

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

**В.о. завідувача кафедри
автоматики та робототехнічних
систем**

ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. _____ О.О.
Опришко
(підпис)

(ПІБ)

" ____ " _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему **"РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО
КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ СУШІННЯ ЗЕРНА В ШАХТНІЙ
ЗЕРНОСУШАРЦІ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ КОМПЛЕКСУ ТЕХНІЧНИХ
ЗАСОБІВ SCHNAIDER ELEKTRIK"**

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

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент.
(науковий ступінь та вчене
звання)

(підпис)

Дудник А.О.
(П.І.Б.)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

К.пед.н., доцент
(науковий ступінь та вчене
звання)

(підпис)

Лукін В.Є.
(П.І.Б.)

Виконав

(підпис)

Кондратюк В.Ю.
(П.І.Б.)

КИЇВ – 2026
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. завідувача кафедри
автоматики та робототехнічних
систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)
к.т.н., доц. _____ О.О.
Опришко
(підпис)

(ПБ)

" ____ " _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту
Кондратюку Вадиму Юрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

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

1. Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи: "Розроблення системи автоматичного керування процесом сушіння зерна в шахтній зерносушарці із використанням комплексу технічних засобів Schneider Elektrik,

затверджена наказом ректора НУБіП України від "24" 10 2025 р. № 2518"С"

2. Термін подання завершеної роботи на кафедру "31" травня 2026 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної бакалаврської роботи:

3.1. Завдання кафедри на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи.

3.2. Нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації.

3.3. Наукова література з тематики кваліфікаційної бакалаврської роботи.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

4.1. Класифікація технологічних процесів сушіння та зберігання зерна в агропромисловому комплексі.

4.2. Дослідження об'єкта автоматизації.

- 4.3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань.
- 4.4. Розробка цифрової системи керування.
- 4.5. Схеми системи автоматизації.
- 4.6. Розробка засобів візуалізації технологічного процесу.
- 4.7. Техніко-економічне обґрунтування.

5. Перелік графічних документів:

5.1. Функціональна схема автоматизації системи керування шахтною зерносушаркою.

5.2. Система автоматизації процесу сушіння зерна в шахтній зерносушарці. Схема електрична принципова.

5.3. Система автоматизації процесу сушіння зерна в шахтній зерносушарці. Схема електрична принципова. Схема електрична з'єднань.

5.4. Система автоматизації процесу сушіння зерна в шахтній зерносушарці. Схема електрична принципова. Схема електрична підключень.

5.5. Система автоматизації процесу сушіння зерна в шахтній зерносушарці. Схема електрична принципова . Зовнішній вид щита керування.

Дата видачі завдання "25" жовтня 2025 року

**Керівник
бакалаврської
кваліфікаційної роботи**

(підпис)

Лукін В.Є.
(П.І.Б.)

**Завдання
прийняв до виконання**

(підпис)

Кондратюк В.Ю.
(П.І.Б.)

ЗМІСТ

Вступ	6
РОЗДІЛ 1. Класифікація технологічних процесів сушіння та зберігання зерна в агропромисловому комплексі	8
1.1. Основні положення управління процесами зберігання зерна	8
1.2. Способи та технологічні установки для сушіння зерна	10
1.3. Принцип роботи шахтних зерносушарок	11
1.4. Функціональна схема автоматизації системи керування шахтною зерносушаркою	17
РОЗДІЛ 2. Дослідження об'єкта автоматизації	21
2.1. Розробка математичної моделі об'єкта автоматизації	21
2.2. Розробка та дослідження імітаційної моделі об'єкта автоматизації із використанням математичних пакетів MATLAB та MathCad	25
2.3. Визначення передатної функції шахтної зерносушарки для каналу керування температурою зерна	30
РОЗДІЛ 3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань	33
3.1. Вибір алгоритму керування та визначення параметрів настройки регулятора	33
3.2. Реалізація алгоритму керування	34
3.2.1. Вибір програмно-логічного контролера та модулів розширення підключення датчиків температури та вологості	34
3.2.2. Вибір датчиків температури зерна та агенту сушіння та визначення їх передатних функцій	38
3.2.3. Вибір датчиків вологості зерна	40
3.2.4. Вибір датчиків рівня зерна	41
3.2.5. Визначення передатної функції електродвигуна приводу вивантажувального шнеку як виконавчого механізму САК температурою зерна	42
3.2.6. Вибір частотного перетворювача	46
РОЗДІЛ 4. Розробка цифрової системи керування	48
РОЗДІЛ 5. Схеми системи автоматизації	55
5.1 Розробка схеми електричної принципової системи автоматичного керування шахтною зерносушаркою LAW SBC-8LE	55
5.2. Вибір апаратури захисту та керування	60
5.2.1. Вибір автоматичних вимикачів	63
5.2.2. Вибір електромагнітних пускатів	65
5.2.3. Вибір проміжних реле	67
5.3. Вибір проводів та кабелів	68

5.4. Розробка електричних схем з'єднань та підключень системи керування шахтною зерносушаркою	71
5.5. Вибір щита керування	74
РОЗДІЛ 6. Техніко-економічне обґрунтування	76
Висновки	80
Список використаної літератури	81
Додатки	83

ВСТУП

Актуальність теми. У сільському господарстві та промисловості часто виникає потреба знижувати вологість різних матеріалів і продуктів. У аграрній, переробній та харчовій галузях це пов'язано з необхідністю підвищення збереженості зернової, плодоовочевої та іншої продукції. За останні десятиріччя було створено багато технологій сушіння, що забезпечують оптимальну вологість зернових, олійних культур, овочів і фруктів. Сушильні технології активно розвиваються, формуючи окрему галузь у промисловості та сільському господарстві.

Основна мета сушіння зернових і олійних культур — доведення вологості до рівня, що гарантує безпечне тривале зберігання без ризику саморозігрівання. Крім того, правильно підібраний режим сушіння сприяє фізіологічному дозріванню зерна та покращує його якість.

Об'єкт дослідження — процес сушіння зерна в шахтній прямоточній зерносушарці.

Предмет дослідження — залежність енергозатрат на сушіння від режимів та параметрів роботи зерносушарки.

Мета роботи — підвищення продуктивності шахтної зерносушарки та якості готової продукції шляхом удосконалення технологічного процесу, зокрема оптимізації температурного режиму.

Для досягнення мети необхідно:

- дослідити сучасні системи автоматизації керування температурою сушіння в шахтних зерносушарках;
- розробити функціональну схему та алгоритм роботи системи керування;
- створити та дослідити імітаційну модель об'єкта в MatLAB;
- обґрунтувати вибір алгоритму керування, технічних засобів та показників якості системи;

– розробити схеми автоматизації та дистанційного керування сушінням на базі Scada Trace Mode.

Методи дослідження базуються на теорії сушіння, тепло- і масопереносу та математичному моделюванні з використанням комп'ютерних технологій.

РОЗДІЛ 1

КЛАСИФІКАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ СУШІННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ ЗЕРНА В АГРОПРОМИСЛОВОМУ КОМПЛЕКСІ

1.1. Основні положення управління процесами зберігання зерна

Сушіння є ключовою технологічною операцією, що забезпечує переведення зерна та насіння у стабільний стан, необхідний для тривалого зберігання. Під час зберігання зерно продовжує дихати, хоча його життєві процеси мінімальні; при цьому відбуваються хімічні перетворення, пов'язані зі споживанням крохмалю. Зниження вологості та охолодження зернової маси дозволяють суттєво зменшити втрати від дихання.

Менша вологість уповільнює дихання зерна, пригнічує розвиток мікроорганізмів і шкідників. Сушіння також прискорює післязбиральне дозрівання та вирівнює зернову масу за вологістю і ступенем стиглості.

Ризики під час зберігання зерна поділяють на три групи:

фізичні — вологість, температура, фізико-механічні властивості, домішки;

біологічні — комахи, пліснява, токсини;

хімічні — техногенні забруднення, порушення технології вирощування, обробки та зберігання.

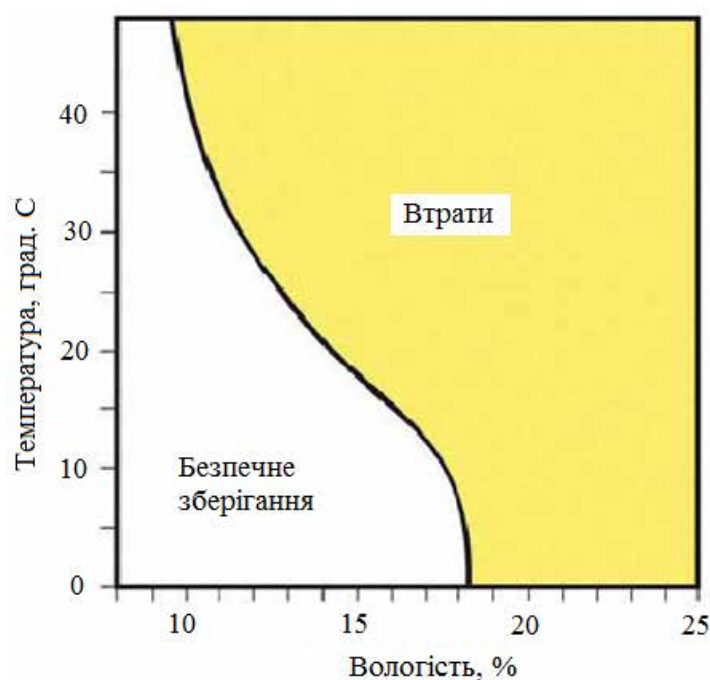
Оптимальна вологість, що запобігає розвитку плісняви та шкідників, залежить від температури зерна, тривалості зберігання, культури та початкової якості зерна.(таблиця 1.1).

Таблиця 1.1.

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

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

Інтенсивність розвитку плісняви та комах визначається поєднанням температури й вологості зерна (мал. 1.1). За певних умов навіть зерно з підвищеною вологістю може зберігатися без втрат, якщо його утримувати в охолоджену стані.



Мал. 1.1. Області безпечного зберігання і втрати якості зерна

Під рекомендованими для безпечного зберігання значеннями вологості слід розуміти максимальну вологість окремої зернівки, а не середній показник усієї маси. Якщо поряд знаходяться волога й суха зернівки, між ними відбувається повільний перерозподіл вологи, доки різниця не зменшиться до 1–2%. Однак цей процес триває довго.

У реальних умовах вологі зернівки зазвичай зосереджуються пошарово або у локальних осередках. Тому навіть за безпечної середньої вологості всієї партії пліснява може активно розвиватися саме в цих локальних зонах з підвищеним вологовмістом.

1.2. Способи та технологічні установки для сушіння зерна

Основна частина вологи в зерні міцно зв'язана з сухою речовиною, тому її можна видалити лише шляхом випаровування, витрачаючи енергію на подолання сил зв'язку та теплоту пароутворення. Такий процес називають тепловим сушінням.

За способом підведення теплоти сушарки поділяють на:

- конвекційні — зерно омивається нагрітим сушильним агентом;
- кондуктивні (контактні) — нагрівання через гарячу поверхню;
- сублімаційні — видалення вологи у замороженому стані під вакуумом;
- радіаційні — сушіння інфрачервоним випромінюванням;
- високочастотні — видалення вологи під дією електричного поля високої частоти.

За типом нагріву сушильного агента розрізняють:

- прямий нагрів — суміш повітря і топкових газів (високі вимоги до палива);
- непрямий нагрів — чисте повітря, нагріте у теплообміннику.

За принципом дії сушарки бувають:

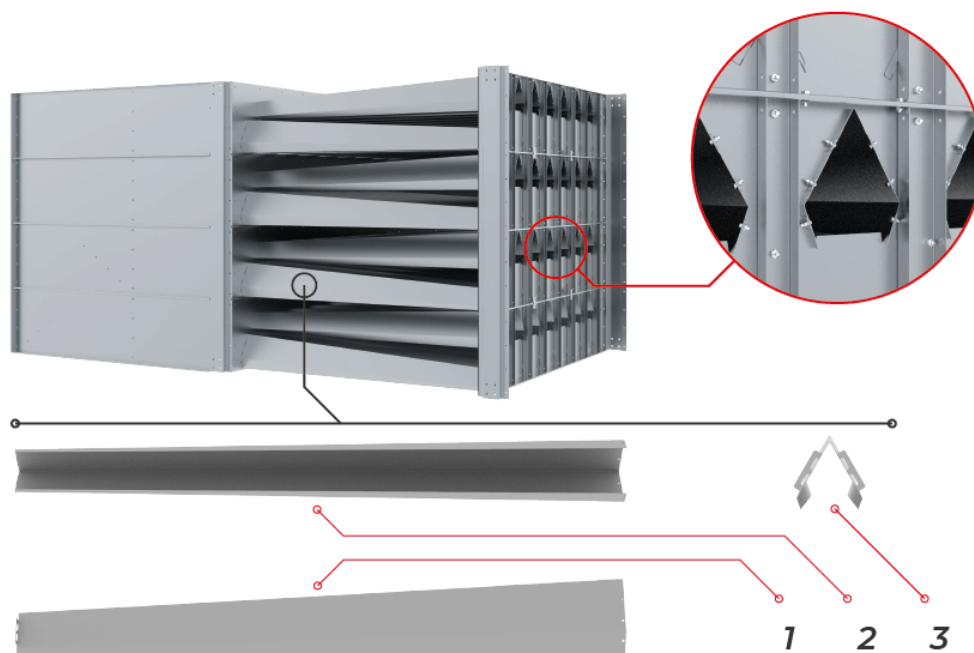
- прямоточні — зерно проходить шахту один раз;
- протиточні (рециркуляційні) — частина висушеного зерна змішується з сирим і повертається в сушарку, що дозволяє ефективно сушити високовологе зерно та зменшувати витрати на обробку партій.

Шахтні сушарки комплектуються теплоізоляцією, аспірацією та базовими елементами, що дозволяють розпочати роботу одразу після монтажу. Окрім моделей СЗШ-16 і ДСП-50, в Україні добре зарекомендували себе закордонні сушарки LAW, Strahl (Mulmix, Kika), Ravaro, Buhler, Stela, Petkus, а також двозонні Satig і Scolari.

1.3. Принцип роботи шахтних зерносушарок

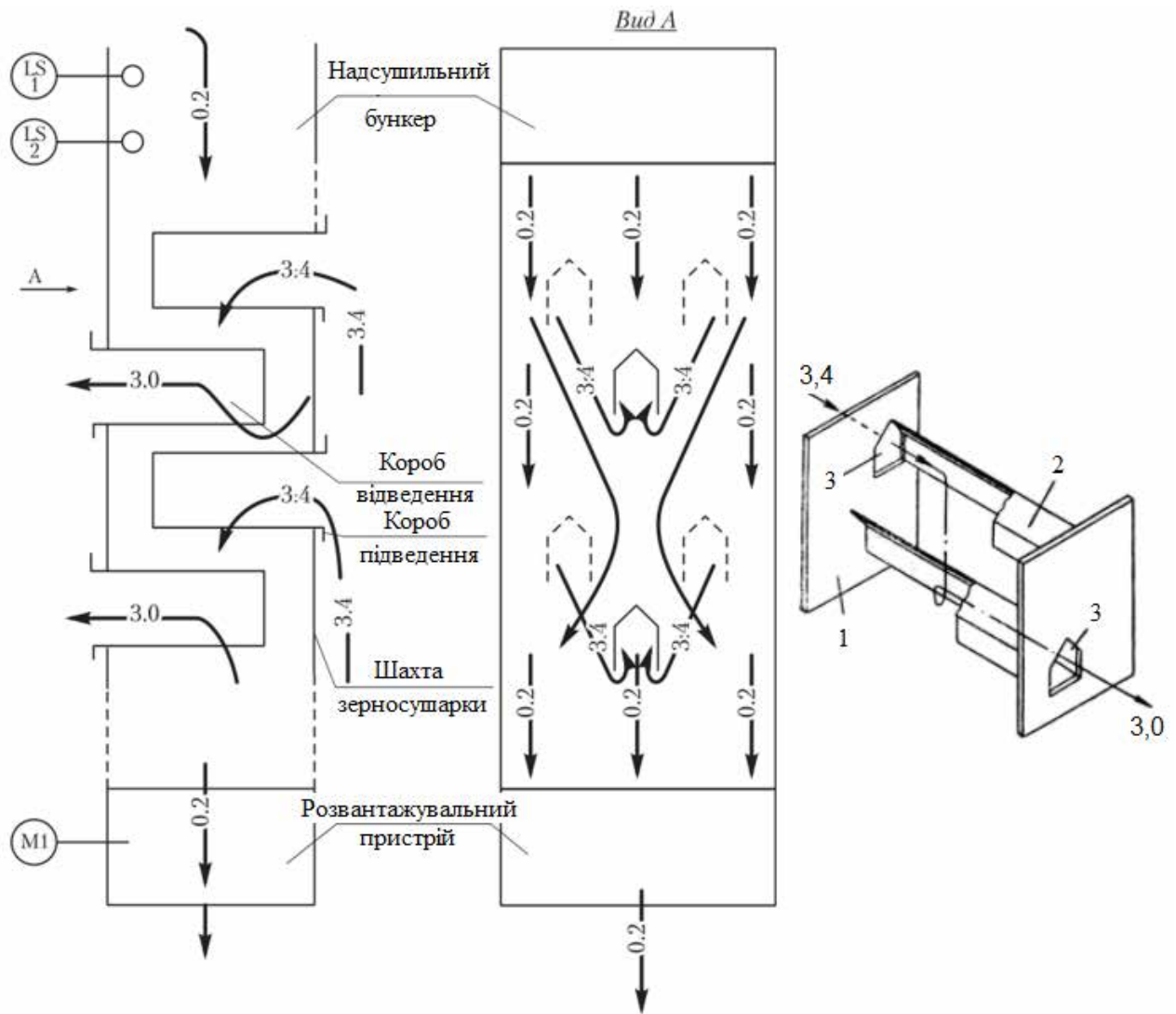
Одним із найпоширеніших способів сушіння є обробка зерна в малорухомому гравітаційному щільному шарі. За цим принципом працюють шахтні зерносушарки, у яких короби підведення та відведення теплоносія розташовані у шаховому порядку. Зерно рухається зверху вниз, послідовно проходячи через зони подачі та відведення агента сушіння. Це забезпечує прямоточне або перехресне продування зернової маси.

Сушильний агент, що надходить з одного боку шахти, проходить крізь шар зерна та виходить через короби відведення з протилежного боку, виконуючи функції теплоносія та вологоносія. Температура агента сушіння повинна залишатися в межах допустимих значень, оскільки її зниження призводить до підвищення відносної вологості та зменшення здатності повітря поглинати вологу.



