

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет (ННІ) Енергетики, автоматики і енергозбереження

УДК

ПОГОДЖЕНО

**Директор ННІ енергетики,
автоматики і енергозбереження**

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

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

_____ **В.В. Каплун**
(підпис)

_____ **О.О. Опришко**
(підпис)

«___» _____ 2025 р.

«___» _____ 2025 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

02.06.-№1667 “С”.2024.09.26.008ПЗ

На тему: «Дослідження і вдосконалення комп'ютерно-інтегрованої системи керування сушінням зерна в шахтній сушарці на базі КТЗ Arduino»

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

Освітньо-наукова програма: автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Гарант освітньої програми

Доктор технічних наук, доцент _____ **Іващук В'ячеслав Віталійович**
(підпис)

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи

Кандидат технічних наук, доцент. _____ **Цигульов Іван Тихонович**
(підпис)

Виконав

_____ **Михеєв Кирил Валерійович**
(підпис)

КИЇВ 2025

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

Факультет (ННІ) Енергетики, автоматики і енергозбереження

ЗАТВЕРДЖУЮ

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

кандидат технічних наук, доцент _____ О.О. Опришко
(підпис)

« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

Михеєву Кирилу Валерійовичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

Спеціальність: 174 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Освітньо-наукова програма: автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка.

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: **«ДОСЛІДЖЕННЯ І ВДОСКОНАЛЕННЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ СУШІННЯМ ЗЕРНА В ШАХТНІЙ СУШАРЦІ НА БАЗІ КТЗ ARDUINO»**,

затверджена наказом ректора НУБіП України від "02" червня 2024 р. № 1667 «С».

Термін подання студентом магістерської роботи: 15.05.2025 року

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

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

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

Дата видачі завдання « _____ » _____ 2025 р.

Керівник магістерської роботи _____ Цигульов І.Т.
(Підпис) (Прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____ Михеєв К.В.
(Підпис) (Прізвище та ініціали)

Анотація

У цьому дипломному проекті здійснено огляд виробничих процесів зерносушарки, проаналізовано чинні системи та рівень їхньої автоматизації. Розроблено систему автоматичного регулювання температури повітря. Наведено загальний опис технологічного процесу сушіння зерна, а також виконано розрахунки та проведено вибір відповідного технологічного обладнання й засобів автоматизації. Раціональність запропонованих рішень підтверджується розрахунками, а економічна доцільність впровадження цієї системи детально обґрунтована.

Annotation

This diploma project reviews the production processes of a grain dryer, analyzes the current systems and their level of automation. A system for automatic air temperature control is developed. A general description of the technological process of grain drying is given, and calculations are performed and the appropriate technological equipment and automation tools are selected. The rationality of the proposed solutions is confirmed by calculations, and the economic feasibility of implementing this system is substantiated in detail.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
РОЗДІЛ 1. КЛАСИФІКАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЗБЕРІГАННЯ ТА СУШІННЯ ЗЕРНА В АГРОКОМПЛЕКСІ.....	10
1.1. Основи управління процесами зберігання зерна.....	10
1.2. Методи та технологічні рішення для сушіння зерна.....	13
1.3. Принцип роботи шахтної зерносушарки.....	15
1.4. Розробка функціональної схеми автоматизації.....	19
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	22
2.1. Розробка математичної моделі за результатами теоретичних досліджень.....	22
2.2. Розробка і дослідження імітаційної моделі об'єкта автоматизації у середовищі MATLAB.....	24
2.3. Вибір алгоритму керування об'єктом.....	27
РОЗДІЛ 3. ВИБІР РЕГУЛЯТОРА ТА ПОЯСНЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО НАЛАШТУВАНЬ.....	30
3.1. Реалізація алгоритму керування.....	30
3.2. Вибір контролера керування.....	30
3.3. Вибір первинного перетворювача САК.....	34
3.4. Вибір виконавчого механізму САК.....	38
3.5. Вибір частотного перетворювача.....	42
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ.....	44
4.1. Аналіз динамічних характеристик і визначення передатної функції об'єкта.....	44
4.2. Вибір алгоритму управління та технічних засобів для його реалізації.....	49
4.3. Аналіз роботи системи автоматичного регулювання та визначення показників якості управління.....	52
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА SCADA-СИСТЕМИ.....	55
РОЗДІЛ 6. ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА.....	61
6.1. Вибір пуско-захисної апаратури.....	61
6.1.1. Обрання кабелів та проводів.....	67
6.2. Розробка принципової схеми.....	67
6.3. Розробка схеми з'єднань.....	68
6.4. Розробка схеми підключень.....	69
6.5. Розробка загального виду щита керування.....	69

6.6. Розробка алгоритму роботи системи.....	70
РОЗДІЛ 7. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ.....	71
РОЗДІЛ 8. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ.....	76
ВИСНОВКИ.....	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	81

ВСТУП

Актуальність теми цього дослідження визначається нагальною необхідністю вдосконалення технологій сушіння зерна в агропромисловому секторі. Сушіння зернових культур є важливим етапом у технологічному циклі їх обробки, оскільки саме цей процес має вирішальний вплив на збереження якості продукції та її довговічність. Нині переважно застосовувані методи сушіння характеризуються високими енерговитратами, що породжує значні фінансові та ресурсні втрати. Водночас вони не завжди гарантують потрібні умови для збереження поживної цінності зернових культур і забезпечення їх тривалого зберігання. З огляду на актуальні виклики, що виникають через необхідність енергозбереження та підвищення ефективності виробничих процесів, використання комп'ютерно-інтегрованих систем керування з опорою на сучасні платформи, такі як Arduino, стає перспективним напрямом досліджень. Ця відкрита платформа сприяє створенню економічно обґрунтованих, адаптивних і технічно гнучких рішень для автоматизації виробничих процесів, що є особливо важливим для малих і середніх сільськогосподарських підприємств, де модернізація інфраструктури часто обмежена наявними ресурсами.

Об'єктом дослідження виступає шахтна сушарка для зерна — устаткування, широко використовуване на агропідприємствах для зниження вологості зернових культур до рівнів, оптимальних для тривалого зберігання. Шахтні сушарки характеризуються ефективністю, простотою конструктивного виконання та відносно низькими витратами на експлуатацію, що забезпечує їм популярність серед сільськогосподарських виробників. Проте їх загальна продуктивність та стабільність залежить від можливостей точної регуляції таких параметрів, як температура сушильного повітря, рівень вологості в камері та швидкість повітряного потоку. Недостатній рівень автоматизації цих процесів може спричинити як перевитрату енергії, так і суттєві технологічні недоліки, включаючи нерівномірне сушіння або навіть псування продукції.

Предметом дослідження є розробка комп'ютерно-інтегрованої системи керування на основі контролера Arduino, яка покликана забезпечити автоматизацію й оптимізацію процесу сушіння зернових культур у шахтній сушарці. Така система складається з комплексу сенсорів для моніторингу ключових параметрів (температури, вологості, швидкості потоку повітря), виконавчих механізмів для їх коригування (вентилятори, нагрівальні елементи) і програмного забезпечення для аналізу даних та керування процесом у реальному часі. Модульність і адаптивність платформи Arduino дозволяють розробляти економічно вигідні рішення з високою доступністю для практичного впровадження.

Метою дослідження є розробка й удосконалення комп'ютерно-інтегрованої системи керування на основі Arduino з метою підвищення ефективності операцій сушіння зерна у шахтному обладнанні. Для досягнення цієї мети ставляться такі завдання: зниження енергоспоживання шляхом оптимального керування обладнанням, забезпечення стабільних умов сушіння для підвищення якості кінцевої продукції, а також покращення надійності й автономності всього технологічного процесу через запровадження автоматизованих систем контролю. Результатом дослідження має стати інноваційне рішення, яке допоможе агропромисловим підприємствам підвищити продуктивність своєї діяльності та зміцнити конкурентоспроможність продукції на ринку.

Цілі і завдання дослідження: Виконати аналіз існуючих методів і систем керування процесом сушіння зерна в шахтних сушарках, виокремивши їх переваги, недоліки та потенційні напрями вдосконалення. Розробити архітектуру комп'ютерно-інтегрованої системи керування на базі Arduino, включаючи підбір відповідних сенсорів, виконавчих елементів і створення алгоритмів управління. Створити прототип зазначеної системи та здійснити експериментальні дослідження для оцінки її результативності в умовах реальної експлуатації шахтної сушарки. Проаналізувати результати експериментів, визначити вплив

нової системи на енергоефективність і якість процесу сушіння, а також сформулювати рекомендації щодо інтеграції розробки у виробничу практику.

Метод дослідження проводиться з використанням інтегрованого підходу, що передбачає поєднання теоретичного аналізу, моделювання, експериментального тестування та статистичної обробки отриманих даних. Теоретичний аналіз слугує для вивчення сучасних технологій і методик управління процесами сушіння, а також визначення оптимальних параметрів роботи обладнання. Моделювання допомагає відтворювати роботу системи у різноманітних умовах, удосконалюючи алгоритми управління перед їх практичним впровадженням. Експериментальні дослідження дають змогу оцінити функціональність створеного прототипу на реальному обладнанні та визначити його вплив на ефективність сушіння. Водночас статистична обробка даних дозволяє ґрунтовно проаналізувати результати експериментів, підтвердити їх надійність і оцінити значущість отриманих показників.

Отже, метою дослідження є розробка інноваційного способу автоматизації процесу сушіння зерна, спрямованого на підвищення ефективності аграрного виробництва. Використання комп'ютерно-інтегрованих систем на основі Arduino може стати ключовим кроком до цифровізації агропромислового комплексу, сприяючи більш раціональному ресурсоспоживанню, зменшенню витрат і підвищенню якості готової продукції.

РОЗДІЛ 1

КЛАСИФІКАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЗБЕРІГАННЯ ТА СУШІННЯ ЗЕРНА В АГРОКОМПЛЕКСІ

1.1. Основи управління процесами зберігання зерна

Сушіння є ключовою технічною операцією, що забезпечує доведення зерна та насіння до стабільного стану, необхідного для їх тривалого зберігання. Попри те, що під час зберігання зерно залишається живим і продовжує дихати, його життєдіяльність зводиться до мінімуму. У процесі дихання відбуваються хімічні реакції, кінцевим результатом яких є витрати крохмалю. Проведення сушіння та охолодження зерна сприяє мінімальним втратам під час зберігання.

Зменшення вологості зернової маси призводить до зниження інтенсивності її дихання, пригнічення активності мікроорганізмів та шкідників. Це також активізує процес післязбирального дозрівання, забезпечуючи однорідність зерна за рівнем вологості та стиглістю.

Досягнення оптимальної межі вологості після сушіння має критичне значення для успішного зберігання зерна. Для маловологих післязбиральних зерен підтримується низька інтенсивність дихання. Однак за сталих температур чим більший вміст вологи в зерновій масі, тим швидше посилюється енергетика дихання, причому цей процес нерівномірний. Це явище пов'язане з наявністю у зерні вільної води.

При низькому вмісті вологи вода у зерні перебуває у зв'язаному стані й міцно утримується білками та крохмалем. Проте за підвищення рівня вологості вода починає заповнювати клітини зерна, де білки та крохмаль майже не утримують її. Вільна вода легко розподіляється різними частинами зерна і бере участь у гідролізі. Наявність вільної води значно активізує ферменти, що відповідають за процеси дихання.

Вологість зерна вважається критичною, коли у клітинах з'являється вільна волога, що супроводжується різким зростанням інтенсивності процесів дихання. Наприклад, для пивоварного ячменю ця критична межа становить 14,5%, і зерно, що має вологість понад цей показник, підлягає сушінню.

Основними причинами псування зерна є:

1. Висока вологість. Повторне зволоження зерна може виникати через міграцію вологи унаслідок коливань температури в складі, потрапляння води через відкриті люки, зернопроводи або просочування ґрунтових вод у нижні шари зернової маси.
2. Підвищена температура зерна.
3. Наявність сторонніх предметів і дрібних домішок, таких як подрібнене зерно, шматочки ґрунту, насіння бур'янів і незернисті частини рослин (соломка, колоски тощо). Особливо небезпечним є їх накопичення в окремих зонах складу.
4. Нерівномірний розподіл температури в зерносховищі.
5. Недостатнє очищення приміщення перед завантаженням зерна.
6. Низький рівень моніторингу та контролю умов зберігання.

Фактори ризику при зберіганні зерна можна поділити на три основні групи: фізичні, біологічні та хімічні. До фізичних факторів належать вологість і температура зерна, його фізико-механічні властивості та наявність сторонніх домішок. До біологічних відносяться шкідники, пліснява, токсини тощо. Хімічну групу утворюють техногенне забруднення, а також порушення технологій вирощування, переробки та зберігання.

Цвіль і комахи є ключовими причинами псування зерна. Пліснява активно розвивається у вологому та теплому середовищі, а комахам також потрібна підвищена температура. Оптимальна температура для розвитку шкідників — від 15 до 38 градусів Цельсія, проте вони здатні існувати навіть у прохолоднішому зерні. За умови підвищення вологості та температури зберігання понад безпечні рівні суттєво зростає ризик появи плісняви, комах і захворювань. Кукурудза особливо схильна до самозигрівання, що провокує її псування.

Оскільки пліснява й комахи розвиваються у схожих умовах, запліснявіле зерно приваблює шкідників, а зерно з комахами починає пліснявіти. Додатково деякі види комах живляться пліснявою і розносять її спори. Через це невеликі ділянки ураження можуть швидко поширюватися, утворюючи великі зони з

підвищеною температурою, пліснявими кірками та грудками, які характеризуються неприємним запахом.

Вологість зерна, необхідна для запобігання розвитку плісняви та появи комах, визначається кількома факторами. Серед них важливу роль відіграють температура зерна, очікувана тривалість його зберігання, сорт вирощених культур, а також початкова якість зернового матеріалу (табл. 1.1).

Таблиця 1.1.

Оптимальні значення максимальної вологості зерна(%) культур для різних періодів зберігання

Культура	Тривалість зберігання, місяців		
	До 6	Від 6 до 12	Більше 12
Пшениця	14	13	13
Ячмінь	14	12	12
Гречка	16	13	13
Жито	13	12	12
Льон	9	7	7
Соя	13	12	11
Соняшник	10	9	9
Кукурудза	15	14	13

Рівень розвитку плісняви і комах залежить від поєднання температури та вологості зерна (рис. 1.1). Наприклад, зерно з високим рівнем вологи може зберігатися протягом певного періоду за умови зберігання його в прохолодному середовищі.

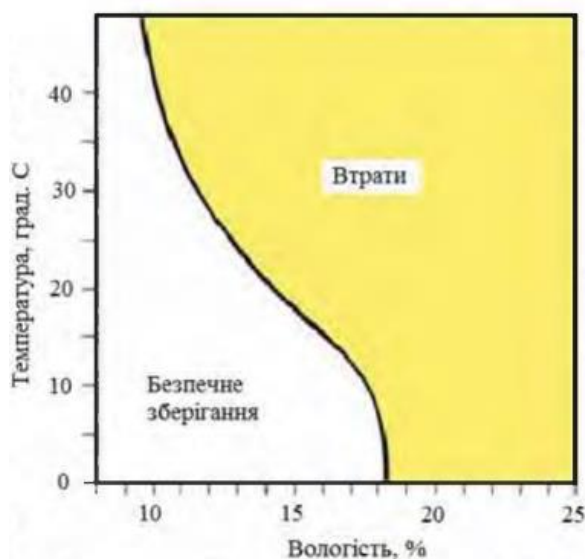


Рис 1.1. Области втрати якості зерна та безпечного зберігання

Підтримання оптимального рівня вологості зерна є критично важливим для забезпечення його безпечного зберігання. При цьому рекомендована максимальна вологість зерна повинна сприйматися як верхня межа, а не як середнє значення загальної маси. У ситуації, коли зерно з підвищеним вмістом вологи контактує із сушеними зразками, спостерігається міграція вологи—це відбувається до моменту, поки різниця у вмісті вологи між окремими зернами не зменшиться до 1–2%. Проте процес передачі вологи між зернами характеризується достатньою тривалістю. У випадках, коли в масі зерна присутні ділянки з підвищеною вологістю, вони, зазвичай, розподіляються пошарово або утворюють локалізовані осередки. Варто зазначити, що навіть за умови дотримання середнього рівня вологості зернової маси нижче безпечного порогу, у локальних зонах з надлишковою вологою існує високий ризик розвитку плісняви.

1.2. Методи та технологічні рішення для сушіння зерна

Волога в структурі зерна тісно інтегрована із сухими речовинами і може бути вилучена шляхом випаровування. Для подолання сил зв'язку вологи із сухими компонентами зерна та забезпечення процесу пароутворення необхідно задіяти чималий обсяг теплової енергії. Цей процес отримав назву термічного сушіння.

Залежно від способу передачі теплової енергії, сушильні установки поділяються на кілька основних типів: конвекційні (теплопередача відбувається через контакт матеріалу із гарячим потоком повітря або іншого осушувача), кондуктивні (матеріал контактує з нагрітою поверхнею), сублімаційні (волога видалається у замороженому стані під вакуумом), випромінювальні (забезпечення сушіння завдяки інфрачервоному випромінюванню) та високочастотні (усунення вологи за допомогою дії електромагнітного поля високої частоти).

Конвекційні сушильні апарати класифікуються на низькотемпературні та високотемпературні установки. Вони також можуть функціонувати у різних режимах: безперервному чи періодичному. Залежно від стану зернового шару, установки поділяються на ті, що працюють із щільним нерухомим шаром, рухомим шаром, киплячим чи зваженим зерновим шаром. Крім того, розрізняють сушарки за принципом нагріву осушувача: із прямим і непрямим нагріванням. У випадку прямого нагрівання використовуються суміші атмосферного повітря та димових газів, тоді як у сушарках непрямого нагрівання осушувачем служить чисте атмосферне повітря, яке підігрівається в системі теплообміну.

За принципом дії сушильні установки поділяються на прямоточні й протиточні (циркуляційні). У прямоточних сушарках зерно проходить через сушильну шахту один раз, і ефективність сушіння залежить від обраного протоколу теплової обробки. Для таких установок необхідне сортування зернових партій за рівнем вологості, допустима різниця якої не повинна перевищувати 2-3 відсотки. Натомість циркуляційні сушарки дозволяють частині висушеного зерна змішуватися із сирою масою та повторно проходити процес термічної обробки, що дає змогу ефективно працювати із сировиною навіть високої початкової вологості, зменшуючи потребу в додаткових вантажно-розвантажувальних роботах і точному дозуванні.

Згідно з конструктивними характеристиками, зерносушарки поділяються на такі типи: шахтні, барабанні, тунельні, модульні, колонні, конвеєрні, карусельні, мобільні тощо.

Особливо популярними у великих господарствах і на елеваторах є стаціонарні сушарки безперервної дії. Це зумовлено їхньою здатністю забезпечувати стабільний регламент виробництва, високою швидкістю висихання й можливістю варіювання режимами роботи завдяки періодичному завантаженню та розвантаженню.

Шахтні зерносушарки володіють низкою переваг: вони здатні обробляти будь-які сипучі культури, забезпечувати рівномірне висихання матеріалів завдяки рециркуляції нагрітого повітря, що дозволяє висушувати зерно з підвищеною початковою вологістю. Вони відзначаються невисокими витратами на обладнання й експлуатацію, оснащені системами теплоізоляції та аспірації. У мінімальній комплектації обладнання дає змогу розпочати сушіння одразу після монтажу.

1.3. Принцип роботи шахтної зерносушарки

Шахтні сушарки посідають провідне місце серед технологічного обладнання для сушіння зерна в аграрному секторі завдяки своїй конструктивній простоті, високій продуктивності та здатності обробляти великі обсяги продукції. Їхня робота базується на принципі безперервного потоку, у якому зерно вертикально пересувається через шахту, а гаряче повітря забезпечує випаровування надлишкової вологи.

Основний алгоритм функціонування шахтної сушарки полягає у подачі зерна у верхню частину шахти, звідки воно під дією сили тяжіння рухається вниз. Паралельно в шахту вводиться гаряче повітря, що спрямовується або вертикально вгору, або перпендикулярно до руху зерна, забезпечуючи конвективний процес випаровування.

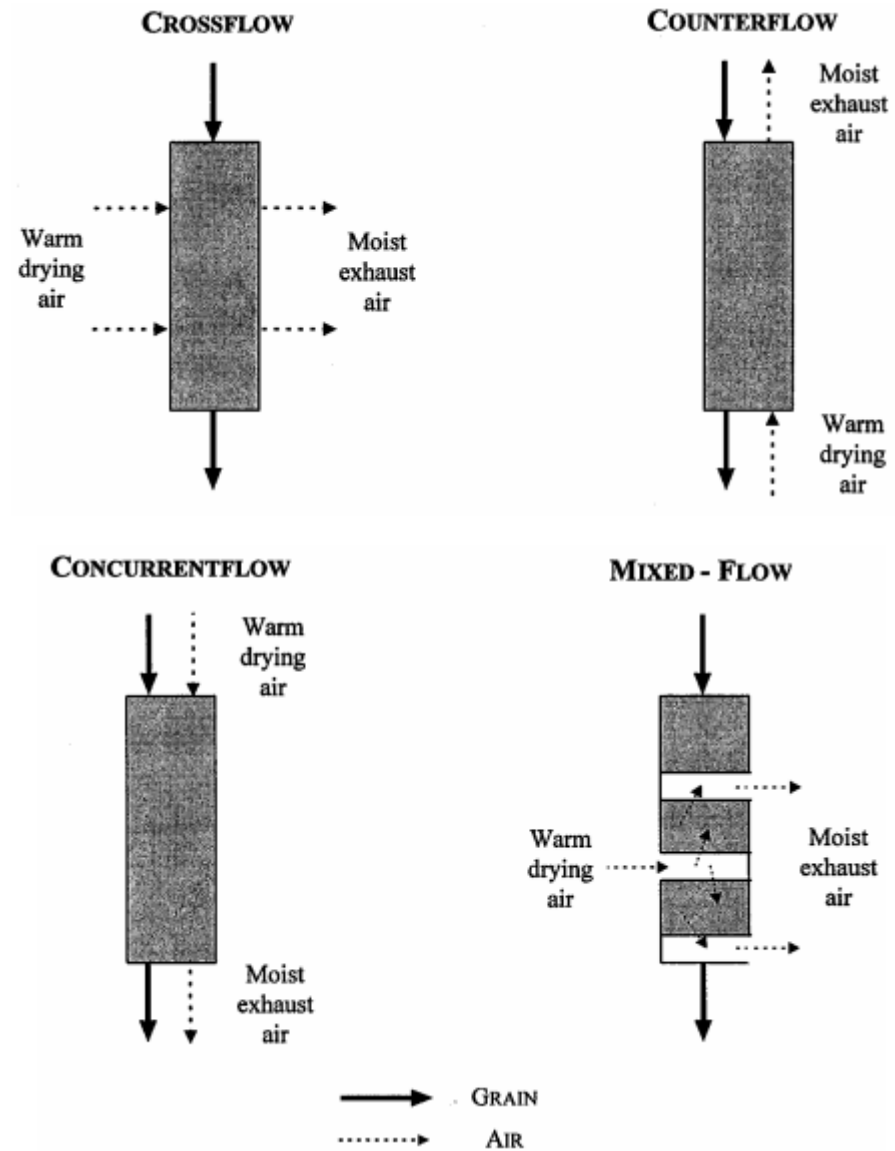


Рис 1.2. Методи сушки зерна гарячим повітрям

Так званий десікат (гаряче сушильне повітря) виконує подвійне завдання: з одного боку, він нагріває зерно, сприяючи швидкому випаровуванню вологи, а з іншого — транспортує випаровану вологу з сушильної камери.

