури зерна і повітря, вологості зерна, зберігання зерна);
- визначення за розробленою математичною моделлю раціональних режимів роботи вентиляційних установок відповідно до параметрів процесу досушування або зберігання;
- зручне для сприйняття відображення поточних значень контрольованих параметрів в режимі реального часу;
- формування з заданою дискретністю бази даних динаміки контрольованих параметрів і техніко-економічних показників.

Для виконання вищевказаних завдань розроблена функціональна схема автоматизації системи керування диференційованими режимами активного вентилявання зерна в бункері БВ-40 (технічні характеристики наведені в таблиці 1.1) (рис. 3.14).

Як було зазначено, у магістерській роботі розглядається процес двостадійного сушіння зерна як складової технологічного процесу його тривалого зберігання у зерносховищах. По-перше, сушіння зерна безпосередньо у зерносховищі є неможливим внаслідок дуже великої насипної щільності зерна. По-друге, у зерні в зерносховищі можуть виникати процеси саморозігрівання або внаслідок локального осередку більшої вологості зерна можливе його псування. Тому зерно із зерносховища за необхідності охолоджують та досушують.

Технологія двостадійного сушіння (рис. 2.1) передбачає високотемпературне сушіння у шахтній сушарці до певної вологості W і

температури, і досушування на установках активного вентиляювання із охолодженням зерна до заданої температури у бункері активного вентиляювання.

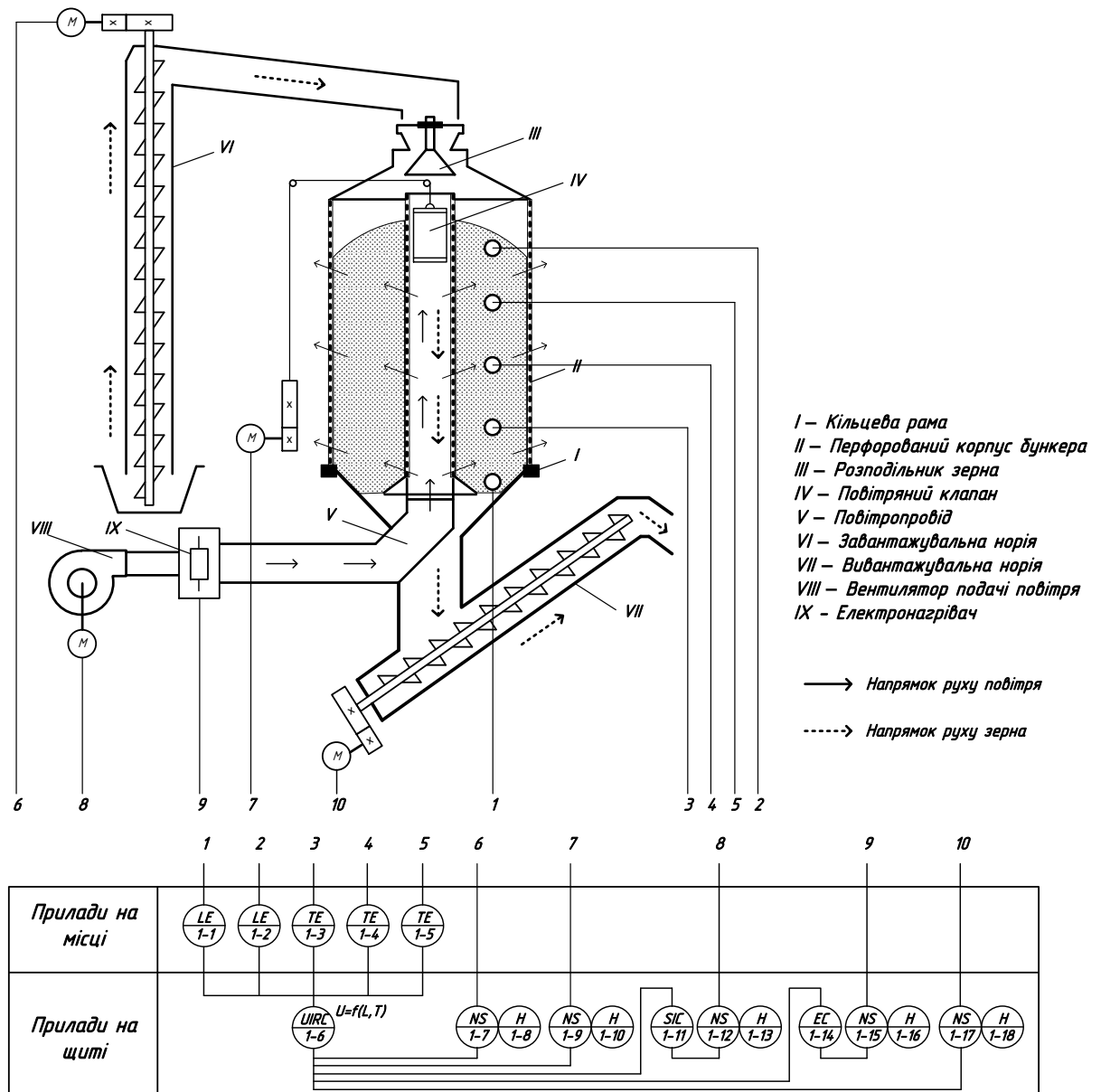


Рис. 3.14. Функціональна схема автоматизації системи керування диференційованими режимами активного вентиляювання зерна в бункері БВ-40

Технологічний процес керування температурою зерна в зерносховищі відбувається за наступним алгоритмом:

- завантаження зерна із зерносховища в бункер активного вентиляювання;

- активне вентиляювання зерна із використанням нагрівних елементів для підігріву вентиляційного повітря (за потреби – при вентиляюванні холодним вологим повітрям);
- охолодження зерна;
- вивантаження зерна із бункера у зерносховище для його відлежування.

Автоматичний керуючий пристрій (програмно-логічний контролер) UIRC (1-6) отримує інформацію про технологічний стан бункера за допомогою датчиків нижнього LE (1-1) та верхнього LE (1-2) рівня зерна, датчиків температури TE (1-3, 1-4, 1-5), розташованих відповідно у нижній, середній та верхній зоні зберігання.

При відсутності зерна у бункері контролер передає керуючий сигнал на електродвигун приводу завантажувальної норії, починаючи процес завантаження бункера зерном.

Після завантаження бункера контролер в залежності від температури зерна та технологічного регламенту диференційованих режимів сушіння (таблиця 3.1) передає сигнал керування на частотний перетворювач SIC (1-11) та регулятор потужності електронагрівачів ЕС (1-14). Частотний перетворювач зміною частоти обертання валу двигуна приводу відцентрового вентилятора керує витратами вентиляційного повітря у відповідності з регламентом, а регулятор потужності керує температурою нагрівання повітря.

Повітряний клапан встановлюється контролером у таке положення, при якому вентиляційне повітря протискується крізь зерновий насип і не втрачається над насипом через перфоровані стінки при неповності завантаженому бункері.

Після виконання регламенту контролер вмикає вивантажувальну норію, і відвантажує зерно у зерносховище до спрацювання датчика нижнього рівня. По закінченню цього циклу починається наступний.

3.5. Визначення передатної функції бункера активного вентиляювання зерна по каналу керування температурою зерна

Для визначення динамічних характеристик бункера активного вентиляювання зерна як об'єкта управління була використана його розгінна характеристика, яка представляє собою залежність температури насипу зерна t_z від часу, при ступінчастій зміні керуючої дії: включення вентилятора подачі повітря (рис. 3.15). Розгінна характеристика побудована за даними (Додаток Б), отриманими у п. 2.3, при побудові графічних інтерпретацій (рис. 2.7).

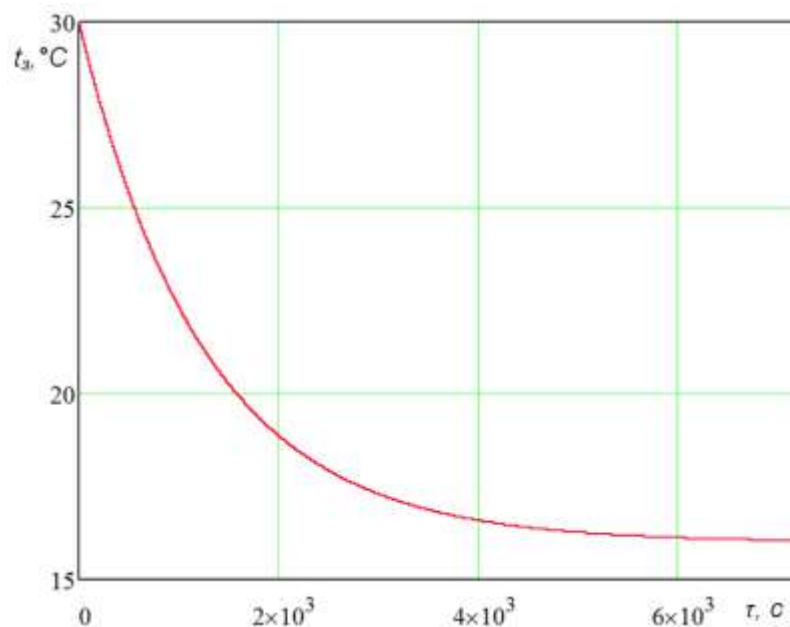


Рис. 3.15. Розгінна характеристика бункера активного вентиляювання для каналу керування температурою зернового насипу

Для визначення передатної функції бункера активного вентиляювання зерна для каналу керування був використаний графічний метод [25]. Для цього розгінна характеристика (рис. 3.15), була пронормована за виразом

$${}^0y(t_i) = \frac{y(t_i) - y(t_0)}{y(\infty) - y(t_0)} = \frac{y(t_i) - 30}{16,05 - 30} \quad (3.13)$$

Результати розрахунку занесені в таблицю (Додаток Б), нормована розгінна характеристика бункера активного вентилявання для каналу керування зображена на рис. 3.16.

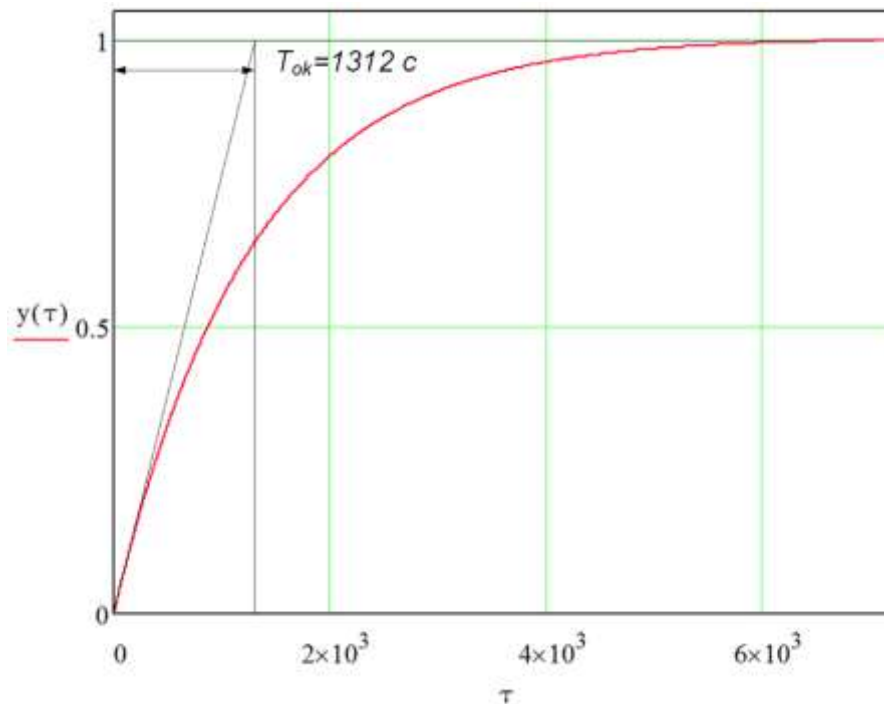


Рис. 3.16. Нормована розгінна характеристика бункера активного вентилявання для каналу керування температурою зернового насипу

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

$$W(s) = \frac{k_{OY} \cdot e^{-\tau_{OY} \cdot s}}{T_{OY} \cdot s + 1}, \quad (3.14)$$

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. 3.16). Точка перегину відповідає середині відрізка часу, на якому спостерігається максимальний приріст ординати кривої розгону.