Мал. 1.2. Конструкція сушильних коробів:
1 – вигляд з боку; 2 – вигляд знизу; 3 – фронтальний вигляд

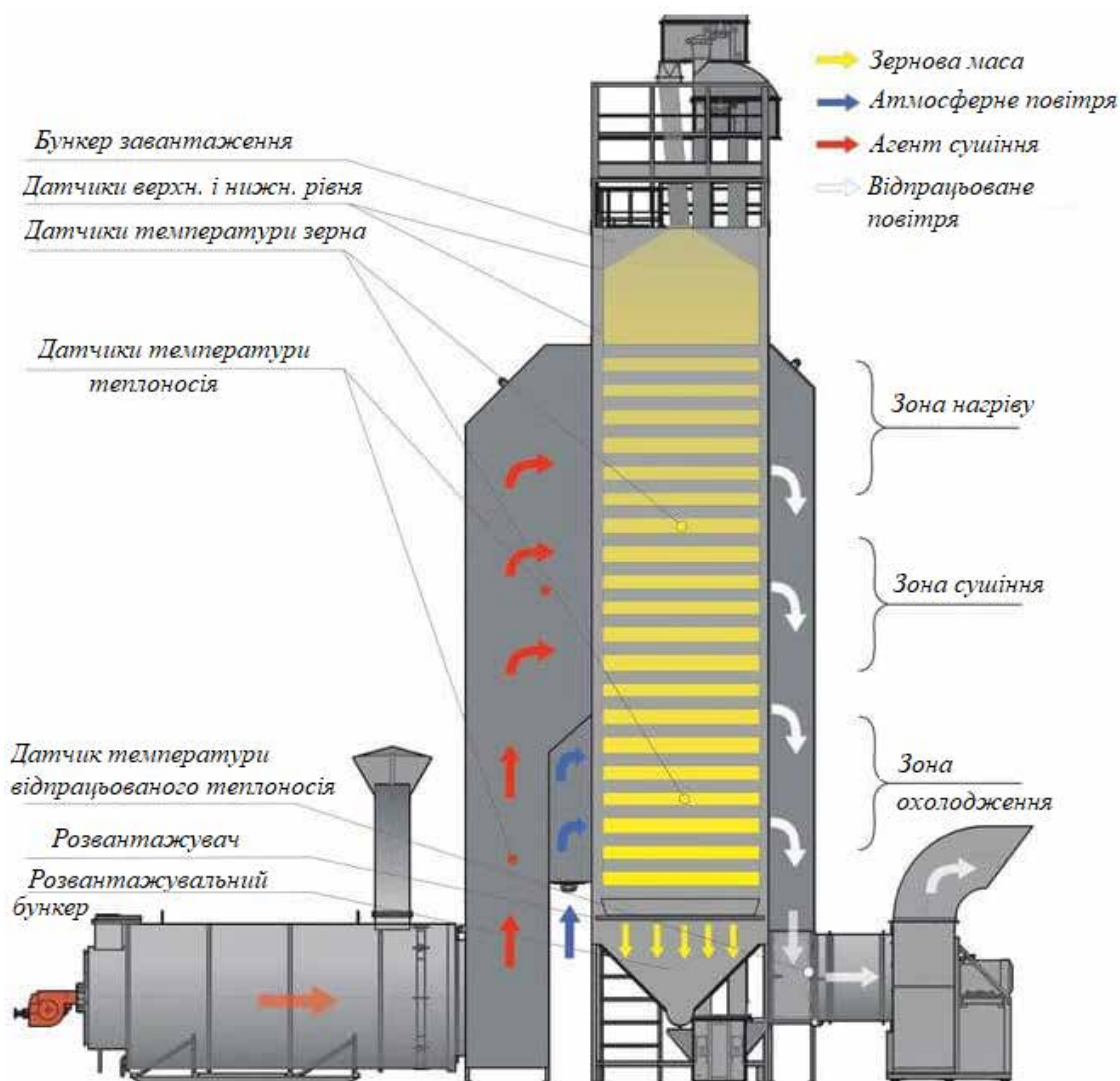
Короб являє собою канал із відкритою нижньою стороною, через яку агент сушіння входить у зерновий шар або виходить із нього (мал. 1.2). Під нижньою відкритою стороною короба зерно розташовується під кутом природнього відкосу. Одна з торцевих сторін кожного коробу відкрита, інша – заглушена. Короба підведення відкриті з боку входу агента сушіння і заглушені з боку його виходу із шахти. Короба відведення навпаки, закриті з боку входу і відкриті з боку виходу агента сушіння із шахти. Короба виготовляють з листової оцинкованої сталі товщиною 1,5...2 мм.



Мал. 1.3. Технологічна схема сушіння зерна у шахтній зерносушарці:

1 – стінка шахти; 2 – сушительний короб; 3 – вхідний та вихідний отвори;
 Матеріальні потоки: 0,2 – зерно; 3,4 – теплоносій;
 3,0 – відпрацьований теплоносій

У шахтних прямоточних зерносушарках зерно рухається суцільним потоком у режимі неперервної дії (мал.1.3). Швидкість його опускання визначається роботою випускного механізму. Рівень зерна контролюють датчики мінімального LS(2) та максимального LS(1) рівня: при досягненні мінімуму двигун розвантажувальних кареток M1 вимикається, при досягненні максимуму — знову вмикається. Це забезпечує стабільне завантаження сушарки та рівномірний рух зернової маси.



Мал. 1.4. Конструкція шахтної зерносушарки

Сушильний агрегат складається з двох паралельних шахт та розподільної камери, поділеної на три зони (мал. 1.4). У дві верхні зони подається агент сушіння, у нижню — охолоджене повітря, що формує дві сушильні та одну охолоджувальну зони. У першій зоні видаляється поверхнева волога, у другій — капілярна; температурні режими регулюються форсунками та заслінками. Завантажувальні бункери розташовані над шахтами та закріплені на металевих швелерах.

У нижній частині шахт встановлені випускні пристрої з роликowymi підвісними затворами. На дві шахти припадає 16 отворів, кожен з яких періодично

відкривається електроприводом і закривається поворотальною пружиною. Під затворами розміщені розвантажувальні бункери.

У роботі розглядається шахтна зерносушарка CFCAI LAW SBC-8LE (мал. 1.5).



Мал. 1.5. Шахтна зерносушарка LAW типу SBC-LE

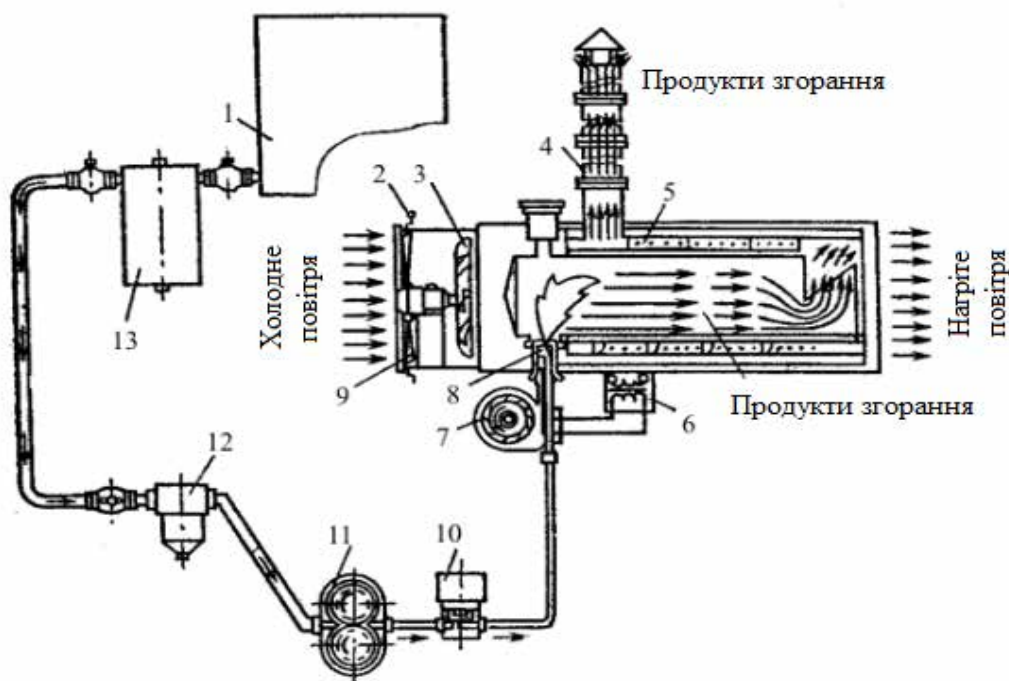
Технічні характеристики деяких зерносушарок модельного ряду LAW SBC-LE наведена у табл. 1.2 .

Таблиця 1.2.

Технічні характеристики зерносушарок LAW SBC-LE

Параметр	Модель сушарки				
	SBC 8LE	SBC 10LE	SBC 15LE	SBC 20LE	SBC 24LE
Загальна висота сушарки, мм	11328	13093	18400	22816	26352
Ширина сушарки, мм	3894	3894	3894	3894	3894
Довжина сушарки, мм	8002	8002	8482	9496	9496

Теплова потужність пальника, кВт	1x3700	1x3700	1x4600	2x3700	2x3700
Потужність вентилятора зон нагріву і сушіння, кВт	1x15,0	1x22,0	2x15,0	2x22,0	3x18,5
Потужність вентилятора зони охолодження, кВт	1x9,0	1x11,0	1x18,5	2x9,0	2x18,5
Об'єм сушарки, м ³	44,6	54,0	83,0	106,4	125,1
Продуктивність, (пшениця, 18-14%, 90°C), т/год.	22,0	29,0	45,0	62,0	78,0



Мал. 1.6. Функціональна схема теплогенератора:

1 – ємність; 2 – рукоятка; 3 – вентилятор; 4 – димова труба; 5 – теплообмінник; 6 – трансформатор запалювання; 7 – форсунка; 8 – паливник; 9 – лопаті вентилятора; 10 – клапан; 11 – паливний насос; 12 – відстійник; 13 – паливний бак

Температура сушильного агента є визначальним параметром, оскільки саме вона формує температуру нагріву зерна та впливає на його схожість і якість. Через неможливість точного вимірювання температури зерна в шахті

контролюють температуру теплоносія на вході та виході сушарки. Допустимі режими сушіння встановлюються відповідно до рекомендацій виробника обладнання (табл. 1.3).

Таблиця 1.3.

Максимальні значення температур сушильного агента і зерна
в шахтних зерносушарках

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

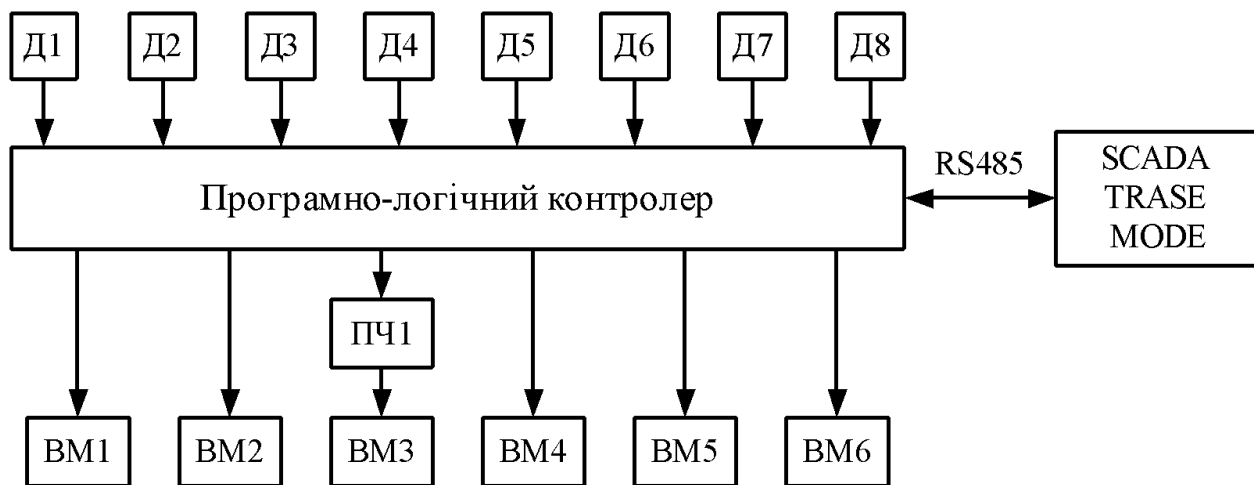
1.4. Функціональна схема автоматизації системи керування шахтною зерносушаркою

Для забезпечення стабільного та безпечного процесу сушіння в шахтній зерносушарці необхідно контролювати рівень зерна в надсушильному бункері, параметри теплоносія, температуру та вологість зерна на вході й виході, а також температуру зерна в зоні сушіння. Додатково здійснюється керування завантажувальними й вивантажувальними механізмами та розвантажувальним шнеком, що визначає тривалість перебування зерна в шахті. Функціональна схема автоматизації наведена на мал. 1.7.

Як пристрій керування згідно із завданням на магістерську роботу передбачається використати програмно-логічний контролер Schneider Electric, який може бути складовою частиною SCADA TRACE MODE.

TRACE MODE – програмний комплекс класу SCADA HMI, призначений для розробки програмного забезпечення АСУТП, систем телемеханіки, автоматизації будівель, систем обліку електроенергії, води, газу, тепла, а також для забезпечення їх функціонування у реальному часі. Особливістю TRACE MODE є "технологія єдиної лінії програмування", тобто можливість розробки усіх модулів АСУ за допомогою єдиного інструменту. Така система дає можливість візуалізувати та оперативно відслідковувати технологічний процес та керувати ним у створеному людино-машинному інтерфейсі.

Таким чином, реалізується наступна структура керування процесом сушіння зерна у шахтній зерносушарці (мал. 1.8).



Мал. 1.8. Структура комп'ютерно-інтегрованої САК шахтною зерносушаркою

На мал. 1.8 наведено позначення елементів функціональної схеми автоматизації:

датчики рівня зерна Д1, Д2; датчики температури та вологості у надсушильному бункері Д3, Д4; датчик температури агента сушіння Д5; датчик температури зерна в зоні сушіння Д6; датчики температури та вологості на виході сушарки Д7, Д8. Виконавчі механізми включають електродвигуни

вентиляторів ВМ1, ВМ2, привід розвантажувального шнека ВМ3, завантажувальної норії ВМ4, рециркуляційної норії ВМ5 та норії вивантаження ВМ6. Швидкість шнека регулюється перетворювачем частоти ПЧ1, що визначає експозицію сушіння.

Алгоритм роботи системи передбачає: запуск програми ПЛК; попереднє 10-хвилинне вентилявання шахти; завантаження зерна до верхнього рівня; подачу теплоносія та запуск процесу сушіння; через 30 хв — увімкнення розвантажувального шнека та рециркуляції; контроль температури й вологості за сигналами датчиків; повторне досушування зерна до досягнення заданої вологості. Після цього рециркуляційна норія перемикається на вивантаження, а сушарка працює до повного спорожнення. Завершення циклу супроводжується послідовним вимкненням вентиляторів, шнека, норій та теплогенератора.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

2.1. Розробка математичної моделі об'єкта автоматизації

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

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

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

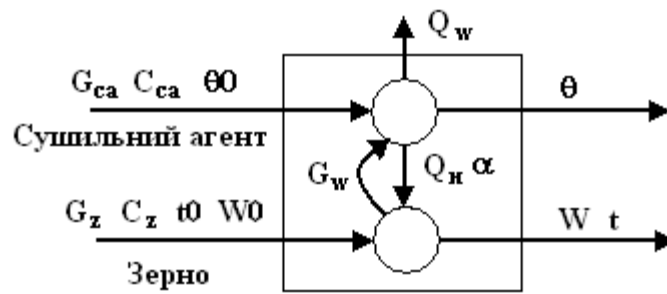
$$dn = 0.622 \cdot \frac{\varphi \cdot P_{нас}}{Pb - \varphi \cdot P_{нас}}, \quad (2.2)$$

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

P - відносна вологість повітря;

Pb – загальний (барометричний) тиск парогазової суміші.

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



Мал. 2.1. Структурна схема процесу сушіння зерна

Вважаємо, що тепло нагрітого повітря витрачається на підігрівання зерна і випарювання вологи з нього:

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

Матеріальний баланс по зерну:

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

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

Швидкість сушіння тоді матиме вигляд:

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

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

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

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

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

$\mathcal{R}$ – коефіцієнт зовнішнього вологообміну, м/с.;

a_m – коефіцієнт потенціалопровідності масопереносу, м²/с.

Для періодичного процесу сушіння це буде рівняння, де температура і вологовміст змінюється в часі:

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

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

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

де $\bar{\theta}$ - середня температура матеріалу;

$\bar{W}$ - середній вологовміст матеріалу;

c – питома теплоємність матеріалу;

r – теплота пароутворення;

t – температура сушильного агенту;

G і G_0 – витрати вологого і сухого матеріалу;

$\langle$ - коефіцієнт теплообміну;

F – площа поверхні матеріалу;

$/$ – час;

x – координата (у напрямку руху зерна).

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

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

Значення відносної вологості повітря знаходимо з рівняння:

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

Коефіцієнт сушіння, 1/с, знаходимо з рівняння:

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

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

Приведемо рівняння:

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

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

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

де f – питома поверхня зерна м²/кг;

α – коефіцієнт тепловіддачі від повітря до зерна, Вт/м² град;

r – теплота пароутворення, Дж/кг.

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

Вихідними даними для імітаційного моделювання процесу сушіння зерна є наступні:

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

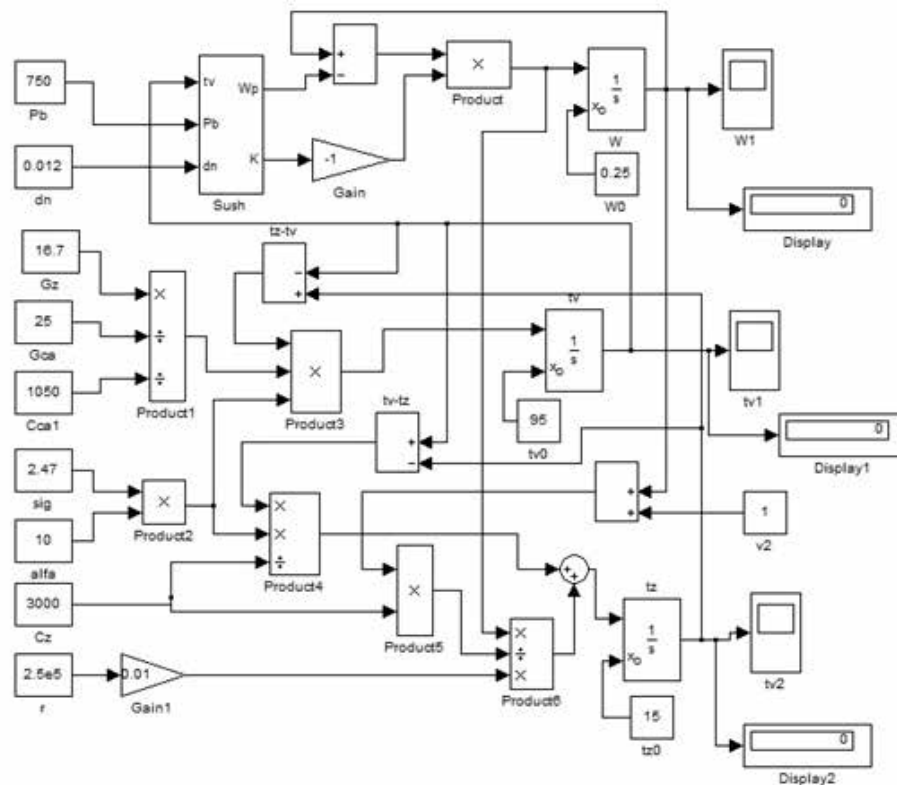
Сушильний агент, гаряче повітря, подається в кількості $G_{ca} = 1,5$ кг/с з температурою $t_0 = 70$ °С, і теплоємністю $C_{ca} = 1150$ Дж/(кг °С).