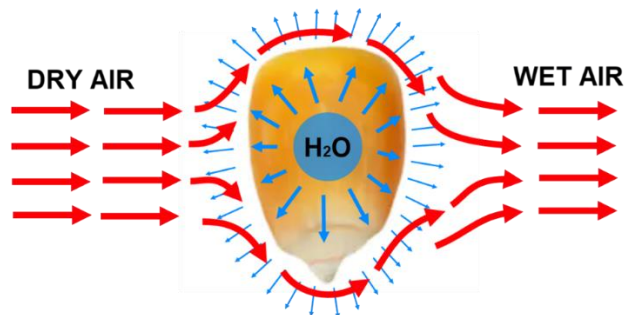


Рис 1.3. Випаровування та транспортовка вологи десікантом (повітрям)

Процес сушіння умовно поділяється на два концептуальні етапи:

1. Початковий етап характеризується швидким видаленням зовнішньої вологи з поверхні зерна під впливом високотемпературного середовища.
2. Завершальний етап триває довше та включає повільну дифузію внутрішньої вологи з глибини зерна.

Залежно від режиму роботи, сушіння може здійснюватись як у статичному щільному шарі зерна, так і в русі зернової маси. При цьому в русі зерно опускається завдяки гравітаційному ефекту, водночас повітря проходить крізь шар зерна у напрямку, протилежному або співпадаючому напрямку руху зерна, забезпечуючи інтенсивний тепло- і масообмін. Такий механізм сприяє доведенню рівня вологості до передбачених стандартами показників.

Структура шахтної сушарки складається з кількох базових технічних компонентів:

1. Вертикальна шахта — збірний корпус, через який переміщується зерно. Ця частина установок найчастіше має прямокутний або циліндричний переріз.
2. Повітряна система — включає нагрівачі та вентилятори (осьові або відцентрові), які подають гаряче повітря.
3. Повітроводні елементи — забезпечують рівномірність розподілу потоку гарячого повітря через шар зерна.
4. Механізми перемішування — деякі модифікації сушарок використовують спеціальні конструктивні елементи із зигзагоподібним розташуванням для покращення рівномірності процесу.

Новітні моделі шахтних сушарок устатковані системами рециркуляції повітря, що дозволяє повторно використовувати залишкове тепло після попереднього нагрівання. Наприклад, відпрацьоване тепло очищується за допомогою фільтрів і знову повертається у систему, що суттєво підвищує її енергоефективність.

Ефективність функціонування шахтної сушарки визначається сукупністю ключових параметрів, кожен із яких впливає на процес сушіння зерна та його кінцеві характеристики:

Температура сушильного повітря. Цей параметр варіюється залежно від типу зернової культури. Для сирого рису оптимальна температура становить приблизно 60°C, тоді як для відвареного рису межа підвищується до 85°C.

Швидкість подачі повітря. Вона визначає як швидкість процесу сушіння, так і якість обробленого зерна. Наприклад, у сушарках типу LSU рекомендована швидкість подачі повітря становить 60–70 м³/хв/тонна.

Товщина шару зерна. У сушарках товщина шару зерна зазвичай коливається в межах від 0,15 до 0,30 м, що забезпечує максимально ефективну взаємодію зерна з повітряним потоком.

Технологічний процес передбачає багаторазове проходження зерна через сушильну шахту, частота якого залежить від початкового рівня вологості та бажаного кінцевого значення. При досягненні необхідного рівня вологості зерно переміщується до нижньої частини сушарки, звідки його вивантажують за допомогою спеціального механізму.

Забезпечення оптимальних умов сушіння досягається завдяки інтеграції систем автоматизації та використанню сенсорних пристроїв. Серед найпоширеніших елементів систем управління такими сушарками виділяють:

Датчики температури та вологості. Вони використовуються для постійного моніторингу параметрів середовища всередині сушильної камери.

Датчики рівня зерна. Ці пристрої відповідають за контроль кількості матеріалу в шахті.

Контролери. Сучасні системи часто базуються на мікроконтролерах, таких як Arduino Mega 2560, що дає змогу автоматизувати регулювання температурного режиму, швидкості подачі повітря та інших ключових параметрів.

Зазначені автоматизовані рішення сприяють підтриманню стабільних умов сушіння, зменшуючи ризики перегрівання зерна. Це дозволяє не лише зберегти високу якість готового продукту, але й забезпечити його здатність до проростання.

1.4. Розробка функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема слугує ключовим технічним документом, що відображає розташування органів керування, технологічного обладнання, приладів, засобів автоматизації та комунікацій. Цей документ є основоположною складовою проекту, яка визначає архітектуру й структуру автоматизації всього технологічного процесу. У межах функціональної схеми зазначаються зв'язки між умовними графічними позначеннями, наводяться таблиці та супроводжувальні пояснення, які сприяють повнішому розумінню її змісту.

Функціональна схема структурно поділяється на дві основні зони. У верхній частині креслення зображено технологічну схему системи, тоді як у нижній містяться графічні позначення, що демонструють інтеграцію приладів, щитів, контрольних пунктів, елементів керування та засобів автоматизації.

На схемі детально відображаються всі функціональні компоненти моделі разом із взаємозв'язками між ними. Вона репрезентує процеси, які протікають у системі або в окремих її функціональних контурах, забезпечуючи цілісне уявлення про їх функціонування та взаємодію.

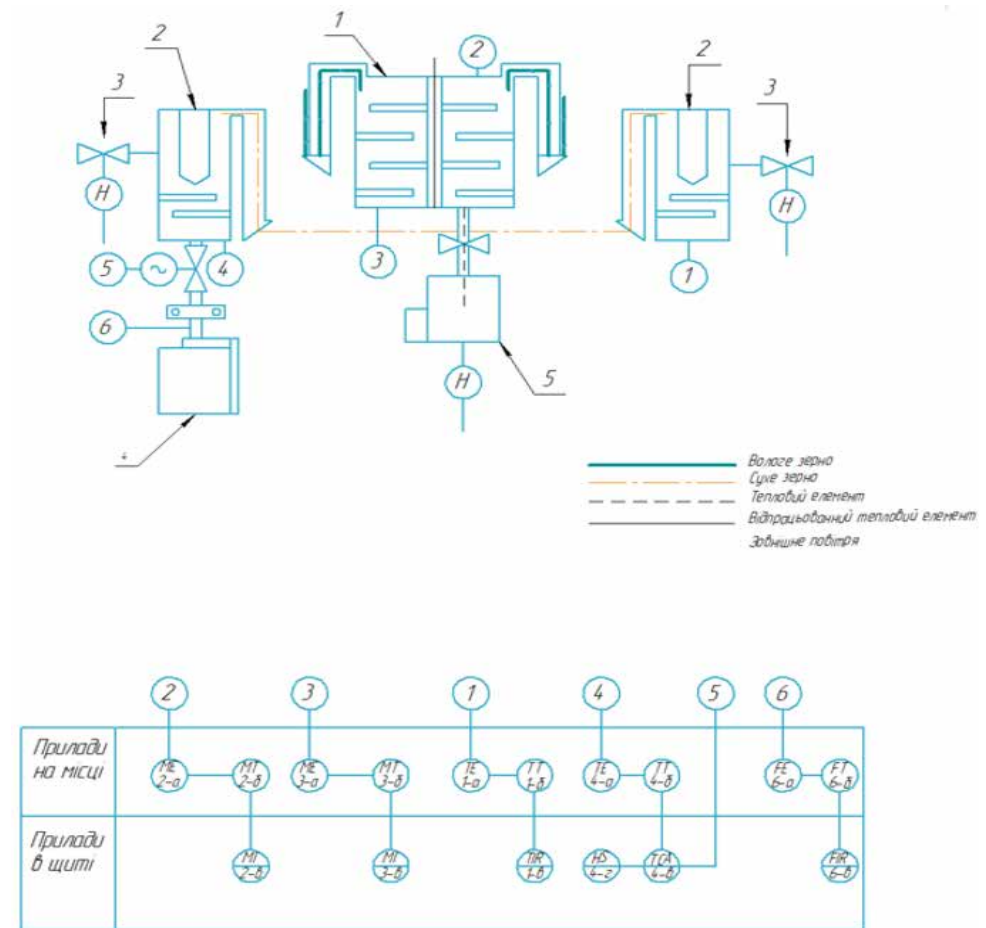


Рис. 3 Функціональна схема зерносушарки

1—зерносушарка, 2—охолоджувальні камери, 3—вентилятори, 4—зерносховище, 5—теплогенератор.

TE – датчик температури;

TT – перетворювач температури;

TIR – індикація та реєстрація значень температури;

ME – датчик вологості;

MT – перетворювач вологості;

MI – індикація значення вологості;

TSA – контроль та оповіщення температури;

HS – ручний перемикач;

FE – витратомір;

FT – перетворювач витрат;

FIR – індикація та реєстрація витрат.

Принцип роботи зерносушарки полягає у завантаженні зерна до апарата, де датчики вологості ME визначають рівень вологи в матеріалі у відсотках. На основі отриманих показників задається оптимальна температура сушіння. Температурний датчик регулює подачу палива в систему та забезпечує контроль за підтриманням необхідного температурного режиму у шахті, що дозволяє досягти максимально збалансованого процесу сушіння. Після цього зерно проходить камери охолодження, де за допомогою зовнішнього повітря здійснюється його охолодження, а потім цикл сушіння та охолодження повторюється.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

Мета цього розділу полягає у розробці математичної моделі об'єкта керування та побудові рівняння динаміки, що описує зміну параметрів управління в моделі об'єкта.

Основними параметрами, що регулюються в цій роботі, є температура та вологість. Температура залежить від витрат тепла на навколишнє середовище, поглинання тепла матеріалом і нагрівання повітря всередині сушарки. Під час сушіння зерно слід доводити до заданого рівня вологості для забезпечення його якісної обробки та довготривалого зберігання. Тому важливо також урахувати витрати повітря на вентиляцію, яка здійснює відведення вологи з камер сушіння.

2.1. Розробка математичної моделі за результатами теоретичних досліджень

Стабілізація температури осушувача забезпечується шляхом регулювання витрати палива, яке подається у повітрянагрівач, або шляхом контролю швидкості потоку повітря з навколишнього середовища. З огляду на конструкцію шахтної зерносушарки, рекомендується обрати другий варіант із використанням відпрацьованого осушувача.

Повітрянагрівачі, що працюють на рідкому або газоподібному паливі та оснащені камерою згоряння, характеризуються складним процесом теплообміну. Цей процес супроводжується взаємодією різних фізичних явищ у динамічному середовищі: рух повітря, дифузія газів, хімічне горіння, зміна агрегатного стану речовин, а також зміна властивостей і складу середовища. Зважаючи на складність математичного опису системи рівнянь, що відображають весь процес теплообміну, для аналізу динамічних характеристик повітрянагрівачів зазвичай використовують спрощене рівняння тепломасового балансу. Аналітичний метод визначення динамічних властивостей дозволяє усереднити рушійні фактори у взаємодії середовищ та вважати лінійний розподіл параметрів процесу вздовж усього теплообмінника.

Для сільськогосподарських повітрянагрівачів динамічні характеристики залежать від температури теплоносія в часі, що змінюється через коливання витрат палива або електроенергії. До пристроїв прямого нагріву належать такі повітрянагрівачі, в яких теплоносій утворюється змішуванням димових газів із повітрям. Тепло від згоряння розпиленого палива частково передається через випромінювання і конвекцію через стінки камери згоряння, а також шляхом безпосереднього змішування продуктів згоряння з потоками повітря. Саме передача тепла через стінки визначає інерційність системи та її динамічні характеристики. Тому дослідження динамічних властивостей агрегата здебільшого зводиться до визначення кількості тепла, яке передається через стінки і накопичується в матеріалі під час перехідного стану.

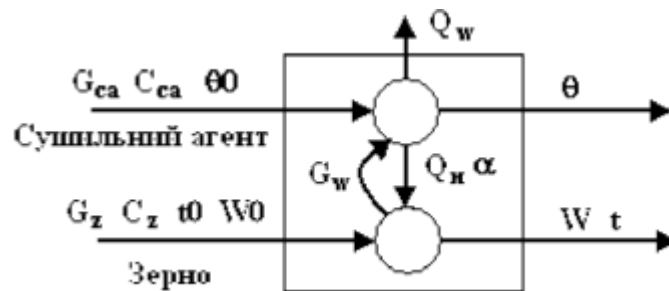


Рис 2.1. Структурна схема процедури сушіння зерна у вигляді “чорного ящика”

Для створення ефективної математичної моделі системи необхідно врахувати всі характеристики об'єкта, а також скласти перелік класифікаційних ознак і припущень:

- У сушарці передбачено 4 зони;
- Режим роботи може бути як динамічним, так і статичним;
- Для сушіння застосовується конвективний метод постачання тепла;
- Рух матеріалу та сушильного агента є направленим;
- Теплообмін із навколишнім середовищем не враховується;
- Параметри у кожній зоні вважаються однаковими;

- Коефіцієнти швидкості сушіння та теплообміну залишаються незмінними в межах визначеного діапазону зміни параметрів сушильного агента і матеріалу.

2.2. Розробка і дослідження імітаційної моделі об'єкта автоматизації у середовищі MATLAB

Рівняння теплового балансу для матеріалу в камері сушіння зерносушильної установки формується таким чином:

$$\frac{LG_{kn}^M \partial[(c^M + c^n W_{kn})t^M]}{\partial x} + \alpha_{M/n} F_{M/n} (t_{kn}^M - t_{kn}^n) + N_{kn} g_{kn}^M r + \frac{\partial[(c^M + c^n W_{kn})t^M g_{kn}^M]}{\partial t} = 0 \quad (2.1).$$

де: t^M , t_{kn}^n – позначають температуру матеріалу та сушильного агента, L – визначає довжину зони сушильної шахти [м], Параметри c^M , c^n – представляють теплоємність матеріалу (зерна) і сушильного агента (повітря) [Дж/(кг К)], Коефіцієнт теплообміну наведено як $\alpha_{M/n}$, а $F_{M/n}$ позначає площу поверхні теплообміну між матеріалом та сушильним агентом [м²], швидкість сушки характеризується значенням N_{kn} [1/с], r – вказує питому теплоту пароутворення [Дж/кг].

Після замінів та необхідних перетворень рівняння набуває такого вигляду:

$$G_{kn}^M [(c^M + c^n W_{kn})t_{kn}^M - (c^M + c^n W_{вх.kn})t_{kn.вх}^M] + \alpha_{M/n} F_{M/n} (t_{kn}^M - t_{kn}^n) + N_{kn} g_{kn}^M r + t_{kn}^M g_{kn}^M \frac{d(c^M + c^n W_{kn})}{dt} + (c^M + c^n W_{kn}) \frac{d(t_{kn}^M g_{kn}^M)}{dt} = 0; \quad (2.2).$$

Розглянемо систему диференціальних рівнянь, яка описує зміну температури матеріалу у зерносушильній установці шахтного типу.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 10.5 \frac{d\Delta t_{kn}^M(t)}{dt} + \Delta t_{kn}^M = 0.0015\Delta t_{\text{вх.кн}}^M(t) - 6.17\Delta W_{\text{вх.кн}}(t) + \\
 0.0043\Delta g_{kn}^M(t) + 10.1\Delta W_{kn}(t) - 0.39\Delta G_{kn}^M(t) + 0.00056G_{kn}^n(t) + 1.34\Delta t_{kn}^n(t); \\
 4.69 \frac{d\Delta t_1^M(t)}{dt} + \Delta t_1^M(t) = 0.00078\Delta t_{kn}^M(t) - 3.98\Delta W_{kn}(t) + 0.038\Delta g_1^M(t) + \\
 15.2\Delta W_1(t) - 0.25\Delta G_1^M(t) + 0.001\Delta G_1^n(t) + 0.00002\Delta t_1^n + 23.12\Delta d_1(t); \\
 3.5 \frac{d\Delta t_2^M(t)}{dt} + \Delta t_2^M(t) = 0.00099\Delta t_1^M(t) - 6.82\Delta W_{kn}(t) + 0.0667\Delta g_2^M(t) + \\
 18.6\Delta W_2(t) - 0.286\Delta G_2^M(t) + 0.0038\Delta G_2^n(t) + 0.000047\Delta t_2^n(t) + \\
 37.57\Delta d_2(t); \\
 8 \frac{d\Delta t_3^M(t)}{dt} + \Delta t_3^M(t) = 0.0019\Delta t_2^M(t) - 21.86\Delta W_2(t) + 0.1541\Delta g_3^M(t) - \\
 7.84\Delta W_3(t) - 0.5\Delta G_3^M(t) + 0.024\Delta G_3^n(t) + 0.00015\Delta t_3^n(t) + 42.3\Delta d_3(t).
 \end{array} \right. \quad (2.3)$$

Структурна схема моделі була розроблена в середовищі MATLAB Simulink і представлена на рисунку 2.1. Будь-які зміни температури в зоні сушіння безпосередньо впливають на температурні показники в інших зонах. У свою чергу, зміна вологості матеріалу позначається як на його вологості, так і на температурі в наступних зонах. Крім того, варіація інших параметрів спричиняє зміну температури та вологості, що викликає відповідні відхилення цих показників у сусідніх зонах сушіння.

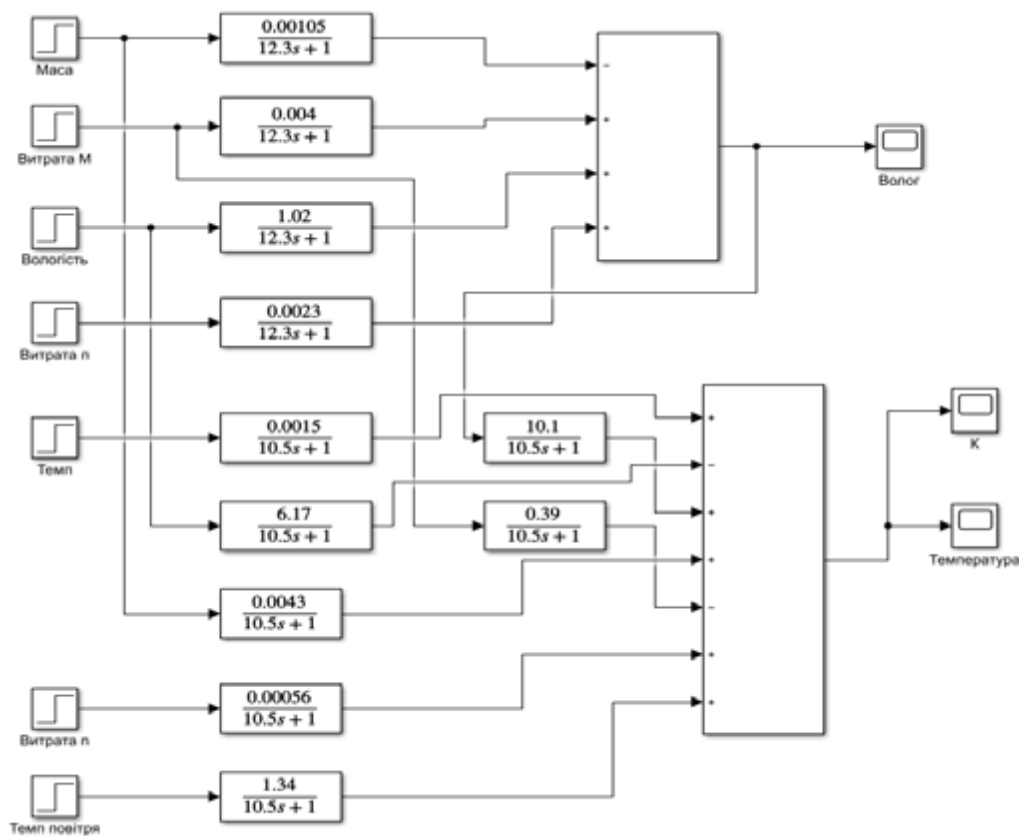


Рис 2.2. Структурне представлення математичної моделі вологості зерна у камері сушіння

Проведено аналіз й отримано значення постійної часу об'єкта за каналом регулювання температури в умовах роботи шахтної зерносушарки.

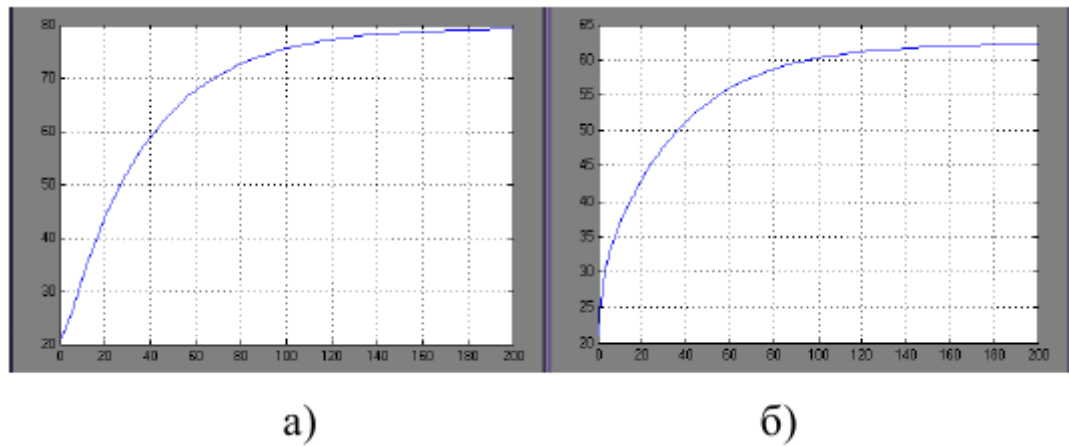


Рис 2.3. Розгінні криві, що відображають зміну температури зерна при різних рівнях вологості: 17% (позначено як а) та 25% (позначено як б)

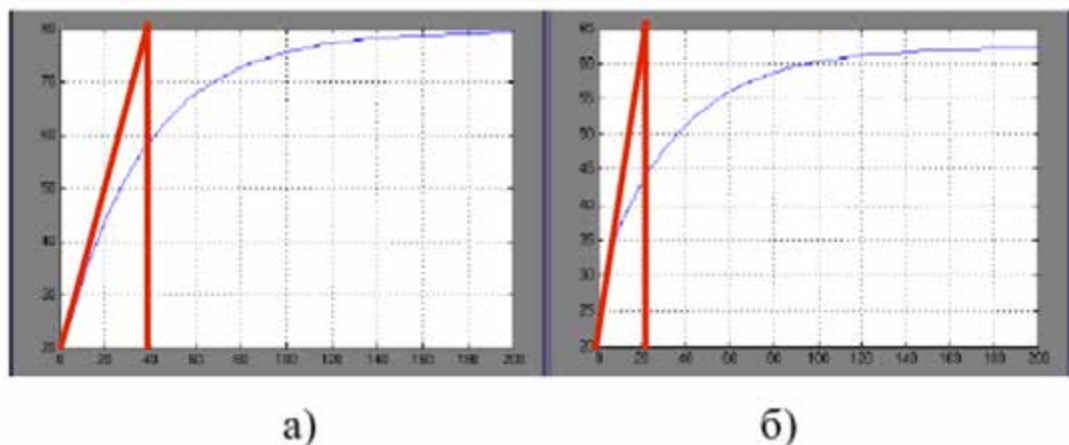


Рис 2.4. Нормовані розгінні криві, що відображають зміну температури зерна при різних рівнях вологості: 17% (позначено як а) та 25% (позначено як б)

Встановлено, що постійна часу в системі регулювання температури зерна становить $T_{pk} = 30$ секунд.