Коефіцієнт передачі об'єкта керування визначаємо за формулою

$$k_{ov} = \frac{T_K - T_{II}}{L_K - L_{II}}, \quad (3.15)$$

де T_K та T_{II} – відповідно кінцева та початкова температура повітря зернового насипу у бункері активного вентилявання, °С;

L_K та L_{II} – відповідно кінцеве та початкове відносне значення продуктивності системи подачі повітря бункера активного вентилявання зерна, %.

$$T_K = 16,05^\circ\text{C}, T_{II} = 30^\circ\text{C}; \quad L_K = 100\%, L_{II} = 0\%.$$

$$k_{ov} = \frac{16,05 - 30}{100 - 0} = \frac{-13,5}{100} = -0,135 \left[\frac{^\circ\text{C}}{\% \text{ продуктивн}} \right]$$

Знак мінус характеризує спадаючий характер зміни температури.

Значення постійної часу та часу чистого запізнення, визначені з нормованої розгінної характеристики. Час чистого запізнення визначається часом, що необхідний на проходження повітря повітропроводом бункера активного вентилявання зерна та подолання шляху через зерновий насип до перфорованих стінок бункера.

$$T_{ov} = 1312 \text{ c}, \quad \tau_{ov} = 35 \text{ c}.$$

Отримаємо передатну функцію бункера по каналу керування температурою насипу зерна при його охолодженні

$$W_{ov}(s) = \frac{0,135 \cdot e^{-35 \cdot s}}{1312 \cdot s + 1}.$$

РОЗДІЛ 4

ВИБІР РЕГУЛЯТОРА ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО НАЛАШТУВАНЬ

4.1. Вибір алгоритму керування та визначення параметрів настройки регулятора

Будь-яка система автоматичного керування складається з регулятора та об'єкта керування. Динамічні властивості останнього відіграють вирішальну роль при виборі найбільш ефективного алгоритму керування. Встановлено, що критерієм для правильного вибору алгоритму керування може служити значення відношення часу чистого запізнення об'єкта до його постійної часу, тобто $\frac{\tau_{ov}}{T_{ov}}$ [25]. Для цього передатна функція для статичного об'єкта повинна бути представлена у вигляді виразу (3.14). При виборі типу регулятора рекомендується орієнтуватися на величину відношення часу запізнення до постійної часу об'єкта керування $\frac{\tau_{ov}}{T_{ov}}$:

- якщо $\frac{\tau_{ov}}{T_{ov}} < 0,2$, перевагу віддають позиційному (релейному)

алгоритму керування, але можливе використання і неперервного алгоритму. Рішення приймається в залежності від технологічних вимог до процесу управління.

- якщо $0,2 < \frac{\tau_{ov}}{T_{ov}} < 1,0$, перевагу віддають неперервному або

цифровому алгоритму керування (П-, ПІ- або ПІД-алгоритм керування)

- якщо $\frac{\tau_{ov}}{T_{ov}} > 1,0$, вибирають спеціальний цифровий регулятор з

екстраполятором, який компенсує запізнювання в контурі керування.

Крім того, для обґрунтування алгоритму керування і вибору регулятора, який відповідає цьому алгоритму, необхідно знати не тільки властивості об'єкта та вимоги до технологічного процесу, але й деякі конструктивні особливості самих регуляторів. Промислові регулятори реалізують алгоритм керування з певною похибкою, що обов'язково повинно враховуватись при виборі усіх технічних засобів, що входять до складу системи автоматичного керування.

В даному випадку передатна функція бункера активного вентилявання для каналу керування температурою зернового насипу

$$W_{ov}(s) = \frac{0,135 \cdot e^{-35 \cdot s}}{1312 \cdot s + 1}, \text{ при цьому відношення } \frac{\tau_{ov}}{T_{ov}} = \frac{35}{1312} = 0,026, \text{ тому за вказаною}$$

методикою необхідно використати позиційний алгоритм керування.

Але необхідно врахувати наступні технологічні умови: згідно із розробленою функціональною схемою автоматизації системи керування температурою активного вентилявання зерна та технологічним регламентом диференційованих режимів роботи обладнання охолодження зернового насипу в бункері здійснюється неперервно, змінюються лише витрати вентиляційного повітря. Для керування відцентровим вентилятором використовується частотний перетворювач, характерною особливістю якого є вбудований у нього ПІД-регулятор частоти обертання.

Тому для системи автоматичного керування температурою зерна в бункері прийнятий неперервний ПІД-алгоритм керування.

Розрахунок параметрів настройки регулятора виконані у розділі 5 магістерської роботи.

4.2. Реалізація алгоритму керування

Згідно з функціональною схемою автоматизації система керування складається з:

- програмно-логічного контролера (ПЛК), який отримує інформацію про температуру та рівень зерна у бункері від датчиків температури у трьох зонах бункера та від датчиків рівня (верхній та нижній) зерна температури, і формує сигнали керування частотним перетворювачем та регулятором потужності;
- модуля розширення аналогових входів для підключення до ПЛК аналогових датчиків температури;
- перетворювача частоти, який за ПД-алгоритмом здійснює безпосереднє керування швидкістю обертання валу електродвигуна приводу відцентрового вентилятора, змінюючи витрати повітря на активне вентилявання за розробленим технологічним регламентом диференційної роботи обладнання;
- регулятора потужності, за допомогою якого здійснюється керування електронагрівачами, тобто нагріванням вентиляційного повітря, як це передбачено регламентом диференційованих режимів активного вентилявання;
- електродвигунів приводу транспортерів зерна, електродвигуна приводу повітряного клапану.

4.2.1. Вибір промислових пристроїв керування

Для керування перетворювачем частоти, регулятором потужності та іншим технологічним обладнанням згідно із завданням на виконання магістерської роботи обраний програмний логічний контролер MODICON TM238LFDC24DT Schneider Electric (рис. 4.1).

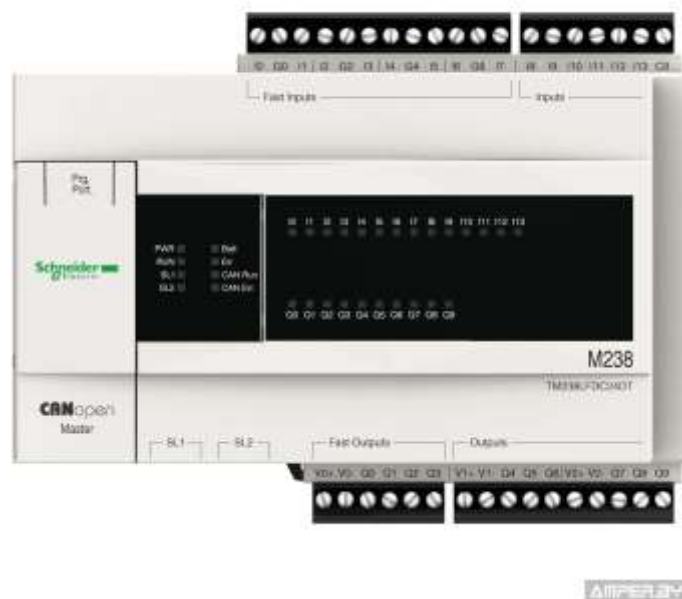


Рис. 4.1. Програмний логічний контролер
MODICON TM238LFDC24DT Schneider Electric

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

Основні технічні характеристики ПЛК MODICON TM238 наведені в таблиці 4.1.

Технічні характеристики ПЛК MODICON TM238LFDC24DT

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

Для підключення аналогових датчиків температури (термометрів опору) використовується модуль розширення аналогових входів TM2AMM6HT Schneider Electric (рис. 4.2), розроблений для збільшення

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



Рис. 4.2. Модуль розширення аналогових входів TM2AMM6NT

4.2.2. Вибір первинного вимірювального перетворювача САК

До первинних вимірювальних перетворювачів (ПВП) висуваються наступні вимоги:

- лінійність і однозначність статичної характеристики (допустима нелінійність не повинна перевищувати 0,1...3,0%);
- висока чутливість;
- стабільність характеристик у часі;
- швидкодія;
- стійкість до хімічних впливів контролюючого і навколишнього середовища (первинні перетворювачі, розміщені у захисній оболонці);
- мінімальний зворотній вплив на контролюючий параметр та зручність монтажу і обслуговування.

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

- на першому етапі за типом контрольованого параметра об'єкта керування та умовами його роботи визначається різновид перетворювача;
- на другому етапі, після вибору всіх елементів регулятора за каталогами, знаходять його типорозмір.

ПВП рекомендується підбирати таким чином, щоб межі його вимірювання охоплювали діапазон зміни контрольованої ним величини і були якнайближчими до них, не забуваючи про необхідність забезпечення необхідної перевантажувальної здатності ПВП і про можливість його підключення до обраного електронного керуючого пристрою регулятора. При цьому особливу увагу необхідно приділяти швидкодії (інерційності) ПВП, яка характеризується його постійною часу.

Так, при обґрунтуванні вибору ПВП температури повітря вентилявання зерна необхідно в першу чергу звернути увагу на те, вимірювання якого діапазону зміни температури відповідно до технологічних умов він повинен забезпечити. Діапазон вимірюваних значень температури активного вентилявання зерна повинен відповідати температурі зовнішнього повітря для усіх сезонів вентилявання, тобто і від'ємні значення температури для холодних місяців, так і додатні для теплих.

Для того, щоб ПВП у процесі вимірювання температури на заданому рівні не вносив недопустиму динамічну похибку вимірювання, його постійна часу $T_{ПВП}$ повинна бути на порядок меншою від постійної часу об'єкта T_{OY} .

Постійна часу об'єкту $T_{OY} = 1312$ с. З огляду на сказане, максимальна постійна часу перетворювача повинна бути не більше $1312/10=131$ с.

Враховуючи вимоги за діапазоном вимірювання та інерційністю, а також особливості підключення датчиків температури до ПЛК типу

MODICON TM238 обраний термоперетворювач опору загальнопромислового виконання ТСМУ-2212-50М, технічні характеристики якого наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2.

Основні технічні характеристики термоперетворювача опору ТСМУ-2212

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

Термоперетворювачі з уніфікованим вихідним сигналом типу ТСМУ призначені для неперервного перетворювання температури середовища (газів, пари, рідин та сипких середовищ) у пропорційний струмовий сигнал 0-5 або 4-20 мА дистанційної передачі. Датчик складається із вбудованого в головку вимірювального перетворювача із вихідним сигналом 0-5 або 4-20 мА та термозонду (рис. 4.3).

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

Термоперетворювач ТСМУ-2212 відповідає вимогам ДСТУ 2858-94.



Рис. 4.3. Термоперетворювач опору з уніфікованим вихідним сигналом ТСМУ-2212

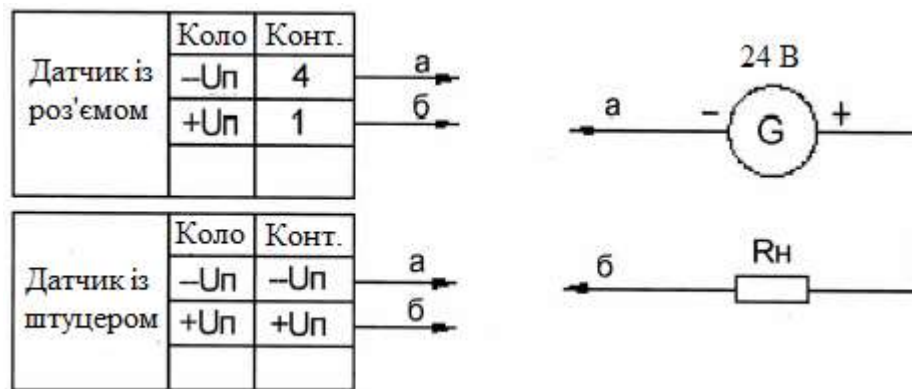


Рис. 4.4. Схема зовнішніх з'єднань датчиків типу ТСМУ із вихідним сигналом 4-20 мА

Для визначення передатної функції ПВП скористаємось його номінальною статичною характеристикою (рис. 4.5).