Прийнято, що питома поверхня зерна $f' = 2,47$ м²/кг [10];

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

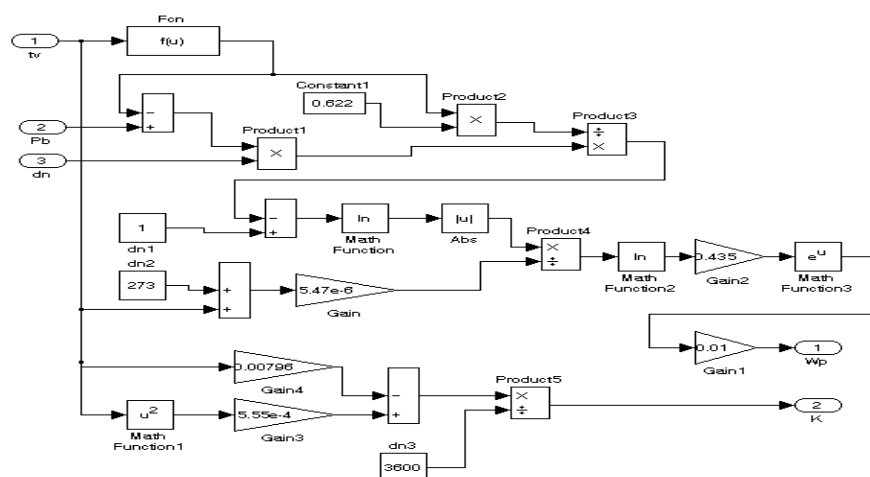
- теплота пароутворення $r = 2500 \oplus 10^3$ Дж/кг;
- барометричний тиск $P_b = 750$ мм рт. ст.;
- коефіцієнт тепловіддачі від повітря до зерна $\zeta = 15,3$ Вт/(м² °С).

Розробимо модель в середовищі Simulink MATLAB. Так як модель достатньо громіздка, розіб'ємо її на дві частини. В основній частині (мал. 2.2.) розмістимо рівняння, які представляють із себе систему диференціальних рівнянь і розраховують температуру зерна, температуру повітря і вологовміст зерна.

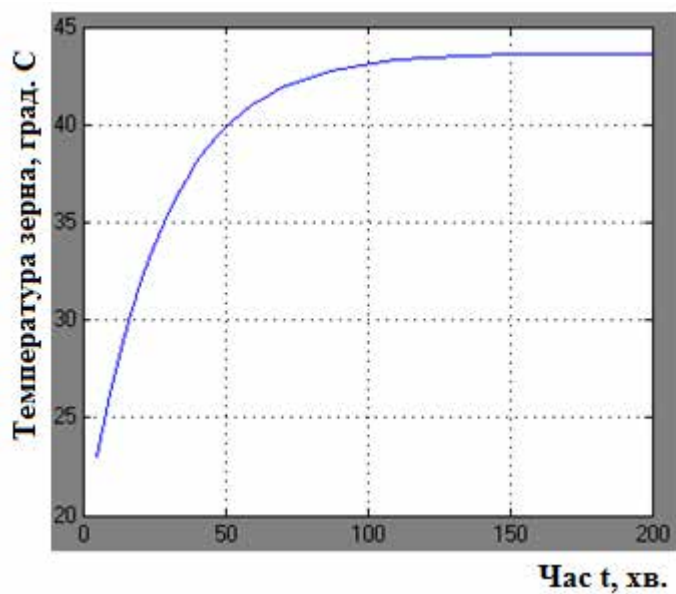


Мал. 2.2. Схема імітаційної моделі сушарки
у середовищі Simulink MATLAB

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

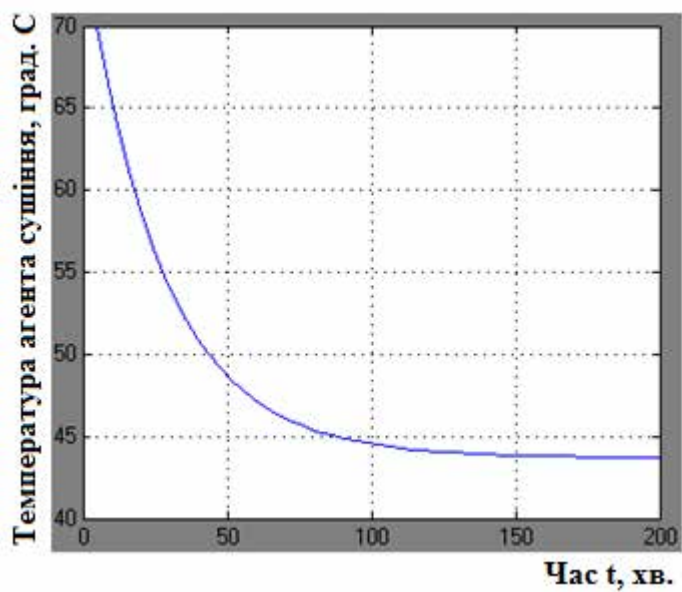


Мал. 2.3. Імітаційна модель підсистеми моделі сушарки
в середовищі Matlab Simulink

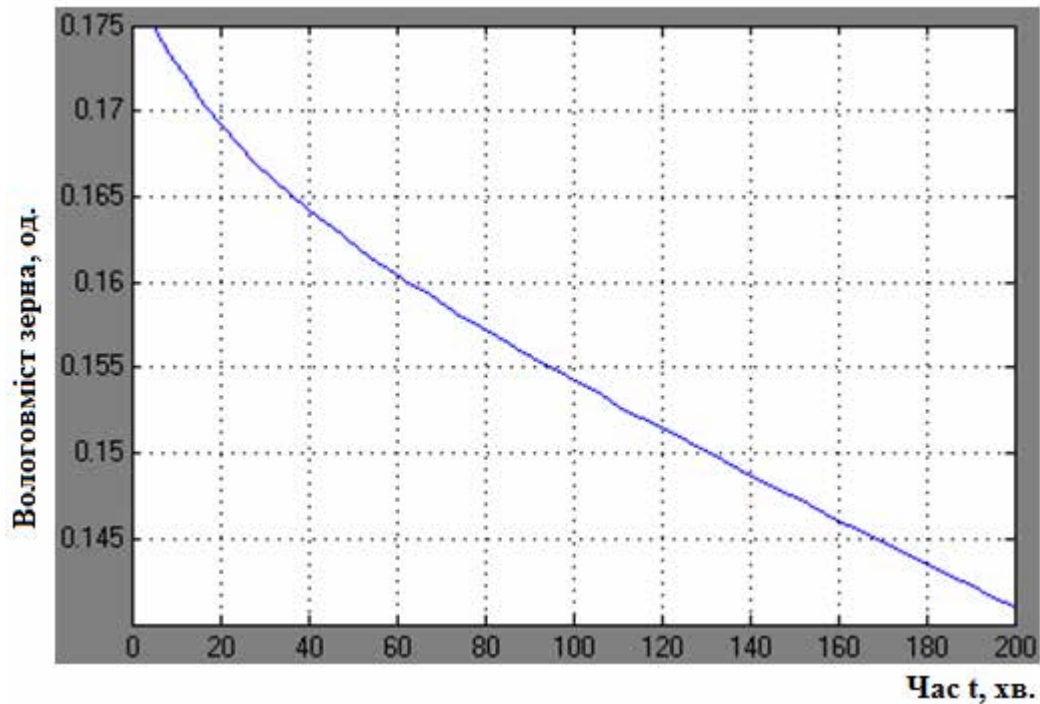


Мал. 2.4. Зміна температури зерна під час сушіння

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



Мал. 2.5. Зміна температури агента сушіння

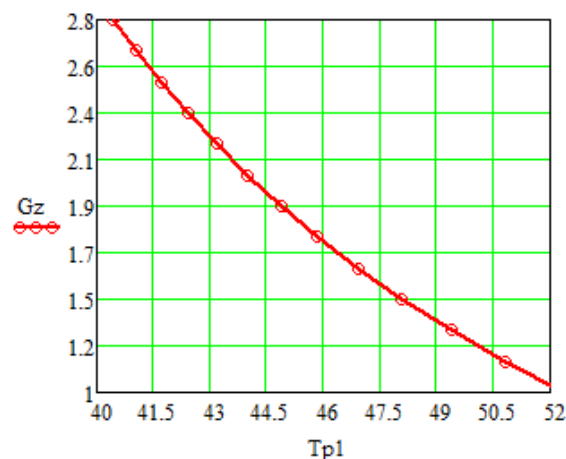


Мал. 2.6. Зміна вологовмісту зерна під час його сушіння

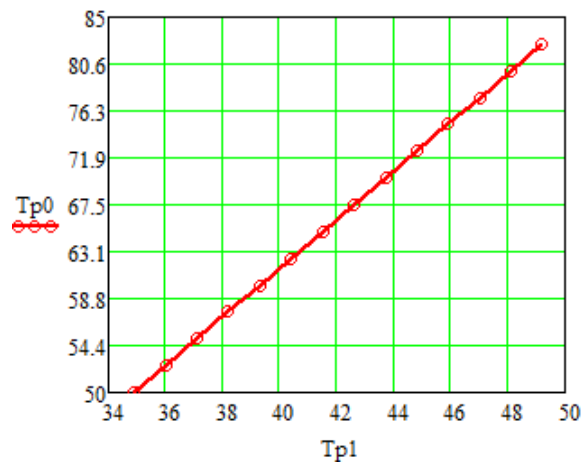
Дослідимо вплив витрат вологого зерна на температуру сушильного агента, вологовміст на виході при постійному початковому вологовмісті $W_0=0,175$ та зміну температури сушильного агента під час сушіння при постійній витраті вологого зерна $G_z = 2,1$ кг/с.

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

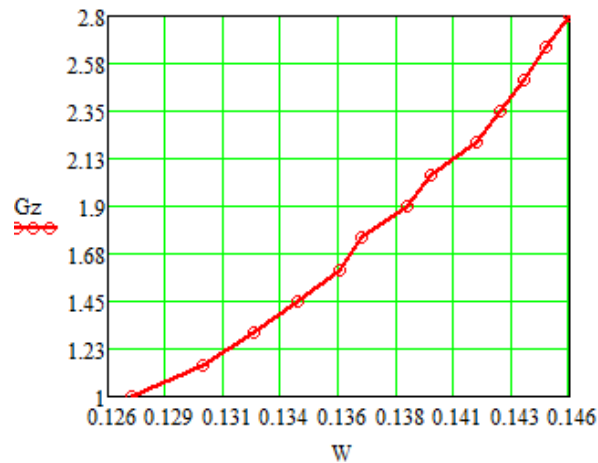
Дані для побудови графіків отримані за допомогою імітаційної моделі (блоки Display, Display1, Display2) (мал. 2.2).



Мал. 2.7. Вплив витрат вологого зерна на температуру сушильного агента

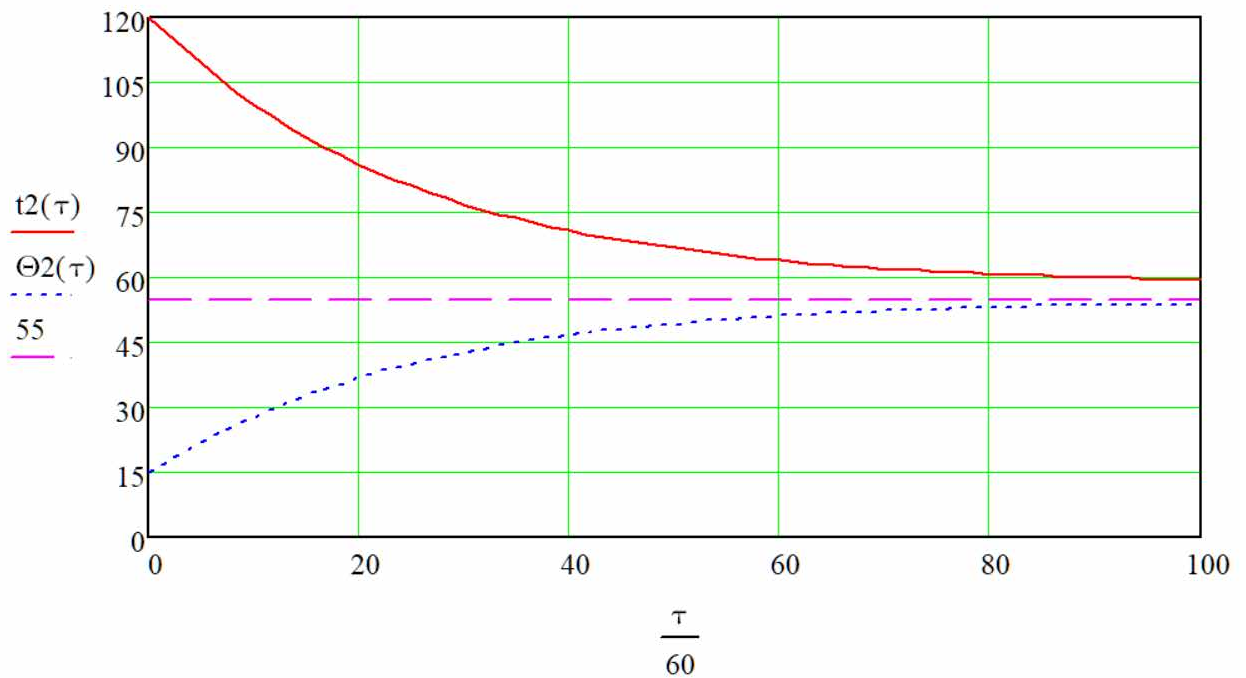


Мал. 2.8. Зміна температури сушильного агента під час сушіння при постійній витраті вологого зерна $G_z = 2,1$ кг/с



Мал. 2.9. Вплив витрат вологого зерна на вологовміст на виході при постійному початковому вологовмісті $W_0 = 0,175$

При доведенні температури зерна від 15°C до майже граничного допустимого значення 54°C (при граничному значенні $55\dots 60$) зміна температури зерна і агента сушіння виглядають наступним чином (мал. 2.10).



Мал. 2.10. Зміна температури агента сушіння у шахтній зерносушарці при нагріванні зерна від 15°C до 54°C

Проведене дослідження показало, що збільшення витрати вологого зерна призводить до зниження температури сушильного агента та відповідного зростання вологовмісту на виході (мал. 2.7).

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

Розгінна характеристика побудована за даними (мал. 2.10). При цьому час із хвилин переведено у секунди.

Для цього розгінна характеристика була пронормована за виразом

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

Результати розрахунку занесені в таблицю (Додаток А), нормована розгінна характеристика шахтної зерносушарки для каналу керування зображена на мал. 2.11.

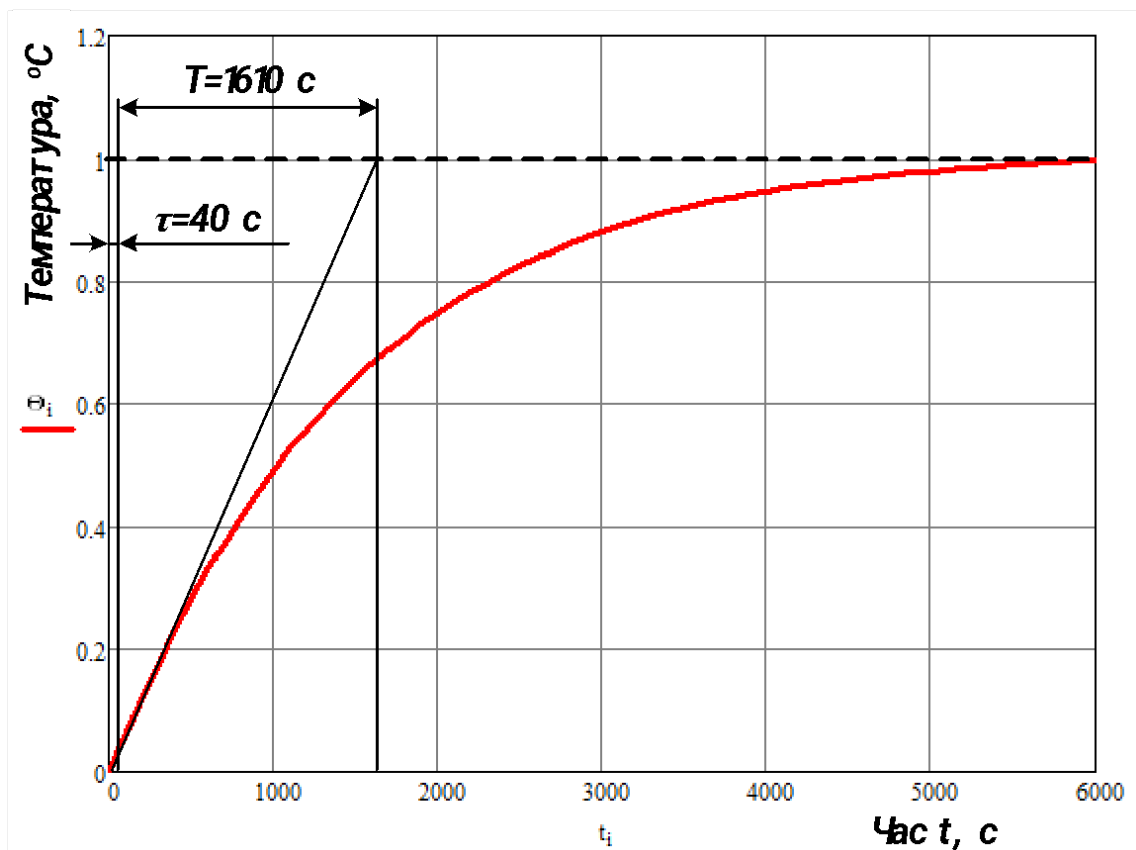
Для статичних об'єктів передатна функція, отримана за кривою розгону, представляється у вигляді інерційної ланки із запізненням

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

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

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

τ_{oy} - час чистого запізнення, с.



Мал. 2.11. Нормована розгінна характеристика шахтної зерносушарки для каналу керування температурою сушіння зерна

Чисельне значення постійної часу T_{oy} та часу запізнення τ_{oy} об'єкта знаходять за допомогою дотичної, яку проводять до точки перегину розгінної характеристики (мал. 2.11). Коефіцієнт передачі об'єкта керування визначаємо за формулою

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

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

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

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

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

Час чистого запізнення визначається часом, що необхідний на проходження повітря повітропроводом шахтної зерносушарки та початку сушіння.