Досліджено вплив витрат зерна на кінцеву температуру та параметри постійної часу об'єкта за відповідним каналом регулювання. На основі отриманих даних побудовано розгінні криві для вологості зерна 17% та 25%, які ілюструються на рисунку 2.5.

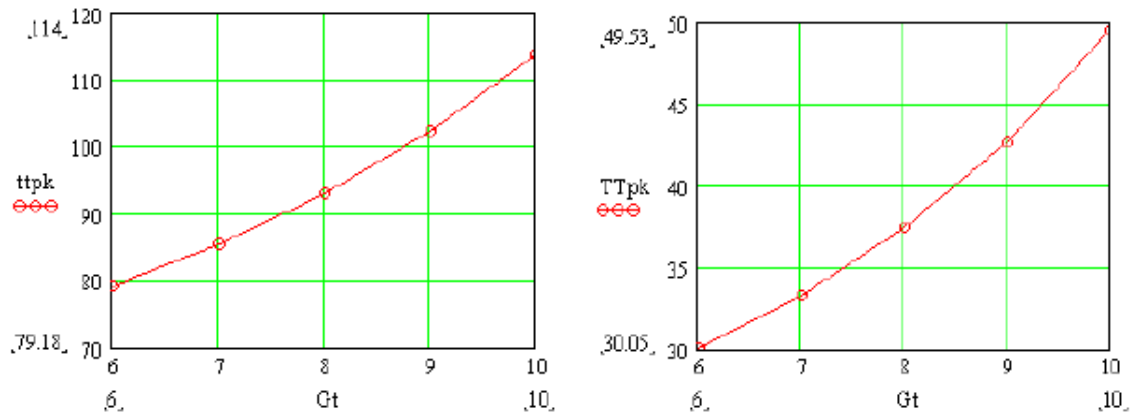


Рис 2.5. Розгінні криві для вологості зерна 17% та 25%

Розроблено імітаційну модель для ефективного регулювання температурного режиму в шахтній зерносушарці. Модель дозволила дослідити вплив витрат зерна на температуру його нагрівання та динамічні характеристики системи за каналом регулювання температури.

2.3. Вибір алгоритму керування об'єктом

Динамічні характеристики об'єкта керування дозволяють визначити алгоритм регулювання ще на етапі проектування. Для цього аналізується залежність між постійною часу та часом затримки об'єкта керування. Відповідна залежність вибору закону регулювання представлена в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Залежності вибору закону керування

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

На основі проведених обчислень отримано таке співвідношення:

$$\frac{t}{T} = \frac{0.52}{51} = 0.01 < 0.2$$

Виходячи з даних таблиці 2.1, можна обрати відповідний закон керування положенням. Однак, з огляду на те, що алгоритм позиційного регулювання супроводжується значними амплітудами власних коливань, особливо для інерційних об'єктів, таких як сушарка, регулювання якої потребує високої точності, швидкості та відсутності перерегулювання, доцільно застосувати лінійний закон регулювання.

Розраховується динамічний коригуючий коефіцієнт R_d .

Оскільки об'єкт керування є статичним, а перехідний процес аперіодичним, значення динамічного коефіцієнта визначається за формулою 2.4.

$$R_d = \frac{y_1}{K_0 * y_{max}} \quad (2.4)$$

Де y_1 – максимальне динамічне відхилення, K_0 – коефіцієнт передачі об'єкту керування, y_{max} – максимально можливе збурення по навантаженню.

$$R_d = \frac{0.75}{5 * 5} = 0.03 \quad (2.5)$$

Далі алгоритм керування встановлюється на основі графічних залежностей, представлених на рис. 2.6. На основі діаграми прискорювальної характеристики визначається взаємозв'язок між динамічним коефіцієнтом керування та динамічними властивостями об'єкта керування для типової поведінки перехідного процесу.

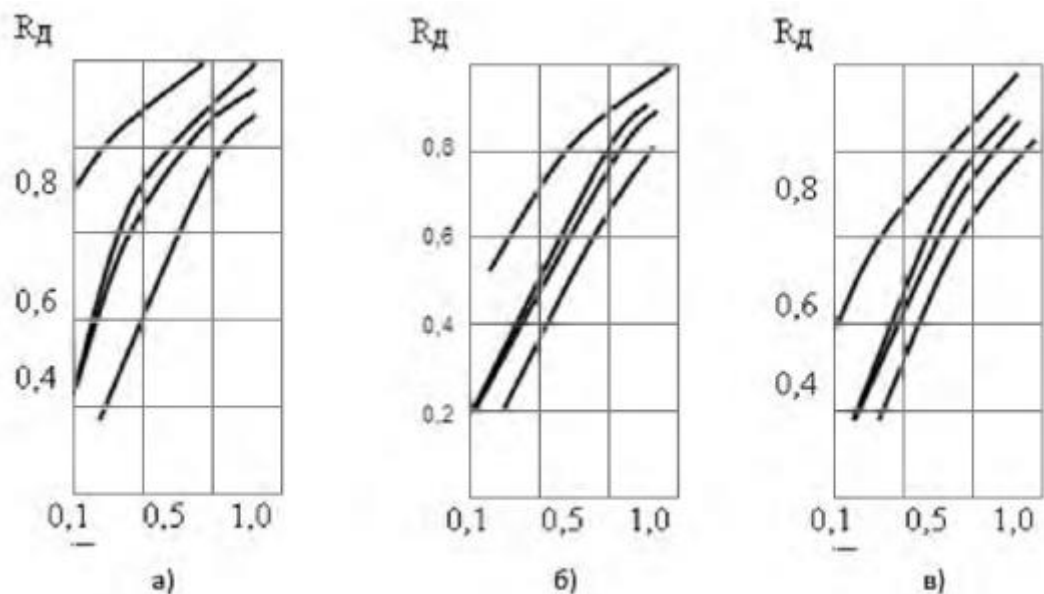


Рис 2.6. Залежність динамічного коефіцієнта керування від властивостей ОК

а – для аперіодичного процесу, б – для процесу із перерегулюванням 20%,
в – для процесу з мінімальним показником якості.

Таблиця 2.2

Відносний час регулювання

Алгоритм керування	Об'єкт	Відносний час регулювання		
		Аперіодичний	20% перерегулювання	Мінімальний інтегральний критерій
Пропорційний	Статичний	4.5	6.5	9.0
	Астатичний	6.0	8.0	-
Пропорційно-інтегральний	Статичний	8.0	12.0	18.0
	Астатичний	14.0	16.0	10.0
Пропорційно-інтегрально-диференційний	Статичний	5.5	7.0	10.0
	Астатичний	9.0	12.0	13.0

З графіка кривої прискорення виділяється залежність динамічного коефіцієнта керування від динамічних характеристик об'єкта для перехідного процесу з 20% перерегулюванням. Потім проводиться перевірка відповідності алгоритму керування заданому часу відгуку через обчислення необхідних параметрів на основі даних таблиці.

$$t = \psi\tau = 5.5 * 0.52 = 2.86 \text{ с} \quad (2.6)$$

ψ – відносний час регулювання, він дорівнює 5.5 для ПД алгоритму керування.

Результати розрахунків підтверджують, що обраний алгоритм керування забезпечує заданий час регулювання, оскільки виконуються необхідні умови. ($t < T_{ок}$, або $2.86 < 51 \text{ с.}$)

РОЗДІЛ 3

ВИБІР РЕГУЛЯТОРА ТА ПОЯСНЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО НАЛАШТУВАНЬ

3.1. Реалізація алгоритму керування

Система передбачає наступні компоненти:

- Програмне логістичне керування, яке отримує дані з датчиків температури в трьох зонах сушарки, а також показники температури зерна на верхньому та нижньому рівнях. На основі цієї інформації формуються керуючі сигнали для частотного перетворювача та регулятора потужності.
- Модуль для розширення аналогових входів, який дозволяє підключати аналогові температурні датчики до програмованого логічного контролера (ПЛК).
- Частотний перетворювач з PID-алгоритмом, що забезпечує пряме керування частотою обертання вала електродвигуна. Це дозволяє змінювати потік повітря шляхом регулювання швидкості відцентрованого вентилятора.
- Електродвигуни для роботи зернових транспортерів та системи приводу повітряних клапанів.

Таким чином, усі елементи системи працюють узгоджено, забезпечуючи ефективне управління процесами сушіння зерна.

3.2. Вибір контролеру керування

Для нашого проекту ми обрали обладнання для керування технологічними процесами – програмований логічний контролер Arduino Mega 2560 Rev3.



Рис 3.1. Контролер Arduino Mega 2560 Rev3

Arduino Mega 2560 Rev3 – це відкритий мікроконтролерний пристрій, який широко застосовується для створення різноманітних електронних систем і проектів. Він є одним із найпотужніших і найбільш функціонально розширюваних пристроїв у лінійці Arduino, надаючи більше можливостей і контактів порівняно з іншими моделями серії.

Пристрій пропонує 54 цифрових входи/виходи, 4 порти UART для підключення до інших апаратів і 16 аналогових входів. Він також оснащений 256 кілобайтами флеш-пам'яті для зберігання програмного забезпечення та 8 кілобайтами оперативної пам'яті для роботи з даними. Крім того, його функціонал можна розширювати за рахунок додаткових модулів та аксесуарів, що дозволяє створювати більш складні й високофункціональні системи.

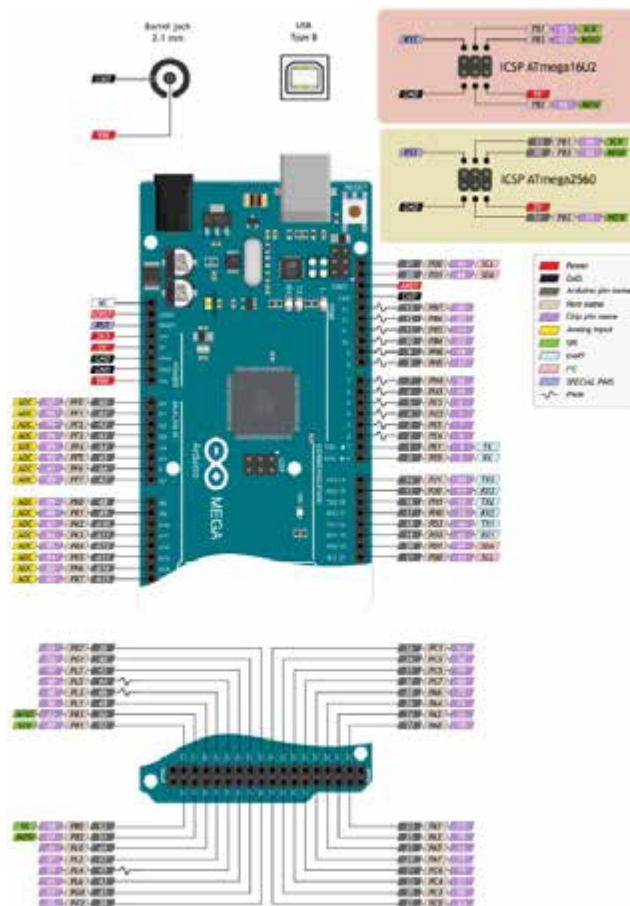


Рис 3.2. Схема распиновки Arduino Mega 2560

Основні технічні характеристики програмованого логічного контролера Arduino Mega 2560 Rev3 представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1.

Технічні параметри контролера Arduino Mega 2560 Rev3

Напруга живлення	7-12В
Допустимі межі напруги	6-20В
Аналогові входи	16
Дискретні входи/виходи	54
Напруга живлення датчиків	19.2-30В
Пам'ять	256 Кб, вбудована
Струм дискретних виходів	3.3В 50мА
Струм дискретних входів	40мА
Швидкість передачі даних	SPI – до 50 мегабіт на секунду UART – до 115200 біт на секунду TWI – до 400 кілобіт на секунду
Робоча температура навк. середовища	Від -10 до +55°С

Схему підключення системи зображено на рисунку 3.3.

Пін заземлення GND(чорний дріт) датчиків та дисплею під'єднується до піну GND.2 контролера.

Піни живлення VCC(червоний дріт) датчиків та дисплею під'єднуються до піну 5V контролера. Для датчиків також встановлені резистори, вони не є обов'язковими, але можуть запобігти поломці при перевантаженні.

Піни інформації SDA(зелений дріт) датчиків під'єднані до цифрового піну контролера, перший датчик до п'ятого, другий – четвертого.

Піни дисплею SDA(інформації) та SCL(часу)(синій дріт) під'єднані до відповідних пінів SDA20 та SCL21 контролера.

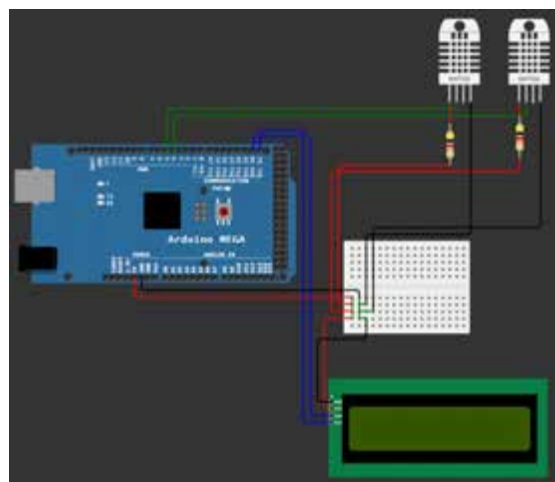


Рис 3.3. Схema підключення дисплею та датчиків до контролера

Створення моделі системи було виконано з використанням онлайн-симулятора Wokwi, який дозволяє збирати модель та одразу налаштовувати код системи.

На цій моделі зображена схема підключення двох датчиків DHT22 (в нашому випадку використовуються датчики TCMY-2212 та SHT30 I2C, але симулятор не дозволяє обирати інші моделі. На щастя значної різниці немає, з'єднання буде таке саме), та дисплею LCD 16x2 (I2C) до контролера Arduino mega 2560 Rev3.

В кодї використовуються бібліотеки DHT sensor library(дозволяє використовувати датчик DHT22), та LiquidCrystal I2C(дозволяє дисплею LCD 16x2 комунікувати з чіпом контролера).

В нашій системі будуть використовуватися два комплекти таких моделей. Одна для вимірювання температури, друга для вологості. В прикладі зображено уніфіковану модель, яка одразу вимірює обидва параметри.

При запуску симуляції датчики вимірюють температуру та вологість у шахті зерносушарки з частотою оновлення 2 секунди, та видають середнє значення на дисплей.

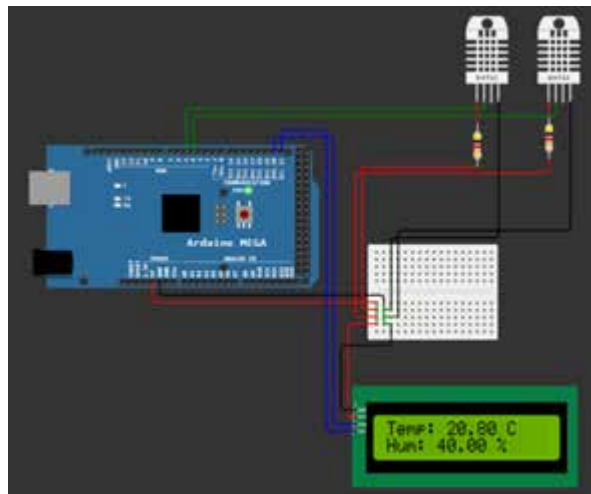


Рис 3.4. Імітація правильної роботи системи

При значній різниці значень температури($>3^{\circ}\text{C}$) або вологості($>2\%$) між датчиками система видає помилку, показує різницю та зупиняє роботу.

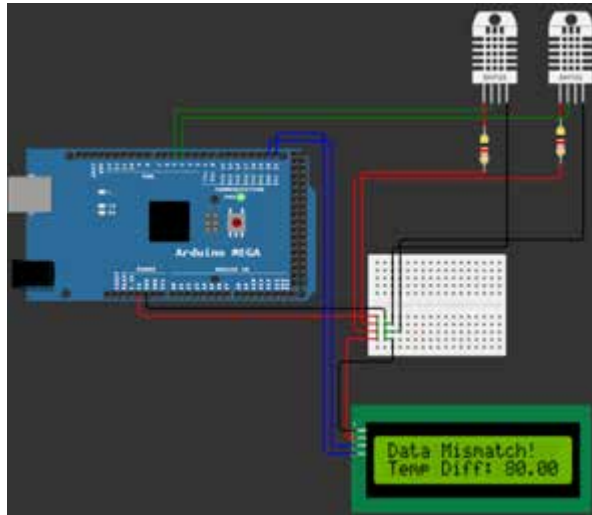


Рис 3.5. Приклад помилки при значній різниці температур

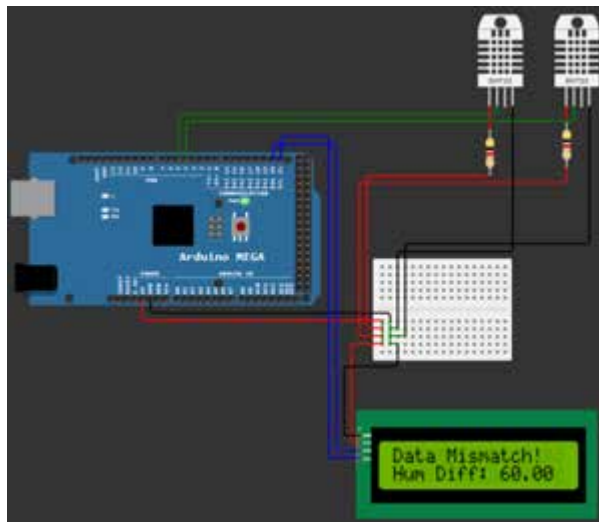


Рис 3.6. Приклад помилки при значній різниці вологості

Повний код системи надано в додатку А.

3.3. Вибір первинного перетворювача САК

До основного первинного перетворювача висуваються такі основні вимоги:

- Забезпечення лінійності та чіткості статичної характеристики (допустимий рівень нелінійності має бути в межах 0.1–3%).
- Високий рівень чутливості.
- Стабільність параметрів протягом тривалого часу.
- Висока швидкодія.

- Стійкість до впливу хімічних речовин як із боку контрольованого середовища, так і навколишнього середовища (за наявності захисного кожуха для первинного перетворювача).

- Мінімальний вплив на контрольовані параметри, зручність монтажу та обслуговування.

Процес вибору передавача, інтегрованого в контролер, проводиться у два етапи:

1. Спершу визначається тип перетворювача залежно від характеристик контрольованого параметра об'єкта керування та умов його експлуатації.

2. Далі, на підставі каталогів підбираються всі необхідні елементи регулятора, після чого визначається його типорозмір.

Рекомендується вибирати первинний перетворювач так, щоб його діапазон вимірювань охоплював змінні значення контрольованого параметра і був максимально узгоджений із ними. При цьому слід враховувати здатність перетворювача до перевантаження та сумісність із відповідним електронним блоком керування. Особливу увагу необхідно приділяти швидкодії (інерційним характеристикам), що визначаються постійною часу перетворювача.

З огляду на вимоги до діапазону вимірювань, інерційності, а також специфіку підключення температурних датчиків до ПЛК, було обрано термоперетворювач опору загальнопромислового типу ТСМУ-2212-50М. Його технічні характеристики наведені у таблиці 3.2.



Рис 3.7. Термоперетворювач опору ТСМУ-2212 з уніфікованим вихідним сигналом

Таблиця 3.2.

Технічні параметри термоперетворювача опору ТСМУ-2212

Діапазон вимірювальних температур	Від -25 до +50°C
Клас допуску	В
Номінальна статична характеристика	50М
Ступінь захисту від вологи і пилу	IP55
Показник теплової інерції	8
Стійкість до вібрації	N3
Кліматичне виконання	У3
Матеріал захисної арматури	12Х18Н10Т
Діапазон умовного тиску	0.4 – 4 мПа

Теплопередавачі типу ТСМУ з рівномірним вихідним сигналом призначені для безперервного вимірювання температури навколишнього середовища (газів, парів, рідин та сипучих матеріалів) та її перетворення у пропорційний струмовий сигнал 0-5 мА або 4-20 мА. Це забезпечує можливість тривалої передачі даних на відстань. Пристрій складається з вбудованого у корпус передавача з вихідним сигналом 0-5 мА або 4-20 мА, а також термодатчика.

Температура, що вимірюється, лінійно перетворюється термочутливим елементом у пропорційну зміну омичного опору, який далі перетворюється в струмовий сигнал на виході передавача.

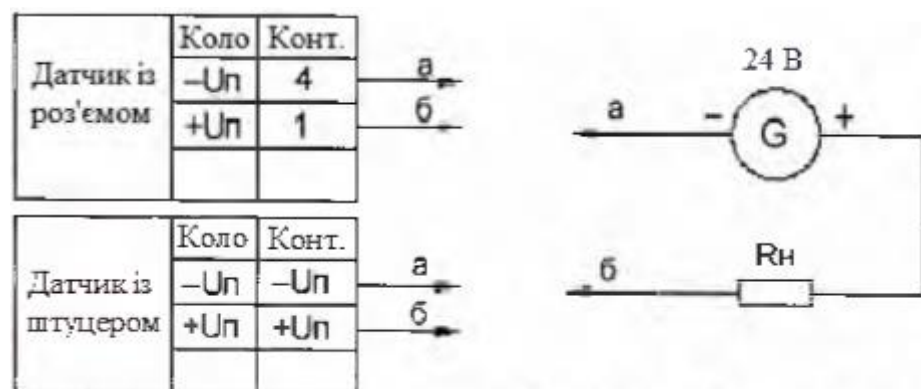


Рис 3.8. Схема зовнішніх з'єднань датчику ТСМУ-2212

Для визначення передатної функції ПВП використовуємо його номінальну статичну характеристику (рис. 3.9).