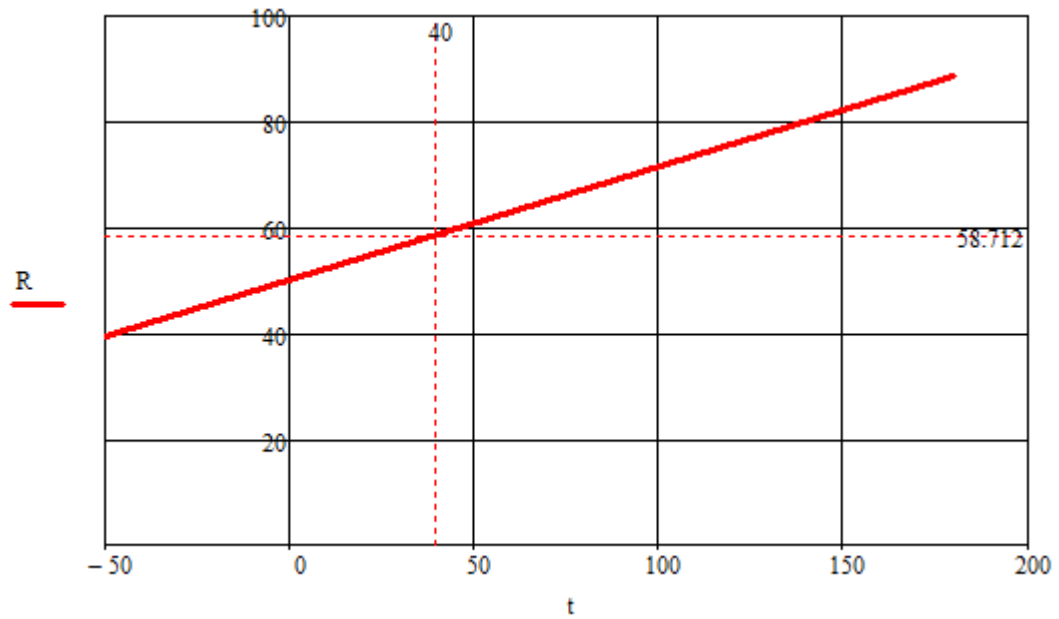


Рис. 4.5. Номінальна статична характеристика термоперетворювача опору ТСМУ-2212 (50М)

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

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

$$k_{ПВП} = \frac{\Delta I}{\Delta T} = \frac{20 - 4}{50 - (-25)} = 0,217 \frac{mA}{^{\circ}C}, \quad (4.1)$$

де ΔT – різниця значень вимірюваних датчиком температур, $^{\circ}C$ (таблиця 4.2);

ΔI – різниця струмів, що відповідає значенням температур в робочому діапазоні, мА.

Враховуючи, що показник теплової інерції сприймаючого елемента складає $T_{ПВП} = 8 \text{ c}$ (таблиця 4.2), передатна функція датчика ТСМУ-2212

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

4.2.3. Вибір виконавчого механізму САК

Для вибору типу та розміру вентилятора при його використанні для активного вентилявання необхідно знати розрахункові значення обміну повітря, необхідного для видалення надлишкової вологи та температури з шару зерна, та повного тиску.

Згідно технологічного регламенту (таблиця 3.1), вентилятор повинен забезпечити витрату повітря $400 \frac{m^3}{год}$ із поступовим її зменшенням до $100 \frac{m^3}{год}$. Враховуючи, що повністю заповнений бункер активного вентилявання БВ-40 містить 40 т зерна пшениці, отримаємо, що вентилятор повинен забезпечувати подачу повітря в межах від $4000 \frac{m^3}{год}$ (при витраті повітря $100 \frac{m^3}{год}$) до $16000 \frac{m^3}{год}$ (при витраті повітря $400 \frac{m^3}{год}$).

Крім того, необхідно враховувати, що вентилятор повинен забезпечувати необхідний тиск для проходження повітря крізь щільний шар зернової маси. Відомо, що радіальні (відцентрові) вентилятори здатні створювати набагато більший статичний тиск (до $2000 \div 2500$ Па), ніж осьові ($30 \div 300$ Па).

Враховуючи вищевказане, для використання в даній системі керування обраний **радіальний (відцентровий) вентилятор В-Ц4-70-8** (рис. 4.6), призначений для роботи в стаціонарних вентиляційних установках, зокрема – бункерах вентилявання БВ-40.



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

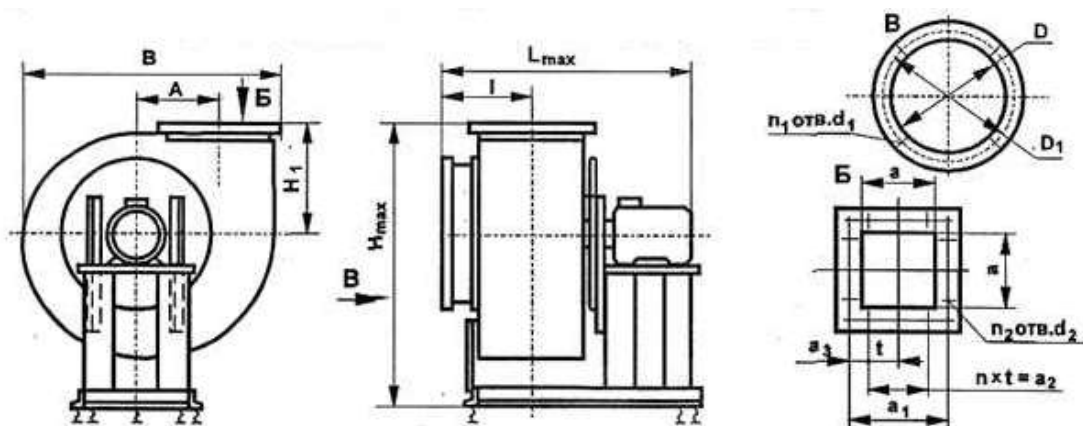


Рис. 4.7. Монтажне виконання вентилятора В-Ц4-70-8

Таблиця 4.3.

Габаритні та монтажні розміри вентиляторів типу В-Ц4-70

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

Технічні характеристики вентилятора В-Ц4-70-8

Вентилятор	Потужність електродвигуна приводу вентилятора, кВт	Швидкість обертання робочого колеса, об/хв.	Показники в робочій зоні	
			Продуктивність, тис. $\frac{m^3}{год}$	Напір, Па
В-Ц4-70-8	11,0	950	10,0...22,0	1020...550

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

Таблиця 4.5.

Технічні характеристики електродвигуна АИР132М4

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

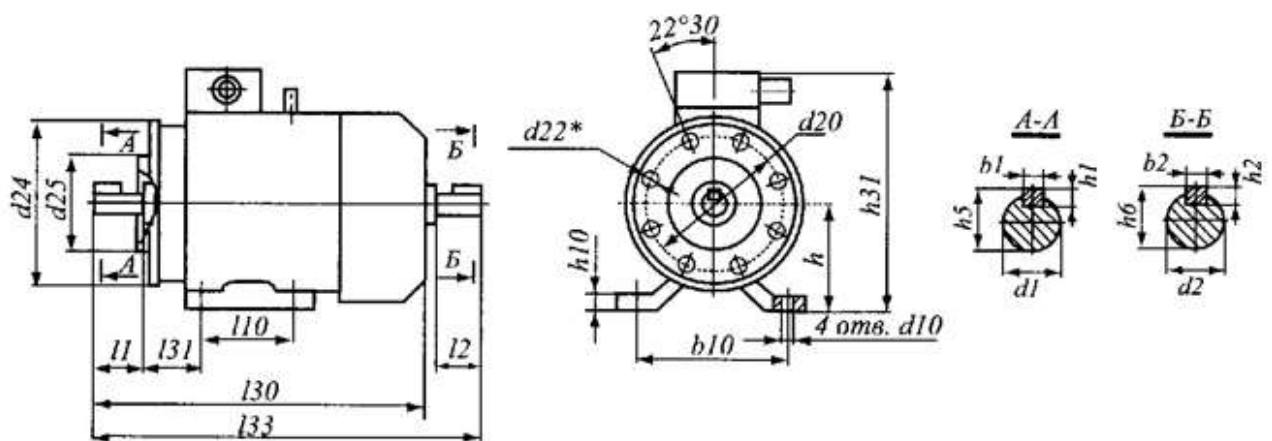


Рис. 4.8. Монтажне виконання електродвигуна АИР132М4

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

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}, \quad (4.2)$$

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

$$v = \frac{f_V}{f_H} = \frac{\omega_{1V}}{\omega_0}, \quad (4.3)$$

де швидкість ω_0 пов'язана з частотою мережі виразом (4.2).

Введемо поняття фіктивного ковзання

$$s_\phi = \left(\frac{\omega_{1V}}{\omega_0} \right) \cdot s = v \cdot s. \quad (4.4)$$

Дійсна швидкість обертання при частоті f_V

$$\omega = \omega_{1V} \cdot (1 - s). \quad (4.5)$$

Підставляючи у (4.5) значення ω_{1V} із (4.3) з урахуванням (4.4), визначимо

$$\omega = \omega_0 \cdot (v - s_\phi). \quad (4.6)$$

Для малих значень ковзання обертаючий момент двигуна пропорційний ковзанню

$$M = \left(\frac{M_H}{s_H} \right) \cdot s_\phi. \quad (4.7)$$

Підставляючи (4.6) та (4.7) у вихідне рівняння

$$M - M_c = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (4.8)$$

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

$$J \cdot s \cdot \omega_0 \cdot (v - s_\phi) = \left(\frac{M_H}{s_H} \right) \cdot s_\phi. \quad (4.9)$$

Цей вираз можна представити як

$$\frac{J \cdot \omega_0 \cdot s_H}{M_H} \cdot s \cdot \frac{s_\phi}{s_H} + \frac{s_\phi}{s_H} = \frac{J \cdot \omega_0}{M_H} \cdot s \cdot v. \quad (4.10)$$

Якщо за вхідну величину прийняти відносну швидкість поля v , а за вихідну – відносне ковзання $\sigma = \frac{s_\phi}{s_H}$, то вираз (4.10) матиме вигляд

$$T_{M1} \cdot s \cdot \sigma + \sigma = T_{M2} \cdot s \cdot v, \quad (4.11)$$

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

Тоді передатна функція асинхронного електродвигуна при частотному керуванні

$$W(s) = \frac{\sigma(s)}{v(s)} = \frac{T_{M2} \cdot s}{T_{M1} \cdot s + 1}. \quad (4.12)$$

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

Передатна функція асинхронного електродвигуна у цьому випадку

$$W_{BM}(s) = \frac{k_{BM}}{T_{BM} \cdot s + 1}, \quad (4.13)$$

$$k_{BM} = \frac{\omega_H}{f}; \quad (4.14)$$

$$T_{BM} = \frac{J_{3B}}{\beta}, \quad (4.15)$$

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

β - жорсткість механічної характеристики;

$$\beta = \frac{2 \cdot M_{KP}}{\omega_0 \cdot s_{KP}}, \quad (4.16)$$

де M_{KP} - критичний момент електродвигуна;

s_{KP} - критичне ковзання електродвигуна.