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

Отримаємо передатну функцію бункера для каналу керування температурою сушіння

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

РОЗДІЛ 3

ВИБІР РЕГУЛЯТОРА ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЙОГО НАЛАШТУВАНЬ

3.1. Вибір алгоритму керування та визначення параметрів настройки регулятора

Встановлено, що критерієм для правильного вибору алгоритму керування може служити значення відношення часу чистого запізнення об'єкта

до його постійної часу, тобто $\frac{\tau_{oy}}{T_{oy}}$. Для цього передатна функція для статичного об'єкта повинна бути представлена у вигляді виразу (2.15). При виборі типу регулятора рекомендується орієнтуватися на величину відношення

часу запізнення до постійної часу об'єкта керування $\frac{\tau_{oy}}{T_{oy}}$:

- якщо $\frac{\tau_{oy}}{T_{oy}} < 0,2$, перевагу віддають позиційному (релейному) алгоритму керування, але можливе використання і неперервного алгоритму. Рішення приймається в залежності від технологічних вимог до процесу управління.

В даному випадку передатна функція шахтної зерносушарки для каналу керування температурою сушіння $W_{oy}(s) = \frac{0,39 \cdot e^{-40 \cdot s}}{1610 \cdot s + 1}$, при цьому відношення

$\frac{\tau_{oy}}{T_{oy}} = \frac{40}{1610} = 0,025$, тому за вказаною методикою необхідно використати позиційний алгоритм керування.

Отже за технологічним вимогами та особливостями обладнання системи керування прийнятий неперервний ПІД-алгоритм керування без

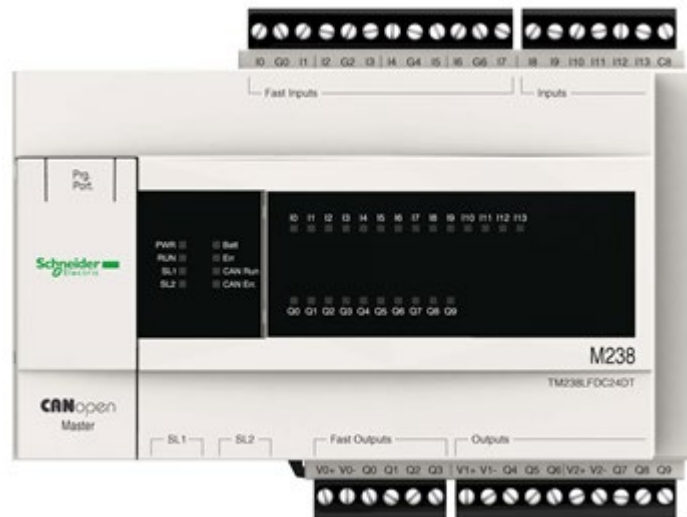
проведення додаткових розрахунків динамічного коефіцієнта регулювання за методикою .

3.2. Реалізація алгоритму керування

Згідно з функціональною схемою автоматизації система керування включає програмно-логічний контролер, що приймає сигнали від датчиків рівня, температури та вологості зерна в різних зонах сушарки та формує керуючі впливи на виконавчі механізми. До складу системи також входять модулі розширення аналогових входів, перетворювач частоти для регулювання швидкості приводу розвантажувального шнека (визначення експозиції сушіння) та електрообладнання для керування електродвигунами вентиляторів, норій і транспортера. Вибір елементів силового та керуючого електрообладнання розглянуто в розділі 5, а вибір ПЛК, модулів розширення та датчиків — у наступних підрозділах.

3.2.1. Вибір програмно-логічного контролера та модулів розширення підключення датчиків температури та вологості

Для керування технологічним обладнанням, зокрема частотним перетворювачем керування електродвигуном вивантажувального шнека, згідно із завданням на виконання магістерської роботи обраний програмно-логічний контролер MODICON TM238LFDC24DT Schneider Electric (мал. 3.1).



Мал. 3.1. Програмно-логічний контролер
MODICON TM238LFDC24DT Schneider Electric

Контролер MODICON TM238 – це універсальний модульний програмований контролер для вирішення задач автоматичного керування низького та середнього ступеня складності. Основні технічні характеристики ПЛК MODICON TM238 наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1.

Технічні характеристики ПЛК MODICON TM238LFDC24DT

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

Для їх підключення використовуються модулі розширення аналогових входів TM2AMI4LT Schneider Electric (мал. 3.2), розроблений для збільшення технічних можливостей ПЛК різних типів компанії Schneider Electric, зокрема MODICON TM238. Технічні характеристики розширювального модуля TM2AMI4LT наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2.

Технічні характеристики модуля розширювання
аналогових входів TM2AMI4LT

Серія	Логічний контролер Modicon M238
Тип продукту	Модуль аналогового вводу
Кількість аналогових входів	4
Розширення аналогового входу	12 біт
Тип підключення датчиків	Напруга 0...10В; Струм 0...20мА; Pt100/Pt1000 датчик температури -200...600°C Ni100/Ni1000 датчик температури -50...150°C
Джерело живлення	Зовнішнє живлення
Напруга живлення	24В пост. струму
Межі відхилення напруги живлення	20,4...28,8В
Споживаний струм	50мА у 5В пост. струму вбудований 60мА у 24В пост. струму зовнішній
Допустиме тривале перевантаження	40мА на аналоговий вхід за струмом; 13В на аналоговий вхід за напругою
Тривалість вибірки	160мс
Період опитування	160мс на канал + 1 цикл керування (аналог. вхід напруга/струм); 320мс на канал + 1 цикл керування (аналог. вхід датчик температури)
Похибка вимірювання	+/-0,2% повної шкали 0...10В; +/-0,2% повної шкали 0...20мА; +/-0,4% шкали Pt100/Pt1000, Ni100/Ni1000
Сумісність серій продукту	Twido; Advantys OTB



Мал. 3.2. Модуль розширення аналогових входів TM2AMI4LT

3.2.2. Вибір датчиків температури зерна та агенту сушіння та визначення їх передатних функцій

З урахуванням діапазону вимірювання, інерційності та сумісності з модулями TM2AMI4LT обрано термоперетворювач опору ОВЕН ДТС125Л, який формує уніфікований сигнал 4–20 мА та відповідає вимогам ДСТУ 2858-94. Він перетворює температуру у зміну омичного опору, що далі трансформується у струмовий вихідний сигнал.

Таблиця 3.3.

Основні технічні характеристики термоперетворювача опору ДТС125Л

Діапазон вимірюваних температур, °C	0...+180
Номінальна статична характеристика (НСХ)	100М
Клас допуску	В
Показник теплової інерції, с	8 (при Ø гільзи 6мм)

Ступінь захисту від пилу та води	IP55
Матеріал захисної арматури	Ст. 12X18H10T
Діапазон умовного тиску, мПа	0,4...4,0
Стійкість до вібрації	Група вик. N3
Кліматичне виконання	УЗ



Мал. 3.3. Термоперетворювач опору з уніфікованим вихідним сигналом ОВЕН ДТС125

За динамічними властивостями датчик є інерційною ланкою,

передатна функція якого має вигляд
$$W_{ПВП}(s) = \frac{k_{ПВП}}{T_{ПВП} \cdot s + 1}.$$

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

$$k_{ПВП} = \frac{\Delta I}{\Delta T} = \frac{20 - 4}{180 - 0} = 0,089 \frac{mA}{^{\circ}C}, \quad (3.1)$$

Враховуючи, що показник теплової інерції сприймаючого елемента складає $T_{ПВП} = 8 \text{ c}$ (таблиця 3.3), передатна функція датчика ДТС125

$$W_{ПВП}(s) = \frac{k_{ПВП}}{T_{ПВП} \cdot s + 1} = \frac{0,089}{8 \cdot s + 1}.$$

3.2.3. Вибір датчиків вологості зерна

Для вимірювання вологості зерна обраний датчик вологості PCE-A-315 (мал. 3.4).

Технічні характеристики мікрохвильового вологоміра зерна PCE-A-315 наведені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4.

Технічні характеристики мікрохвильового вологоміра PCE-A-315

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



Мал. 3.4. Мікрохвильовий вологомір зерна PCE-A-315

3.2.4. Вибір датчиків рівня зерна

Як датчик нижнього та верхнього рівня зернової маси у надсушильному бункері шахтної зерносушарки вибраний датчик рівня типу ДПУ-10 (мал. 3.5).



Мал. 3.5. Датчик граничного рівня сипких матеріалів ДПУ-10

Датчик ДПУ-10 працює за принципом зміни коливань вібраційної «виделки», збудженої п'єзоелементами. При зануренні у продукт амплітуда коливань змінюється, що фіксується контролером. На основі цього формується команда на спрацювання реле та керування підключеним навантаженням.

Технічні характеристики датчика рівня ДПУ-10 наведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5.

Технічні характеристики датчика рівня сипких продуктів ДПУ-10

Принцип дії	вібраційний
Температура контролюваного матеріалу	від -40°C до +60°C
Робочий тиск	1 атм.
Робочий температурний діапазон	від -40°C до +85°C
Вага	до 2,5 кг
Матеріал резонатора датчика	нержавіюча сталь

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

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

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

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

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

Позначимо через ω_{1V} швидкість обертання поля статора при частоті f_V .

Тоді відносна швидкість поля

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

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

Введемо поняття фіктивного ковзання

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

Дійсна швидкість обертання при частоті f_V

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

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

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

Для малих значень ковзання обертаючий момент двигуна пропорційний ковзанню

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

Підставляючи (3.6) та (3.7) у вихідне рівняння

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

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

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

Цей вираз можна представити як

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

Якщо за вхідну величину прийняти відносну швидкість поля v , а за

вихідну – відносне ковзання $\sigma = \frac{s_\phi}{s_H}$, то вираз (3.10) матиме вигляд

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

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

Тоді передатна функція асинхронного електродвигуна при частотному керуванні

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

Передатна функція асинхронного електродвигуна у цьому випадку

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

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

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

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

β - жорсткість механічної характеристики;

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

де M_{KP} - критичний момент електродвигуна;

S_{KP} - критичне ковзання електродвигуна.

Розрахуємо необхідні величини для визначення передатної функції за виразами (3.13) – (3.16). Вихідні дані – каталожні значення для електродвигуна АИР100S4УЗ [28], технічні характеристики наведені в табл. 5.1 магістерської роботи.

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

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

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

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

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

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

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

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

Тоді

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

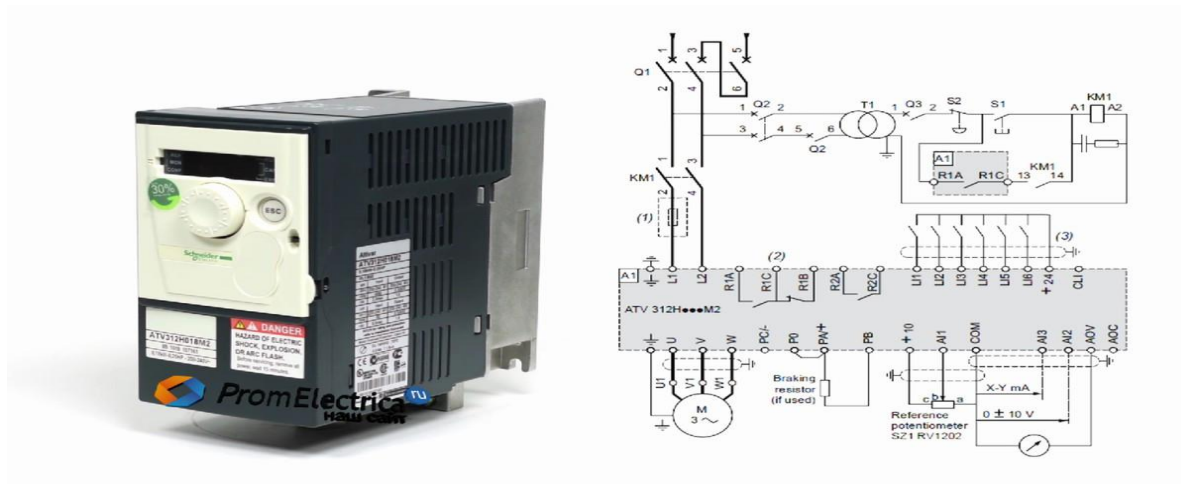
$$T_{BM} = \frac{J_{3B}}{\beta} = \frac{0,1}{1,18} = 0,085 \text{ с}. \quad k_{BM} = \frac{\omega_H}{f} = \frac{147,6}{50} = 2,95 \frac{\text{рад./с}}{\text{Гц}}.$$

Отже, передатна функція електродвигуна АИР100S4У3 при частотному керуванні

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

3.2.6. Вибір частотного перетворювача

У системі керування шахтною зерносушаркою для регулювання швидкості приводу розвантажувального шнека застосовано частотний перетворювач Altivar ATV312 (Schneider Electric мал 3.6.).



Мал. 3.6. Зовнішній вигляд перетворювача частоти

Altivar ATV312 фірми Schneider Electric

Частотні перетворювачі серії **Altivar ATV312** належать до високотехнологічних приводів потужністю 0,75–75 кВт і забезпечують розширені можливості керування електродвигунами. Потужність перетворювача частоти, або необхідна їх кількість для живлення усіх електродвигунів приводу вентиляторів, визначається за таблицею 3.6.

Таблиця 3.6.

Технічні характеристики моделей перетворювачів частоти

типу Altivar ATV312 фірми Schneider Electric

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

Оскільки для приводу розвантажувального шнеку використовується асинхронний трифазний електродвигун АІР100S4У3 потужністю 3,0 кВт, згідно з табл. 3.6 необхідно використати частотний перетворювач Altivar ATV312HU30N4.

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

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

$$W_{нч}(s) = \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}. \quad (4.1)$$

Передатна функція цифрового ПІД-регулятора має вигляд:

$$W_{pp}(z) = K_p + \frac{K_i T(z+1)}{2(z-1)} + \frac{K_d(z-1)}{Tz} =$$

$$\frac{K_i T^2 + 2K_d + 2K_p T}{2Tz(z-1)} \left(z^2 + \frac{K_i T^2 - 2K_p T - 4K_d}{K_i T^2 + 2K_d + 2K_p T} z + \frac{2K_d}{K_i T^2 + 2K_d + 2K_p T} \right) \quad (4.2)$$

При цьому отримується система двох рівнянь з трьома невідомими:

$$\begin{cases} \frac{K_i T^2 - 2K_p T - 4K_d}{K_i T^2 + 2K_d + 2K_p T} = -(z_1 + z_2) = d \\ \frac{2K_d}{K_i T^2 + 2K_d + 2K_p T} = z_1 z_2 = c \end{cases} \quad (4.3)$$

Оскільки рівняння (4.2) та (4.3) мають зайву змінну, то один з параметрів слід визначати за додатковими технологічними умовами.

$$\Delta x(t) = C_0 \cdot x_{ex}(t) + C_1 \cdot \frac{dx_{ex}(t)}{dt} + \frac{C_2}{2!} \cdot \frac{d^2 x_{ex}(t)}{dt^2} + \dots \quad (4.4)$$

Для астатичної системи добротність за швидкістю можна визначити

як відношення швидкості зміни вхідного сигналу $\frac{dx_{ex}(t)}{dt} = \dot{x}_{ex}$ до усталеної похибки

$$K_v = \frac{\dot{x}_{ex}}{\Delta x_{уст}} \quad (4.5)$$

при лінійній зміні вхідного сигналу $x_{ex}(t) = kt$. Тоді швидкість

$$\Delta x_{ex} = const = k, \text{ а } Z\text{-зображення вхідного сигналу } X_{ex}(z) = \frac{kTz}{(z-1)^2}.$$

Зображення динамічної похибки матиме вигляд:

$$\Delta X(z) = \frac{X_{ex}(z)}{1 + W_{roz}(z)} = \frac{X_{ex}(z)}{1 + W_{pez}(z)W_{нч}(z)} \quad (4.6)$$

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

$$\begin{aligned} \Delta x_{уст} &= \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} \Delta X(z) = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} \frac{X_{ex}(z)}{1 + W_{pez}(z)W_{нч}(z)} = \\ &= \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} \frac{\frac{kTz}{(z-1)^2}}{1 + W_{pez}(z)W_{нч}(z)} = \frac{kT}{\lim_{z \rightarrow 1} [(z-1)(1 + W_{pez}(z)W_{нч}(z))]} = \\ &= \frac{kT}{\lim_{z \rightarrow 1} [(z-1) \cdot W_{pez}(z)W_{нч}(z)]}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Враховуючи, що $\Delta x_{ex} = k$, отримаємо:

$$\Delta x_{уст} = \frac{\Delta x_{ex}}{\frac{1}{T} \lim_{z \rightarrow 1} [(z-1) \cdot W_{pez}(z)W_{нч}(z)]}. \quad (4.8)$$

Тоді для систем з ПД-регулятором:

$$\begin{aligned} K_V &= \frac{\Delta x_{ex}}{\Delta x_{уст}} = \frac{1}{T} \lim_{z \rightarrow 1} [(z-1) \cdot W_{pez}(z)W_{нч}(z)] = \\ &= \frac{1}{T} \lim_{z \rightarrow 1} \left[\left((z-1)K_p + (z-1) \frac{K_i T(z+1)}{2(z-1)} + (z-1) \frac{K_d(z-1)}{z} \right) W_{нч}(z) \right]. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Остаточно, добротність за швидкістю для систем з ПД-регулятором

$$K_V = \lim_{z \rightarrow 1} W_{нч}(z) \cdot K_i. \quad (4.10)$$

При цьому похибка слідування при лінійній зміні вхідного сигналу

$x_{ex}(t) = kt$ буде дорівнювати:

$$\Delta x_{уст} = \varepsilon_{tr} = \frac{k}{K_V} \quad (4.11)$$

Коефіцієнт інтегруючої складової регулятора тоді визначається:

$$K_i = \frac{K_V}{\lim_{z \rightarrow 1} W_{нч}(z)} \quad (4.12)$$

Рекомендовані значення коефіцієнта добротності за швидкістю залежать від постійних часу об'єкту (табл. 4.1).

Таблиця 4.1.