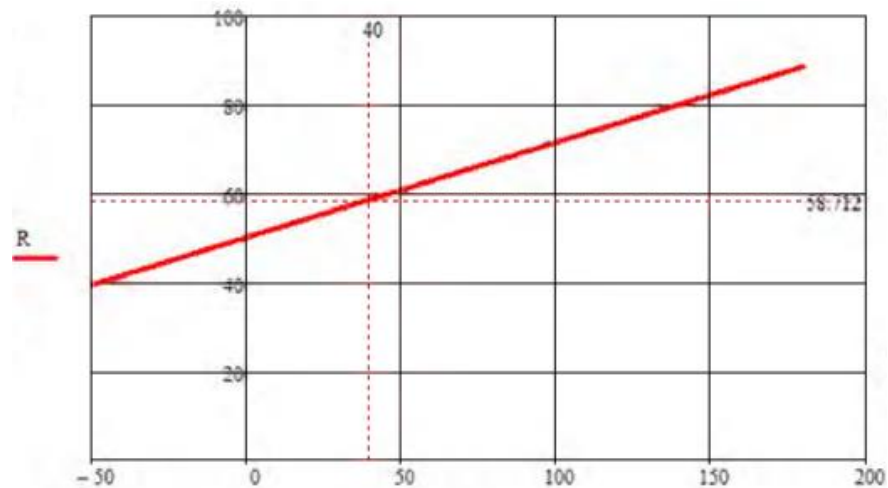


Рис 3.9. Номінальна статична характеристика ТСМУ-2212

Згідно з динамічними властивостями, теплоперетворювач є інерційною ланкою, передатна функція якої описується наступним чином:

$$W_{\text{ПВП}}(s) = \frac{k_{\text{ПВП}}}{T_{\text{ПВП}} \cdot s + 1} \quad (3.1)$$

Коефіцієнт передачі $k_{\text{ПВП}}$ розраховується за формулою:

$$k_{\text{ПВП}} = \frac{\Delta I}{\Delta T} = \frac{20 - 4}{50 - (-25)} = 0.217 \text{ mA/}^\circ\text{C} \quad (3.2)$$

Тут ΔT – різниця значень температур, що вимірюються датчиком, а ΔI – різниця струмів, пропорційних температурі в межах робочого діапазону.

З урахуванням того, що коефіцієнт теплової інерції чутливого елемента становить $T_{\text{ПВП}} = 8\text{с}$, передатна функція датчика ТСМУ-2212 має вигляд:

$$W_{\text{ПВП}}(s) = \frac{k_{\text{ПВП}}}{T_{\text{ПВП}} \cdot s + 1} = \frac{0.217}{8 \cdot s + 1} \quad (3.3)$$

Зазвичай, вологість зерна визначають за допомогою лабораторних аналізів. Однак такий підхід часто викликає значні затримки, неякісне висушування та зниження ефективності роботи зерносушарки. Тому доцільно використовувати пристрої для контролю вологості, як вологоміри.

Для нашої зерносушарки ідеальним вибором є блочний вологомір SHT30 I2C. Завдяки компактному розміру та здатності вимірювати вологість безпосередньо в потоці зерна, його легко інтегрувати у конструкцію самої зерносушарки. Пристрій сумісний майже з будь-яким мікропроцесорним контролером, а додатковою перевагою є його функція вимірювання температури.



Рис 3.10. Зовнішній вигляд блочного вологоміру SHT30 I2C

Його характеристики:

Діапазон вимірювання температури: від -40 до +120 °С;

Точність у температурному діапазоні (5-60 °С): ±0,3 °С;

Діапазон вимірювання відносної вологості: від 0 до 100%;

Точність у діапазоні відносної вологості (20-80% RH): ±3%;

Робоча напруга: від 2,15 до 5,5 В;

Тип інтерфейсу: I2C;

Час відгуку для вимірювання вологості: 8 с;

Споживана потужність: щонайменше 5 мкВт (при напрузі 2,4 В).

3.4. Вибір виконавчого механізму САК

Для вибору типу та розміру вентилятора для активного аераційного процесу необхідно враховувати розрахункові показники повітрообміну, необхідного для видалення надлишкової вологи із шару зерна, температуру, а також сумарний тиск у системі.

Вентилятор повинен забезпечувати потік повітря, який поступово зменшується від $400 \frac{\text{м}^3/\text{год}}{\text{т}}$ до $100 \frac{\text{м}^3/\text{год}}{\text{т}}$. Якщо врахувати, що сушарка повністю завантажена 40 тонами зерна пшениці, критично важливим стає забезпечення подачі повітря в діапазоні від $4000 \frac{\text{м}^3/\text{год}}{\text{т}}$ до $1600 \frac{\text{м}^3/\text{год}}{\text{т}}$.

Окрім цього, система повинна враховувати створення необхідного тиску для проходження повітря крізь щільний шар зерна. Відомо, що радіальні (відцентрові) вентилятори здатні генерувати значно вищий статичний тиск (до

2000-2500 Па) порівняно з осьовими вентиляторами, які забезпечують лише 30-300 Па.

З огляду на ці умови, для використання в цій системі керування було обрано відцентровий вентилятор моделі В-Ц4-70-8 (рисунок 3.11), який оптимально підходить для застосування в стаціонарних вентиляційних системах, зокрема у зерносушильних комплексах.



Рис 3.11. Вентилятор В-Ц4-70-8

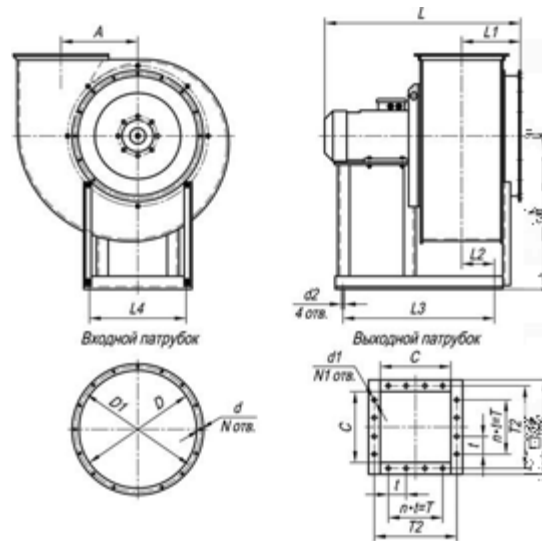


Рис 3.12. Креслення вентилятору В-Ц4-70-8

Таблиця 3.3.

Технічні параметри вентилятору В-Ц4-70-8

Вентилятор	Потужність електродвигуна	Швидкість обертання колеса	Показники в робочій зоні	
			Продуктивність	Напір
В-Ц4-70-8	11 кВт	950 об/хв	10-22 м ³ /год	1020-550 Па

Для роботи вибраного вентилятора застосовується асинхронний трифазний електродвигун АИР132М4, який має наступні технічні характеристики, наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4.

Технічні параметри електродвигуна АИР132М4

Двигун	Потужність	Частота обертання валу	ККД	$\cos \varphi$	Маса
АИР132М4	11 кВт	1000 об/хв	88.5%	0.85	83.5 кг



Рис 3.13. Електродвигун АИР132М4

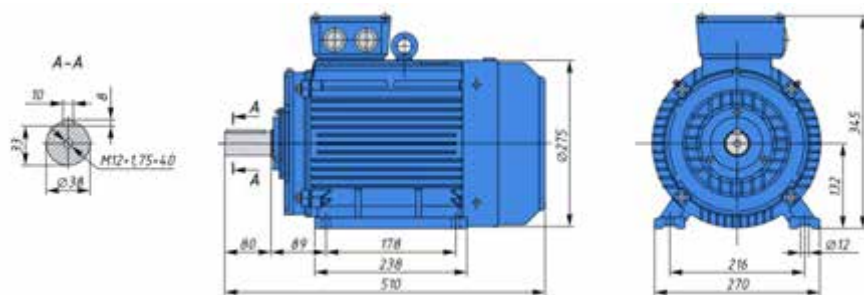


Рис 3.14. Креслення електродвигуна АИР132М4

Найоптимальнішим способом плавного регулювання швидкості вентилятора є частотний метод. Можливість зміни швидкості таким методом зумовлена взаємозв'язком із формулою синхронної швидкості обертового магнітного поля статора. Він передбачає, що швидкість пропорційна частоті напруги, яка подається на обмотки статора.

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} \quad (3.4)$$

Виведемо передатну функцію асинхронного електродвигуна під час частотного керування. Позначимо ω_{1V} швидкість обертання поля у статорі при

частоті f_v , використовуючи цей параметр для визначення відносної швидкості поля:

$$v = \frac{f_v}{f_H} = \frac{\omega_{1V}}{\omega_0} \quad (3.5)$$

Введемо поняття фіктивного ковзання, що дозволяє отримати дійсну швидкість обертання при заданій частоті. Підставивши відомі значення у відповідні формули, визначимо шукану залежність.

$$s_\phi = \left(\frac{\omega_{1V}}{\omega_0}\right) * s = v * s \quad (3.6)$$

$$\omega = \omega_{1V} * (1 - s) \quad (3.7)$$

$$\omega = \omega_0 * (v - s_\phi) \quad (3.8)$$

Для малих значень ковзання крутний момент двигуна пропорційний ковзанню, що дає змогу спростити рівняння. Підставляючи дані із попередніх виразів, виводимо базове рівняння. Приймаючи до уваги випадок, коли момент двигуна дорівнює нулю (3.11), отримуємо спрощене співвідношення. Цей вираз можна представити у компактній формі.

$$M = \left(\frac{M_H}{s_H}\right) * s_\phi \quad (3.9)$$

$$M - M_c = J * \frac{d\omega}{dt} \quad (3.10)$$

$$J * s * \omega_0 * (v - s_\phi) = \left(\frac{M_H}{s_H}\right) * s_\phi \quad (3.11)$$

$$\frac{J * \omega_0 * s_H}{M_H} * s * \frac{s_\phi}{s_H} + \frac{s_\phi}{s_H} = \frac{J * \omega_0}{M_H} * s \quad (3.12)$$

Якщо взяти відносну швидкість поля v за вхідний параметр, а відносне ковзання $\sigma = \frac{s_\phi}{s_H}$ — за вихідний, рівняння набуде остаточного вигляду, що визначає передатну функцію для асинхронного електродвигуна під час частотного керування.

$$T_{M1} * s * \sigma + \sigma = T_{M2} * s * v \quad (3.13)$$

$$\text{Де } T_{M1} = \frac{J * \omega_0 * s_H}{M_H}, \text{ а } T_{M2} = \frac{J * \omega_0}{M_H}.$$

$$W(s) = \frac{\sigma(s)}{v(s)} = \frac{T_{M2} * s}{T_{M1} * s + 1} \quad (3.14)$$

Таким чином, передатна функція електродвигуна при керуванні частотою є отриманим математичним виразом.

$$W_{BM}(s) = \frac{k_{BM}}{T_{BM} * s + 1} = \frac{1.988}{0.014 * s + 1} \quad (3.15)$$

3.5. Вибір частотного перетворювача

Промисловий перетворювач частоти AC70-T3-2R2G/004P, що входить до серії продуктів AC70 компанії VEICHI, спеціально розроблений для керування обертальним моментом, забезпечення плавного запуску та зупинки синхронних і асинхронних трифазних електродвигунів. Цей пристрій знаходить застосування в різних сферах промисловості та аграрного сектору, включаючи металургію, харчову промисловість, нафтогазову галузь, системи водопостачання й водовідведення, вентиляторні установки тощо.

Перетворювачі частоти цієї серії оснащуються вбудованим модулем, що реалізує ПД-алгоритм керування, забезпечуючи ефективну та точну роботу системи.



Рис 3.15. Перетворювач AC70-T3-2R2G/004P

Частотні перетворювачі використовуються для плавного й поступового регулювання швидкості трифазних асинхронних електродвигунів. Це регулювання забезпечується створенням трифазного струму змінної частоти на виході пристрою. Система приводу дозволяє відслідковувати й налаштувати ключові параметри через цифрову панель, такі як задана швидкість, вихідна частота, струм і напруга двигуна, вихідна потужність і момент, стан дискретних входів, загальний час роботи приводу тощо. Завдяки впровадженим технологіям,

приводи серії АС70 виділяються як одне з найсучасніших рішень у своєму класі. Ця серія охоплює діапазон потужностей в межах від 11 до 15 кВт. Основні характеристики частотного перетворювача АС70 наведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5.

Технічні параметри перетворювача АС70-Т3-2R2G/004Р

Потужність	11 кВт
Напруга на вході/виході	380 В
Номінальний струм	25 А
Вихідна частота	400 Гц

Особливості перетворювача частоти АС70-Т3-2R2G/004Р:

- Діапазон вихідних частот: від 0,2 до 400 Гц.
- 16 програмованих профілів швидкості.
- Векторне керування з автоматичною адаптацією до двигуна або контролера (комбінація векторного керування та функції компенсації ковзання забезпечує щонайменше 150% початкового моменту двигуна на частоті 1 Гц).
- Функція оптимізації часу для процесів розгону та гальмування.
- Вбудований ПД-регулятор з можливістю вибору прямої або зворотньої характеристики.
- Два варіанти зупинки двигуна: регульоване гальмування або зупинка шляхом інерційного руху.
- Автоматичний перезапуск після зникнення напруги, у тому числі для обертового двигуна.
- Вбудований інтерфейс для підключення до ПК.
- Різноманітні засоби захисту електродвигуна або групи двигунів.
- Функція відключення при перевищенні крутного моменту.
- Захист від перевантажень, розриву чи викривлення фази.
- Система захисту від перегрівання.
- Запобігання коротким замиканням.

Цей перетворювач чудово підходить для обраного типу двигуна.

РОЗДІЛ 4

АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

4.1. Аналіз динамічних характеристик і визначення передатної функції об'єкта

У випадку повітрянагрівача стабілізація температури сушильного агенту здійснюється регулюванням витрат палива. Процес теплообміну в таких системах відзначається високою складністю, адже відбувається за умов взаємодії випромінюючого середовища та рухомих потоків. Цей процес включає в себе різноманітні фізико-хімічні явища: рух і дифузію газів, згорання палива, зміну складу та властивостей компонентів системи тощо. Для простішого моделювання таких взаємодій застосовують спрощені рівняння матеріального і теплового балансів. Аналітичний підхід у цьому випадку є доцільним, оскільки дає змогу врахувати усереднені значення рушійних сил різних процесів та припустити лінійність їхніх показників.

Для сільськогосподарських повітрянагрівачів динамічні характеристики системи визначаються як залежність температури теплоносія від часу за змін витрат палива чи електроенергії. У випадку прямого нагрівання теплоносіїв формується шляхом змішування гарячих газів з повітряним потоком. Частина тепла передається через стінки камери згорання конвекційним і радіаційним теплопереносом, тоді як інша частина переходить безпосередньо в потік внаслідок змішування.

Ключовим параметром інерційності об'єкта є кількість тепла, яка передається через стінки камери згорання. Тому при визначенні динамічної характеристики основною задачею є розрахунок цієї кількості.

За стаціонарних умов роботи повітрянагрівача, тобто під час постійного процесу горіння з незмінною витратою палива, тепловий баланс можна описати рівнянням:

$$Q_B + Q_T + Q_{CG} = Q_{TG} + Q_{CG} \quad (4.1)$$

Q_B і Q_T характеризують кількість тепла, внесена до топки повітрям, яке подається для забезпечення горіння, та паливом відповідно, виміряну в кілокалоріях за годину. Q_{CT} визначає кількість тепла, що утворюється в результаті спалювання палива, також у кілокалоріях за годину. Q_{CT} описує кількість тепла, переданого через стінки камери згорання, тоді як Q_{TG} відображає тепло, що міститься у продуктах згорання, які виходять із камери згорання.

Варто зазначити, що величини Q_B та Q_T є несуттєвими у порівнянні з Q_{CT} , оскільки співвідношення $(Q_B + Q_T)$ до Q_{CT} становить менше 1% ($\frac{Q_B + Q_T}{Q_{CT}} * 100 < 1\%$). У зв'язку з цим вони можуть бути проігноровані та не враховуватися у подальших розрахунках.

Після цього регульована температура теплоносія θ_T , яка фіксується на виході з повітрянагрівача, може бути представлена у вигляді наступного виразу.

$$\theta_T = \theta_T' + \theta_T'' - \theta_0 \quad (4.2)$$

Визначення температури здійснюється через рівняння теплового балансу:

$$Q_H^P \cdot \eta_T \cdot q - L_T \cdot C_T \cdot (\theta_T - \theta_0) = 0 \quad (4.3)$$

Де:

$\theta_T' = \frac{Q_{CT}}{L_T \cdot C_T} + \theta_0$ — температура теплоносія, що утворюється за рахунок

передачі тепла через стінки, в °С;

$\theta_T'' = \frac{Q_{TG}}{L_T \cdot C_T} + \theta_0$ — температура теплоносія, що виникає внаслідок тепла,

яке утворюється при змішуванні повітря з проточними газами під час нагрівання від початкової температури, в °С;

θ_0 — температура зовнішнього повітря, в °С;

Q_H^P — нижча теплотворна здатність палива, ккал/кг;

η_T — коефіцієнт корисної дії повітрянагрівача;

q — витрата палива, кг/год;

L_T — витрата теплоносія, кг/год;

C_T — питома теплоємність теплоносія, ккал/(кг·°С).

Температура $\theta_T //$ може бути визначена за допомогою рівняння матеріального балансу:

$$L_T C_T (\theta_T // - \theta_0) - L_G C_G (\theta_G - \theta_0) = 0 \quad (4.4)$$

де L_G – поточна витрата газів, кг/год; C_G – середня питома теплоємність газів, ккал/(кг · °C). Величину θ_T можна визначити за виразом (4.2) за умови, що кількість тепла, яка поглинається внутрішньою поверхнею стінок, буде дорівнювати кількості тепла, відданій повітрю зовнішньою поверхнею стінок.

За зміни кількості спалюваного палива відбувається порушення стаціонарного режиму теплопередачі: температура стінок змінюється, і теплова рівновага досягається лише через певний проміжок часу. Для вираження цієї залежності необхідно скласти диференціальне рівняння. Оскільки температура теплоносія і стінок змінюється лінійно, слід написати кінетичне (4.5), балансове (4.6), (4.7) і перехідне (4.8) рівняння.

$$\frac{dQ_1}{dt} = \alpha F (\theta_{CT} - \frac{\theta_T' + \theta_0}{2}); \quad (4.5)$$

$$\frac{dQ_1}{dt} = L_T C_T (\theta_T' - \theta_0); \quad (4.6)$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = Q_H^P \eta_T q - L_T C_T (\theta_T - \theta_0); \quad (4.7)$$

$$\frac{dQ_2}{dt} - \frac{dQ_1}{dt} = G C_{CT} \frac{d\theta_{CT}}{dt}; \quad (4.8)$$

Q_1 – кількість тепла, передана повітрям від стінок за час t , ккал; α – коефіцієнт тепловіддачі повітря від стінок, ккал/(год·м²·°C); F – площа поверхні тепловіддачі, м²; θ_{CT} – середнє значення температури стінок, °C; Q_2 – кількість тепла, передана стінці середовищем, що нагріває, за час t , ккал; θ_T – температура топкових газів на виході з камери згорання, °C; G – маса теплообмінних стінок, кг; C_{CT} – питома теплоємність матеріалу стінок, ккал/(кг·°C).

У подальших розрахунках значення α , C_{CT} , G , а також температури обох середовищ (нагрівального й нагрітого) приймаються як середньоарифметичні для заданого інтервалу: $C_T \approx C_0$; $L_T \approx L_0$.

Для набуття формулою (4.8) остаточного вигляду із лише постійними величинами (регульованими параметрами є θ_T та час t), потрібно

трансформувати. Замінивши θ_T на вираз через θ_T' та θ_T'' , можна отримати вираз відносно температури стінки.

$$\theta_{CT} = \left(\frac{L_T C_T}{\alpha F} + \frac{1}{2}\right)\theta_T - \left(\frac{L_T C_T}{\alpha F} + \frac{1}{2}\right)\theta_T'' + \theta_0, \quad (4.9)$$

Диференціюючи рівняння щодо часу, отримаємо:

$$\frac{d\theta_{CT}}{dt} = \left(\frac{L_T C_T}{\alpha F} + \frac{1}{2}\right) \frac{d\theta_T}{dt}. \quad (4.10)$$

Підставивши у це рівняння значення $\frac{dQ_1}{dt}$ та $\frac{dQ_2}{dt}$ з рівнянь (4.6) і (4.7), а також вирази для θ_T і θ_T'' із рівнянь (4.2) та (4.4), після виконання серії перетворень отримуємо диференціальне рівняння для перехідного процесу.

$$\frac{G C_{CT} \left(\frac{L_T C_T}{\alpha F} + \frac{1}{2}\right) d\theta_T(t)}{L_T C_T dt} + \theta_T(t) = \frac{Q_H^P \eta_T q}{L_T C_T} + \theta_0 \quad (4.11)$$

Рівняння (4.11), враховуючи затримку в об'єкті при нульових початкових умовах, можна представити у загальному вигляді як рівняння аперіодичної ланки першого порядку із затримкою:

$$T_0 \frac{d\theta_T(t)}{dt} + \theta_T(t) = k_0 q(t - \tau), \quad (4.12)$$

Де:

$$T_0 = \frac{G C_{CT} \left(\frac{L_T C_T}{\alpha F} + \frac{1}{2}\right)}{L_T C_T}; \quad (4.13)$$

$$k_0 = \frac{Q_H^P \eta_T}{L_T C_T}; \quad (4.14)$$

T_0 позначає часову постійну, вимірювану у секундах, с; k_0 є коефіцієнтом передачі об'єкта, що виражається в °С·год/кг; τ представляє затримку в об'єкті, яка може бути визначена за допомогою наступної формули:

$$\tau = \tau_{\Gamma} + \tau_{TP}, \quad (4.15)$$

де τ_{Γ} – час горіння в топці, що становить менше однієї секунди ($\tau_{\Gamma} < 1$ с);

$\tau_{TP} = \frac{l}{\omega_T}$ – транспортне запізнення, виражене в секундах; l – відстань від

точки встановлення вимірювального пристрою температури теплоносія до полум'я, виміряна в метрах; ω_T – швидкість руху теплоносія у повітропроводі, визначена в метрах за секунду.

Передаточна і перехідна функції для повітрянагрівачів прямого нагрівання можуть бути представлені наступними виразами:

$$W(s) = \frac{k_0}{T_0 \cdot s + 1} \cdot e^{-s \cdot \tau}; \quad (4.16)$$

$$\theta_T = k_0 \cdot q \cdot (1 - e^{-\frac{t-\tau}{T_0}}). \quad (4.17)$$

У рівнянні (4.11) коефіцієнт тепловіддачі α має змінний характер і залежить від температурного режиму роботи системи. Це, в свою чергу, означає, що й постійна часу T_0 варіюватиметься у певних межах відповідно до змін значення α .

Разом із цим, значення коефіцієнта передачі об'єкта може вважатися сталим незалежно від режиму роботи, оскільки для повітрянагрівачів прямого нагрівання варіації коефіцієнта η_T є мінімальними. Такі варіації, зазвичай, головним чином зумовлені змінами температури навколишнього середовища. У зв'язку із цим надалі важливим є визначення меж змін коефіцієнта тепловіддачі α та постійної часу T_0 як функцій від витрати палива.