Розрахуємо необхідні величини для визначення передатної функції за виразами (4.13) - (4.16). Вихідні дані – каталожні значення для електродвигуна [30].

$$M_H = 9550 \cdot \frac{P_H}{n_H} = 9550 \cdot \frac{11}{950} = 110,58 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (4.17)$$

$$M_{KP} = M_H \cdot \mu_{KP} = 110,58 \cdot 1,6 = 176,928 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (4.18)$$

$$S_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{1000 - 950}{1000} = 0,05. \quad (4.19)$$

$$\mu_1 = \frac{\mu_{KP}}{\mu_{ПВСК}} = \frac{1,6}{1,4} = 1,14. \quad (4.20)$$

$$s_{KP} = \frac{S_H + \sqrt{S_H \cdot \frac{\mu_{KP} - 1}{\mu_1 - 1}}}{1 + \sqrt{S_H \cdot \frac{\mu_{KP} - 1}{\mu_1 - 1}}} = \frac{0,05 + \sqrt{0,05 \cdot \frac{1,6 - 1}{1,14 - 1}}}{1 + \sqrt{0,05 \cdot \frac{1,6 - 1}{1,14 - 1}}} = 0,35 \quad (4.21)$$

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_0}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1000}{60} = 104,7 \text{ рад./с}. \quad (4.22)$$

$$\omega_H = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_H}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 950}{60} = 99,4 \text{ рад./с}. \quad (4.23)$$

$$J_{IP} = J_{ДВ} + J_{PM} = 0,045 + 0,09 = 0,135 \text{ кг} \cdot \text{м}^2. \quad (4.24)$$

Тоді

$$\beta = \frac{2 \cdot M_{KP}}{\omega_0 \cdot S_{KP}} = \frac{2 \cdot 176,928}{104,7 \cdot 0,35} = 9,66 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад./с}}.$$

$$T_{BM} = \frac{J_{ЗВ}}{\beta} = \frac{0,135}{9,66} = 0,014 \text{ с}. \quad k_{BM} = \frac{\omega_H}{f} = \frac{99,4}{50} = 1,988 \frac{\text{рад./с}}{\text{Гц}}.$$

Отже, передатна функція електродвигуна при частотному керуванні

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

4.2.4. Вибір частотного перетворювача

У САК диференційованими режимами активного вентилявання зерна в бункері БВ-40 в якості пристрою для керування електродвигуном приводу відцентрового вентилятору вибраний частотний перетворювач серії **Altivar ATV312** фірми **Schneider Electric** (рис. 4.9).

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

Ці перетворювачі оснащені вбудованим модулем реалізації ПД-алгоритму керування.



Рис. 4.9. Зовнішній вигляд перетворювача частоти Altivar ATV312 фірми Schneider Electric

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

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

Можливості перетворювача Altivar ATV312:

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

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

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

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

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

Потужність перетворювача частоти, або необхідна їх кількість для живлення усіх електродвигунів приводу вентиляторів, визначається за таблицею 4.6.

Таблиця 4.6.

Технічні характеристики моделей перетворювачів частоти
типу Altivar ATV312 фірми Schneider Electric

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

Оскільки для приводу відцентрового вентилятора використовується асинхронний трифазний електродвигун АІР132М4 потужністю 11кВт, згідно з табл. 4.6 необхідно використати перетворювач Altivar ATV312HD11N4.

4.2.5. Вибір датчика рівня зерна

Як датчик нижнього та верхнього рівня зернової маси у бункері активного вентилявання використовується датчик рівня ДПУ-10 (рис. 4.10).

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



Рис. 4.10. Датчик граничного рівня сипких матеріалів ДПУ-10

Принцип роботи датчика ДПУ-10 наступний: так звана "виделка" датчика вібрає 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 4.7, схема із наведеними можливими варіантами встановлення – у додатку В.

Таблиця 4.7.

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	$I_{\text{макс}} = 8\text{А}$, $U_{\text{макс AC}} = 250\text{В}$, $U_{\text{макс DC}} = 24\text{В}$
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.

4.2.6. Вибір регулятора потужності для керування електронагрівачами

Для керування електронагрівачами вибраний регулятор потужності типу DRU3 MEYERTEC.

Трифазні регулятори потужності DRU3 MEYERTEC (рис. 4.11) призначені для плавного управління потужністю, що передається з мережі до навантаження. Управління здійснюється від вхідного аналогового сигналу або у ручному режимі.

Регулятори потужності DRU3 найчастіше використовуються для керування ТЕНами, інфрачервоними нагрівачами, а також для плавного керування потужними лампами розжарювання. Крім того, ці регулятори знайшли широке використання в автоматизованих системах управління технологічними процесами у різноманітних галузях промисловості: металургія, харчова промисловість, сушка, екструзія, термообробка та плавлення скла, потужні напівпровідники, нафтохімія.



Рис. 4.11. Трифазний регулятор потужності DRU3 MEYERTEC:
а – з природним охолодженням, б – із примусовим охолодженням

Регуляторам потужності DRU3 притаманні наступні переваги:

- широкий модельний ряд трифазних регуляторів потужністю 25...200А, напругою 200...440В;
- точне управління навантаженням – приведена похибка приладу не перевищує 1%;
- лінеаризація залежності вихідної напруги або потужності від вхідного сигналу;
- ручне управління за місцем або автоматичне керування навантаженням від аналогового сигналу: 4...20 мА, 0...5 В, 0...10 В;
- наявність швидкодіючого запобіжника у кожній фазі регулятора для забезпечення захисту від коротких замикань.

Основний алгоритм управління регулятором потужності – фазовий. Регулювання потужності здійснюється зміною кута (фази) відкриття тиристора. У цьому випадку потужність у навантаженні пропорційна часу відкритого стану тиристора всередині напівперіоду мережевої напруги (рис. 4.12).

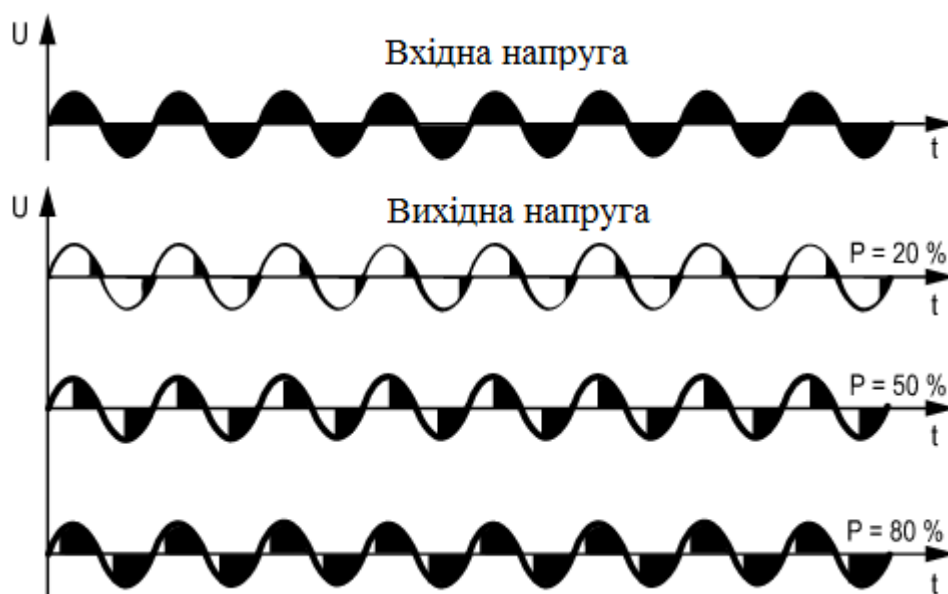


Рис. 4.12. Фазовий метод регулювання потужності пристроєм DRU3

Навантаження до регуляторів потужності DRU3 вмикається за схемами "зірка без нейтралі" та "трикутник" (рис. 4.13).

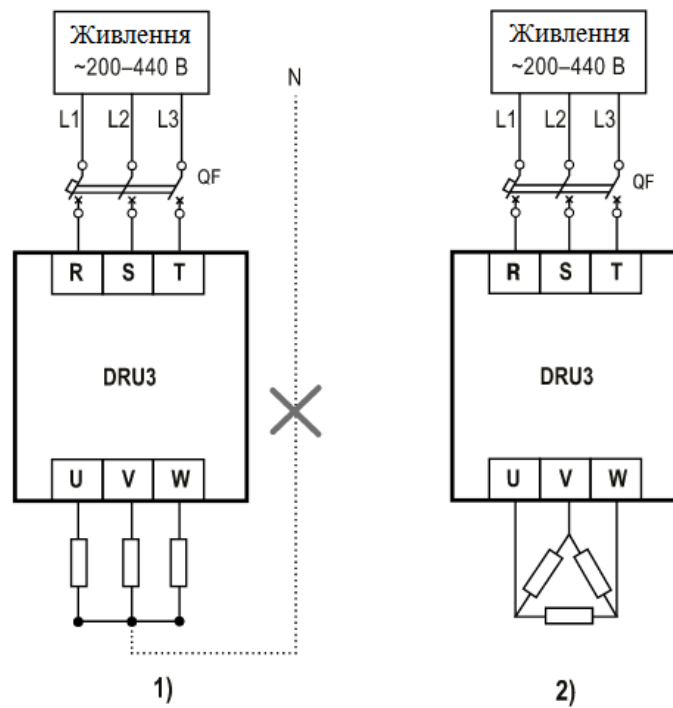


Рис. 4.13. Підключення мережі та навантаження до регулятора потужності DRU3 MEYERTEC:

1) – за схемою "зірка без нейтралі", 2) – за схемою "трикутник"

Технічні характеристики регулятора потужності DRU3 MEYERTEC наведені в Додатку Г.

Модифікація приладу вибирається виходячи із розрахункового номінального струму приладу (таблиця 4.8), що визначається за потужністю електронагрівачів за виразом

$$I_{\text{розр}} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{л}}} = \frac{9000}{\sqrt{3} \cdot 380} = 13,69 \text{ А.} \quad (4.25)$$

P – номінальна потужність навантаження, Вт; оскільки до регулятора потужності підключено 3 електронагрівачі по 3 кВт кожний, потужність навантаження $P = 9000$ Вт;

$U_{\text{л}}$ – номінальна напруга трифазної мережі живлення (380 В).

Отже, для даної системи керування необхідно використати регулятор потужності модифікації DRU3-25.

Таблиця вибору модифікації приладу DRU3 MEYERTEC

Номінальний струм навантаження, А	Модифікація приладу DRU3 MEYERTEC
16	DRU3-25
25	DRU3-40
50	DRU3-75
63	DRU3-100
80	DRU3-125
100	DRU3-150
125	DRU3-200

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

На сучасному етапі розвитку автоматизації основним видом регуляторів стають цифрові. При виконанні імпульсної теореми для визначення їх параметрів налаштування можна застосовувати аналітичні і графічні методи. Проте, при необхідності аналізу процесів у самому цифровому регуляторі, самостійного створення програми, що реалізує алгоритм керування, при дослідженні впливу періоду квантування та дискретного характеру сигналів на динамічні характеристики цифрової системи, більш точним буде метод синтезу регулятора у Z-перетворенні.