Залежність коефіцієнту добротності за швидкістю
від постійних часу об'єкта

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

Передатні функції складових елементів САК:

$$W_{ПВП}(s) = \frac{0,089}{8 \cdot s + 1}.$$

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

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

Передатна функція розімкненої неперервної частини

$$W_{РОЗ}(s) = \frac{0,089 \cdot 2,95 \cdot 0,39}{(8 \cdot s + 1) \cdot (0,085 \cdot s + 1) \cdot (1610 \cdot s + 1)} = \frac{0,102}{(8 \cdot s + 1) \cdot (0,085 \cdot s + 1) \cdot (1610 \cdot s + 1)}.$$

Передатна функція замкненої неперервної частини

$$W_{ЗАМ}(s) = \frac{W_{РОЗ}(s)}{1 + W_{РОЗ}(s)} = \frac{\frac{0,102}{(8 \cdot s + 1) \cdot (0,085 \cdot s + 1) \cdot (1610 \cdot s + 1)}}{1 + \frac{0,102}{(8 \cdot s + 1) \cdot (0,085 \cdot s + 1) \cdot (1610 \cdot s + 1)}}.$$

$$W_{3AM}(s) = \frac{0,102}{1094,8s^3 + 13017s^2 + 1618,085s + 1,102}$$

Вимірюваними у дискретні моменти часу з інтервалом

$$T_u \leq \frac{\pi}{\omega_c} \quad (4.13)$$

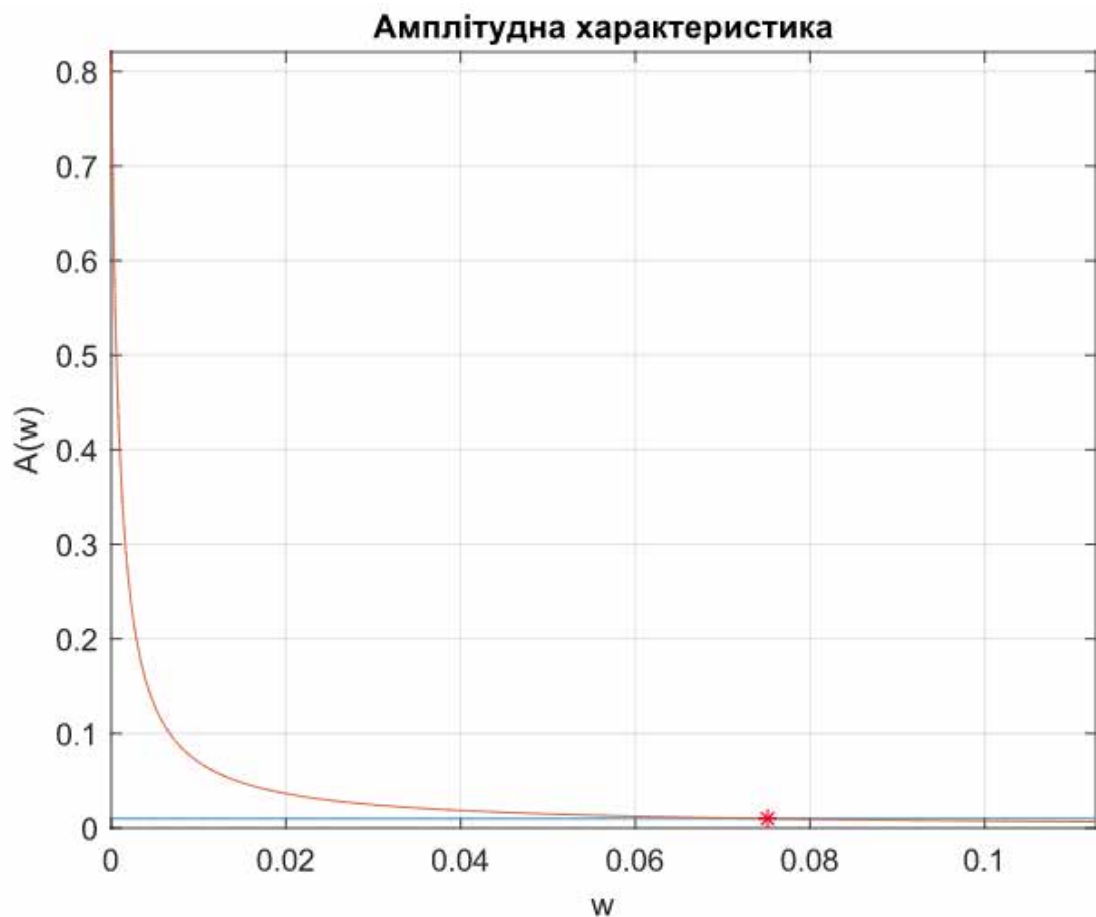
При заданій точності відтворення сигналу можна вважати, що спектр сигналу

$$|W_{3.нч}(j \cdot \omega)| \leq \theta_{\text{зад}}, \quad (4.14)$$

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

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

Будуємо АЧХ замкненої неперервної частини (мал. 4.1) системи та визначаємо час квантування (за допомогою математичного пакету MATLAB).



Мал. 4.1. АЧХ замкненої неперервної частини САК

```

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

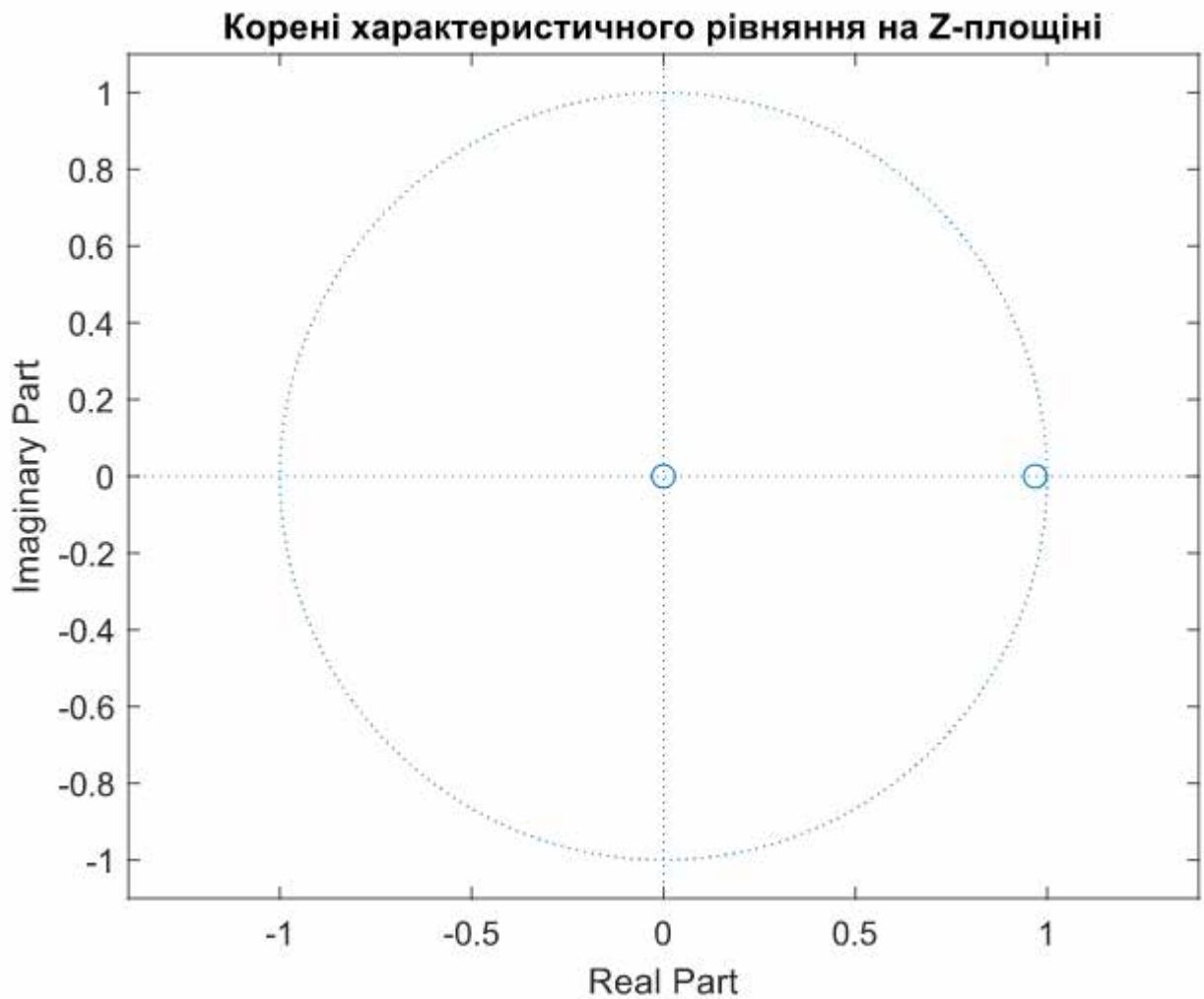
Дискретна передатна функція розімкнутої неперервної частини
Wncz =
    0.0313 z + 1.032e-05
    -----
    z^2 - 0.9686 z
Sample time: 41.804 seconds
Discrete-time transfer function.
Корені характеристичного рівняння
Zk =
     0
    0.9686
Корені характеристичного рівняння
a1 =
1312.0
Корені характеристичного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

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

Диференціальний параметр складової ПІД-регулятора
Kd =
     0

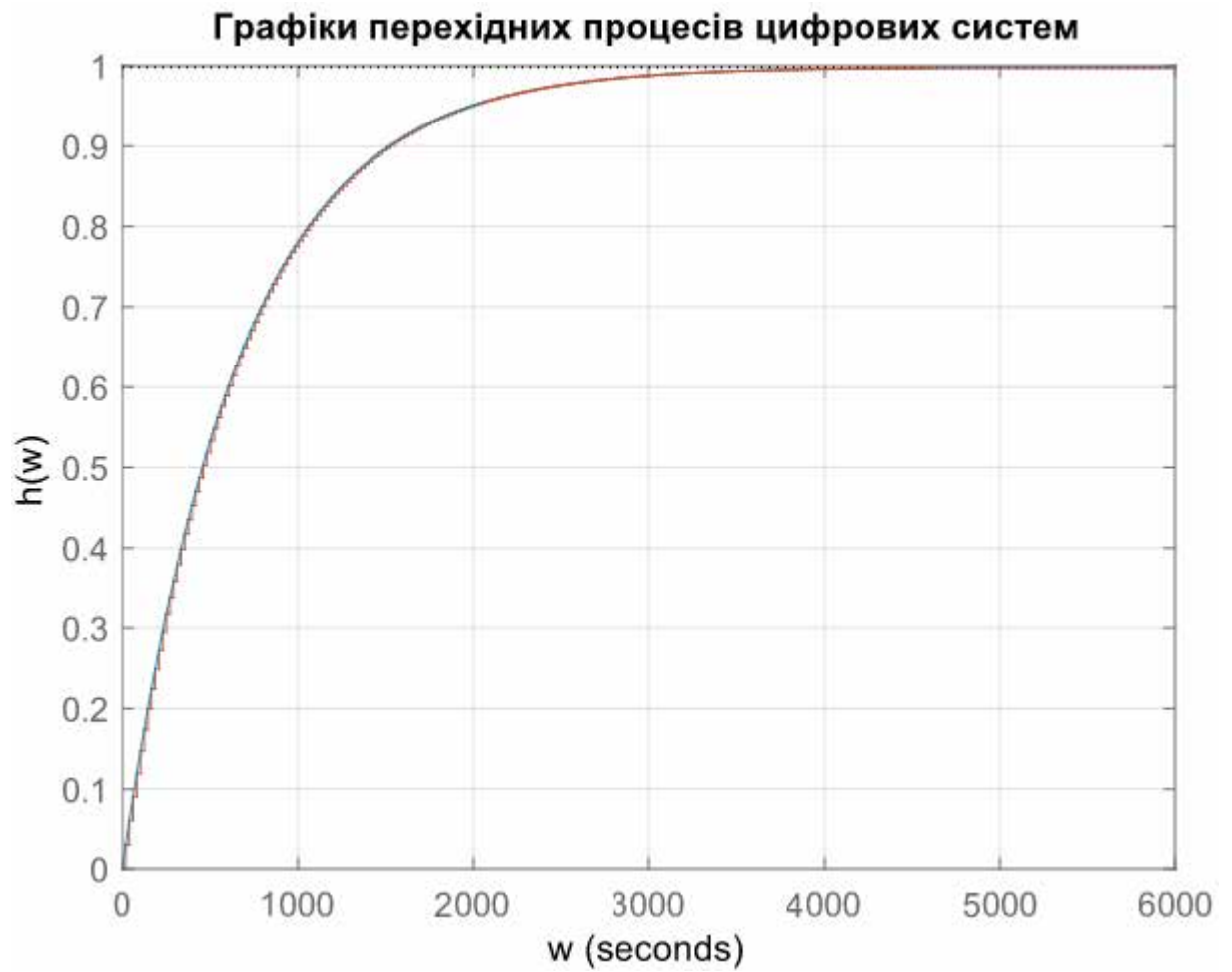
```

Згідно цього критерію усі корені характеристичного рівняння повинні знаходитися в колі одиничного радіусу на z -площині для дійсних коренів $|z_k| < 1$ (мал. 4.2), і оскільки усі корені знаходяться у колі – система є стійкою.



Мал. 4.2. Корені характеристичного рівняння на z-площині

Показники якості роботи системи отримаємо, побудувавши перехідний процес цифрової системи керування у пакеті MATLAB (мал. 4.3). З кривої перехідного процесу отримаємо: час регулювання дорівнює 3000 с, відсутні помилки регулювання та перерегулювання.



Мал. 4.3. Перехідний процес САК температурним режимом
сушіння зерна у шахтній зерносушарці

РОЗДІЛ 5

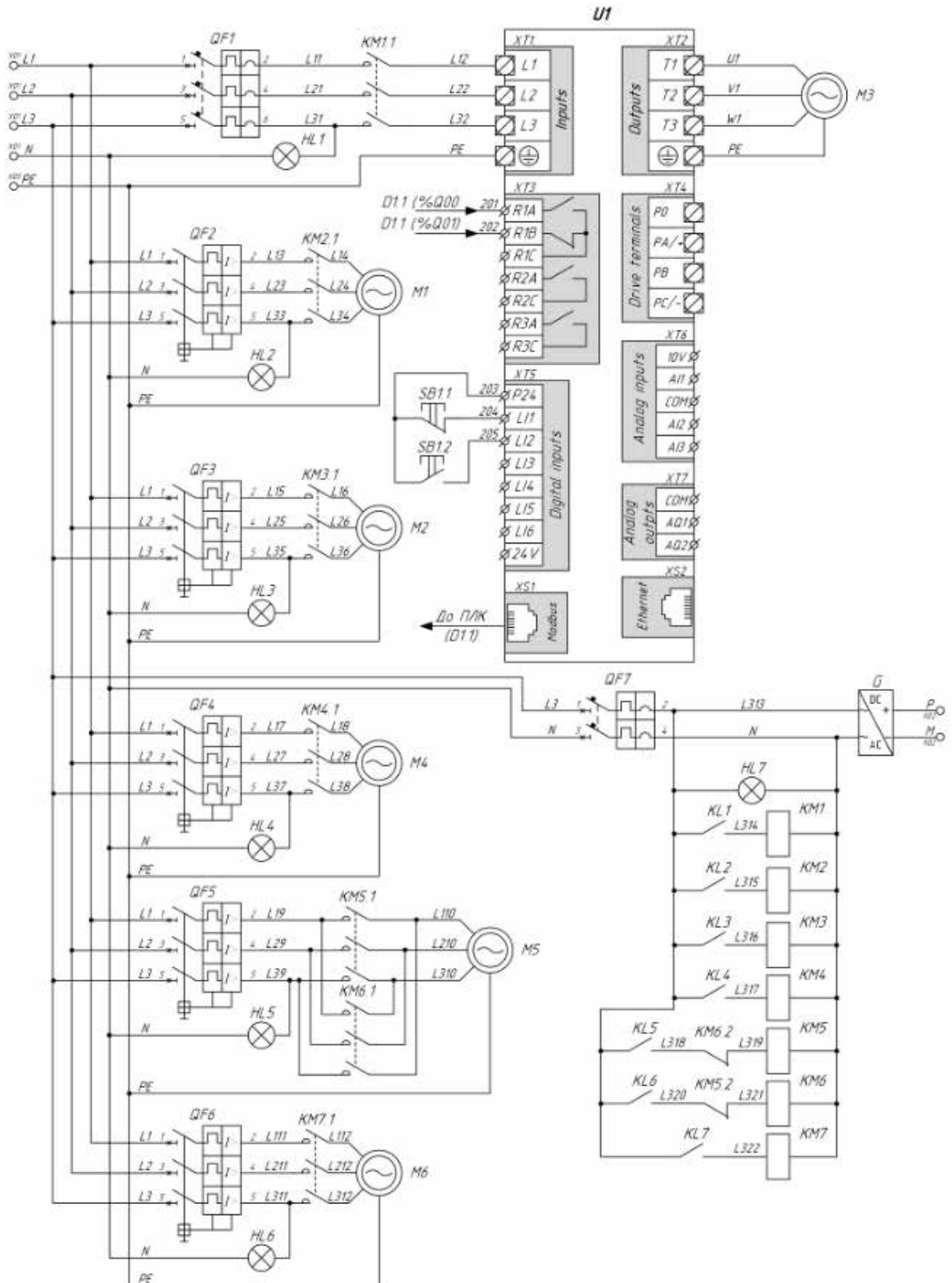
СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

5.1 Розробка схеми електричної принципової системи автоматичного керування шахтною зерносушаркою LAW SBC-8LE

Схема електрична принципова системи автоматичного керування шахтною зерносушаркою LAW SBC-8LE зображена на мал. 5.1, 5.2 та 5.3.

Схема системи керування побудована на обладнанні Schneider Electric: ПЛК Modicon M238 TM238LFDC24DT з модулями аналогових входів TM2AM14LT, релейними модулями TWDDRA8RT та частотним перетворювачем ATV312HU30N4. Система підтримує ручний та автоматичний режими роботи. Алгоритм функціонування передбачає:

1. увімкнення автоматичних вимикачів QF1...QF7;
2. запуск програми ПЛК кнопкою SB2.1;
3. у режимі «Автоматичний» — 10-хвилинне вентилявання шахти вентиляторами M1 і M2;
4. після вентилявання — увімкнення норії M4 та подачу зерна до надсушильного бункера; при спрацюванні датчика верхнього рівня D1.2 починається завантаження шахти сушіння.



Мал. 5.1. Система автоматичного керування шахтною зерносушаркою
LAW SBC-8LE. Схема електрична принципова

5. Разом із запуском завантажувальної норії вмикається теплогенератор, після чого агент сушіння подається в зону нагріву та зону сушіння.

6. Через 30 хвилин активується електродвигун М3 розвантажувального шнека, який подає зерно на рециркуляційну норію М5.

7. ПЛК отримує дані про температуру та вологість від датчиків D1.6–D1.11 через модулі D1.4 і D1.5; експозиція сушіння регулюється частотним перетворювачем U1 шляхом зміни швидкості приводу М3.