У даному випадку при підстановці зазначених параметрів у відповідні формули можна визначити передаточну функцію об'єкта управління для системи керування. Параметри, такі як теплота згоряння ($Q_H^P = 11000$ ккал/кг), коефіцієнт корисної дії теплообмінника ($\eta_T = 0,85$), $G = 820$ кг, витрата теплоносія ($L_T = 48000$ кг/год), теплоємності речовини ($C_{CT} = 0,02$ ккал/(кг·°C) та $C_T = 0,24$ ккал/(кг·°C)), площа теплообмінної поверхні ($F = 9$ м²), коефіцієнт тепловіддачі ($\alpha = 33$ ккал/(год·м²·°C)), масова витрата робочого середовища ($q = 150$ кг/год) і характерний час ($\tau = 45-50$ с), допомагають отримати шукану математичну передачу процесу керування.

$$W_{OY}(s) = \frac{0,8}{200 \cdot s + 1} \cdot e^{-50 \cdot s}. \quad (4.18)$$

Перехідна функція для повітрянагрівачів прямого нагрівання визначається рівнянням:

$$\theta_{T36} = \theta_0 \cdot e^{-\frac{t-\tau}{T_0}} + k_0 \cdot q \cdot (1 - e^{-\frac{t-\tau}{T_0}}). \quad (4.19)$$

На основі цього будуюмо графіки перехідних характеристик об'єкта, враховуючи вплив управління та збурення. Передаточна функція об'єкта за збуренням записується у вигляді:

$$W_{\text{Об'єкт}}(s) = \frac{0,75}{200 \cdot s + 1} \cdot e^{-50 \cdot s}. \quad (4.20)$$

4.2. Вибір алгоритму управління та технічних засобів для його реалізації

Одним із ключових параметрів є визначення періоду квантування. З огляду на теорему Котельникова, період квантування обчислюється із використанням амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) замкненої неперервної частини системи з допустимою похибкою у 1%. Для цього застосовується програмний інструмент MathCAD. У результаті період квантування T_k становить 10 секунд.

Розрахунок цифрового регулятора: для досягнення аперіодичного монотонного перехідного процесу рекомендовано використовувати ПІД-алгоритм управління. Передатна функція цифрового ПІД-регулятора описується такою формулою:

$$W_{\text{РЕГ}}(z) = K_P + \frac{K_I T(z+1)}{2(z-1)} + \frac{K_D(z-1)}{Tz}. \quad (4.21)$$

Для визначення одного з коефіцієнтів K_I використовується добротність системи за швидкістю K_v . Інші коефіцієнти K_P , K_D обчислюються з урахуванням необхідності компенсувати полюси (інерційності) неперервної частини системи.

$$K_v = \lim W_{\text{НЧ}}(z) \cdot K_I. \quad (4.22)$$

```

w := 0, 0.001.. 1      j := i
Wp(w) :=  $\frac{0,8}{200 \cdot j \cdot w + 1} \cdot e^{-50 \cdot j \cdot w}$ 
w := 1
Given
|Wz(w)| = 0.01

(w) := Find(w)
w = 0.308

Tk :=  $\frac{\pi}{w}$       Tk = 10.189

w := 0, 0.0001.. 0.4
Az(w) := |Wz(w)|      Az(0.308) = 0.01

```

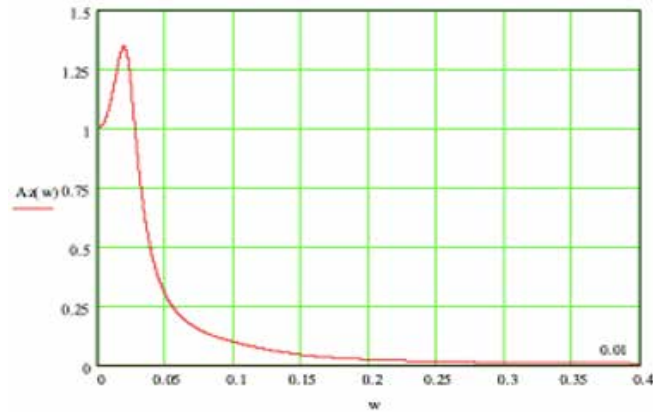


Рис 4.1. АЧХ неперервної замкненої частини системи

Потрібно визначити передатну функцію неперервної частини системи в цифровому вигляді. Це завдання виконується за допомогою ППП MATLAB шляхом використання розкладання ланки запізнення в ряд Паде.

```
Z→1
>> Wn=tf([-40 0.8],[10000 250 1])
Transfer function:
    -40 s + 0.8
-----
 10000 s^2 + 250 s + 1
>> Wz=c2d(Wn,10)
Transfer function:
 -0.03165 z + 0.03872
-----
 z^2 - 1.77 z + 0.7788
Sampling time: 10
>>
```

Рис 4.2. Розкладання ланки за допомогою ППП MATLAB

Таким чином, передатна функція неперервної частини системи наведена у вигляді:

$$W_{\text{НЧ}}(z) = \frac{-0,03165 \cdot z + 0,03872}{z^2 - 1,77 \cdot z + 0,7788} \quad (4.23)$$

Добротність системи за швидкістю K_v обчислюється за такою формулою:

$$K_v = \frac{(1+K)^2}{(\alpha_1 - \beta_1) \cdot K} \quad (4.24)$$

де α_i , β_i та K є коефіцієнтами передатної функції неперервної частини системи, наведеної у формалізованій формі:

$$W_{\text{НЧ}}(s) = \frac{b_m + b_{m-1} \cdot s + \dots + b_1 \cdot s^{m-1} + b_0 \cdot s^m}{a_n + a_{n-1} \cdot s + \dots + a_1 \cdot s^{n-1} + b_0 \cdot s^n} = K \frac{1 + \beta_1 \cdot s + \dots + \beta_{m-1} \cdot s^{m-1} + \beta_m \cdot s^m}{1 + \alpha_1 \cdot s + \dots + \alpha_{n-1} \cdot s^{n-1} + \alpha_n \cdot s^n}, \quad (4.25)$$

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

$$\text{У даному випадку } W_{\text{НЧ}}(s) = 0,8 \cdot \frac{1 - 50 \cdot s}{1 + 250 \cdot s + 10000 \cdot s^2}.$$

Використовуючи формулу (4.22), знаходимо K_v :

$$K_v = \frac{(1 + 0,8)^2}{(250 + 50) \cdot 0,8} = 0,014 \quad (4.26)$$

Коефіцієнт інтеграції K_I обчислюється за допомогою формули (4.12), а також програмного забезпечення MathCAD.

$$\begin{aligned} K &:= 0.8 & \alpha_1 &:= 250 & \beta_1 &:= -50 \\ K_v &:= \frac{(1 + K)^2}{(\alpha_1 - \beta_1) \cdot K} & K_v &= 0.014 \\ Wn4(z) &:= \frac{-0.01365 \cdot z + 0.03872}{z^2 - 1.77 \cdot z + 0.7788} & \lim_{z \rightarrow 1} Wn4(z) &\rightarrow 2.848863636363636363 \\ K_i &:= \frac{0.014}{2.85} & K_i &= 4.912 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

Рис 4.3. Розрахунок K_I за допомогою ППП MathCAD

Таким чином, $K_I = 0,005$.

Знайдемо корені знаменника неперервної частини за допомогою ППП MathCAD:

$$z^2 - 1,77 \cdot z + 0,7788 = 0 \quad (4.27)$$

$$z^2 - 1.77 \cdot z + 0.7788 \text{ solve } ,z \rightarrow \begin{pmatrix} .81847932652174964637 \\ .95152067347825035363 \end{pmatrix}$$

Таким чином, знаменник може бути представлений у вигляді $(z - 0,82) \cdot (z - 0,95)$. Це і є полюси, які необхідно компенсувати.

Чисельник передаточної функції регулятора у спрощеному вигляді можна записати таким чином:

$$z^2 + \frac{K_I T^2 - 2K_P - 4K_D}{K_I T^2 + 2K_P T + 2K_D} \cdot z + \frac{2K_D}{K_I T^2 + 2K_P T + 2K_D}. \quad (4.28)$$

Прирівняємо вирази (4.24) і (4.25), враховуючи однакові степені z , та розв'яжемо отриману систему рівнянь за допомогою ППП MathCAD.

$$\begin{aligned}
 &K_i := 0.005 \quad T := 10 \\
 &K_p := 1 \quad K_d := 1 \\
 &\text{Given} \\
 &\frac{K_i \cdot T^2 - 2 \cdot T \cdot K_p - 4 \cdot K_d}{K_i \cdot T^2 + 2 \cdot T \cdot K_p + 2 \cdot K_d} = -1.77 \\
 &\frac{2 \cdot K_d}{K_i \cdot T^2 + 2 \cdot T \cdot K_p + 2 \cdot K_d} = 0.7788 \\
 &\begin{pmatrix} K_p \\ K_d \end{pmatrix} := \text{Find}(K_p, K_d) \quad K_p = 1.232 \quad K_d = 44.252
 \end{aligned}$$

Рис 4.4. Розв'язання системи рівнянь за допомогою ППП MathCAD

У результаті отримаємо: $K_p = 1,232$, $K_d = 44,252$. Таким чином, передавальна функція регулятора набуває вигляду:

$$W_{\text{РЕГ}}(z) = 1,232 + 0,025 \frac{(z+1)}{(z-1)} + 4,425 \frac{(z-1)}{z}. \quad (4.29)$$

4.3. Аналіз роботи системи автоматичного регулювання та визначення показників якості управління

Системи автоматичного регулювання (САР) відіграють ключову роль у забезпеченні автоматизації процесів, спрямованих на досягнення заданих характеристик якості. Вони повинні демонструвати високу стійкість та ефективність під час виконання своїх функцій.

До основних параметрів, що визначають якість регулювання, належать: амплітуда коливань, тривалість перехідного процесу, величина перерегулювання та залишкова похибка. Проте в окремих випадках доцільним може бути врахування інших показників, наприклад, частоти коливань або швидкості зміни регульованої величини.

Перевірка цифрової стійкості САР здійснюється шляхом використання критерію Джурі. Для реалізації цього процесу необхідно визначити передатну функцію розімкненої системи.

$$\begin{aligned}
 W_{\text{РОЗ}}(z) = W_{\text{НЧ}}(z) * W_{\text{РЕГ}}(z) &= \frac{-0.03165 * z + 0.03872}{z^2 - 1.77 * z + 0.7788} * 1.232 + 0.025 \frac{(z+1)}{(z-1)} + 4.425 \frac{(z-1)}{z} = \\
 &= \frac{-0.18z^3 + 0.22z^2 - 0.07z + 0.03}{z^4 - 2.77z^3 + 2.54z^2 - 0.77z} \quad (4.30)
 \end{aligned}$$

Далі знаходимо передатну функцію замкненої системи:

$$W_{\text{ЗАМ}}(z) = \frac{W_{\text{ПОЗ}}(z)}{1+W_{\text{ПОЗ}}(z)} = \frac{-0,18z^3+0,22z^2-0,07z+0,03}{z^4-2,95z^3+2,76z^2-0,84z+0,03} \quad (4.31)$$

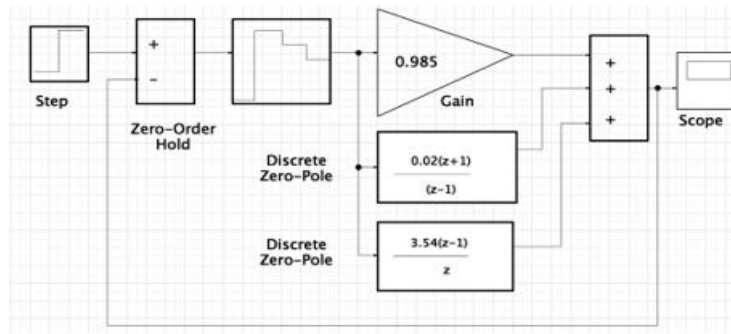


Рис 4.5. Блок-схема системи автоматичного регулювання в середовищі
MATLAB

Розв'язуємо характеристичне рівняння замкненої системи, використовуючи програмне забезпечення MathCAD.

$$z^4 - 2.95 \cdot z^3 + 2.76 \cdot z^2 - 0.84 \cdot z - 0.03 \text{ solve, } z \rightarrow \begin{pmatrix} .15787412568974547892 - .82941756891253480547 \cdot i \\ .15787412568974547892 + .82941756891253480547 \cdot i \\ .75495377091125615427 - .25106297537018535310 \cdot i \\ .75495377091125615427 + .25106297537018535310 \cdot i \end{pmatrix}$$

Корені рівняння відображаємо на Z-площині. Оскільки всі отримані корені розташовані всередині одиничного кола, система вважається стійкою відповідно до критерію Джурі.

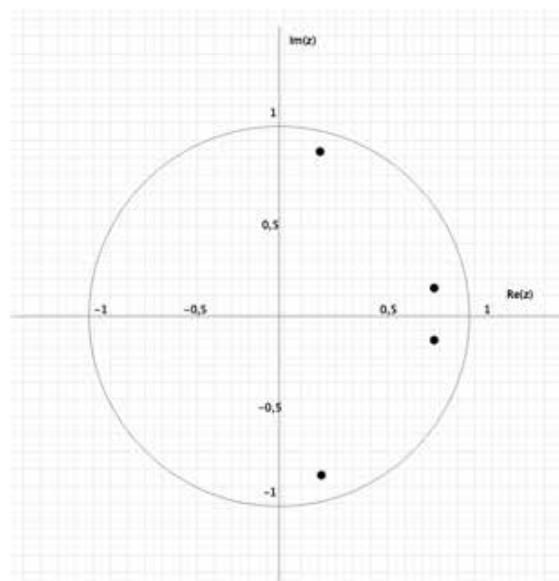


Рис 4.6. Визначення стійкості за критерієм Джурі

Далі, за допомогою програмного забезпечення MATLAB, будемо структурно-алгоритмічну схему цифрової системи, а також моделюємо її перехідний процес.

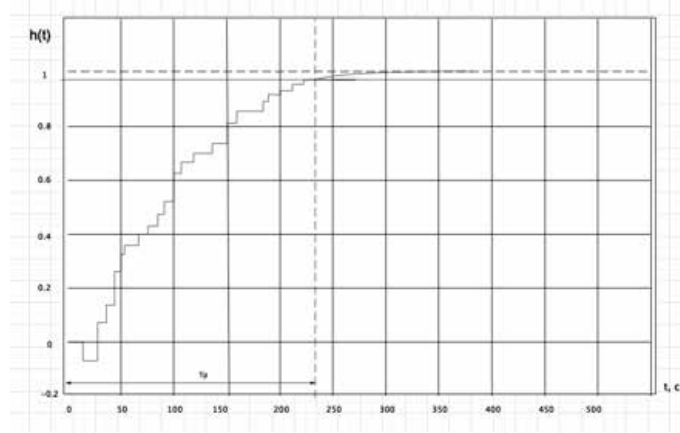


Рис 4.7. Перехідна характеристика системи

На основі перехідного процесу визначаємо основні показники якості автоматичної системи регулювання:

- час регулювання $T_r=240$ с;
- відсутність перерегулювання: $\sigma=0\%$;
- відсутність коливальності: $n=0$;
- статична похибка: $\Delta=0$.

Ці показники відповідають технологічним вимогам до процесу сушіння зерна. Таким чином, система вважається стійкою за критерієм Джурі.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА SCADA-СИСТЕМИ

Візуалізація є методом представлення інформації у вигляді зрозумілих образів, таких як малюнки, фотографії, графіки, схеми, структурні схеми, таблиці чи карти. Застосування такого способу подання дозволяє спростити сприйняття складних даних і полегшити аналіз.

Для реалізації візуалізації у процесах контролю використовуються підходи, як:

- SCADA-системи (Trace Mode, Genesis);
- керування за допомогою пультів управління;
- контролери з дисплеями.

Вибір технічних засобів для візуалізації залежить від обсягу даних та розміру об'єкта управління. В умовах великих систем зазвичай застосовують SCADA-системи. Вони є програмними комплексами, які забезпечують як візуалізацію технологічних процесів, так і їх управління. Завдяки SCADA оператор отримує зручний графічний інтерфейс для моніторингу та керування процесами.

З урахуванням існуючих технічних ресурсів, візуалізація операторського інтерфейсу була реалізована через SCADA Trace Mode (AdAstrA), що є одним із рішень автоматизації технологічних процесів (АСУТП). Зокрема, це рішення було адаптоване для роботи автоматизованої системи контролю й управління процесом сушіння зерна.

Розроблена SCADA-система забезпечує виконання таких ключових завдань:

- ефективне управління й контроль за технологічним процесом сушіння зерна;
- забезпечення високого рівня надійності й безпеки;
- оптимізація споживання енергетичних ресурсів;
- отримання даних у режимі реального часу;
- доступ до проекту з будь-якої точки;

- впровадження підсистеми підтримки прийняття рішень.

Результати роботи системи можна побачити у її демонстраційному представленні. Наприклад, робочі екрани дають можливість перемикатися між різними режимами за допомогою кнопок у нижньому правому куті екрану. Перший екран дозволяє стежити за роботою всіх механізмів у межах сушарки. Для цього на зображення довільно накладаються сигнальні лампочки, кожна з яких пов'язана з відповідними параметрами програми. На другому екрані знаходиться інформаційна панель управління, де відображаються основні параметри й функції для ефективного контролю технологічного процесу.

На рисунку 5.1 представлено інтерфейс оператора. На даному екрані, що виконує функцію мнемосхеми, зображене технологічне обладнання, яке включає зерносушарку, топкову установку, завантажувальну норію, вентилятори, розвантажувальний конвеєр, газопровід та манометри.

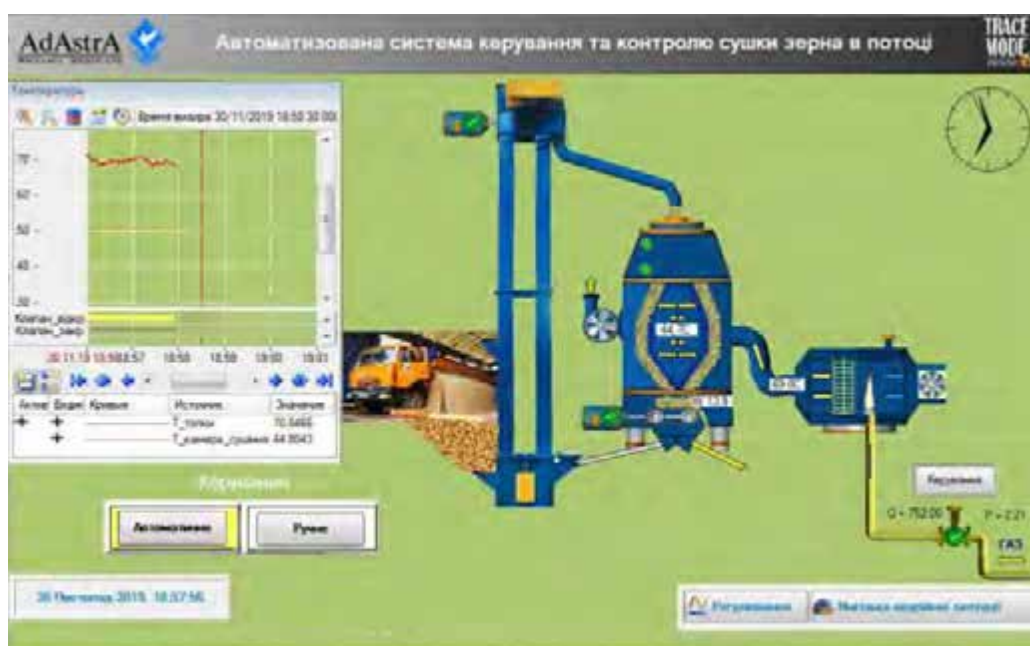


Рис 5.1. Інтерфейс системи у SCADA TRACE MODE

Часову динаміку змін технологічного параметра доцільно зображати у вигляді графіка, що відображає залежність цього параметра від часу. Саме тому в системах SCADA широко застосовуються інструменти, які забезпечують візуалізацію змін значень параметра з плином часу. Такі елементи називаються трендами.

Тренд реального часу демонструє зміни параметра на поточний момент. Зазвичай такі тренди оснащені смугою прокрутки, яка дає змогу «відмотати» назад і переглянути попередні дані виробництва, або ж повернутися до відображення «поточного часу». Наприклад, тренд, що демонструє зміну температури теплоносія для печі та сушильної камери, наведено на рис. 5.2.

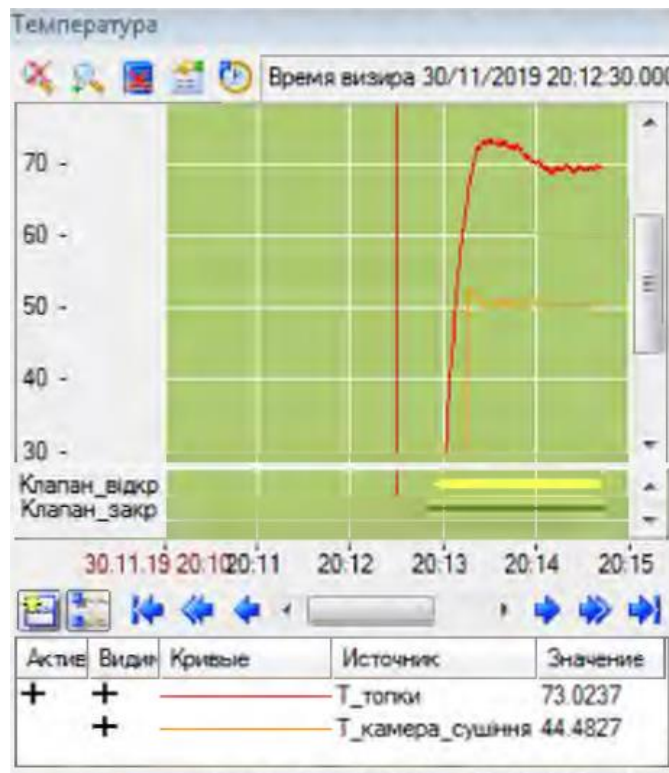


Рис 5.2. Тренд показників температури

На рисунку 5.3 представлені перемикачі режимів роботи, а також вікно автоматичного режиму, що включає відповідні кнопки для ввімкнення та вимкнення. Ці кнопки передають сигнали до елементів програми керування, таких як контакти та котушки.