У цьому розділі розглядається методика розрахунку параметрів налаштувань ПД-регулятора при апроксимації неперервної частини систем другого порядку у вигляді послідовного з'єднання двох інерційних ланок:

$$W_{нч}(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}. \quad (5.1)$$

Передатна функція цифрового ПД-регулятора має вигляд:

$$W_{рр}(z) = K_p + \frac{K_i T(z+1)}{2(z-1)} + \frac{K_d(z-1)}{Tz} = \frac{K_i T^2 + 2K_d + 2K_p T}{2Tz(z-1)} \left(z^2 + \frac{K_i T^2 - 2K_p T - 4K_d}{K_i T^2 + 2K_d + 2K_p T} z + \frac{2K_d}{K_i T^2 + 2K_d + 2K_p T} \right) \quad (5.2)$$

Якщо в знаменнику неперервної частини є два полюси z_1 і z_2 , то знаменник має поліном другого степеня $z^2 - (z_1 + z_2)z + z_1 z_2$. Синтез цифрового ПД-регулятора полягає у знаходженні значень коефіцієнтів налаштування K_p , K_i та K_d , які визначаються таким чином, щоб компенсувати два полюси Z-перетворення неперервної частини системи, що відповідають двом інерційним ланкам. При цьому отримується система двох рівнянь з трьома невідомими:

$$\begin{cases} \frac{K_i T^2 - 2K_p T - 4K_d}{K_i T^2 + 2K_d + 2K_p T} = -(z_1 + z_2) = d \\ \frac{2K_d}{K_i T^2 + 2K_d + 2K_p T} = z_1 z_2 = c \end{cases} \quad (5.3)$$

Оскільки рівняння (5.2) та (5.3) мають зайву змінну, то один з параметрів слід визначати за додатковими технологічними умовами. Наприклад, коефіцієнт інтегральної складової регулятора рекомендується визначати за добротністю за швидкістю K_V , яка визначається як величина, обернена коефіцієнту похибки за швидкістю C_1 при поданні динамічної похибки $\Delta x(t)$ у вигляді нескінченного ряду

$$\Delta x(t) = C_0 \cdot x_{ex}(t) + C_1 \cdot \frac{dx_{ex}(t)}{dt} + \frac{C_2}{2!} \cdot \frac{d^2 x_{ex}(t)}{dt^2} + \dots \quad (5.4)$$

Для астатичної системи добротність за швидкістю можна визначити як відношення швидкості зміни вхідного сигналу $\frac{dx_{ex}(t)}{dt} = \dot{x}_{ex}$ до усталеної похибки

$$K_V = \frac{\dot{x}_{ex}}{\Delta x_{уст}} \quad (5.5)$$

при лінійній зміні вхідного сигналу $x_{ex}(t) = kt$. Тоді швидкість $\dot{x}_{ex} = const = k$, а Z-зображення вхідного сигналу $X_{ex}(z) = \frac{kTz}{(z-1)^2}$.

Зображення динамічної похибки матиме вигляд:

$$\Delta X(z) = \frac{X_{ex}(z)}{1 + W_{роз}(z)} = \frac{X_{ex}(z)}{1 + W_{pec}(z)W_{нч}(z)} \quad (5.6)$$

Згідно з теоремою про кінцеве значення Z-перетворення усталена похибка буде дорівнювати:

$$\begin{aligned} \Delta x_{уст} &= \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} \Delta X(z) = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} \frac{X_{ex}(z)}{1 + W_{pec}(z)W_{нч}(z)} = \\ &= \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} \frac{kTz}{(z-1)^2} = \frac{kT}{\lim_{z \rightarrow 1} [(z-1)(1 + W_{pec}(z)W_{нч}(z))]} = \\ &= \frac{kT}{\lim_{z \rightarrow 1} [(z-1) \cdot W_{pec}(z)W_{нч}(z)]}. \end{aligned} \quad (5.7)$$

Враховуючи, що $\dot{x}_{ex} = k$, отримаємо:

$$\Delta x_{ycm} = \frac{\dot{x}_{ex}}{\frac{1}{T} \lim_{z \rightarrow 1} [(z-1) \cdot W_{pez}(z) W_{нч}(z)]}. \quad (5.8)$$

Тоді для систем з ПД-регулятором:

$$\begin{aligned} K_V &= \frac{\dot{x}_{ex}}{\Delta x_{ycm}} = \frac{1}{T} \lim_{z \rightarrow 1} [(z-1) \cdot W_{pez}(z) W_{нч}(z)] = \\ &= \frac{1}{T} \lim_{z \rightarrow 1} \left[(z-1) K_p + (z-1) \frac{K_i T (z+1)}{2(z-1)} + (z-1) \frac{K_d (z-1)}{z} \right] W_{нч}(z). \end{aligned} \quad (5.9)$$

Остаточно, добротність за швидкістю для систем з ПД-регулятором

$$K_V = \lim_{z \rightarrow 1} W_{нч}(z) \cdot K_i. \quad (5.10)$$

При цьому похибка слідкування при лінійній зміні вхідного сигналу $x_{ex}(t) = kt$ буде дорівнювати:

$$\Delta x_{ycm} = \varepsilon_{tr} = \frac{k}{K_V} \quad (5.11)$$

Коефіцієнт інтегруючої складової регулятора тоді визначається:

$$K_i = \frac{K_V}{\lim_{z \rightarrow 1} W_{нч}(z)} \quad (5.12)$$

Рекомендовані значення коефіцієнта добротності за швидкістю залежать від постійних часу об'єкту (табл. 5.1).

Таблиця 5.1.

Залежність коефіцієнту добротності за швидкістю
від постійних часу об'єкта

Постійні часу об'єкту T , с	Коефіцієнт добротності за швидкістю K_V
≈ 1	3..10
≈ 10	0,3..1
≈ 100	0,01..0,04
≈ 1000	0,004..0,012

У подальших розрахунках нехтуємо інерційною складовою передатної функції електродвигуна, оскільки постійна часу є дуже малою (0,014 с).

Визначаємо передатну функцію розімкненої, замкненої та дискретну передатну функцію неперервної частини системи, до якої входить і фіксатор нульового порядку (за допомогою математичного пакету MATLAB).

MATLAB Command Window

```

Передатна функція об'єкта керування
Wok =
    0.135
    -----
    1312 s + 1
Continuous-time transfer function.
Передатна функція виконавчого механізму (регулюючого органу)
Wvm =
    1.988
    -----
    0.014 s + 1
Continuous-time transfer function.
Передатна функція сприймаючого елемента
Wce =
    0.217
    -----
    8 s + 1
Continuous-time transfer function.

Передатна функція розімкнутої неперервної частини системи керування
Wnc =
    0.9984
    -----
    18.37 s^2 + 1312 s + 1
Continuous-time transfer function.
Передатна функція замкнутої неперервної частини системи керування
Wzam =
    146.7 s^3 + 1.05e04 s^2 + 1318 s + 0.9984
    -----
    2699 s^5 + 3.859e05 s^4 + 1.382e07 s^3 + 1.742e06 s^2 + 2916 s + 1.217
Continuous-time transfer function.

```

Згідно з теоремою Котельнікова для можливості безпомилкового відтворення сигналу, як показує аналіз амплітудних спектрів імпульсної системи, найменша частота квантування повинна дорівнювати $2 \cdot \omega_c$, де ω_c – найвища частота вхідного сигналу, яка має місце в амплітудно-частотній характеристиці неперервної частини системи.

Теорема стверджує: якщо сигнал не містить в собі частот вище, ніж ω_c , рад/с, він повністю описується своїми значеннями, вимірними у дискретні моменти часу з інтервалом

$$T_c \leq \frac{\pi}{\omega_c} \quad (5.13)$$

При заданій точності відтворення сигналу можна вважати, що спектр сигналу

$$|W_{3.нч}(j \cdot \omega)| \leq \theta_{зад}, \quad (5.14)$$

де $|W_{3.нч}(j \cdot \omega)|$ – амплітудно-частотна характеристика неперервної частини замкненої автоматичної системи;

$\theta_{зад}$ – необхідна точність, що повинна бути забезпечена на виході системи.

Будуємо АЧХ замкненої неперервної частини (рис. 5.1) системи та визначаємо час квантування (за допомогою математичного пакету MATLAB).

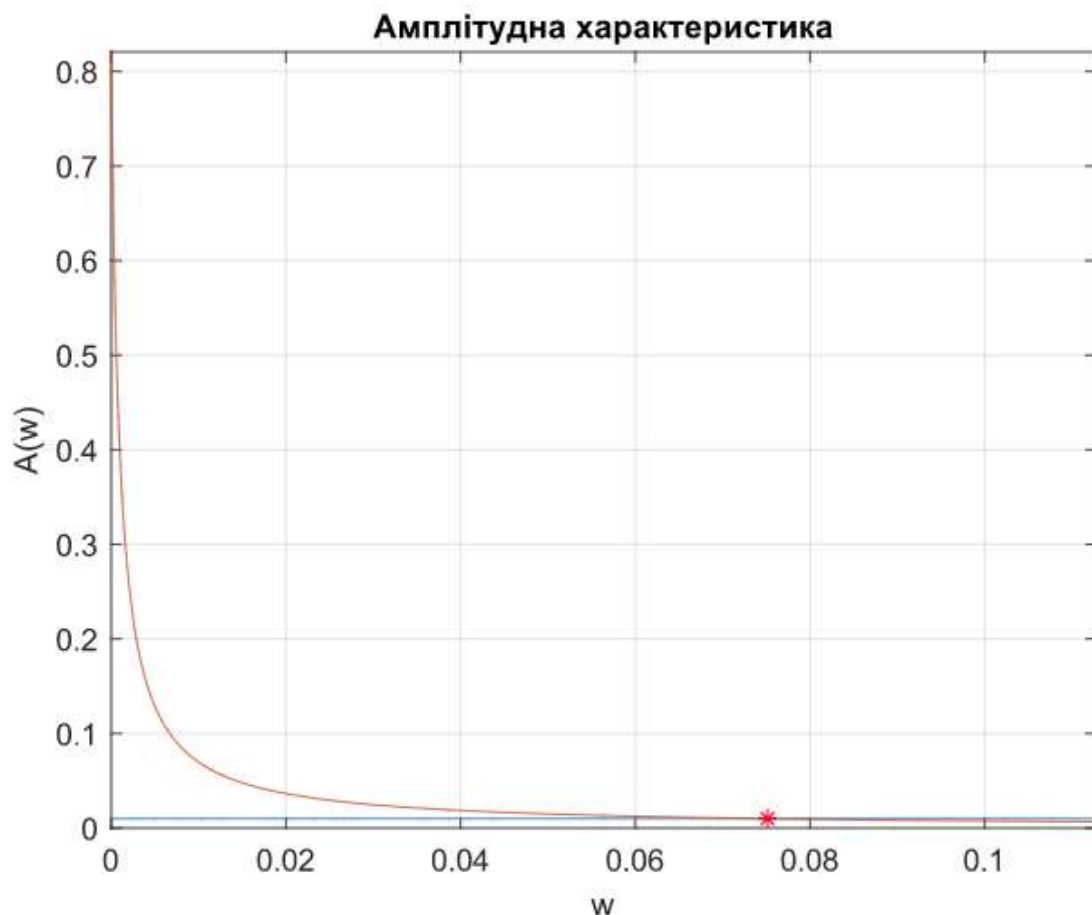


Рис. 5.1. АЧХ замкненої неперервної частини САК

```

Розрахункова частота квантування
wc =
    0.0752
Розрахунковий період квантування
Tk =
    41.8041

Дискретна передатна функція розімкнутої неперервної частини
Wncz =
    0.0313 z + 1.032e-05
    -----
           z^2 - 0.9686 z
Sample time: 41.804 seconds
Discrete-time transfer function.
Корені характеристичного рівняння
Zk =
     0
    0.9686
Корені характеристичного рівняння
a1 =
1312.0
Корені характеристичного рівняння
b1 =
     0
Коефіцієнт помилки системи за швидкістю
C1 =
328.0

Коефіцієнт добротності системи за швидкістю
Kv =
0.0030487499748373009139939993823708
Інтегральний параметр складової ПІД-регулятора
Ki =
0.0030537
Пропорційний параметр складової ПІД-регулятора
Kp =
    4.0068

Диференціальний параметр складової ПІД-регулятора
Kd =
     0

```

З наведених розрахунків для САК температурою активного вентилявання зерна отримано дані для налаштування ПІД-регулятора.

За допомогою критерію Джурі проведемо оцінку стійкості цифрової системи керування температурним режимом активного вентилявання. Згідно цього критерію усі корені характеристичного рівняння повинні знаходитися в колі одиничного радіусу на z -площині для дійсних коренів $|z_k| < 1$ (рис. 5.2), і оскільки усі корені знаходяться у колі – система є стійкою.