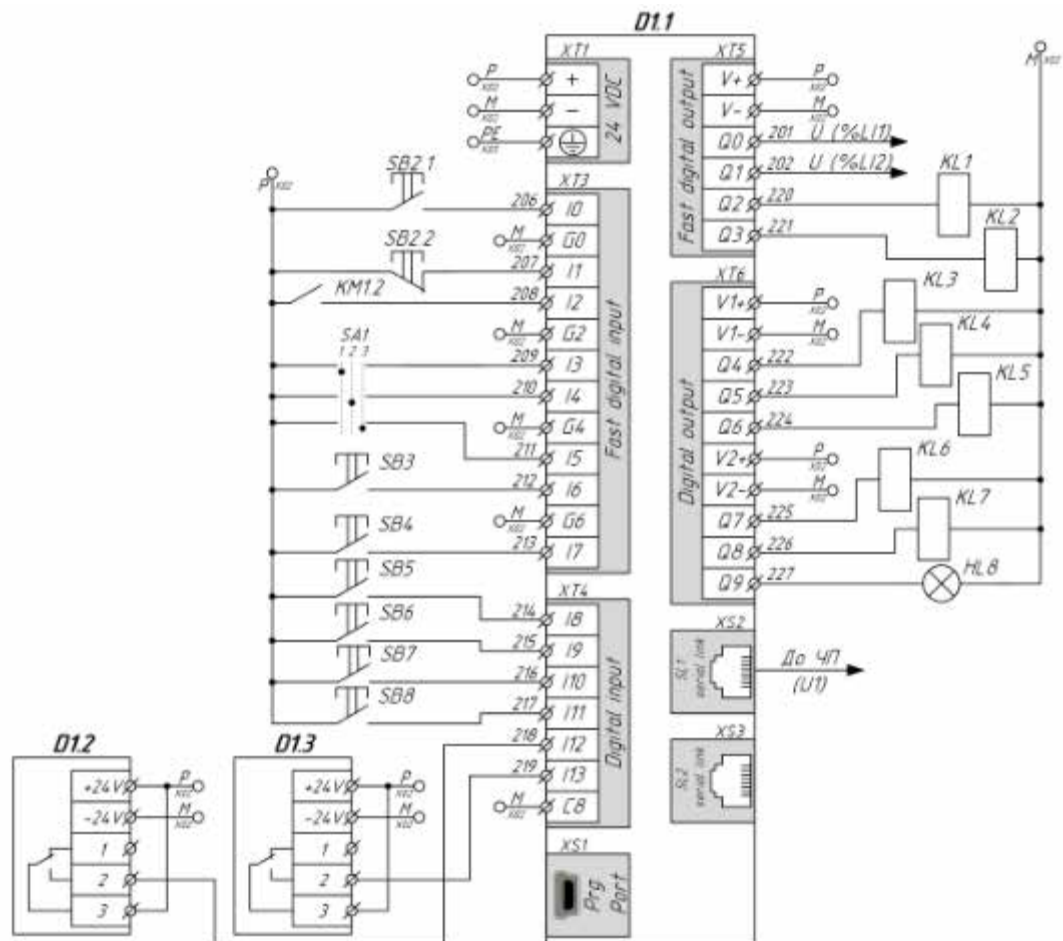
8. Зерно, що не досягло необхідної вологості, повертається на повторне сушіння через рециркуляційну норію М5 та завантажувальну норію М4.

9. Після досягнення заданої вологості рециркуляційна норія М5 переходить у реверс, вмикається норія вивантаження М6, а М4 працює ще 2 хвилини для очищення. Сушарка завершує роботу після повного спорожнення шахти та спрацювання датчика нижнього рівня D1.3.

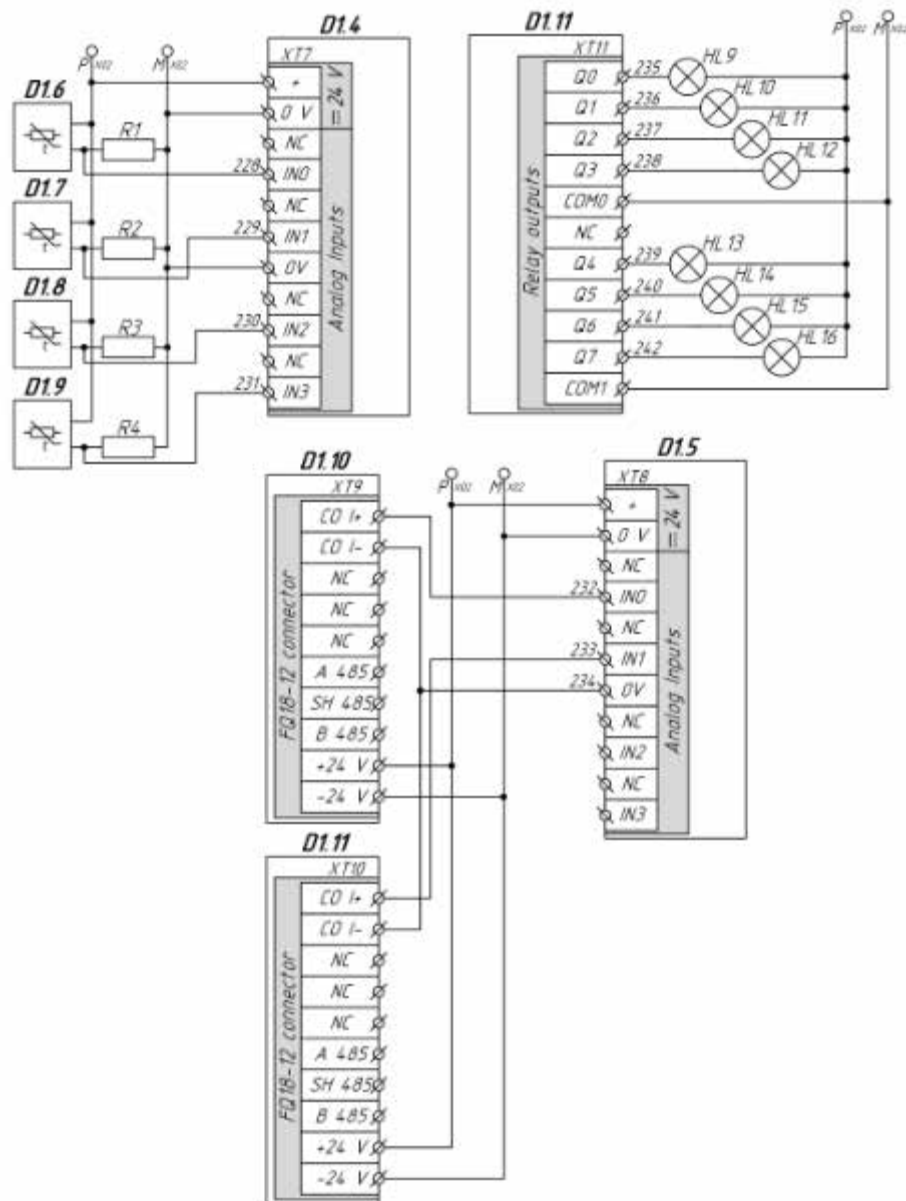
10. Після закінчення сушіння зупиняються електродвигуни М1, М2 та М3 приводу відповідно відцентрових вентиляторів та вивантажувального шнеку, вимикається теплогенератор. Через 2 хв. зупиняються електродвигуни М5 та М6 приводу рециркуляційної та розвантажувальної норії.

Повний цикл сушіння завершений.

Лампи HL1-HL8 на принциповій схемі (мал. 5.3) сигналізують про наявність напруги живлення у відповідних колах керування електродвигунами та САК, лампи HL9-HL16 – про виконання відповідних технологічних операцій.

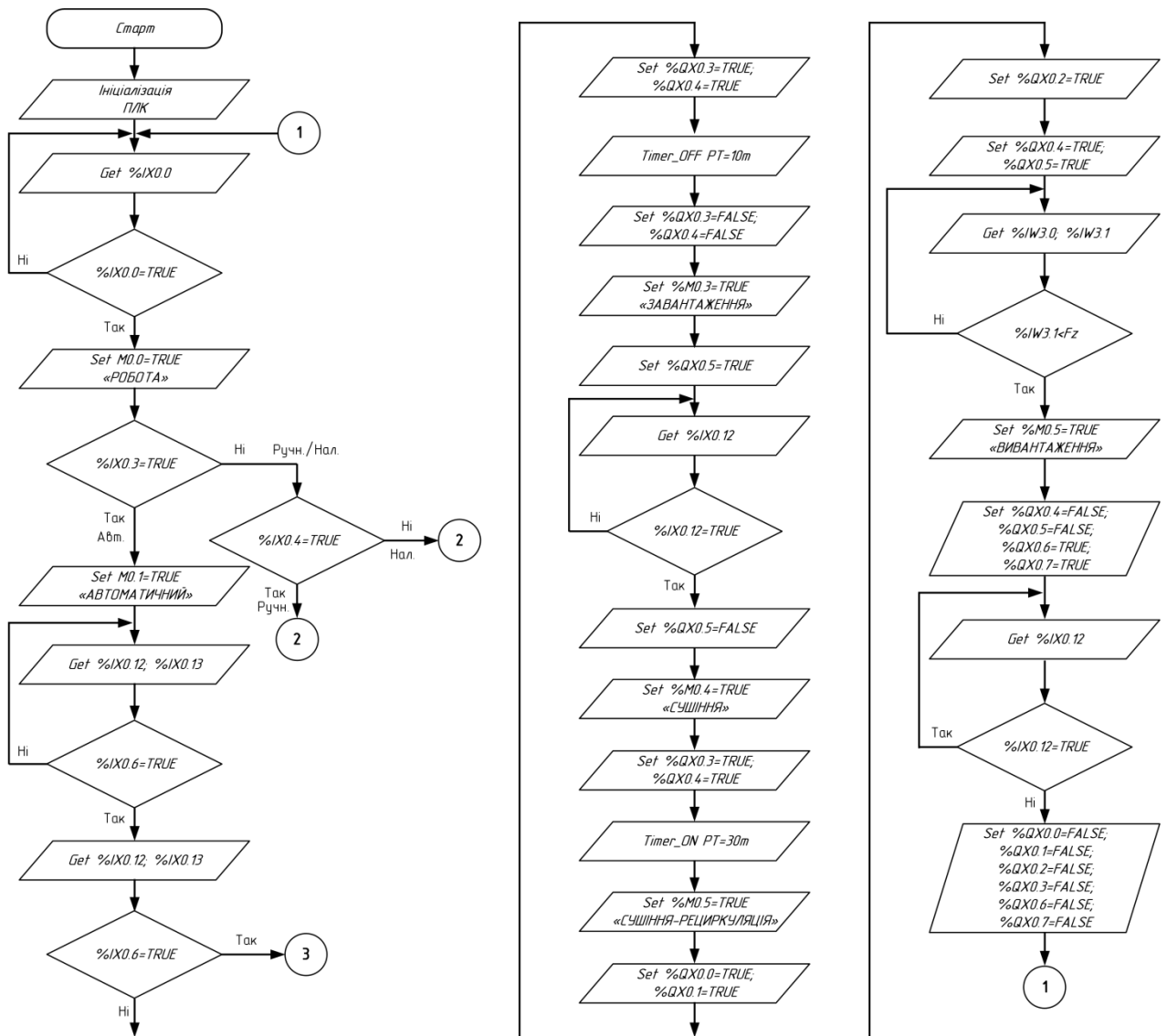


Мал. 5.2. Система автоматичного керування шахтною зерносушаркою LAW SBC-8LE. Схема електрична принципова (продовження: приєднання електротехнічного обладнання до ПЛК Modicon M238)



Мал. 5.3. Система автоматичного керування шахтною зерносушаркою LAW SBC-8LE. Схема електрична принципова
(продовження: приєднання датчиків температури та вологості до модулів розширення аналогових входів TM2AM14LT)

Зазначеному опису роботи принципової схеми відповідає наступна блок-схема алгоритму роботи САК (мал. 5.4).



Мал. 5.4. Блок-схема алгоритму роботи САК шахтною зерносушаркою

5.2. Вибір апаратури захисту та керування

У системі автоматичного керування зерносушаркою LAW SBC-8LE пуск, зупинка та захист виконавчих механізмів здійснюються за допомогою автоматичних вимикачів і пускачів. Частотний перетворювач U1, що керує електродвигуном M3, підключений через автомат QF1 і пускач KM1, а захист двигуна від аварійних режимів забезпечує сам перетворювач. Електродвигуни вентиляторів та норій (M1, M2, M4, M5, M6) захищаються автоматичними

вимикачами з комбінованими розчіплювачами та відповідними пускачами. Коло керування захищене автоматичним вимикачем QF7.

Технічні характеристики електродвигунів наведені у табл. 5.1, 5.2.

Таблиця 5.1.

Технічні характеристики асинхронних трифазних електродвигунів АИР180М8У3 та АИР132S4У3 приводу відцентрових вентиляторів

Характеристика електродвигуна	Марка електродвигуна та позначення за принциповою схемою	
	АИР180М8У3 (М1)	АИР132S4У3 (М2)
Потужність, кВт	15	7,5
Напруга живлення, В	380/660	220/380, 380/660
Номинальний струм, А	34,1	15,6
Частота обертання поля статора, об./хв.	750	1500
Частота обертання валу, об./хв.	730	1450
$\cos\varphi$	0,76	0,84
ККД, %	88,0	87,0
Відношення моментів $M_{\text{пуск}}/M_{\text{н}}$	2,0	2,3
Відношення моментів $M_{\text{max}}/M_{\text{н}}$	2,0	2,3
Відношення струмів $I_{\text{пуск}}/I_{\text{н}}$	6,6	7,0
Момент інерції, $\text{кг}\cdot\text{м}^2$	0,1	0,0227
Режим роботи	Тривалий, S1	Тривалий, S1
Термічний клас ізоляції обмоток	F – до 150°C	F – до 150°C
Ступінь захисту від вологи та пилу	IP54	IP54
Вага, кг	172,0	67,0

Таблиця 5.2.

Технічні характеристики асинхронних трифазних електродвигунів
АИР100S4У3 та АИР100L6У3 приводу розвантажувального шнеку та норій
(завантаження та вивантаження)

Характеристика електродвигуна	Марка електродвигуна	
	АИР100S4У3 (М3)	АИР100L6У3 (М4, М5, М6)
Потужність, кВт	3,0	2,2
Напруга живлення, В	3ф,220/380,50Гц	3ф,220/380,50Гц
Номинальний струм, А	6,8	5,6
Частота обертання поля статора, об/хв.	1500	1000
Частота обертання валу, об./хв.	1410	935
cosφ	0,82	0,76
ККД, %	82,6	79,0
Відношення моментів $M_{\text{пуск}}/M_{\text{н}}$	2,3	2,0
Відношення моментів $M_{\text{max}}/M_{\text{н}}$	2,3	2,1
Відношення струмів $I_{\text{пуск}}/I_{\text{н}}$	7,0	6,5
Момент інерції, кг·м ²	0,01	0,02
Режим роботи	Тривалий, S1	Тривалий, S1
Термічний клас ізоляції обмоток	F – до 150°C	F – до 150°C
Ступінь захисту від вологи та пилу	IP54	IP54
Вага, кг	38,0	36,3

Крім зазначеного обладнання, у колі керування встановлені кнопкові пости керування **SB1**, **SB2**, кнопки керування **SB3- SB8**, проміжні реле **KL1- KL7**, перемикач режимів роботи (ручний, автоматичний) **SA1**, лампи світлової сигналізації.

5.2.1. Вибір автоматичних вимикачів

Таблиця 5.3.

Вибір автоматичних вимикачів

Електродвигун	Автоматичний вимикач, виконання умов
АИР100S4УЗ (М3) Потужність 3,0 кВт Струм $I_n = 6,8\text{А}$ Пусковий струм $I_{\text{пуск}} = 7 \cdot 6,8 = 47,6\text{А}$ $1,6 \cdot I_{\text{пуск}} = 76,16\text{А}$	іК60N С 20А 3Р (трифазний, з електромагнітним розчіплювачем) $U_{ав} = 400\text{В}, U_{ав} \geq U_m; 400\text{В} > 380\text{В}$ $I_{ном.ав} = 20\text{А}; I_{ном.ав} \geq I_{ном.ел.дв}; 20\text{А} > 6,8\text{А}$ $I_{ном.розч} = (5...10) I_{ном.ав} = (100...200)\text{А}$ $I_{ном.розч} \geq I_{ном.ел.дв}; (100...200)\text{А} > 6,8\text{А}$ $I_{від.розч} \geq (1,5...1,6) I_{пус.}$ $(100...200)\text{А} > 76,16\text{А}$
АИР180М8УЗ (М1) Потужність 15,0 кВт Струм $I_n = 34,1\text{А}$ Пусковий струм $I_{\text{пуск}} = 6,6 \cdot 34,1 = 225,06\text{А}$ $1,6 \cdot I_{\text{пуск}} = 360,1\text{А}$	GV2ME36 (трифазний, з електромагнітним та тепловим розчіплювачами) $U_{ав} = 690\text{В}, U_{ав} \geq U_m; 690\text{В} > 380\text{В}$ $I_{ном.ав} = 36\text{А}; I_{ном.ав} \geq I_{ном.ел.дв}; 36\text{А} > 34,1\text{А}$ $I_{ном.розч} = 416\text{А}, I_{ном.розч} \geq I_{ном.ел.дв}; 416\text{А} > 34,1\text{А}$ $I_{від.розч} \geq (1,5...1,6) I_{пус.}, 416\text{А} > 360,1\text{А}$ Регулювання захисту теплових розчіплювачів 28...36А

Таблиця 5.3.