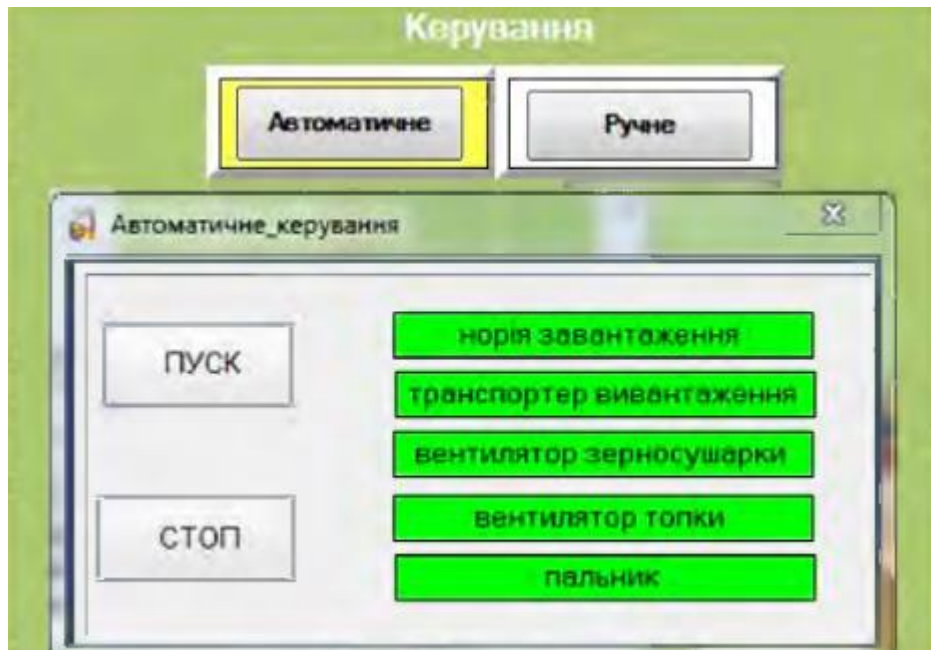


Рис 5.3. Вікно перемикання режиму керування

На рисунку 5.4 представлено вікно режиму ручного керування, управління механізмами якого відбувається кнопковими перемикачами.

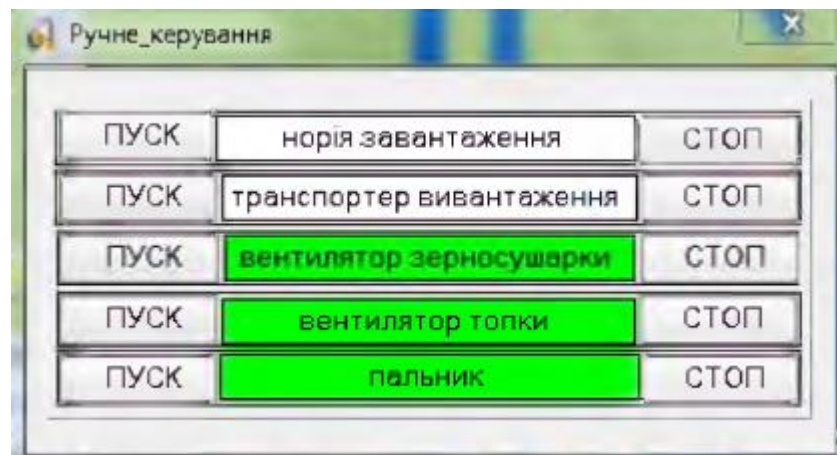


Рис 5.4. Вікно режиму ручного керування

На рисунку 5.5 представлено вікно керування виконавчим механізмом в ручному режимі, в ньому також відображаються параметри тиску та витрат.



Рис 5.5. Вікно ручного керування виконавчим механізмом

У ході технологічного процесу необхідно забезпечувати контроль за відповідними параметрами для запобігання аварійним ситуаціям та уникнення пошкоджень обладнання. Система SCADA надає можливість моніторингу ключових показників виробничого процесу. Проте, лише перевірка параметрів є недостатньою — у багатьох випадках необхідно оперативно інформувати оператора про виникнення аварійної ситуації або досягнення параметром критичних значень.

На рисунку 5.6 подано візуалізацію, яка моделює аварійну ситуацію на прикладі змін у показниках тиску палива. Зокрема, представлено світловий індикатор, що активується у разі падіння тиску нижче встановлених нормативних меж.

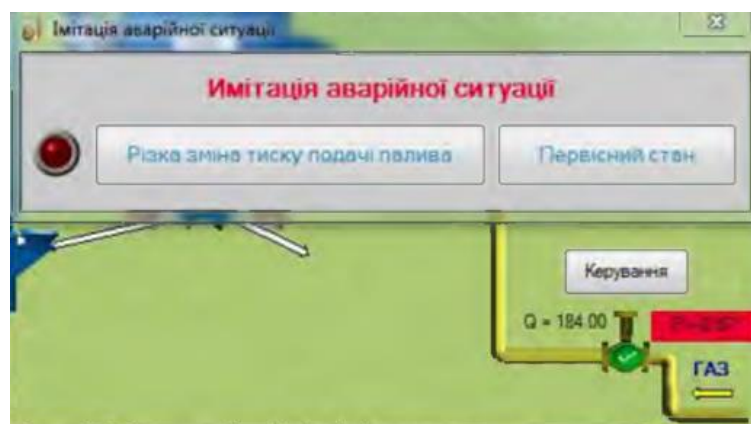


Рис 5.6. Вікно імітаційної аварійної ситуації

Фінальний екран представленого огляду системи SCADA зображено на рисунку 5.7. Це є екран налаштувань, який включає ключові технологічні

параметри, зокрема: температуру теплоносія, тиск у подачі палива, швидкість роботи розвантажувального конвеєра (яка передбачає 10 рівнів налаштування), а також параметри для конфігурації ПІД-регулятора, що забезпечує формування необхідної уставки.

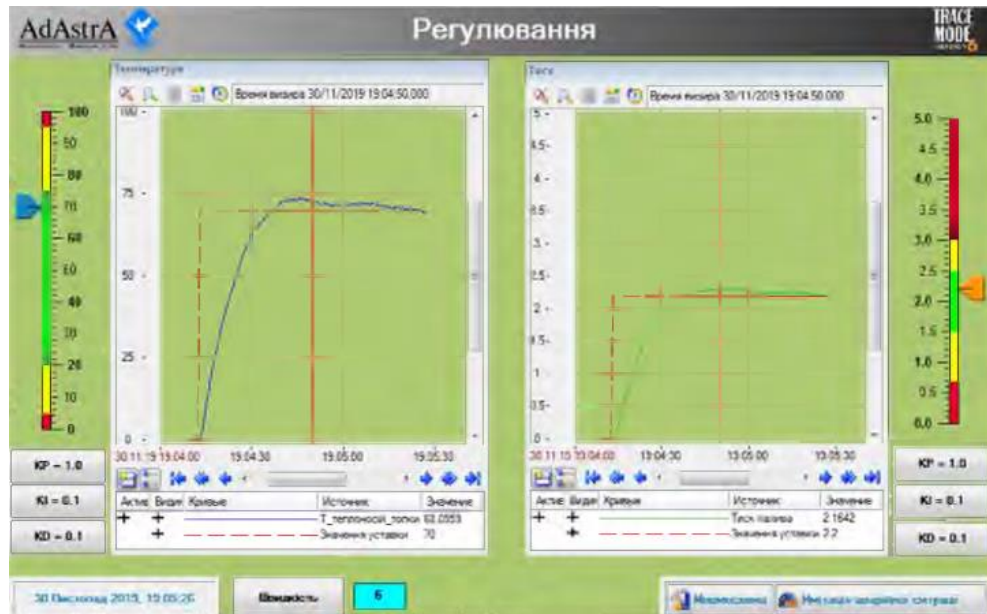


Рис 5.7. Вікно регулювання параметрів

РОЗДІЛ 6

ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

6.1. Вибір пуско-захисної апаратури

Для забезпечення надійного захисту електроспоживачів та стабільного функціонування їх роботи використовуються прилади для керування, запуску та захисту – електротехнічні механізми. Вибір таких механізмів здійснюється відповідно до характеристик напруги, типу струму, певних технічних вимог, потужності тощо.

Вибір електромагнітних пускачів КМ1-КМ3

Магнітні пускачі потрібні для дистанційного управління різноманітними силовими навантаженнями, переважно електродвигунами. Основна функція такого пристрою – забезпечення запуску та реверсу двигунів, а також їх захист від перенавантажень завдяки використанню теплових реле.

Процес вибору електромагнітного пускача базується на таких критеріях:

- а) за типом або серією;
- б) за номінальною напругою, з дотриманням умови:

$$U_{\text{н.мп.}} \geq U_{\text{м.}}, \quad (6.1)$$

де $U_{\text{н.мп.}}$ – номінальна напруга магнітного пускача, В;

$U_{\text{м.}}$ – номінальна напруга електромережі, В;

- в) за номінальним струмом, відповідно до умови:

$$I_{\text{н.мп.}} \geq I_{\text{н.}}, \quad (6.2)$$

де $I_{\text{н.мп.}}$ – номінальний струм магнітного пускача, А;

$I_{\text{н.}}$ – номінальний струм навантаження, А;

- г) за номінальною напругою котушки пускача, згідно з умовою:

$$U_{\text{к.мп}} \geq U_{\text{кк.}} \quad (6.3)$$

Де:

$U_{\text{к.мп}}$ — номінальна напруга котушки магнітного пускача, В;

$U_{\text{кк}}$ — напруга кола керування, В.

- д) За ступенем захисту;
- е) За кліматичним виконанням і категорією розміщення.

Оскільки до електромагнітного пускача КМ1 під'єднано лампи НІ1, для вибору використовуються такі дані:

$$U_{н.с.м.} = 220 \text{ В}; I_{н.л1} = 1.5 * 24 = 36 \text{ А}; U_{н.м.у.} = 24 \text{ В.}$$

Для захисту обрано електромагнітні пускачі АВВ АF09-30-10-11 з такими характеристиками:

- Номінальний струм: 40 А;
- Два нормально відкриті контакти;
- Номінальна напруга котушки: 24 В;
- Номінальний струм допоміжних контактів: 40 А;
- Кліматичне виконання: О4 (згідно з ГОСТ 15150–69);
- Тип: нереверсивний із тепловим реле;
- Ступінь захисту: IP54.

Вибір перемикачів SA1:

Пакетно-кулачкові перемикачі використовуються у схемах керування та регулювання як розмикачі, перемикачі для вольтметрів, амперметрів та для управління асинхронними електродвигунами. Їх технічні характеристики:

- Номінальна робоча напруга: 24–220 В;
- Номінальна сила струму: 1–2,5 А.

У цій схемі обрано пакетний кулачковий перемикач ПВЗ-60 із наступними параметрами:

- Максимальний струм: 6 А при 250 VAC;
- Мінімальний струм: 10 мА при 5 VAC;
- Термін механічної експлуатації: до 1 000 000 циклів;
- Робочий температурний діапазон: від -20 °С до +55 °С;
- Стійкість до вібрації: частота 10–500 Гц із амплітудою 10 м.

Вибір автоматичних вимикачів SF1:

Автоматичні вимикачі необхідні для нечастого вимикання, захисту кабелів, а також захисту споживачів від перевантаження та короткого замикання.

Вибір автоматичного вимикача здійснюється з урахуванням таких умов:

- а) визначення за типом або серією;

б) відповідність номінальній напрузі згідно з умовою:

$$U_{н.ав} \geq U_{м.}, \quad (6.4)$$

де $U_{н.ав}$ — номінальна напруга автоматичного вимикача, В;

$U_{м.}$ — номінальна напруга електромережі, В;

в) вибір за номінальним струмом відповідно до умов:

$$I_{н.ав} \geq I_{н.дв}, \quad (6.5)$$

де $I_{н.ав}$ — номінальний струм автоматичного вимикача, А;

$I_{н.дв}$ — номінальний струм електродвигуна, А;

г) за номінальним струмом теплового розчіплювача:

$$I_{нр} \geq 1,25 \cdot I_{н.дв}, \quad (6.6)$$

де $I_{нр}$ — номінальний струм теплового розчіплювача автоматичного вимикача, А;

1,25 — коефіцієнт, що враховує запас по струму спрацювання теплового розчіплювача;

д) відповідність ступеню захисту від дотику обслуговуючого персоналу до струмопровідних частин, розташованих усередині корпусу, а також від проникнення сторонніх твердих об'єктів і вологи згідно з ГОСТ 14254-69;

е) вибір за кліматичним виконанням і категорією розміщення відповідно до ГОСТ 11543-70 і ГОСТ 15150-69.

Оскільки до автоматичних вимикачів SF1 підключені пристрої SF2-SF5, для вибору автоматичного вимикача застосовуються наступні дані:

$$U_{н.м.}=220\text{В}; I_{н.м.}=0.5 \cdot 3 + 3 = 4.5\text{А}.$$

Відповідно до умов виконуємо вибір автоматичного вимикача.

Вихідні дані для підбору автоматичних вимикачів наведено на прикладі SF1:

Характеристики — АВВ SH202-C6; Номінальна напруга: 220 В; Номінальний струм: 6 А; Кількість полюсів: 2; Тип характеристики: А; Номінальна відключаюча здатність: 6000 А; Захист: IP20.

Оскільки до автоматичних вимикачів SF2 підключено XS, для вибору автоматичного вимикача використовуються такі дані:

$$U_{н.м.}=220В; I_{н.}=2.7А.$$

Характеристики — АВВ S202-C3, 3 А; Номінальна напруга: 220 В; Номінальний струм: 3 А; Кількість полюсів: 2; Тип характеристики: А; Номінальна відключаюча здатність: 6000 А; Захист: IP20.

Оскільки до автоматичних вимикачів SF3, SF4, SF5 підключені D1, G1-G2, для вибору автоматичного вимикача використовуються такі дані:

$$U_{н.м.}=220В; I_{н.}=0.32А.$$

Характеристики — АВВ S202-C0,5; Номінальна напруга: 220 В; Номінальний струм: 0,5 А; Кількість полюсів: 2; Тип характеристики: А; Номінальна відключаюча здатність: 6000 А; Захист: IP20.

Оскільки до автоматичних вимикачів SF7, SF8, SF9 підключені M1, M3, M3, для вибору автоматичного вимикача використовуються такі дані:

$$U_{н.м.}=380В; I_{н.}=7.89А.$$

Характеристики — АВВ S203-C8, тип С, 8 А; Номінальна напруга: 380 В; Номінальний струм: 8 А; Кількість полюсів: 3; Тип характеристики: А; Номінальна відключаюча здатність: 6000 А; Захист: IP20.

Оскільки автоматичні вимикачі SF6 підключені до SF7, SF8 та SF9, для їх вибору застосовуємо наступні технічні характеристики:

- Номінальна напруга ($U_{н.м.}$): 380 В
- Номінальний струм ($I_{н.}$): 24 А
- Модель: АВВ SH203-C25
- Тип характеристик: С, 25 А
- Кількість полюсів: 3
- Номінальна відключаюча здатність: 6000 А
- Захисний ступінь (IP): 20

Таким чином, вибір автоматичного вимикача базується на відповідності зазначеним параметрам.

Вибір кнопок керування електродвигунами SB1–SB3

Кнопки серій KE та ПKE призначені для комутації кіл керування з параметрами до 500 В змінного струму (50 Гц) і до 220 В постійного струму. Виходячи з принципової схеми, обрано кнопки типу МТВ2-BLZ1583 для елементів SB1, SB2, SB3, SB4, SB5 та SB6.

Згідно із функціональними призначеннями:

- Чорні кнопки (SB2, SB4, SB6) реалізують функцію "Старт".
- Червоні кнопки (SB1, SB3, SB5) виконують функцію "Стоп".

Габаритне виконання відповідає умовам стандарту ГОСТ 15150-69, а ступінь захисту визначено за ГОСТ 15543.1-89 і становить IP40. Кнопки оснащені циліндричним штовхачем із пластмасовим фронтальним кільцем.

При виборі керуючих кнопок дотримуються наступної умови:

$I_{п} > I_{к}$, де:

- $U_{п}$ і $I_{п}$ — номінальна напруга та струм кнопок,
- $U_{к}$ і $I_{к}$ — параметри керованого кола.

Кнопковий пост МТВ2-BLZ1583 задовольняє цим умовам, оскільки його номінальний струм становить 10 А. Кнопки дозволяють експлуатацію в режимах тривалого, переривчасто-тривалого, короткочасного та повторно-короткочасного навантаження.

Вибір сигнальних ламп кола керування HL1-HL4, EL1

Для світлової сигналізації в колі керування (HL1 – HL4) обрані сигнальні лампи МТ22 (зелений колір) із струмом спрацювання 15 мА. Потужність складає 3,3 Вт. Ступінь захисту відповідає IP54 (згідно з ГОСТ14254-96). Гарантований строк служби становить 10 років, а гарантійне напрацювання на відмову – 25 000 годин. Для забезпечення належної надійності передбачено резервування ламп шляхом паралельного підключення ще двох ідентичних елементів.

Обрання датчика температури ВК1-ВК2.

До таких датчиків висуваються наступні вимоги:

- Лінійність та однозначність статичної характеристики (допустима нелінійність не більше 0,1...3%);
- Висока чутливість;

- Стабільність характеристик протягом періоду експлуатації;
- Швидкодія;
- Стійкість до впливу хімічних факторів як контрольованого, так і навколишнього середовища (при умові, що первинні перетворювачі захищені оболонкою);

- Мінімальний зворотний вплив на параметр, що контролюється;
- Зручність у монтажі та обслуговуванні.

Вибір вимірювальних перетворювачів здійснюється у два етапи:

- Спочатку відповідно до типу контрольованого параметра;
- Потім шляхом визначення типорозміру із каталогів.

Обрання датчика рівня В1-В2.

Основні вимоги до датчиків:

- Лінійність та однозначність статичної характеристики (допустима нелінійність не перевищує 0,1...3%).

- Чутливість.

- Стабільність характеристик у часі.

- Швидкодія.

- Стійкість до хімічних впливів як з боку контрольованого середовища, так і оточуючих чинників (первинні перетворювачі повинні бути розміщені в захисній оболонці).

- Мінімальний зворотний вплив на контрольований параметр.

- Зручність у монтажі та обслуговуванні.

Таблиця 6.1.

Параметри датчику рівня ДС.ПВТ.М18Х1

Робочій тиск	2.5 Мпа
Робоча температура	250 С
Захист	IP65

6.1.1. Обрання кабелів та проводів

Номінальний струм живлення магнітних пускачів і проміжних реле не перевищує 5 А, тому для підключення обираємо провід ПВС 3х1.5 (за стандартом ГОСТ 6323-79). Це провід з мідними жилами перерізом 1.5 мм², який має полівінілхлоридну ізоляцію.

Вибір живильного кабелю для шафи керування

Тривало допустимий струм шафи керування визначається за формулою:

$$I_{ш.тр.доп.} = \sum I_{тр.доп.} = 4.5 \text{ А} \quad (6.7)$$

$\sum I_{тр.доп.}$ — сума тривало допустимих струмів електродвигуна та кола керування.

Для живлення шафи обрано кабель КГНВ 2х8 мм² відповідно до ГОСТ 16442-70. Це кабель з мідними жилами, полівінілхлоридною ізоляцією, зовнішньою полівінілхлоридною оболонкою та перерізом силових жил 8 мм², де тривало допустимий струм складає 6 А.

Також тривало допустимий струм шафи керування розраховується за формулою:

$$I_{ш.тр.доп.} = \sum I_{тр.доп.} = 25 \text{ А} \quad (6.8)$$

Для цього використовується кабель КГНВ 3х8 мм² (ГОСТ 16442-70). Це кабель з мідними жилами, полівінілхлоридною ізоляцією, зовнішньою полівінілхлоридною оболонкою, переріз силових жил якого становить 8 мм², що допускає тривало допустимий струм до 30 А.

6.2. Розробка принципової схеми

Базуючись на функціональній схемі, принципова схема відображає повний склад та взаємозв'язки між електричними елементами, детально пояснюючи принципи її роботи.

Система автоматичного керування функціонує на основі показників температури і вологості. Відповідні сигнали передаються через клемну збірку до реле. Після запуску системи вмикається електродвигун М1, який виконує функцію нагрівання повітря в шахті. Одночасно електродвигун М2 забезпечує

вентиляцію шахти, зокрема регулює температуру в ній та сприяє охолодженню зерна.

Для переходу системи на ручний режим використовується перемикач SA1. Управління в ручному режимі здійснюється за допомогою кнопок SB1-SB5: SB1 відповідає за зупинку системи, SB2 запускає нагрівач повітря, SB3 припиняє роботу електропривода, а SB4 і SB5 призначені для вмикання та вимикання вентилятора з метою регулювання параметрів повітря.

6.3. Розробка схеми з'єднань

Схема з'єднань включає всі компоненти системи відповідно до вимог ГОСТ 2.702-75. У межах дипломної роботи її реалізовано, дотримуючись таких загальних правил:

- Схема з'єднань розроблена для щита керування ЩПК-ЗП-2 (550+400+200) У4ІР00 згідно з ОСТ 36.13-76, який містить усі необхідні комутаційні пристрої.
- Елементи, такі як КМ1-КМ3, КВ1, КВ2, КК1, розташовані на задній панелі щита керування відповідно до ГОСТ 2.702-75.
- Забезпечено відповідність нормам маркування кабелів та ліній зв'язку, які об'єднують всі компоненти системи, згідно з ГОСТ 2.710-81.

Під час розробки схеми було застосовано адресний метод і враховано такі основні аспекти:

- Щит керування УУ-7-0863 представлено в одній площині, де показано:
- Передню панель із розміщенням автоматичних вимикачів QF, кнопок управління SB1-SB5, сигнальних ламп HL1-HL4 і перемикача режимів.
- Виводи затискачів кожного елемента позначено колами із зазначенням їхнього заводського маркування; у випадках відсутності заводського маркування використовуються умовні позначення арабськими цифрами разом із пояснювальними написами.

Адресний метод вважається найефективнішим і найпоширенішим. Його суть полягає в тому, що лінії зв'язку між елементами апаратів, змонтованих на

щиті, не відображаються безпосередньо на схемі. Натомість у місцях підключення проводів до кожного апарата зазначають цифрову або літерно-цифрову адресу. Це дозволяє уникати перевантаження схеми зайвими лініями зв'язку й забезпечує її зручність у використанні.

6.4. Розробка схеми підключень

Відповідно до ГОСТ 2.702-75, схема підключень відображає зовнішні з'єднання щитів, пультів, апаратів і подібного обладнання. Під час розробки такої схеми враховуються креслення приміщень, принципів та функціональні схеми, а також специфікації приладів, апаратури й обладнання.

Елементи з'єднань, прилади поза щитами, комутаційні затискачі, первинні перетворювачі, засоби автоматизації, електропроводку і кабелі, а також коробки кінців термопар, встановлені за межами щитів, позначаються графічними символами.

Шафи, прилади, апарати та пульти схематично позначаються у вигляді кола або прямокутника з підписами всередині відповідних фігур. На зв'язкових лініях вказуються номер проводки, переріз та довжина кабелю чи проводу.

6.5. Розробка загального виду щита керування

Розподільний щит, який використовується в системах автоматизації, виконує функції управління, сигналізації та контролю за станом об'єкта. Його основним призначенням є забезпечення зв'язку між об'єктами управління і оператором системи. Як правило, щит встановлюється у спеціально підготовлених приміщеннях.

У конструкції щита інтегровано пристрої для сигналізації, засоби з керування і управління, а також системи захисту, блокування і контролю.

Вибір моделі щита здійснюється на основі кількості обладнання, особливостей компонування та відповідності стандартним технічним характеристикам.