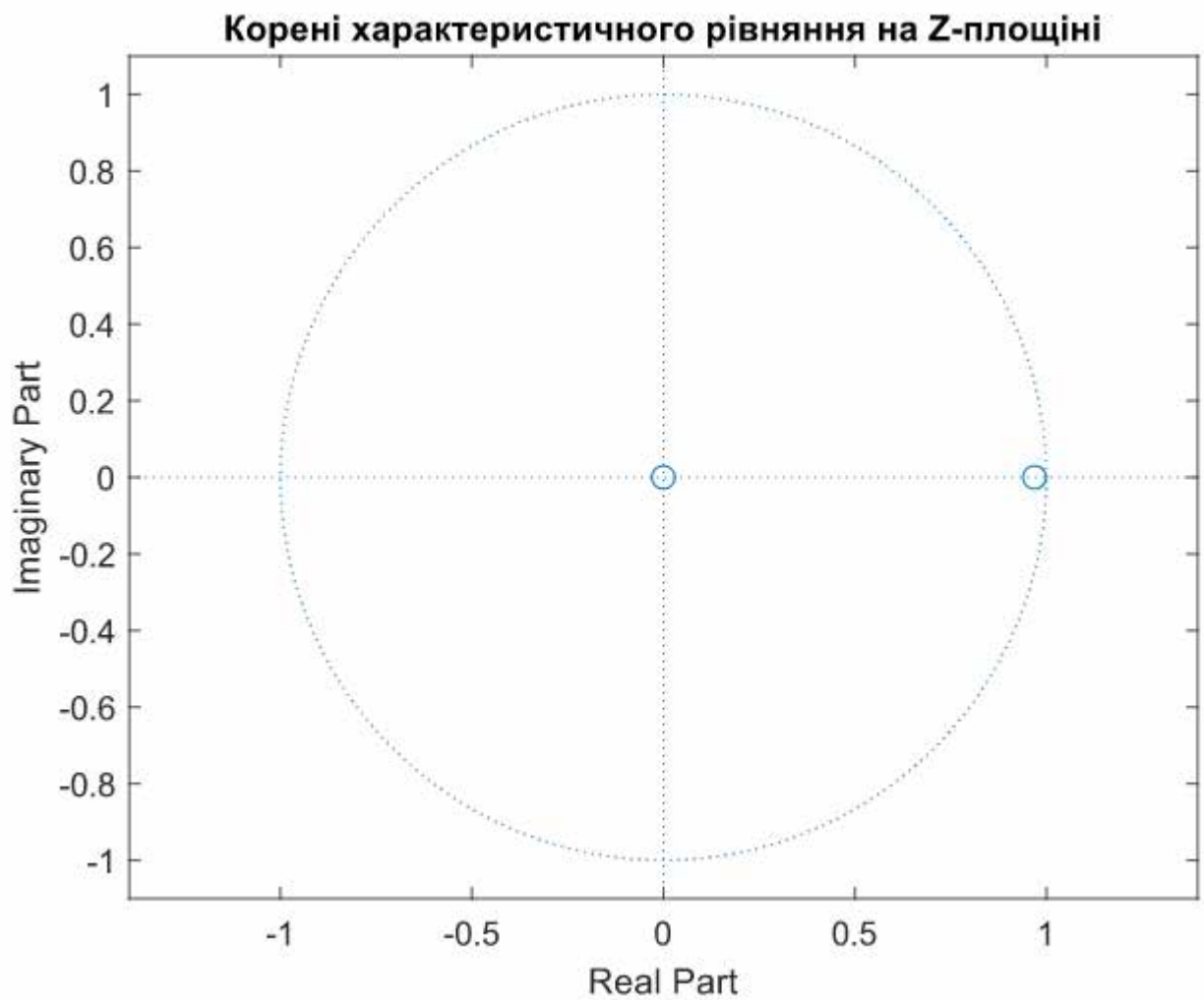


Рис. 5.2. Корені характеристичного рівняння на z-площині

Показники якості роботи системи отримаємо, побудувавши перехідний процес цифрової системи керування у пакеті MATLAB (рис. 5.3). З кривої перехідного процесу отримаємо: час регулювання дорівнює 6000 с, відсутні помилки регулювання та перерегулювання.

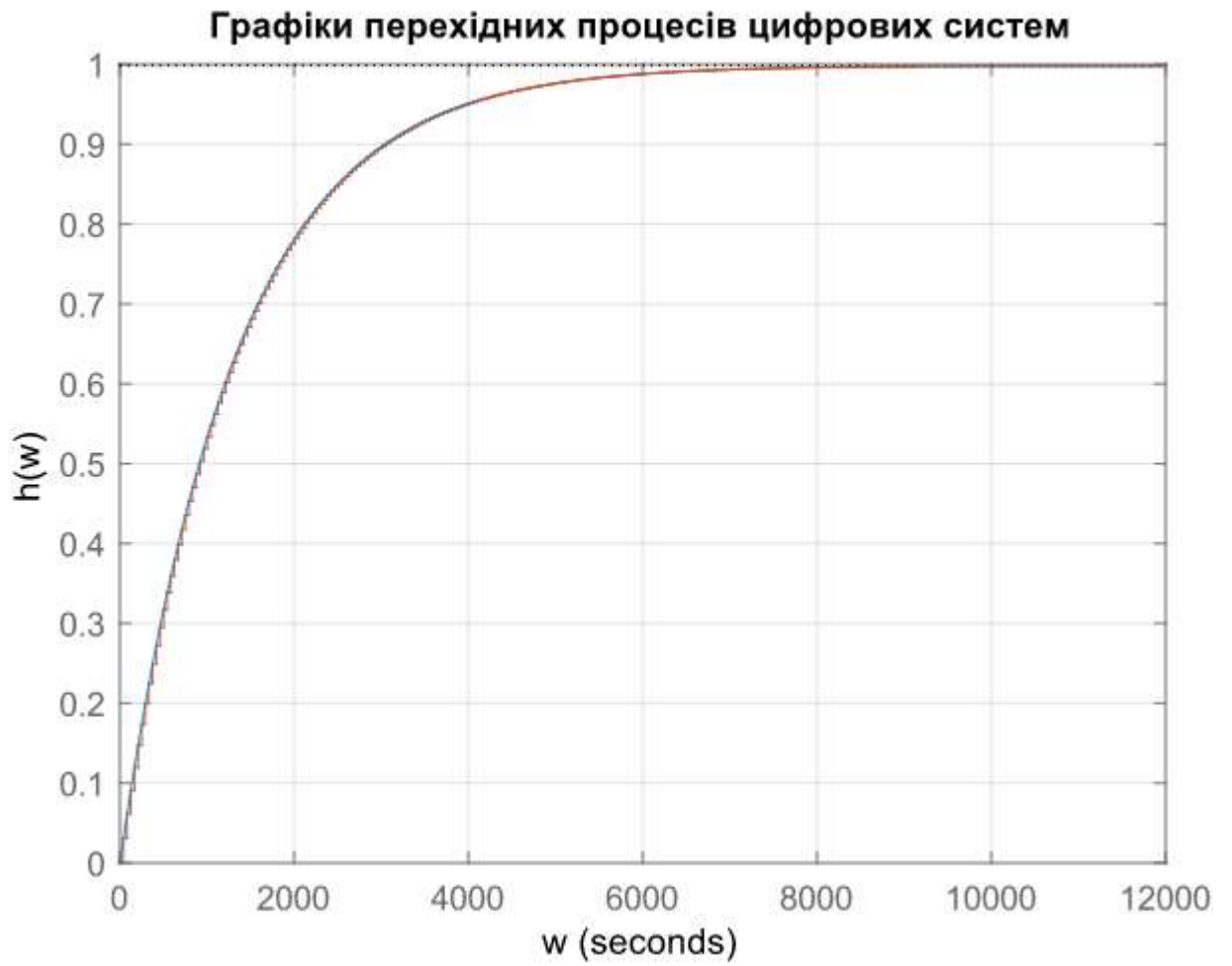


Рис. 5.3. Перехідний процес САК температурним режимом
активного вентилявання зерна

РОЗДІЛ 6

СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

6.1 Розробка схеми електричної принципової системи автоматичного керування диференційованими режимами активного вентилявання зерна в бункері БВ-40

Схема електрична принципова системи автоматичного керування диференційованими режимами активного вентилявання зерна в бункері БВ-40 зображена на рис. 6.1, 6.2.

Схема побудована з використанням обладнання фірми Шнайдер Електрик, програмованого логічного контролера Modicon M238 TM238LFDC24DT (D1.1) та частотного перетворювача ATV312HD11N4 (U1). Також використовується регулятор потужності DRU3-25 (U2). Технологічний процес керування температурою в зерноскладі відбувається за наступним алгоритмом: завантаження зерна в бункер; активне вентилявання зерна з використанням нагрівних елементів (за потреби); охолодження зерна; вивантаження зерна із бункера. Всі процеси даного алгоритму роботи САК реалізуються з використанням програмного забезпечення програмованого логічного контролера. Вмиканням автоматичних вимикачів QF1-5 подається живлення на ПЛК, регулятор напруги та частотний перетворювач. ПЛК після подачі живлення переходить в стан RUN, тобто програма виконується та очікує введення керуючих дій. Натисканням кнопки SB3.1 починається виконання програми завантаження зерна. Опитуванням датчиків верхнього (D1.2) та нижнього (D1.3) рівня зерна в бункері програма отримує інформацію про наявність зерна в бункері, при його відсутності вмикається асинхронний двигун (M2) транспортера завантажувача через проміжне реле (KL2) та магнітний пускач (KM2).

Програма очікує спрацювання датчика верхнього рівня (D1.2) після чого вимикається вмикається асинхронний двигун (M2) транспортера завантажувача. Процес охолодження (досушування) зерна контролюється датчиками температури (D1.5-7) які розташовані в бункері зонально. Відповідно до температури зерна вмикається частотний перетворювач (U1) приводу вентиляційної установки M1. Частота обертання цього електродвигуна змінюється у відповідності до температури зерна за ПДД законом регулювання. Сушіння зерна проводиться по трьом зонам які регулюються програмно (починаючи з нижньої) за допомогою сервоприводу M4 та отримуючи температуру зерна в кожній зоні за допомогою датчиків температури зерна (D1.5-7). За необхідністю (холодне вологе повітря) використовується система підігріву повітря за допомогою нагрівальних елементів EK1-3 потужність яких регулюється за допомогою регулятора потужності (U2) який за допомогою інтерфейсу MODBU-RTU отримує керуючий сигнал. Після закінчення процесу охолодження останньої зони зерно автоматично вивантажується за допомогою транспортеру обладнаного електродвигуном M3. Після спрацювання датчика нижнього рівня (D1.3) відвантаження припиняється та програма переходить в стан очікування команди на завантаження. Виконання програми на кожному етапі виконання можна припинити натисканням на кнопку SB3.2 або провести аварійну зупинку всього обладнання натисканням на кнопку SB1. Перемикач SA1 дозволяє вимкнути ПДД регулятор та інтенсивність вентиляції змінювати за допомогою змінного резистора R5. Лампи HL6-8 сигналізують стадії процесу: завантаження, охолодження та вивантаження відповідно.

Зазначеному опису роботи принципової схеми відповідає наступна блок-схема алгоритму роботи САК (рис. 6.3).

6.2. Вибір апаратури захисту та керування

За електричною принциповою схемою САК диференційованими режимами активного вентилявання зерна в бункері БВ-40, для керування та захисту використовується наступне обладнання:

- для пуску, зупинки та захисту перетворювача частоти **U1** та електродвигуна **M1** від струмів короткого замикання використовується автоматичний вимикач **QF1** та електромагнітний пускач **KM1**;
- для пуску, зупинки та захисту електродвигунів приводу завантажувального та вивантажувального транспортерів **M2** та **M3** від струмів короткого замикання та перевантажень використовуються автоматичні вимикачі **QF2** та **QF3** із комбінованими (електромагнітним та тепловим) розчіплювачами та електромагнітні пускачі **KM2** та **KM3**;
- для подачі живлення і захисту від струмів короткого замикання регулятора потужності **U2** та електронагрівачів **EK1-EK3** використовується автоматичний вимикач **QF4**;
- для захисту кола керування від струмів короткого замикання використовується автоматичний вимикач **QF5**;
- у колі керування встановлені кнопкові пости керування **SB1-SB3**, проміжні реле **KL1-KL3**, лампи світлової сигналізації.