Вибір автоматичних вимикачів (продовження)

Електродвигун	Автоматичний вимикач, виконання умов
АИР132S4УЗ (М2) Потужність 7,5 кВт Струм $I_n = 15,6\text{А}$ Пусковий струм $I_{\text{пуск}} = 7 \cdot 15,6 = 109,2\text{А}$ $1,6 \cdot I_{\text{пуск}} = 174,7\text{А}$	GV2ME21 (трифазний, з електромагнітним та тепловим розчіплювачами) $U_{ав} = 690\text{В}, U_{ав} \geq U_m; 690\text{В} > 380\text{В}$ $I_{ном.ав} = 23\text{А}; I_{ном.ав} \geq I_{ном.ел.дв}; 23\text{А} > 15,6\text{А}$ $I_{ном.розч} = 327\text{А}, I_{ном.розч} \geq I_{ном.ел.дв}; 327\text{А} > 15,6\text{А}$ $I_{від.розч} \geq (1,5...1,6) I_{пус.}, 327\text{А} > 174,7\text{А}$ Регулювання захисту

	теплових розчіплювачів 17...23А
АИР100L6У3 (М4, М5, М6) Потужність 2,2 кВт Струм $I_n = 5,6\text{А}$ Пусковий струм $I_{\text{пуск}} = 6,5 \cdot 5,6 = 36,4\text{А}$ $1,6 \cdot I_{\text{пуск}} = 58,24\text{А}$	GV2ME10 (трифазний, з електромагнітним та тепловим розчіплювачами) $U_{ав} = 690\text{В}, U_{ав} \geq U_m; 690\text{В} > 380\text{В}$ $I_{ном.ав} = 6,3\text{А}; I_{ном.ав} \geq I_{ном.ел.дв}; 6,3\text{А} > 5,6\text{А}$ $I_{ном.розч} = 78\text{А}, I_{ном.розч} \geq I_{ном.ел.дв}; 78\text{А} > 5,6\text{А}$ $I_{від.розч} \geq (1,5...1,6) I_{пус.}, 78\text{А} > 58,24\text{А}$ Регулювання захисту теплових розчіплювачів 4...6,3А

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

$$U_{H.AB} \geq U_{Ж}; \quad (5.5)$$

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

$$I_{H.AB} > I_{K.KEP}, \quad (5.6)$$

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

$$I_{H.ROZCH} > I_{K.KEP}; \quad (5.7)$$

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

$$I_{ВДІС.РОЗЧ} > (1,5...1,6) \cdot I_{K.KEP}. \quad (5.8)$$

За принциповою схемою бачимо, що автоматичний вимикач QF7 захищає блок живлення G (блок живлення Hager ST312 230/24В, номінальний струм споживання 1,04А) та проміжні реле напруги KL1-KL7 (як буде показано далі, це реле напруги проміжні MY4-NS 24V DC із напругою живлення 24В постійного струму та споживаною потужністю 0,9Вт, тобто струмом споживання $0,9/24 = 0,0375\text{ А}$, із загальним струмом споживання $7 \cdot 0,0375 = 0,26\text{А}$). Тому приймаємо, що струм споживання кола керування дорівнює $1,04 + 0,26 = 1,3\text{ А}$. Тому для захисту кола керування вибраний

автоматичний вимикач iK60N C 2A – автоматичний вимикач із номінальним струмом 2A, двохполюсний, із струмом відсічки електромагнітних розчіплювачів $(5...10)I_n$. Умова 5.8 виконується:

$$I_{ВДС.РОЗЧ} > (1,5...1,6) \cdot I_{К.КЕР}$$

$$(5...10) \cdot 2 > (1,5...1,6) \cdot 1,3A; \quad 10...20A > 1,95...2,08A.$$

5.2.2. Вибір електромагнітних пускатів

Електромагнітні пускаті вибирають за наступними умовами:

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

$$U_{Н.ЕП} \geq U_{Ж}; \quad (5.9)$$

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

$$I_{Н.ЕП} \geq I_{Н}; \quad (5.10)$$

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

$$U_{Н.КОТ} \geq U_{КЕР}. \quad (5.11)$$

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

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

За вказаними умовами для відповідних електродвигунів були вибрані наступні електромагнітні пускачі (табл. 5.4).

Таблиця 5.4.

Вибір електромагнітних пускачів

Електродвигун	Електромагнітний пускач,
АИР100S4У3 (М3) Потужність 3,0 кВт Струм $I_n = 6,8\text{A}$	LC1D12M7 (трифазний, з 1NO+1NC допоміжними контактами) $U_{н.еп} \leq 690\text{В}, 25\dots 400\text{Гц}, 300\text{В пост.стр.}$ $U_{н.еп} \geq U_{ж}; 690\text{В} > 380\text{В}$ $I_{н.еп} = 12\text{A}; I_{н.еп} \geq I_{ном.ел.дв}; 12\text{A} > 6,8\text{A}$ $U_{н.кот} \geq U_{кер}; 690 > 220\text{ В}$
АИР180М8У3 (М1) Потужність 15,0 кВт Струм $I_n = 34,1\text{A}$	LC1D40M7 (трифазний, з 1NO+1NC допоміжними контактами) $U_{н.еп} \leq 690\text{В}, 25\dots 400\text{Гц}, 300\text{В пост.стр.}$ $U_{н.еп} \geq U_{ж}; 690\text{В} > 380\text{В}$ $I_{н.еп} = 40\text{A}; I_{н.еп} \geq I_{ном.ел.дв}; 40\text{A} > 34,1\text{A}$ $U_{н.кот} \geq U_{кер}; 690 > 220\text{ В}$
АИР132S4У3 (М2) Потужність 7,5 кВт Струм $I_n = 15,6\text{A}$	LC1D18M7 (трифазний, з 1NO+1NC допоміжними контактами) $U_{н.еп} \leq 690\text{В}, 25\dots 400\text{Гц}, 300\text{В пост.стр.}$ $U_{н.еп} \geq U_{ж}; 690\text{В} > 380\text{В}$ $I_{н.еп} = 18\text{A}; I_{н.еп} \geq I_{ном.ел.дв}; 18\text{A} > 15,6\text{A}$ $U_{н.кот} \geq U_{кер}; 690 > 220\text{ В}$

Таблиця 5.4.

Вибір електромагнітних пускачів (продовження)

Електродвигун	Електромагнітний пускач,
АИР100L6У3 (М4, М5, М6) Потужність 2,2 кВт Струм $I_n = 5,6\text{A}$	LC1D09M7 (трифазний, з 1NO+1NC допоміжними контактами)

	$U_{H.EП} \leq 690В, 25...400Гц, 300В \text{ пост.стр.}$ $U_{H.EП} \geq U_{Ж}; 690В > 380В$ $I_{H.EП} = 9А; I_{H.EП} \geq I_{ном.ел.дв}; 9А > 5,6А$ $U_{H.КОТ} \geq U_{КЕР}; 690 > 220 В$
--	--

5.2.3. Вибір проміжних реле

Проміжні реле для кола управління вибирають

- за напругою кола керування:

$$U_{H.РЕЛЕ} \geq U_{K.УПР}; \quad (5.12)$$

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

$$I_{H.РЕЛЕ} \geq I_{K.УПР}; \quad (5.13)$$

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

За вказаними умовами та згідно з технічними характеристиками вибрані проміжні реле напруги MY4-NS 24V DC. Після вибору кнопових постів, кнопок керування та сигнальних ламп, відомість електроприладів системи автоматичного керування шахтною зерносушаркою матиме наступний вигляд (табл. 5.5).

Таблиця 5.5.

Відомість електроприладів САК шахтною зерносушаркою LAW SBC-8LE

Познач.	Назва	Кільк.	Примітки
M1	Електродвигун асинхронний трифазний АИР180М8У3	1	15кВт
M2	Електродвигун асинхронний трифазний АИР132S4У3	1	7,5кВт
M3	Електродвигун асинхронний трифазний		

	АИР100S4У3	1	3,0кВт
M4-6	Електродвигун асинхронний трифазний АИР100L6У3	3	2,2кВт
QF1	Вимикач автоматичний iK60N C 20A	1	3п
QF2	Вимикач автоматичний GV2ME36	1	3п
QF3	Вимикач автоматичний GV2ME21	1	3п
QF4-6	Вимикач автоматичний GV2ME10	3	3п
QF7	Вимикач автоматичний iK60N C 2A	1	2п
U1	Частотний перетворювач ATV312HU30N4	1	
D1.1	Модульний ПЛК Modicon M238 TM238LFDC24DT	1	
D1.2-3	Датчик рівня зерна ДПУ-10	2	
D1.4-5	Модуль розширення аналогових входів TM2AM14LT	2	
D1.6-9	Датчик температури (термометр опору) ДТС125	4	
D1.10-11	Датчик вологості зерна PCE-A-315	2	
D1.12	Модуль розширення релейних виходів TWDDRA8RT	1	
KM1	Пускач електромагнітний LC1D12M7	1	1NC+1NO
KM2	Пускач електромагнітний LC1D40M7	1	1NC+1NO
KM3	Пускач електромагнітний LC1D18M7	1	1NC+1NO
KM4-7	Пускач електромагнітний LC1D09M7	4	1NC+1NO
G	Блок живлення Hager ST312 230/24В	1	
KL1-7	Реле напруги проміжне MY4-NS 24V DC	7	
SB1-2	Кнопковий пост "Старт-Стоп" ZB5 AW833743	2	NO, NC
SB3-8	Кнопка "Старт" ZB5 A333	6	NO
SA1	Перемикач пакетний K1I023NLH	1	3 положення
HL1-7	Лампа сигнальна A22-RLF-RT 220V	7	червона
HL8-16	Лампа сигнальна AD22-22DS 24V	9	зелена
R1-4	Резистор 2кОм	3	

5.3. Вибір проводів та кабелів

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

$$I_{\text{тр.доп}} \geq I_{\text{розр}}, \quad (5.14)$$

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

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

$$I_{\text{розр.дв}} = \frac{10^3 P_{\text{н.дв}}}{\sqrt{3} U_{\text{н}} \eta_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}}}. \quad (5.15)$$

Визначимо тривало допустимі струми для асинхронних трифазних електродвигунів:

АИР180М8У3 (М1)	$I_{\text{розр.дв}} = \frac{1000 \cdot 15}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,88 \cdot 0,76} = 34,08 \text{ А.}$
АИР132S4У3 (М2)	$I_{\text{розр.дв}} = \frac{1000 \cdot 7,5}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,87 \cdot 0,84} = 15,59 \text{ А.}$
АИР100S4У3 (М3)	$I_{\text{розр.дв}} = \frac{1000 \cdot 3,0}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,826 \cdot 0,82} = 6,73 \text{ А.}$
АИР100L6У3 (М4-6)	$I_{\text{розр.дв}} = \frac{1000 \cdot 2,2}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,79 \cdot 0,76} = 5,57 \text{ А.}$

Враховуючи умову (5.14) та відповідні розраховані значення тривало допустимих струмів, для підключення електродвигунів із відповідними апаратами для пуску і захисту вибрані такі кабелі (таблиця 5.6).

Таблиця 5.6.

Вибір кабелів живлення електродвигунів

Електродвигун	Кабель	Найбільший тривало допустимий струм навантаження, А
АИР180М8У3 (М1) $I_{\text{розр.дв}} = 34,08 \text{ А.}$	АВВГ 4х10 (переріз 10 мм ²), алюмінієві жили, полівінілхлоридна ізоляція	39

АИР132S4У3 (М2) $I_{\text{РОЗР.ДВ}} = 15,59 \text{ А.}$	АВВГ 4х2,5 (переріз 2,5 мм ²), алюмінієві жили, полівінілхлоридна ізоляція	19
АИР100S4У3 (М3) $I_{\text{РОЗР.ДВ}} = 6,73 \text{ А.}$	АВВГ 4х2,5 (переріз 2,5 мм ²), алюмінієві жили, полівінілхлоридна ізоляція	19
АИР100L6У3 (М4-6) $I_{\text{РОЗР.ДВ}} = 5,57 \text{ А.}$	АВВГ 4х2,5 (переріз 2,5 мм ²), алюмінієві жили, полівінілхлоридна ізоляція	19

Як було зазначено у п. 5.2.1, струм кола керування прийнятий таким, що дорівнює 1,3А. Тому для живлення кола керування вибираємо провід ПВ1х0,5 – провід з мідною жилою перерізом 0,5 мм² в полівінілхлоридній оболонці, тривало допустимий струм якого дорівнює 11 А.

Для підключення датчиків температури та вологості повітря використовується провід МГТФЕ 3х0,12 із фторопластовою ізоляцією, екранований [34].

Для вибору кабелю живлення шафи керування необхідно скористатись наступною умовою

$$I_{\text{М.РОЗР.}} = K_o \cdot \sum I_{\text{РОЗР.ДВ}} + I_{\text{КЕР}}, \quad (5.16)$$

де K_o – коефіцієнт одночасності роботи споживачів електроенергії (приймаємо, що усе обладнання працює одночасно, тому $K_o = 1$).

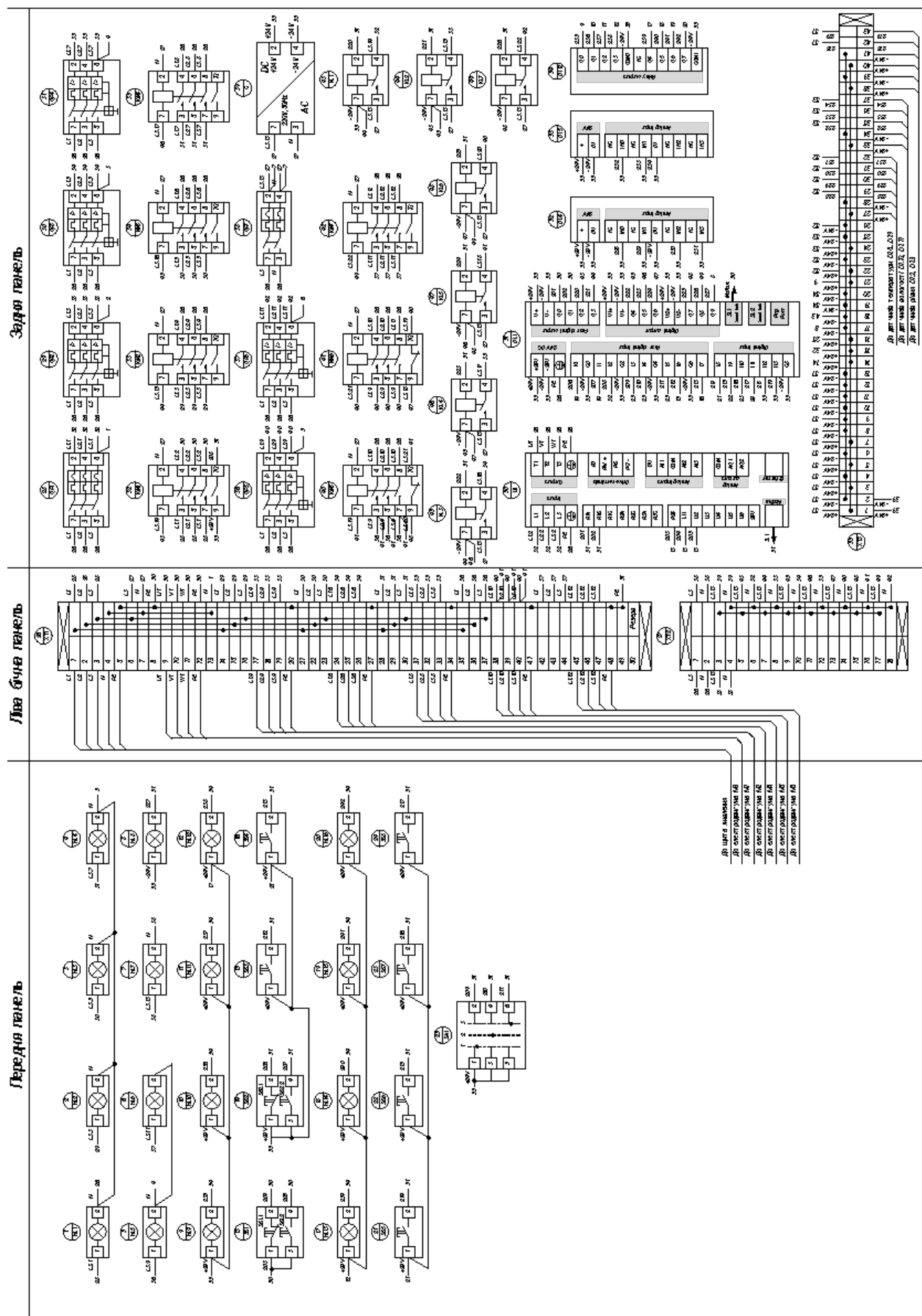
$$I_{\text{М.РОЗР.}} = K_o \cdot \sum I_{\text{РОЗР.ДВ}} + I_{\text{КЕР}} = 34,08 + 15,59 + 6,73 + 3 \cdot 5,57 + 1,3 = 74,41 \text{ А.}$$

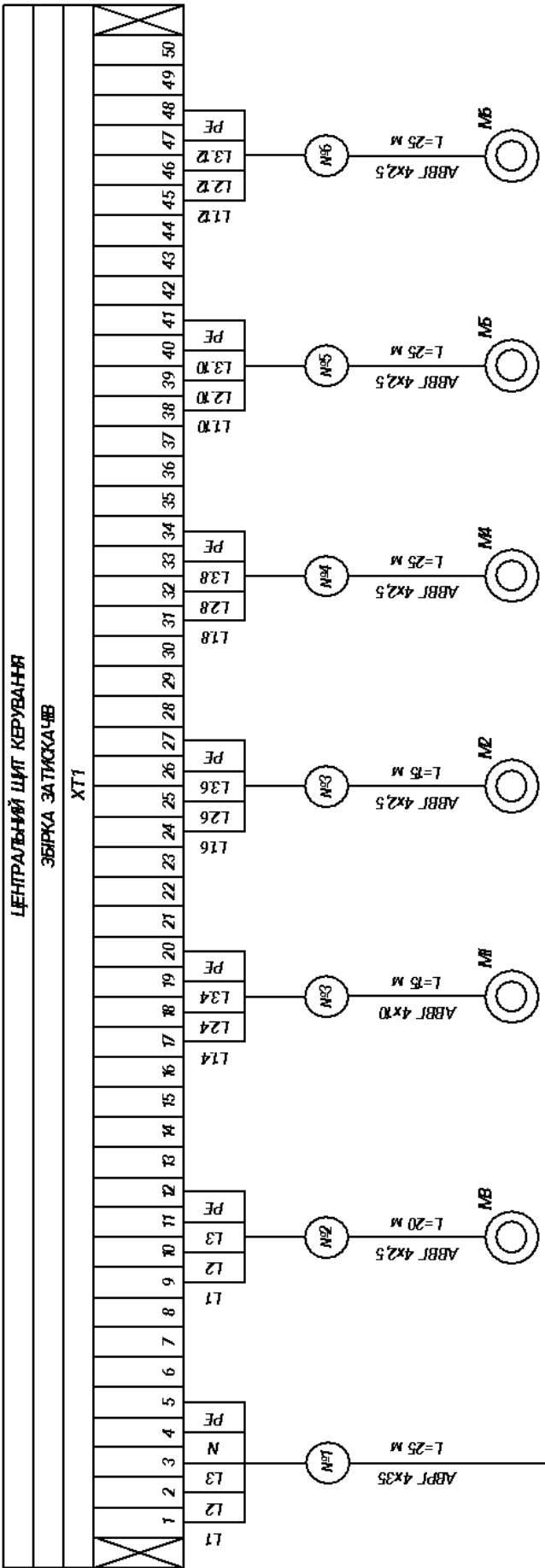
Для живлення шафи керування вибраний кабель АВРГ4х35, з алюмінієвими жилами перерізом 35мм², тривало допустимим струмом 85А [34].