Для застосування пропонується модель щита ЩПК-ЗП-2 (5500+400+200) У4ІР00 ОСТ 36.13–76. Це панельний щит із закритою правою стороною,

виконання №2, габаритними розмірами 550x400x200 мм, кліматичним виконанням V, категорією розташування 4 та ступенем захисту IP00.

6.6. Розробка алгоритму роботи системи

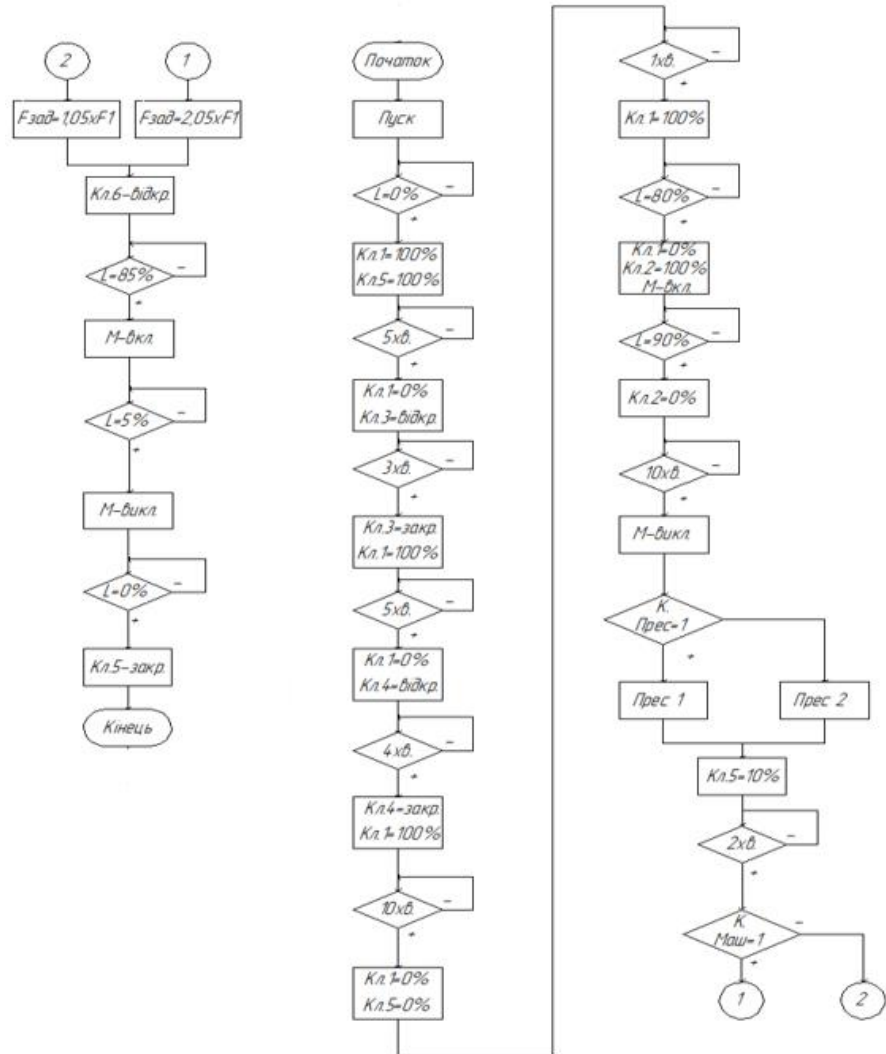


Рис 6.1. Схема алгоритму роботи системи

РОЗДІЛ 7

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

Монтаж та експлуатація електрообладнання мають здійснюватися виключно відповідно до чинних нормативних актів з охорони праці, а також регламентованих вимог експлуатаційної документації.

Безпека функціонування електричних систем повинна забезпечуватися шляхом дотримання таких основних умов:

- надійної ізоляції;
- безпечного розташування струмопровідних елементів;
- ефективного заземлення або занулення корпусів електрообладнання;
- використання попереджувальних, блокувальних і захисних знаків.

Електроустановки, які щойно введені в експлуатацію або пройшли ремонт, потребують проведення приймальних випробувань згідно з діючими нормами. Їх введення в експлуатацію можливе лише після отримання відповідного акта прийняття комісією.

Функціонування електричних систем дозволяється виключно за умов наявності кваліфікованого електротехнічного персоналу, а також офіційно призначеної відповідальної особи для нагляду за їх роботою. Працівники, залучені до обслуговування таких систем, зобов'язані володіти знаннями щодо нормативних вимог у межах своєї професійної компетенції.

Для кожної діючої електроустановки на підприємстві необхідно забезпечити наявність технічної документації з експлуатації, проектної документації, акта введення об'єкта в експлуатацію, паспорта на обладнання, а також схеми виконання електричних з'єднань, блокувань, сигналізації та розміщення пристроїв. Окрім цього, потрібні протоколи проведених електричних випробувань, вимірювання та документи, що засвідчують налаштування й перевірку окремих компонентів системи.

Для уникнення випадкового контакту струмопровідні частини повинні бути належним чином захищені. Крім того, усі електродвигуни мають бути

заземлені та оснащені ефективними засобами захисту від коротких замикань і перевантажень.

Металеві частини електроустановок на 380/220 В із плаваючою нейтраллю, які можуть опинитися під напругою через пошкодження ізоляції, повинні бути заземлені у відповідності до вимог правил улаштування електроустановок. Категорично заборонено розташовувати заземлювачі у місцях, де проходять люди або тварини, біля входу на територію чи на вигульних майданчиках.

Зовнішні електричні лінії слід прокладати в сталевих або пластикових трубах чи коробах у зонах, де вони можуть піддаватися механічним пошкодженням. Електропроводка і обладнання в приміщеннях із підвищеним вмістом пилу, таких як кормосховища, гноєсушильники, сховища трав'яного борошна тощо, повинні бути оснащені вибухозахищеними компонентами.

Електричні проводи, що з'єднують машини з іншим обладнанням у місцях потенційної загрози механічного пошкодження, мають бути захищені шляхом прокладання в сталевих або пластикових трубах, металевих гільзах, коробах чи повітряних каналах. Монтаж вимикачів або плавких запобіжників у ланцюгах захисного заземлення строго заборонений.

Нейтраль внутрішньої електропроводки, яка є заземленою, повинна бути відповідно позначена або пофарбована. Надійність заземлення та його загальний технічний стан необхідно перевіряти щорічно шляхом проведення вимірювань, а також після кожного капітального ремонту чи тривалого періоду простою системи. У разі фіксації відхилень опору заземлення від нормативних значень, визначених правилами, слід оперативно вжити заходів щодо його приведення до стандартів.

Візуальну перевірку стану заземлювачів або шин потрібно здійснювати кожні 6 місяців, а для вологих і особливо мокрих приміщень – кожні 3 місяці. У разі виникнення несправності або виходу з ладу заземлювального пристрою система негайно відключається до моменту повного усунення поломки.

Роз'єми повинні бути захищені від випадкового контакту зі струмопровідними частинами та розташовані так, щоб їх підключення не

створювало труднощі. Розетки для з'єднання випромінювальних приладів із джерелом живлення мають бути обладнані третім захисним контактом.

У приміщеннях із підвищеною небезпекою (вологою понад 90% та запиленістю понад 800 мг/м³) необхідно використовувати герметичні розетки, які включають спеціальні контакти для підключення до захисного нульового провідника. Штекерні з'єднувачі (розетки й вилки), які застосовуються в мережах напругою 12-42 В, повинні конструктивно відрізнитися від стандартних, щоб запобігти можливості встановлення вилок 12-42 В у розетки для 127-220 В, унеможливаючи таким чином помилки.

Огляд, технічне обслуговування і ремонт приймачів та електроспоживачів дозволяється здійснювати тільки після їх відключення від електромережі. Варто встановлювати плакат із написом «Не вмикати! Працюють люди!». Роботи на механізмах та апаратах з електроприводами можуть виконуватись лише особами з групою допуску з електробезпеки не нижче І.

Виробничі, допоміжні та складські будівлі повинні бути облаштовані системами блискавкозахисту відповідно до монтажної інструкції. Для зменшення ризику потрапляння кульової блискавки в будівлю перед початком грози слід уникнути протягів, закривши двері, вікна, люки та всі щілини чи отвори.

У разі надзвичайних ситуацій слід дотримуватися стандартів безпеки. У випадках аварії, таких як появи сторонніх звуків у роботі пристрою, запаху гару, несправностей, іскріння електроприладів, появи напруги на корпусі, перегріву підшипників чи інших деталей апаратури, порушення цілісності захисних механізмів або засмічення вихідних отворів пристроїв, необхідно негайно зупинити роботу машин і апаратів відповідно до встановлених правил експлуатації. У першу чергу потрібно вимкнути подачу електроенергії, пари, води, пального чи хімічних розчинів.

У разі виникнення небезпеки для вашого здоров'я або життя варто негайно покинути загрозову зону та повідомити про це працівників, які перебувають поруч. Виконання аварійних ремонтів і усунення несправностей без зупинки

роботи машин та обладнання суворо забороняється. Після аварійної зупинки та перед повторним запуском обладнання потрібно звільнити його від оброблюваних матеріалів.

Якщо виникла пожежа, слід терміново повідомити керівника об'єкта та службу пожежної охорони (за допомогою телефону чи кур'єра), скористатися звуковими сигналами (сиреною, радіостанцією або дзвінком), після чого розпочати гасіння пожежі доступними засобами: вогнегасником, пожежним краном, піском тощо.

Під час гасіння полум'я горючу речовину потрібно ізолювати від доступу кисню і повітря, а також охолоджувати її до температури, за якої горіння припиняється. При цьому слід уникати появи інших небезпечних факторів, таких як вибухи, обвали чи короткі замикання електродоліній. Якщо обсяг горючого матеріалу великий, гасіння відбувається поетапно, окремо для кожної ділянки.

Легкозаймисті рідини, як-от паливо, гасять вогнегасником, спрямовуючи струмінь під основу полум'я. Можна також засипати палаючу ділянку піском, землею чи накривати мокрим брезентом. Для гасіння вибухонебезпечних речовин, наприклад кормового чи борошняного пилу або аміаку у вибуховій концентрації, слід використовувати струмінь води з гідранта.

Тверді горючі матеріали (сіно, солом'я та інші) гасять водою, засипають піском чи землею або вкривають покривним матеріалом. Якщо загорілися лінії електропередачі, їх потрібно негайно відключити від мережі за допомогою автоматичного вимикача. Якщо це неможливо, проводи перерізають інструментом із сухим дерев'яним держак'ом перед місцем займання. Під час цієї операції необхідно стати на суху дерев'яну основу або гумовий килимок і вдягнути гумові рукавички чи додатково ізолювати руки теплою тканиною.

Для гасіння електроприладів дозволяється використовувати лише сухий пісок.

У разі виникнення пожежі в мобільному транспортному засобі, за можливості, рекомендується перемістити його у безпечне місце, подалі від інших об'єктів, де він не становитиме додаткової небезпеки. Після цього слід

деактивувати пожежну сигналізацію та розпочати гасіння пожежі відповідно до інструкцій.

При відключенні технологічного обладнання для сушіння зерна в аварійних ситуаціях необхідно суворо дотримуватися заходів безпеки, спрямованих на запобігання травмам і нещасним випадкам. У таких випадках забороняється торкатися оголених проводів, металевих частин обладнання або інших елементів, якщо існує підозра на наявність електричної напруги чи пошкодження електричних кабелів. Також слід уникати наближення до небезпечних механізмів, які можуть спричинити травму.

Для захисту навколишніх матеріалів та інших предметів рекомендовано використовувати спеціальні засоби індивідуального захисту, серед яких гумові рукавички, ізоляційне взуття, вогнегасники тощо.

У разі виникнення нещасного випадку першочерговим завданням є усунення фактора небезпеки, наприклад, припинення подачі електроенергії, пари, хімічних розчинів чи зупинка руху механізмів. Потерпілому необхідно надати первинну (долікарську) медичну допомогу та забезпечити його доставку до медичного закладу. Якщо це можливо без створення загрози здоров'ю та життю людей або порушення безперервності технологічного процесу, важливо зберегти обстановку на робочому місці та стан обладнання для подальшого розслідування причин інциденту.

РОЗДІЛ 8

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ

Використання сучасних засобів автоматизації сприяє підвищенню продуктивності праці на виробництві, скороченню термінів окупності вкладень та зниженню собівартості продукції.

Показник зведених витрат відіграє важливу роль у визначенні економічної ефективності капіталовкладень. Він враховує як часткові інвестиції, так і експлуатаційні витрати, розраховані на рік. Формула для обчислення зведених витрат виглядає наступним чином:

$$Взв = С + Ен \cdot К,$$

де Взв — зведені витрати у грн./рік;

С — річні експлуатаційні витрати у грн./рік;

Ен — номінальний коефіцієнт ефективності капіталовкладень в 1/рік;

К — капітальні витрати у грн.

Річні експлуатаційні витрати охоплюють такі складові, як:

- витрати на поточний ремонт обладнання та засобів автоматизації (Спт);
- витрати на оплату праці персоналу (Сз);
- витрати на необхідні допоміжні матеріали (Сд);
- затрати на використання енергоресурсів (Се).

Фонд оплати праці обслуговуючого персоналу (Сз) розраховується за формулою:

$$Cz = N \times Z \times Ззм \cdot T \quad (7.1)$$

де:

N — кількість працівників, які беруть участь у зміні (N = 2);

Z — кількість змін на добу (Z = 2);

Ззм — заробітна плата одного працівника за зміну (500 грн.);

T — кількість робочих днів на рік (T = 251).

За формулою, маємо такі результати:

$$Cz = 2 \times 2 \times 500 \times 251 = 502\,000 \text{ грн.}$$

Амортизаційні відрахування становлять 15% від балансної вартості обладнання. У аналогічному процентному співвідношенні визначаються витрати на ремонт обладнання, яке вийшло з ладу, — вони складають 7% від тієї ж балансної вартості.

Для розрахунку витрат електроенергії використовуються витрати самої енергії та тариф на неї, що дорівнює 0,168 грн/кВт·год. Сума витрат на електроенергію становить $C_e = 4972$ грн. Інші прямі витрати розраховуються у розмірі 1% від загальних експлуатаційних витрат.

Загальні витрати визначаються за формулою:

$$C = C_z + C_a + C_{\text{пр}} + C_e + C_d. \quad (7.2)$$

Розрахунок:

$$C = (502000 + 0,14 \cdot 7671 + 0,05 \cdot 7671 + 4972) \cdot 1,01 = 508429,49 \text{ грн.}$$

Точна балансова вартість обладнання важко піддається визначенню, проте орієнтовна сума виглядає наступним чином:

$$B_v = B_c + B_d + B_r + B_m,$$

$$\text{Де: } B_c = 15\,000 \text{ грн (вартість клапана, 1 шт.),}$$

$$B_d = 250 \text{ грн (вартість одного елемента),}$$

$$B_r = 860 \text{ грн (вартість регулятора, 1 шт.),}$$

$$B_m = 40\,000 \text{ грн (вартість виконавчого механізму, 1 шт.).}$$

Загалом:

$$B_v = 15\,000 + 250 + 860 + 40\,000 = 56\,110 \text{ грн.}$$

Балансна вартість обладнання входить до складу капітальних вкладень, які включають: балансну вартість техніки (B_v), витрати на монтаж і доставку (B_m), прокладання електропроводки ($B_{\text{пр}}$), а також автоматизацію (B_i).

Витрати на придбання засобів автоматизації становлять 56 110 грн.

Вартість доставки, зберігання та монтажу приймається в середньому на рівні 25% від загальної вартості засобів автоматизації.

Витрати на прокладання електропроводки враховують як вартість самого кабелю, так і витрати на роботи з його встановлення. Інші витрати приймаються рівними 2% від суми капітальних вкладень за формулою:

$$K_B = B_B + B_M + B_{Pr} + B_i. \quad (7.3)$$

Підставляючи відомі значення, отримуємо:

$$K_B = (56\,110 + 0,25 \cdot 56\,110 + 0,11 \cdot 56\,110) \cdot 1,02 = 77\,835.$$

Загальні зведені витрати розраховуються за формулою:

$$B_{зв} = 31\,346 + 0,15 \cdot 77\,835 = 43\,021.$$

Підставляючи дані у вираз, отримуємо:

$$B_{заг} = C_{заг} + E_H \cdot 10 \cdot K,$$

$$B_{заг} = 43\,021 + 0,15 \cdot 10 \cdot 77\,835 = 159\,773.$$

У собівартість продукції входять загальні зведені витрати разом із питомими витратами на сировину, зерно, паливо та інші прямі виробничі витрати. Собівартість однієї одиниці продукції визначимо шляхом ділення повних витрат за період на обсяг продукції, виготовленої за цей строк:

$$C_B = B / Q,$$

де Q — кількість виготовленої продукції протягом року ($Q = 500\,000$ тонн),

а B — повна сума витрат на виробництво ($B = 80\,000$ грн).

Розрахунок собівартості:

$$C_B = 80\,000 / 500\,000 = 0,16.$$

Прибуток розраховується за формулою:

$$Pr = C - C_B,$$

де C — ціна одиниці продукції.

$$Pr = 1 - 0,16 = 0,84.$$

Рівень рентабельності виробництва розраховується за формулою:

$$R = Pr / C_B = 0,84 / 0,16 = 5\%.$$

Далі представлений розрахунок строку окупності капітальних інвестицій:

Термін окупності:

$$T = K_k / G = 133\,945 / 159\,773 \approx 1 \text{ рік},$$

де K_k – витрати, пов'язані з розробкою та впровадженням нової системи, грн.

Таким чином, строк окупності нового контролера для зерносушарки становить 1 рік.

Ефективність роботи зерносушарки оцінюється за допомогою такого показника, як тоннопроцент. Цей параметр дозволяє вирахувати витрати на сушіння однієї тони зерна на 1% вологості. Значення у м³/тоннопроцент відображає витрати природного газу для сушіння однієї тони зерна на 1%.

Розглянемо приклад: якщо необхідно висушити зерно від початкової вологості 20% до кінцевої 14%, при цьому витрачається 200 м³ газу з продуктивністю сушарки 25 тон на годину, то витрати газу будуть:

$$200 \text{ м}^3 / 6 \text{ пунктів вологості} / 25 \text{ т/год} = 1,33 \text{ м}^3/\text{тоннопроцент}.$$

Процентний показник зменшення вологості можна обчислити за формулою Дюваля:

$$X_b = 100 \times (a - b) / (100 - b), \quad (7.4)$$

Де: X_b – процент зменшення вологості, a – початкова вологість, b – кінцева вологість.

Наприклад, якщо потрібно знизити вологість із 28% до 14%, розрахунок виглядає наступним чином:

$$X_b = 100 \times (28 - 14) / (100 - 14) = 16,3\%.$$

Отримавши цей показник, можна визначити вартість витраченого газу на сушіння зерна:

$$0,98 \text{ м}^3/\text{тоннопроцент} \times 10 \text{ грн/м}^3 \times 14 (\%) = 137,2 \text{ грн за тонну}.$$

Таким чином, для зменшення вологості зерна з 28% до 14% із використанням представленої системи, при вартості газу 10 грн за м³, потрібно витратити 137.2 грн на кожну тонну.

ВИСНОВКИ

Під час виконання дипломного проекту було здійснено аналіз шахтної зерносушарки, розглянуто економічний та технологічний аспекти, а також проведено дослідження зерносушарки шахтного типу як об'єкта автоматизації. Було розроблено автоматизовану систему контролю та регулювання температурного режиму в шахтній зерносушарці.

Дослідження проводилися з використанням логічного контролера Arduino Mega 2560 Rev3. Було вивчено амплітудно-частотну характеристику системи. Амплітудний і фазовий запас стійкості задовольняють вимоги до стійкості системи.

Аналізуючи перехідні характеристики, визначили основні показники якості системи, такі як час регулювання, перерегулювання і коливання за сталої похибки. З огляду на отримані результати, система виявилася стійкою й придатною для практичного використання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Методичні вказівки до розробки дипломної роботи для студентів із спеціальності 8.05020201 - Автоматизація управління технологічними процесами/ Укл. Лисенко В.П.,Шворов С. А., Коваль В.В.,Решетюк В.М., Мірошник В. О., Шуруб Ю. В., Осипенко В. В., Цигульов І. Т., Руденський А. А., Гладкий А. М.,Болбот І. М., Лукін В.Є., - К.: НУБіП, - 2014.
2. Автоматизація технологічних процесів і систем автоматичного керування: підручник в 3 ч. Ч.3: Автоматизація технологічних процесів і систем автоматичного керування / Барало О.В. - Тарашанський агротехнічний коледж, 2014.– 8с.
3. Теорія автоматичного керування: метод. вказівки і завд. до викон. домашньої контр. роб. та самостійної роботи для студ. напр. підг. 6.050202—Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології// С.Г. Бондаренко, О.В. Сангінова. – К. : НУХТ, - 2011. Чвертко Є.П./Технічні засоби автоматизації/Чвертко Є. П. доц. О. В. Прохоренко : - К.: 2015.
6. <https://bstudy.net/1003233/agro/zernosushilki>
7. https://studme.org/277728/tovarovedenie/shahtnye_sushilki
8. <https://fyi.extension.wisc.edu/energy/files/2016/09/Grain-drying-Systems-GEAPS-2002-secured.pdf>
9. <https://www.fao.org/4/t1838e/T1838E0w.htm#Mechanical%20dryers>
10. https://www.mecmargroup.com/en/news/how_does_a_grain_dryer_work_discover_all_you_need_to_know-46
11. <https://systemax.ua/ua/elektrodivigateli/trehfaznye-obshepromyshlennye-elektrodivigateli/air/air132m4--11-kvt-1500-ob-min-.html>
12. <https://arduino.ua/ru/prod4497-datchik-temperatury-i-vlajnosti-sht30-i2c>
13. <https://buklib.net/books/23044/>
14. Francis Perea – Arduino Essentials 2015.