Вибір автоматичних вимикачів. Вибираючи автоматичний вимикач для захисту електродвигуна, слід дотримуватися таких умов:

- номінальна напруга автоматичного вимикача має дорівнювати напрузі електричної мережі або перевищувати її:

$$U_{ав} \geq U_{м}; \quad (6.1)$$

- номінальний струм автоматичного вимикача має дорівнювати номінальному струму електродвигуна або трохи перевищувати його:

$$I_{ном.ав} \geq I_{ном.ел.дв}; \quad (6.2)$$

- номінальний струм теплового й електромагнітного розчіплювачів має дорівнювати номінальному струму електродвигуна або трохи перевищувати його з подальшим регулюванням струму неспрацювання теплового розчіплювача на номінальний струм електродвигуна:

$$I_{ном.розч.} \geq I_{ном.ел.дв} ; \quad (6.3)$$

- струм відсічки електромагнітного розчіплювача має становити не менш як 1,5...1,6 від пускового струму електродвигуна:

$$I_{від.розч.} \geq (1,5...1,6) I_{пус.} ; \quad (6.4)$$

При виборі автоматичного вимикача для захисту ПЛК та кола керування, необхідно дотримуватись наступних умов:

- номінальна напруга автоматичного вимикача має дорівнювати напрузі живлення електричної мережі або перевищувати її

$$U_{н.ав} \geq U_{ж} ; \quad (6.5)$$

- номінальний струм автоматичного вимикача повинен дорівнювати або перевищувати робочий струм ПЛК та кола керування

$$I_{н.ав} > I_{к.кер} , \quad (6.6)$$

- номінальний струм електромагнітного розчіплювача повинен дорівнювати або перевищувати номінальний струм ПЛК та кола керування

$$I_{н.розч} > I_{к.кер} ; \quad (6.7)$$

- струм відсічки електромагнітного розчіплювача має становити не менше 1,5...1,6 робочого струму ПЛК та кола керування

$$I_{відс.розч} > (1,5...1,6) \cdot I_{к.кер} . \quad (6.8)$$

Вибір електромагнітних пускачів. Електромагнітні пускачі вибирають за наступними умовами:

- номінальна напруга електромагнітного пускача має дорівнювати напрузі живлення електричної мережі або перевищувати її

$$U_{н.еп} \geq U_{ж} ; \quad (6.9)$$

- номінальний струм комутації силових контактів електромагнітного пускача повинен дорівнювати або перевищувати номінальний струм груп електродвигунів

$$I_{H.ЕП} \geq I_H ; \quad (6.10)$$

- номінальна напруга живлення втягувальної котушки електромагнітного пускача повинна дорівнювати напрузі кола керування

$$U_{H.КОТ} \geq U_{КЕР} . \quad (6.11)$$

- за струмом теплового реле та за струмом неспрацювання теплового реле (при відповідній комплектації).

Крім того, слід враховувати необхідність наявності допоміжних контактів магнітного пускача в колі керування.

Вибір проміжних реле. Проміжні реле для кола управління вибирають

- за напругою кола керування:

$$U_{H.РЕЛЕ} \geq U_{К.УПР} ; \quad (6.12)$$

- максимальною комутаційною здатністю допоміжних контактів (струм кола управління повинен дорівнювати або бути меншим за номінальний струм реле):

$$I_{H.РЕЛЕ} \geq I_{К.УПР} ; \quad (6.13)$$

- за кількістю та призначенням допоміжних контактів (нормально розімкнені, нормально замкнені, перемикаючі).

За вказаними умовами та згідно з технічними характеристиками обладнання системи автоматичного керування вибране наступне обладнання (таблиця 6.1).

6.3. Вибір проводів та кабелів

Переріз струмопровідної жили проводу, шнура або кабелю вибирають, виходячи з умов гранично допустимого його нагрівання та достатньої механічної міцності. Під час визначення кількості проводів, які прокладають в одній трубі (або жил багатожильного провідника), нульовий провід

чотирипровідної системи трифазного струму (або заземлюючу жилу) не враховують.

Площу поперечного перерізу жил проводів, шнурів і кабелів вибирають за тривало допустимим струмом

$$I_{\text{тр.доп}} \geq I_{\text{розр}}, \quad (6.14)$$

де $I_{\text{розр}}$ - розрахунковий струм ділянки електричної мережі, А.

Для відгалужень до окремих електроспоживачів за максимальні тривалі робочі струми беруть їх номінальні струми.

Для трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором тривало допустимий струм визначається за формулою

$$I_{\text{розр.дв}} = \frac{10^3 P_{\text{н.дв}}}{\sqrt{3} U_{\text{н}} \eta_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}}}. \quad (6.15)$$

Тривало допустимий струм електродвигуна приводу відцентрового вентилятора (табл. 4.5)

$$I_{\text{розр.дв}} = \frac{1000 \cdot 11}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,885 \cdot 0,85} = 22,24 \text{ А.}$$

Тривало допустимий струм електродвигунів приводу завантажувальної та вивантажувальної норій

$$I_{\text{розр.дв}} = \frac{1000 \cdot 2}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,87 \cdot 0,85} = 4,12 \text{ А.}$$

Враховуючи умову (6.15) та відповідні розраховані значення тривало допустимих струмів, для підключення частотного перетворювача із електродвигуном приводу відцентрового вентилятора вибираємо кабель АВВГ 3х4 (ГОСТ 16442-70) – провід з алюмінієвими жилами, полівінілхлоридною ізоляцією, перерізом струмопровідних жил 4 мм², тривало допустимий струм якого дорівнює 27 А для трьохжильного кабелю [33]. Кабель прокладається в трубі.

Для підключення електродвигунів приводу завантажувальної та вивантажувальної норій вибираємо кабель АВВГ 3х2,5 (ГОСТ 16442-70) – провід з алюмінієвими жилами, полівінілхлоридною ізоляцією, перерізом

струмопровідних жил $2,5 \text{ мм}^2$, тривало допустимий струм якого дорівнює 19 А [33]. Кабель прокладається в трубі.

Вибір проводів живлення кола керування. Оскільки електрообладнання кола керування є малопотужним, струм кола керування не перевищує 5А, для живлення кола керування вибираємо провід ПВ1х0,5 (ГОСТ 6323-79) – провід з мідною жилою перерізом $0,5 \text{ мм}^2$ в полівінілхлоридній оболонці, тривало допустимий струм якого дорівнює 11 А [33].

6.4. Вибір щита керування

Щити і пульти на стадії проектування вибирають на підставі таких нормативних документів: ГОСТ 20504-81 "Система унифицированных типовых конструкций агрегатных комплексов ГСП. Типы и основные размеры", ДСТУ 3288-95 (ГОСТ 26032-96) "Система уніфікованих типових конструкцій агрегатних комплексів. Загальні технічні умови "ОСТ 36.13-76 "Щиты и пульти систем автоматизации технологических процессов". На додаток до ОСТ 36.13-76 розроблені інструкції РМ4-107-82.

Згідно з вище вказаними нормативними документами щити і пульти розраховано, на розміщення їх у закритих приміщеннях із температурою навколишнього середовища від -30 до $+50^\circ\text{C}$ за відносної вологості не більше як 80%. Промисловість випускає також щити та пульти спеціального призначення, які розраховані на більш високі або низькі температури, підвищену вологість, наявність агресивного середовища тощо. Щити та пульти умовно позначають згідно з вимогами ОСТ 36.13-76.

Шафові щити використовують:

- у виробничих приміщеннях, що характеризуються запиленістю, великою вологістю та можливістю механічного пошкодження апаратури й внутрішньощитових проводів;

- для розміщення допоміжної апаратури (реле, джерел живлення) всередині щита;
- для захисту обслуговуючого персоналу від дотиків до відкритих струмоведучих частин апаратури та затискачів.

Враховуючи габаритні розміри пристроїв системи керування, вибираємо щит шафований малогабаритний типу ЩШМ (800x400x350)V4IP30 (ОСТ 36.13-76) [25].

6.5. Розрахунок надійності системи автоматичного керування

Для розрахунку надійності розробленої САК занесемо в таблицю всі елементи схеми електричної принципової з зазначенням інтенсивності їх відмови (табл. 6.2).

Результуюча інтенсивність відмови всіх елементів буде становити:
 $\lambda_p = 31.348 \cdot 10^{-6}$, год⁻¹.

Приймаємо, що термін експлуатації системи становитиме $t = 1 \cdot 10^3$ год., тобто результуючу ймовірність безвідмовної роботи системи визначимо за виразом:

$$p_{pez}(1000) = e^{-31.348 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3} = 0.97.$$

Таблиця 6.2.

Розрахункові параметри САК температурою в зерносховищі

№	Найменування	Кількість	Інтенсивність	Рез. інтенсивність
1	Електромеханічне реле	6	0.5	3
2	Контакти	3	0.25	0.75
3	Автоматичні вимикачі	4	0.13	0.52
4	Лампи	8	0.625	5
5	Трансформатори	2	0.17	0.34
6	Електродвигуни	4	5.24	20.96
7	Інтегральні мікросхеми	4	0.1	0.4
8	Кнопка	6	0.063	0.378
				31.348

РОЗДІЛ 7

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Автоматизація технологічних процесів має забезпечувати збільшення виробництва продукції, підвищення продуктивності праці (зменшення витрат праці), зменшення енергоємності та собівартості продукції, терміну окупності капітальних витрат.

Узагальнюючим показником ефективності капітальних вкладень в розвиток автоматизації є зведені розрахункові витрати, які враховують річні експлуатаційні витрати і частку капіталовкладень, що припадає на один рік.

Зведені витрати визначають за виразом:

$$B_{зв} = C + E_H \cdot K, \quad (7.1)$$

де: $B_{зв}$ – зведені витрати, грн./рік;

C – річні експлуатаційні витрати, грн./рік;

K – капітальні витрати, грн.;

E_H – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, приймають $E_H = 0,15$.

До складу експлуатаційних витрат входять:

- витрати на оплату праці персоналу (C_3);
- утримання основних засобів виробництва (C_v);
- оплата електроенергії (C_E);
- інші прямі витрати (C_I).

Витрати на оплату праці персоналу з експлуатації систем автоматизації визначають виходячи з витрат праці і годинних ставок з урахуванням різних додаткових нарахувань та доплат ($C_3 = 30$ грн./год. з 01.09.2020 р.).

Витрати на утримання основних засобів виробництва C_v складаються з відрахувань на амортизацію C_A (визначають у відсотках від балансової вартості обладнання приладів і засобів автоматизації, приймають $C_A = 14,2\%$) та

відрахувань на поточний ремонт $C_{\text{ПР}}$ (також визначають у відсотках від балансової вартості обладнання приладів і засобів автоматизації, приймають $C_{\text{ПР}} = 18\%$).

Витрати на електроенергію визначаються за споживаною потужністю приладів і тарифами на електроенергію для виробничих цілей (приймається у розмірі 2,40 грн./кВт·год. за цінами 2020 року):

$$C_E = P_{\text{СП}} \cdot \Gamma \cdot 2,40, \quad (7.2)$$

де $P_{\text{СП}}$ – потужність споживачів електроенергії;

Γ – кількість годин роботи споживачів на рік.

Інші прямі витрати приймають рівними 1% від загальної суми експлуатаційних витрат:

$$C_I = 0,01 \cdot (C_3 + C_A + C_{\text{ПР}} + C_E). \quad (7.3)$$

При визначенні капітальних вкладень необхідно враховувати:

- вартість технічних засобів автоматизації (K_3);
- торгівельно-транспортні та складські витрати ($K_{\text{ТТ}}$);
- витрати на монтаж технічних засобів (K_M);
- витрати на електропроводки ($K_{\text{ПР}}$);
- інші капітальні витрати, пов'язані зі здійсненням автоматизації (K_I).

Торгівельно-транспортні та складські витрати зазвичай приймаються рівними 11% від вартості технічних засобів:

$$K_{\text{ТТ}} = 0,11 \cdot K_3. \quad (7.4)$$

При визначенні витрат на монтажні роботи приблизно вважають, що вони складають 15...20% від вартості технічних засобів. Для розрахунку приймемо значення 17%:

$$K_M = 0,17 \cdot K_3. \quad (7.5)$$

Витрати на електропроводки складаються з вартості кабелів (проводів) та вартості їх прокладання.

Інші капітальні витрати, пов'язані зі здійсненням автоматизації, приймаються у розмірі 2% від вартості технічних засобів автоматизації:

$$K_I = 0,02 \cdot K_3. \quad (7.6)$$

Загальна вартість технічних засобів автоматизації складає

$$K_3 = K_{ТЗА} + K_{П}, \quad (7.7)$$

$K_{ТЗА}$ – вартість технічних засобів автоматики у складі САК, грн.;

$K_{П}$ – вартість плат та провідників, грн.

Вартість технічних засобів автоматизації визначається з кошторису системи керування (таблиця 7.1).

Таблиця 7.1.

Загальна вартість технічних засобів автоматизації
САК температурою в зерносховищі

№	Назва обладнання	Тип	Кількість	Ціна/шт	Ціна
1	Вимикач автоматичний	iK06N	1	130	130
2	Вимикач автоматичний	iK60N	1	109.74	109.74
3	Вимикач автоматичний	GV2ME14	2	693.7	1387.4
4	Вимикач автоматичний	iK60N	1	95	95
5	Частотний перетворювач	ATV312HD11N4	1	32151	32151
6	Регулятор потужності	DRU3-10	1	5 886	5886
7	Програмований логічний контролер	Modicon M238	1	7 954	7954
8	Датчик рівня зерна	ДПУ-10	2	6 240	12480
9	Модуль розширення	TM2AMM6HT	1	5 908	5908
10	Датчик температури	TCM	3	180	540
11	Пускач електромагнітний	LC1D40AM7	1	3659	3659
12	Пускач електромагнітний	LC1D12P7	2	892	1784
13	Блок живлення постійного струму	HDR-30-24	1	325.92	325.92
14	Проміжні реле	MY4-NS 24V DC	3	90	270
15	Кнопка "Старт-Стоп"	AW833743	2	180.28	360.56
16	Кнопка з фіксацією "Стоп" червона	XB2-BS542	1	57	57
17	Перемикач на три положення	K1I023NLH	1	1037	1037
18	Лампа сигнальна червона	A22-RLF-RT 220 В	5	26	130
19	Лампа сигнальна зелена	AD22-22DS 24 В	3	34	102
20	Резистор	2K - 0,25W ±1%	4	0.5	2
21	Резистор змінний 2 кОм	2K - 0,25W ±1%	1	12.00	12
22	Клемна збірка		2	90	180
23	Щит керування		1	2 896.00	2896
	Всього				77456.62

Зведені витрати становитимуть

$$B_{ЗВ} = C + E_H \cdot K \quad (7.8)$$

Чистий прибуток, років, можна визначити за виразом

$$Ч = \Delta C_3 + \Delta C_E, \quad (7.9)$$

де ΔC_3 – прибуток за рахунок економії заробітної плати, грн.;

ΔC_E – прибуток за рахунок економії електричної енергії, грн.

Термін окупності установки складатиме

$$T_{\text{ОКУП}} = K / Ч \quad (7.10)$$

Коефіцієнт ефективності капітальних вкладень

$$E = 1 / T_{\text{ОКУП}} \quad (7.11)$$

Для розрахунків використаємо наведену вище методику, формули заносимо у табличний редактор EXCEL (таблиця 7.1, 7.2).

Таблиця 7.2.

Розрахункова таблиця для знаходження терміну окупності від впровадження САК температурою в зерноскховищі

	Розрахункові значення	Од.	Відповідний коефіцієнт	Значення
1	Загальна вартість технічних засобів автоматизації			77456.62
2	Торгівельно-транспортні витрати		0.11	8520.228
3	Витрати на монтаж технічних засобів		0.17	13167.63
4	Витрати на прокладення проводок	150	17.67	2650.5
5	Інші капітальні витрати 2%		0.02	1549.132
6	Капітальні витрати			103344.1
7	Відрахування на амортизацію		0.15	15501.62
8	Витрати на поточний ремонт		0.18	18601.94
9	Витрати на енергоресурси		1.3	2733.12
	потужність автоматизації	1.46		
	кількість годин роботи	1440		
10	Витрати на оплату праці персоналу			86400
	кількість персоналу	2		
	ставка оператора	30		
11	Річні експлуатаційні витрати			123236.7
12	Зведені витрати		0.15	138738.3
13	Чистий прибуток			85233.6
	прибуток за рахунок зменшення персоналу			84153.6
	прибуток за рахунок зменшення браку			1080
	економія за рахунок підвищення якості	0.01%		
14	Термін окупності САК			1.212481

Аналізуючи отримані дані (таблиця 7.2), бачимо, що прибуток складає 85233,6 грн., а через 1.2 роки САК температурою в зерноховищі повністю окупається і вже працюватиме на чистий прибуток. Тому робимо висновок, що установка економічно ефективна і використовувати її доцільно.

ВИСНОВКИ

При виконанні магістерської роботи досліджена залежність енергозатрат від режимів роботи і параметрів електротепловентиляційних установок для активного вентилявання зерна у складі зерносховища.

В результаті дослідження отримані наступні результати.

1. Встановлено, що енергетичну недосконалість високотемпературних зерносушарок можна подолати використанням двостадійного сушіння із застосуванням на другій стадії електротепловентиляційних установок із диференційованими режимами роботи.

2. Отримана математична модель процесів сушіння зерна в нерухомому шарі, за якою досліджена зміна температури та вологовмісту зерна за часом і координатою (висотою, шириною шару зерна) при різних режимах сушіння і охолодження в залежності від початкової вологості і температури, а також виявлено і кількісно оцінено суттєвість впливу на енергоспоживання таких факторів, як засміченість, початкова вологість фракцій домішок. Встановлено, що при зниженні засміченості з 7% до 2% енерговитрати знижуються на 5-6%.

3. Теоретично обґрунтовано ефективність застосування диференційованих режимів роботи електротепловентиляційного обладнання шляхом поступового зниження витрат повітря пропорційно кількості залишкової вологи в зерні з одночасним підвищенням температури повітря (за рахунок "вивільненої" потужності приводу вентилятора). При цьому питомі витрати енергії зменшуються з 28,7 кВт·год/т при традиційному режимі сушіння зерна в бункерах активного вентилявання до 20,7 кВт·год/т при диференційованому, тобто енерговитрати зменшуються на 30%.

Розроблено регламент роботи теплового та вентиляційного обладнання для реалізації диференційованого режиму активного вентилявання.

4. Для реалізації системи автоматичного керування активним вентиляванням зерна за розробленим регламентом розроблена функціональна схема автоматизації, обґрунтовано вибір сучасних технічних засобів автоматики з використанням частотного перетворювача Altivar ATV312HD11N4 (Schneider Electric), програмно-логічного контролера MODICON TM238LFDC24DT (Schneider Electric), регулятора потужності DRU3-25 MEYERTEC, розроблені електричні принципові схеми та необхідне програмне забезпечення.

5. Економічні розрахунки обґрунтували доцільність впровадження розробленої системи керування активним вентиляванням, строк окупності складає 1.2 роки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Анишкин В.И. Консервация влажного зерна. - М.: Колос, 1968.-286с.
- 2 Анишкин В.И., Рыбарук В.А. Теория и технология сушки и временной консервации зерна активным вентилированием. - М.: ВИМ, 1972. - 200с.
- 3 Боноев П.А. Обоснование поточной технологии адсорбционно-контактной сушки зерна. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 1990.-17с.
- 4 Бородин И.Ф., Недилько Н.М. Автоматизация технологических процессов. - М.: Агропромиздат, 1996.
- 5 Боуманск Г. Эффективная обработка и хранение зерна//Пер. с англ. В.И. Даневского. -М.:Агропромиздат, 1991.- 608с.
- 6 Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. -М.: Пищевая промышленность, 1973. - 527с.
- 7 Гірник М. А Механізація і автоматизація післязбиральної обробки зерна. -К.: Урожай, 1970. - 190с.
- 8 Гуляев Г.А. Автоматизация процессов послеуборочной обработки и хранения зерна. - М.: Агропромиздат, 1990. - 240с.
- 9 Донин Б.С., Фишман.А.И., Гальперин Д.М., Медзенковский В.Б. Автоматическое управление процессами сушки зерна.- М.: НИИИМ «НИИМаш»,1964.-80с.
- 10 Драганов Б.Х. Использование возобновляемых и вторичных энергоресурсов в сельском хозяйстве. – Киев: Вища школа, 1988. –56с.
- 11 Есаков В.Г. Двухступенчатая энергосберегающая сушка зерна на предприятиях агропромышленного комплекса. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1986.-17с.
- 12 Есаков Ю.В., Мильман И.Э., Шевцов В.В. и др. К описанию динамики процесса сушки зерна в плотном слое при жестких режимах//Тр. ВИМ. - 1974.- Т.65.- 4.1.-С.37-40.
- 13 Згоруйко В.А., Кривошеев Ю.И., Слынько А.Г. Определение влагосодержания гигроскопических грузов для их сохранной перевозки. - М.: Транспорт,1988. - 496с.
- 14 Калініченко Р.А. Енергозберігаючі режими сушіння і активного вентилування зерна при зберіганні в умовах господарств. Автореф. дис. ... канд. техн. наук.- Київ-2005 р.
- 15 Кей. Р. Введение в технологию промышленной сушки. – Минск: Наука и техника, 1983 - 262с.
- 16 Кирпа Н.Я. Развитие и перспективы обработки и хранения зерна в Украине// Хранение и переработка зерна.- 2000. -№12. - С.25-26.

- 17 Кирпа Н.Я. Развитие оборудования и технологий для первичной обработки, сушки и хранения зерна в хозяйствах АПК. //Хранение и переработка зерна. - 2000.- №10 - С.25-26.
- 18 Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. Энергозбереження в агропромисловому комплексі. - Тернопіль: Підручники & посібники, 2001. – 977с.
- 19 Котов Б.И. К определению динамики сушки трав в плотном слое//Механизация и электрификация сельского хозяйства К.: 1985. - Вып.61. -С. 58-61.
- 20 Красников В.В. Кондуктивная сушка. -М.: Энергия, 1973. -288с.
- 21 Краусп Р.В. Автоматизация послеуборочной обработки зерна. - М.: Машиностроение, 1975. - 227с.
- 22 Лыков А.В. Теория сушки. - М.: Энергия, 1968. - 471с.
- 23 Малин Н.И. Снижение затрат на сушку зерна. - М.: ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, 1991. - 45 с.
- 24 Мартыненко И.И, Головинкий Б.Л, Проценко Р.Д, Резниченко Т.Ф. Автоматика и автоматизация производственных процессов.М.:1985.-336с.
- 25 Мартыненко И.И. Лысенко В.Ф. Проектирование систем автоматики. 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Агропромиздат, 1990 г. - 243 с.
- 26 Мельник Б.Е. Активное вентилирование зерна. Справочник. - М.: Агропромиздат, 1986. - 159с.
- 27 Остапчук Н.В., Шашкин А.Б., Каминский В.Д. Повышение Эффективности сушки зерна. - К.: Урожай, 1988. - 132 с.
- 28 Попов Н.Я. Повышение эффективности работы зерносушилок с повторным использованием агента сушки. - М.: ЦНИИТЭТ Хлебопродуктов, 1980. - 34с.
- 29 Станкевич Г.М., Страхова Т.В., Атаназевич В.И. Сушка зерна. - К.: Либидь, 1997. - 351с.
- 30 Каталог електродвигунів серії АІР [Електронний ресурс]
Режим доступу: https://air.com.ua/katalog_elektrovdigatelei_air/
- 31 Датчик рівня сипких продуктів [Електронний ресурс]
Режим доступу:
https://temix.com.ua/product/vibracionnyj_datchik_signalizator_predelnogo_urovnja_sypuchih_materialov_dpu-10
- 32 Трифазні регулятори потужності DRU3 MEYERTEC [Електронний ресурс]. Режим доступу:
https://owen.ru/product/meyertec_dru3
- 33 Электротехнический справочник. / Алиев И. И., - М.: ИП РадиоСофт, 2006. – 384 с.