ДОДАТОК А

```
#include <DHT.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

// Визначення піна для DHT22
#define DHT1_PIN 5
#define DHT2_PIN 4
#define DHTTYPE DHT22

// Ініціалізація датчика DHT22
DHT dht1(DHT1_PIN, DHTTYPE);
DHT dht2(DHT2_PIN, DHTTYPE);

// Ініціалізація LCD-дисплея (адреса I2C, наприклад, 0x27, розмір 16x2)
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  // Початок серійного зв'язку для налагодження
  Serial.begin(9600);

  // Ініціалізація датчика
  dht1.begin();
  dht2.begin();

  // Ініціалізація LCD
  lcd.init();
  lcd.backlight(); // Увімкнення підсвітки
  lcd.setCursor(0, 0); // Початок першої строки
  lcd.print("Temp: ");
  lcd.setCursor(0, 1); // Початок другої строки
```

```
lcd.print("Humidity: ");
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  // Зчитування даних з першого датчика
  float humidity1 = dht1.readHumidity();
  float temperature1 = dht1.readTemperature();

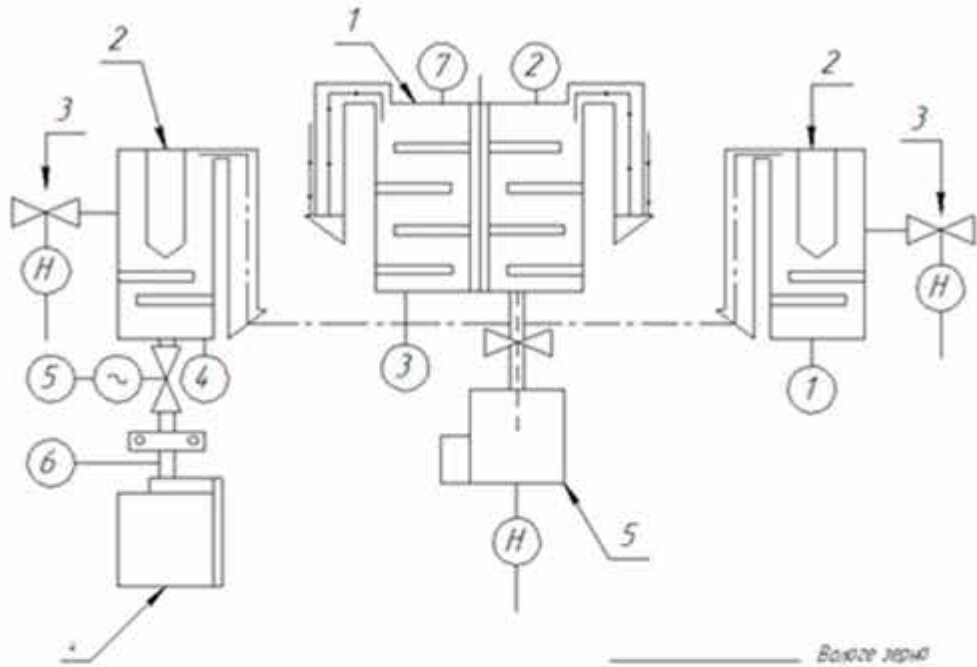
  // Зчитування даних з другого датчика
  float humidity2 = dht2.readHumidity();
  float temperature2 = dht2.readTemperature();

  // Перевірка на помилки читання з датчиків
  if (isnan(humidity1) || isnan(temperature1) || isnan(humidity2) || isnan(temperature2))
  {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Sensor Error!");
    delay(2000);
    return;
  }

  // Визначення допустимої похибки
  const float tempTolerance = 3.0; // Допустима похибка для температури (1°C)
  const float humTolerance = 2.0; // Допустима похибка для вологості (2%)

  // Перевірка розбіжностей з урахуванням похибки
  bool tempMismatch = abs(temperature1 - temperature2) > tempTolerance;
  bool humMismatch = abs(humidity1 - humidity2) > humTolerance;
```

```
if (tempMismatch || humMismatch) {  
    // Якщо є розбіжність, вивести повідомлення про помилку  
    lcd.clear();  
    lcd.setCursor(0, 0);  
    lcd.print("Data Mismatch!");  
    if (tempMismatch) {  
        lcd.setCursor(0, 1);  
        lcd.print("Temp Diff: ");  
        lcd.print(abs(temperature1 - temperature2));  
    } else if (humMismatch) {  
        lcd.setCursor(0, 1);  
        lcd.print("Hum Diff: ");  
        lcd.print(abs(humidity1 - humidity2));  
    }  
} else {  
    // Якщо дані збігаються, вивести середні значення  
    lcd.clear();  
    lcd.setCursor(0, 0);  
    lcd.print("Temp: ");  
    lcd.print((temperature1 + temperature2) / 2);  
    lcd.print(" C");  
    lcd.setCursor(0, 1);  
    lcd.print("Hum: ");  
    lcd.print((humidity1 + humidity2) / 2);  
    lcd.print(" %");  
}  
// Затримка 2 секунди перед наступним зчитуванням  
delay(2000);  
}
```



_____ Вологе зерно
 - - - - - Сухе зерно
 Тепловий елемент
 - · - · - · Відпрацьований тепловий елемент збокине підпра

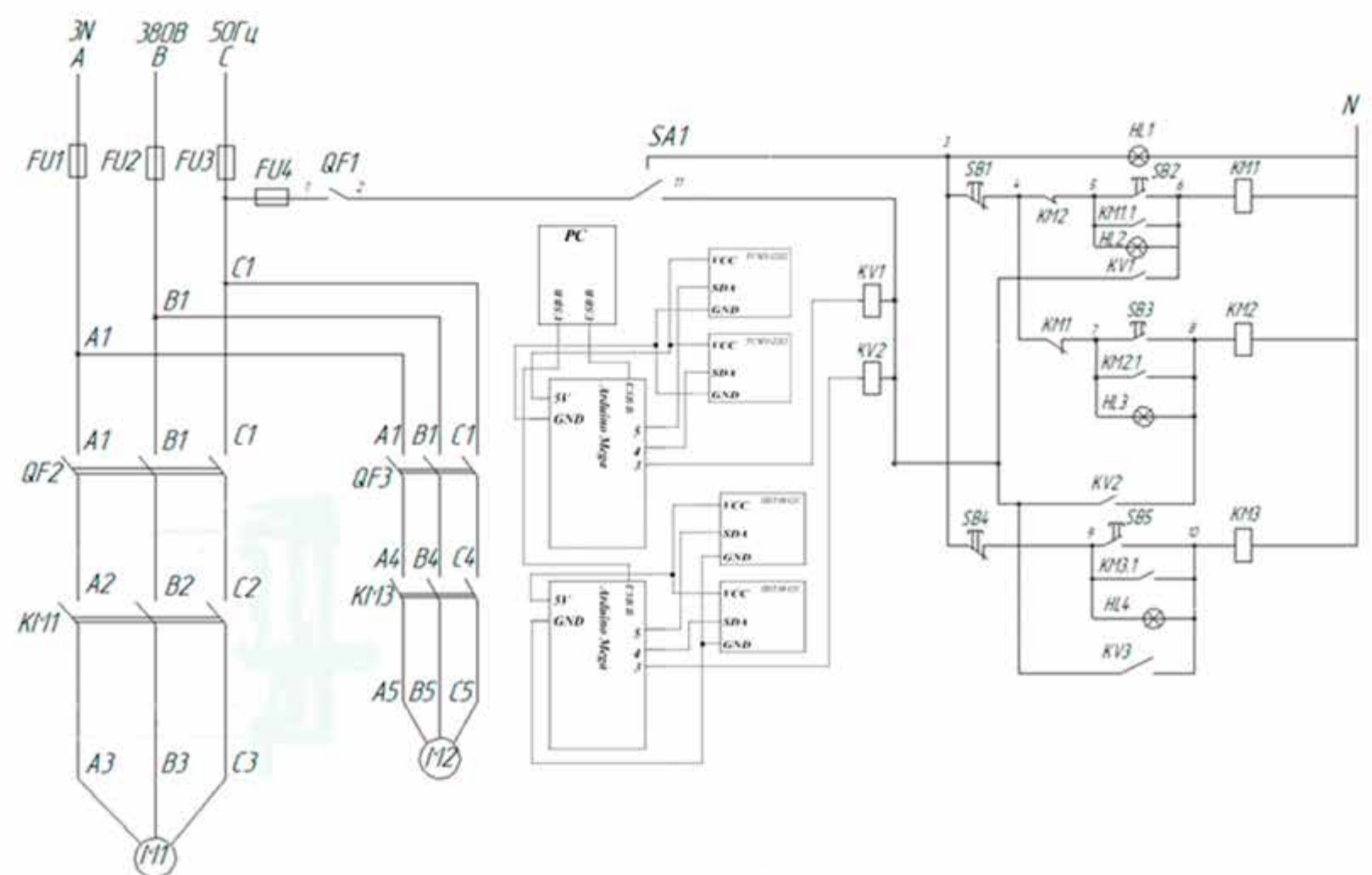
	2	3	1	4	5	6	7
Прилади на місці	TE 2-0	TI 2-0	TE 2-0	TE 2-0	TI 2-0	TE 2-0	TI 2-0
Прилади в щиті		TI 2-0	TI 2-0	TI 2-0	TI 2-0	TI 2-0	TI 2-0

І.А.С. №...
 Лист і дата...
 Сторінка №...
 Лист і дата...
 Вказівка №...
 Лист і дата...

				02.06.- №1667 "С". 2024.09.26.008TX		
Лист	№ докум.	Лист	Дата	Функциональная схема шахты зерносушиарки		
Рисувач	Михайло КВ					
Проб	Шушман ІТ			Лист	Макс	Максималь
І контрол						11
І контрол				Лист	Листов	1
Мод				Деталізація і функціональна схема електро-автоматичної системи управління сушінням зерна в шахтній сушарці № 3273 Івано-Франківська обл.		
				Копія		
				Формат А3		

02.06.- №1667 "С". 2024.09.26.008E1

Лист № 001
Лист № 002
Лист № 003
Лист № 004
Лист № 005
Лист № 006
Лист № 007
Лист № 008
Лист № 009
Лист № 010
Лист № 011
Лист № 012
Лист № 013
Лист № 014
Лист № 015
Лист № 016
Лист № 017
Лист № 018
Лист № 019
Лист № 020

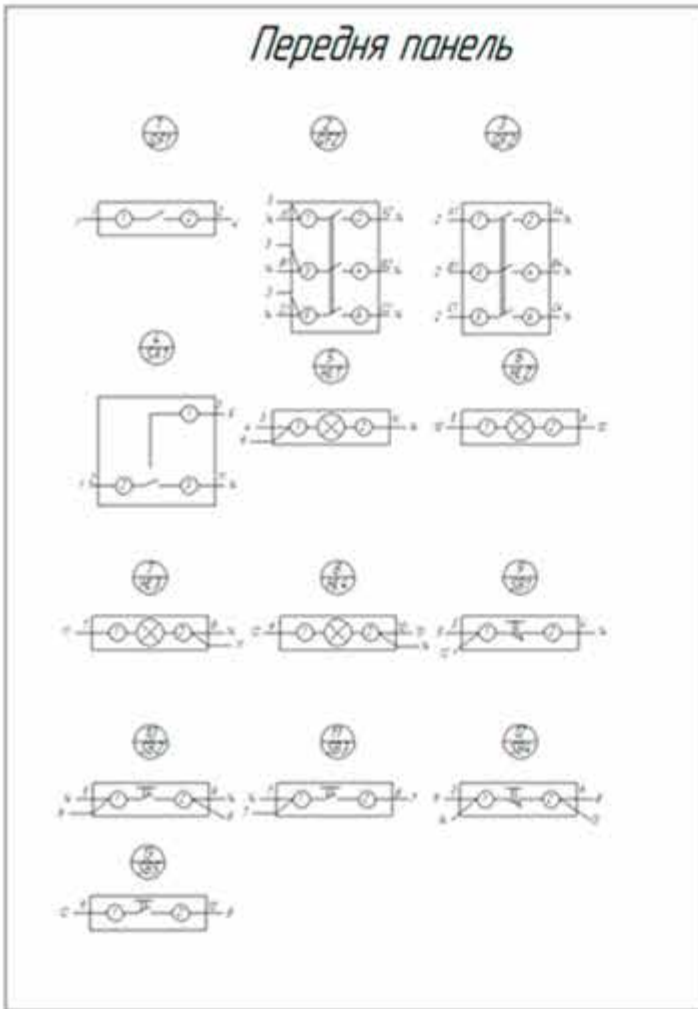


				02.06.- №1667 "С". 2024.09.26.008E1		
Изм/Лист	№ докум	Подп	Дата	Лист	Масса	Максимум
Разработ	Михаил К.В.					1/1
Проект	Циклон 1.1			Лист	Листов	1
Исполн				Достоверность и действительность информации о состоянии системы управления системой учета и защитной суммарной на базе КТГ (Индик)		
Синд				Копировать		
				Формат А3		

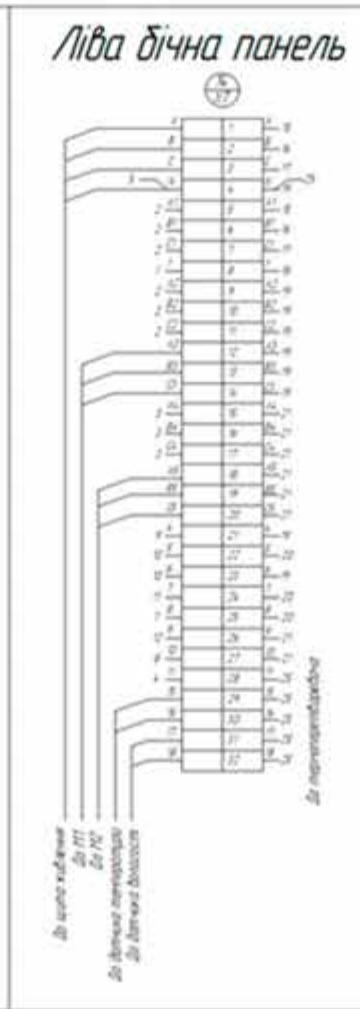
Схема электрично принципова

Лист 1 з 1
Стор. №
Лист 1 з 1

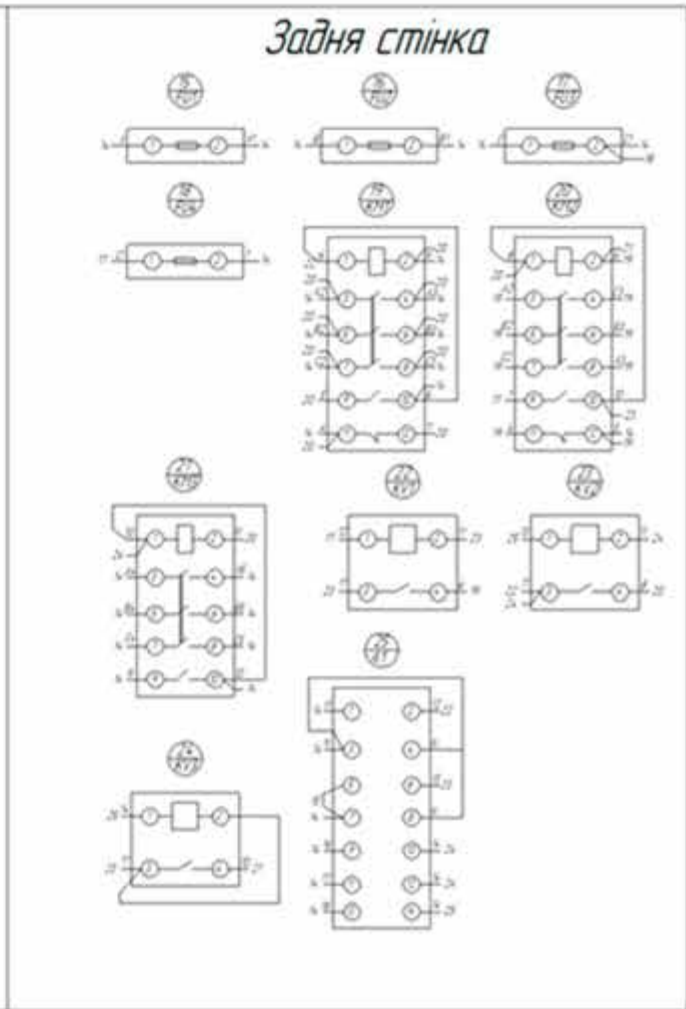
Передня панель



Ліва бічна панель



Задня стінка



				02.06.- №1667 "С" 2024.09.26.008E2	
Пр. Лист	№ Листа	Лист	Листів	Лист	Листів
Стор.	Стор.	Стор.	Стор.	Схема електричного з'єднання	
Лист	Лист	Лист	Лист	Лист	Лист
				Лист 1 з 1	
				Користувач	
				Формат А3-2	

Лист 1 з 1

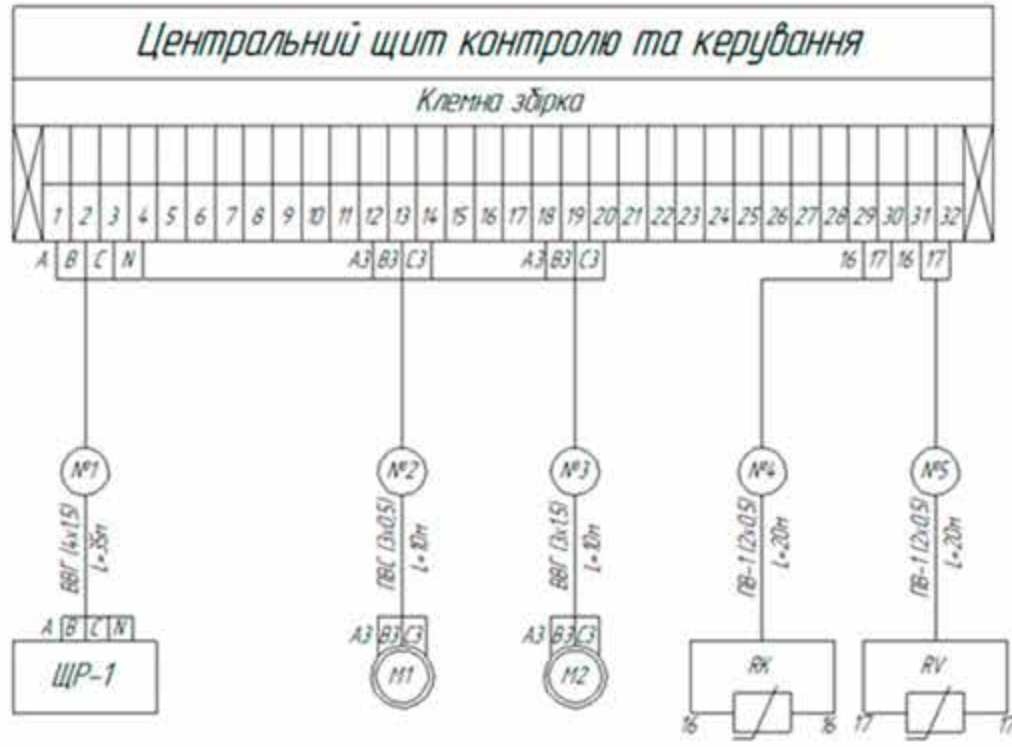
Стор. №

Лист у даної

Вказ. наб. №

Лист у даної

Наб. № мод.



Назва Обладнання	Щит Живлення	Виконавчий механізм	Вентилятор	Датчик Температури	Датчик Вологості
Тун	ЩР-1	АНР132М4	В-Ц4-70-8	ТСМУ-2212	SHF30 I2C

02.06.- №1667 "С". 2024.09.26.008E3			
Лист	Маса	Максимум	
1/1			1:1
Лист	Листов		1
<p>Схема електрична підключень</p> <p>Застосована і побудована згідно з технічними умовами проекту на виконання замовлення.</p> <p>Копіювати заборонено.</p>			
Копіювати		Формат А3	

02.06.- №1667 "С". 2024.09.26.008E4

Листів: 1

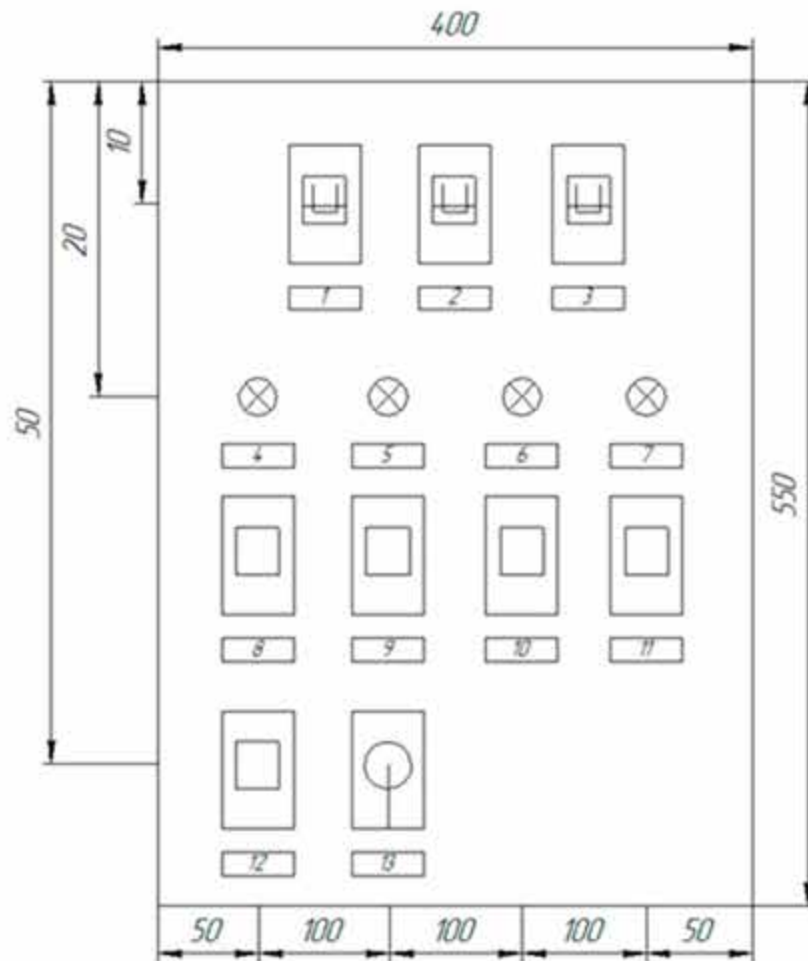
Сторінка №

Листів: 1

Листів: 1

Листів: 1

Листів: 1



02.06.- №1667 "С". 2024.09.26.008E4

Лист	№ докум.	Лист	Дата
Лист	№ докум.	Лист	Дата
Розроб	Михайлів К.В.		
Проб	Пашулен І.Т.		
Т.контр			
Н.контр			
Стб			

Зовнішній вигляд шафи керування

Лист	Масштаб	Масштаб
Лист 1	Листов 2	

Детальний технічний вигляд конструкторської документації створюється згідно з вимогами ДСТУ 9:2015

Копіювати

Формат А4

02.06.- №1667 "С". 2024.09.26.008E4

Листів: 1

Листів: 1

Листів: 1

Листів: 1

Номер надпису	Надпис	Кількість	Номер надпису	Надпис	Кількість
1	Вкл. схеми керування	1	8	Викл. привод	1
2	Вкл. M1	1	9,10	Вкл. привод	2
3	Вкл. M2	1	11	Вкл. вентилятор	1
4	Живлення рук. рек.	1	12	Викл. вентилятор	1
5,6	Робота привода	2	13	Перемикач режимів	1
7	Робота вентилятора	1			

Позиційне позначення	Найменування	Кількість	Примітка
1	Автоматичний вимикач GF1	1	
2	Автоматичний вимикач GF2	1	
3	Автоматичний вимикач GF2	1	
4	Сигнальна лампа HL1	1	
5	Сигнальна лампа HL2	1	
6	Сигнальна лампа HL3	1	
7	Сигнальна лампа HL4	1	
8	Кнопка "стоп" SB1	1	
9	Кнопка "пуск" SB2	1	
10	Кнопка "пуск" SB3	1	
11	Кнопка "пуск" SB4	1	
12	Кнопка "стоп" SB5	1	
13	Перемикач режимів		

02.06.- №1667 "С". 2024.09.26.008E4

Листів: 1

Копіювати

Формат А4