5.4. Розробка електричних схем з'єднань та підключень системи керування шахтною зерносушаркою

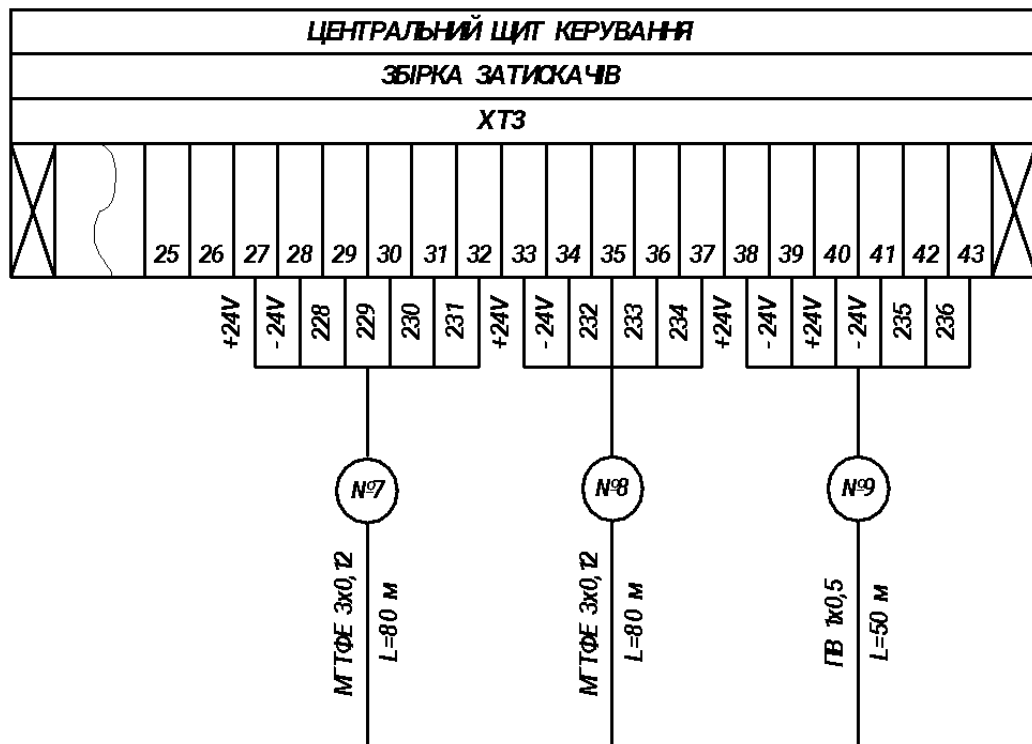
Схеми з'єднань виконують відповідно до загальних вимог: вони розробляються для одного щита або шафи керування, повністю відображають усі апарати та прилади, передбачені принциповою схемою, а їхні позиційні позначення та маркування кіл зберігаються без змін. Існують три способи виконання схем з'єднань — адресний, графічний і табличний. Для адресного та графічного способів щит розгортають в одну площину, прилади зображують спрощено у вигляді прямокутників із зазначенням номера виробу та його позиційного позначення, а внутрішні схеми апаратів подають за потреби. Вивідні затискачі позначають колами із заводським маркуванням, а елементи на платах — лише порядковими номерами.

Електрична схема з'єднань САК шахтної зерносушарки наведена на мал. 5.5, а схема електричних підключень — на мал. 5.6 та 5.7.





Назва обладнання	ШІТ живлення	Електродвигун приводу розвантажувального шкелю	Електродвигун приводу відцентрового вентилятора повітря в сирині	Електродвигун приводу завантаження зерна	Електродвигун приводу рециркуляційної норі	Електродвигун приводу вивантаження зерна
Тип, марка	ШІМ (100х80х350) V4P30	АВР100САУЗ (3 кВт)	АВР100МВУЗ (15 кВт)	АВР100САУЗ (7,5 кВт)	АВР100Л6УЗ (2,2 кВт)	АВР100Л6УЗ (2,2 кВт)



Назва обладнання	Датчик температури (4 шт.)	Датчик вологості зерна (2 шт.)	Датчик рівня зерна у надсушильному бункері (2 шт.)
Тип, марка	ДТС125	РСЕ-А-315	ДПУ-10

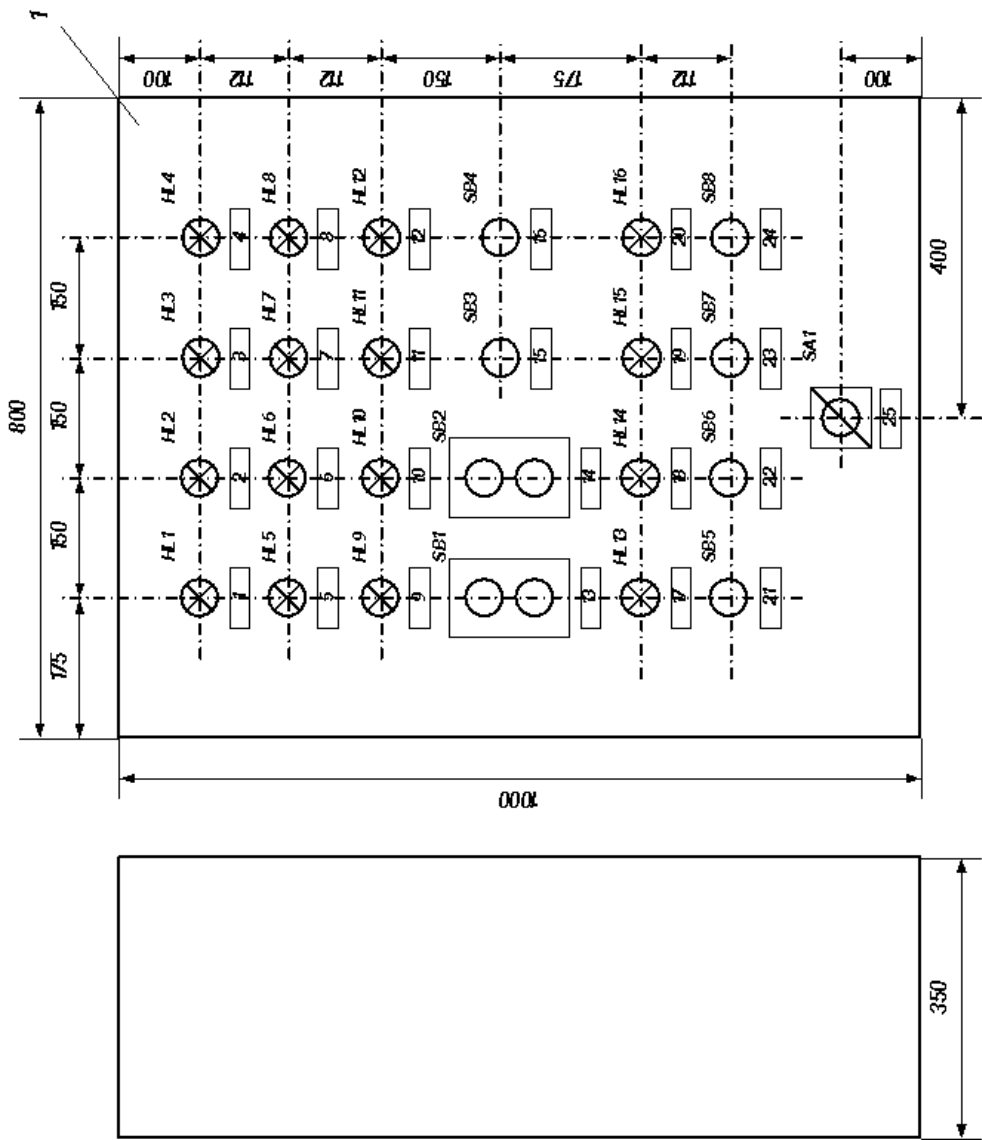
Мал. 5.7. Система автоматичного керування шахтною зерносушаркою.

Схема електрична підключень (продовження)

5.5. Вибір щита керування

Враховуючи габаритні розміри пристроїв системи керування, а також ту обставину, що частотний перетворювач потребує певного повітряного простору для внутрішнього вентилятора охолодження, вибираємо щит шафовий малогабаритний типу ЩШМ (1000x800x350)V4IP30.

Зовнішній вигляд щита керування зображений на мал. 5.8.



Грэм, пазнач	Найменування	Код	Лімітка
1	Ціт керування ЦДМ 1000х800х350	1	
Н1-7	Лампа сігнална А22-RLF-RT 220V	7	
Н8-16	Лампа сігнална А022-220S 24V	9	
SB1-2	Кнопковыі пост "Старт-Стоп" ZB5 АМ833743	2	NO, NC
SB3-8	Кнопка "Старт" ZB5 А333	6	NO
SA1	Переключач пакетныі К1002ЭМН	1	

Надпісы на таблі і в рамках			
Нумар надпісу	Надпіс	Розмір	Колькасць
1	Розваг агуальныі шнек	50x10	1
2	Нагріванні зерна	50x10	1
3	Охолоджэнні зерна	50x10	1
4	Норы завантажэнні зерна	50x10	1
5	Рэацэпцыяна норы	50x10	1
6	Норы вываг аменні зерна	50x10	1
7	Жыленні юла керування	50x10	1
8	Жыленні ГЭК	50x10	1
9,15	Ручне керування М	50x10	2
10,16	Ручне керування М2	50x10	2
11,17	Ручне керування М4	50x10	2
12,18	Ручне керування М6	50x10	2
13	Ручне керування М8	50x10	1
14	Старт ГЭК (авт. рэж.)	50x10	1
21,19	Рэверс М6	50x10	2
22,20	Ручне керування М6	50x10	2
25	Ручной 0 Автоматичныі	50x10	1

Ма
Л.
5 Q

РОЗДІЛ 6

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

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

Зведені витрати визначають за виразом:

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

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

C – річні експлуатаційні витрати, грн./рік;

K – капітальні витрати, грн.;

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

Витрати на електроенергію визначаються за споживаною потужністю приладів і тарифами на електроенергію для виробничих цілей (приймається у розмірі 4,32 грн./кВт·год. за цінами 2026 року):

$$C_E = P_{сп} \cdot \Gamma \cdot 4,32, \quad (7.2)$$

де $P_{сп}$ – потужність споживачів електроенергії;

Γ – кількість годин роботи споживачів на рік.

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

$$C_I = 0,01 \cdot (C_з + C_A + C_{пп} + C_E). \quad (7.3)$$

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

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

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

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

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

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

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

Загальна вартість технічних засобів автоматизації складає

$$K_3 = K_{TZA} + K_{II}, \quad (7.7)$$

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

K_{II} – вартість плат та провідників, грн.

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

Таблиця 7.1.

Загальна вартість технічних засобів автоматизації

САК шахтною зерносушаркою LAW SBC-8LE

№	Назва обладнання	Тип	Кількість	Ціна/шт	Ціна
1	Вимикач автоматичний	iK60N C 20A	1	356	356
2	Вимикач автоматичний	GV2ME32	1	2559	2559
3	Вимикач автоматичний	GV2ME21	1	1 259	1259
4	Вимикач автоматичний	GV2ME10	3	1 335	4005
5	Вимикач автоматичний	iK60N C 2A	1	608	608
6	Частотний перетворювач	ATV312HU30N4	1	9 715	9715
7	Модульний ПЛК Modicon M238	TM238LFDC24DT	1	7 954	7954
8	Датчик рівня зерна	ДПУ-10	2	6240	12480
9	Модуль розширення	TM2AMI4LT	2	10562	21124
10	Датчик температури	TCM	4	180	720
11	Датчик вологості зерна	PCE-A-315	2	284040	568080
12	Модуль розширення	TWDDRA8RT	1	1506	1506
13	Пускач електромагнітний	LC1D12M7	2	875	1750
14	Пускач електромагнітний	LC1D40M7	1	1500	1500
15	Пускач електромагнітний	LC1D09M7	1	858	858
16	Блок живлення постійного струму	HDR-30-24	1	325.92	325.92
17	Проміжні реле	MY4-NS 24V DC	7	90	630
18	Кнопка "Старт-Стоп"	ZB5 AW833743	2	180	360
19	Кнопка "Старт"	ZB5 A333	6	109	654
20	Перемикач на три положення	K1I023NLH	1	1037	1037
21	Лампа сигнальна червона 220 В	A22-RLF-RT	7	28	196
22	Лампа сигнальна зелена 24 В	AD22-22DS	9	37	333
23	Щит керування	ЩЖ1	1	2 896.00	2896
24	Клемна збірка		2	290	580
	Всього				640905.9

Зведені витрати становитимуть

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

Чистий прибуток, років, можна визначити за виразом

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

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

Термін окупності установки складатиме

$$T_{ОКУП} = K / Ч \quad (7.10)$$

Коефіцієнт ефективності капітальних вкладень

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

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

Таблиця 7.2.

Розрахункова таблиця для знаходження терміну окупності
від впровадження САК шахтною зерносушаркою LAW SBC-8LE

	Розрахункові значення		Од.	Відповідний коефіцієнт	Значення
1	Загальна вартість технічних засобів автоматизації				641485.9
2	Торгівельно-транспортні витрати			0.11	70563.45
3	Витрати на монтаж технічних засобів			0.17	109052.6
4	Витрати на прокладення проводок		150	17.67	2650.5
5	Інші капітальні витрати 2%			0.02	12829.72
6	Капітальні витрати				836582.2
7	Відрахування на амортизацію			0.15	125487.3
8	Витрати на поточний ремонт			0.18	150584.8
9	Витрати на енергоресурси			1.3	2733.12
	потужність автоматизації		1.46		
	кількість годин роботи		1440		
10	Витрати на оплату праці персоналу				86400
	кількість персоналу		2		
	ставка оператора		30		
11	Річні експлуатаційні витрати				365205.2
12	Зведені витрати			0.15	490692.6
13	Чистий прибуток				85233.6
	прибуток за рахунок зменшення персоналу				84153.6
	прибуток за рахунок зменшення браку				1080
	економія за рахунок підвищення якості		0.01%		
14	Термін окупності САК				1.815169

Аналізуючи отримані дані, бачимо, що прибуток складає 85233,6 грн., а через 1,8 роки САК шахтною зерносушаркою повністю окупається і вже працюватиме на чистий прибуток. Тому робимо висновок, що установка економічно ефективна і використовувати її доцільно.

ВИСНОВКИ

При виконанні бакалаврської роботи було удосконалено систему автоматизації технологічного процесу сушіння зерна у шахтній зерносушарці.

В результаті дослідження визначені вимоги до формування системи керування, розроблено функціональну схему автоматизації системи керування шахтною зерносушаркою та покроковий алгоритм роботи відповідного технологічного обладнання, обґрунтований вибір алгоритму керування об'єктом, розроблено імітаційну модель та досліджено вплив збурень, створено операторський інтерфейс системи контролю та керування в SCADA TRACE MODE.

Перевірка якості функціонування САК виявила, що система є стійкою, час регулювання складає 3000с, відсутні статична похибка та перерегулювання.

Для реалізації системи автоматичного керування шахтною зерносушаркою LAW SBC-8LE обґрунтовано вибір сучасних технічних засобів автоматики з використанням частотного перетворювача ATV312HU30N4 (Schneider Electric), модульного програмно-логічного контролера Modicon M238 TM238LFDC24DT (Schneider Electric), розроблені електричні схеми: принципова, з'єднань, підключень, та необхідне програмне забезпечення.

Економічні розрахунки обґрунтували доцільність впровадження розробленої системи керування шахтною зерносушаркою LAW SBC-8LE, строк окупності складає 1,8 року.

ЛІТЕРАТУРА

1. Григор'єв В.І., Сичевський М.П. Післязбиральна обробка та зберігання зерна. — К.: Урожай, 2002.
2. Огарь А.А., Романенко М.П. “Автоматизація технологічних процесів”. Київ: Вища школа 2010
3. Коваленко П.І., Коваленко І.П. Технологія зберігання та переробки зерна. — К.: Центр учбової літератури, 2010.
4. Гудзь В.П., Гудзь С.В. Технологія сушіння зерна та насіння. — К.: Аграрна освіта, 2014.
5. Гірник М. А. Механізація і автоматизація післязбиральної обробки зерна. - К.: Урожай, 1970. - 190с.
6. Кравченко В.І. Технологічні процеси зберігання зерна. — К.: КНЕУ, 2008.
7. Саблук П.Т., Месель-Веселяк В.Я. Зернове господарство України. — К.: ННЦ ІАЕ, 2015.
8. Лисенко В.П., Решетюк В.М., Цигульов І.Т. Основи автоматики: теорія і практика. — К.: Освіта України, 2013.
9. Мартиненко І.І., Лисенко В.П. Автоматизація технологічних процесів у АПК. — К.: НУБіП України, 2011.
10. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів / В. Лисенко, Є. Чернушенко, В. Решетюк, В. Мірошник, Н. Заєць, І. Цигульов – К.:Аграр Медіа Груп, 2016. – 476 с.
11. Головінський Б.Л., Мартиненко І.І. Автоматизація виробничих процесів у сільському господарстві. — К.: Урожай, 2005.
12. Болбот І.М. Комп'ютерно-інтегровані системи управління технологічними процесами. — К.: НУБіП України, 2016.
13. Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. - Тернопіль: Підручники & посібники, 2001. – 977с.
14. Лисенко В.П., Болбот І.М. Проектування систем автоматизації. — К.: НУБіП України, 2018.
15. Ковальчук В.В. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів. — К.: НУБіП України, 2017.
16. Кучеренко В.В. Електротехнічні системи та комплекси. — К.: Каравела, 2011.
17. Кравець В.П. Промислові контролери та системи автоматизації. — Львів: Новий Світ, 2014.
18. Гордієнко В.Г. Електропривод: теорія та практичні аспекти. — К.: Ліра-К, 2015.
19. Савченко В.І. Електричні машини та електропривод. — К.: Кондор, 2013.
20. Григор'єв В.І. Сушіння та зберігання зерна. — К.: Урожай, 2005.

21. Навчальне видання: Методичні вказівки щодо оформлення матеріалів курсової роботи з дисциплін: "Проектування систем автоматики", "Проектування систем електрифікації, автоматизації та енергопостачання АПК", "Проектування систем електрифікації та автоматизації АПК" / В.П. Лисенко, І.М. Болбот, О.І. Задорожній. – Київ, Видавничий центр НАУ, 2007. – 48 с.
22. Лисенко В.П., Решетюк В.М., Цигульов І.Т. Основи автоматики: теорія і практика (ч.1). Видання 2-е, перероблене і доповнене. / Лисенко В.П., Решетюк В.М., Цигульов І.Т. – К.: Освіта України, 2013. – 720 с.
23. Коваленко П.І. Технологія зберігання та сушіння зернових культур. — К.: Центр учбової літератури, 2011.
24. Сичевський М.П. Післязбиральна доробка зерна: технології та обладнання. — К.: НУБіП України, 2018.
25. Регульований електропривод. Теорія. Моделювання: Навчальний посібник / І.М. Голодний, Ю.М. Лавріненко, М.В. Синявський, В.В. Козирський, Л.С. Червінський, В.М. Решетюк, В.В. Савченко; За ред. І.М. Голодного. – 2-е вид., доп. і перероб. – К.: Аграр Медіа Груп, 2012. – 513с.: іл.
26. Ковальчук В.В. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів. — К.: НУБіП України, 2017.
27. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів / Лисенко В. та ін. — К.: Аграр Медіа Груп, 2016.
28. Каталог електродвигунів серії АІР [Електронний ресурс]
Режим доступу: https://air.com.ua/katalog_elektrodvigatelei_air/
29. Датчик рівня сипких продуктів [Електронний ресурс]
Режим доступу:
https://temix.com.ua/product/vibracionnyj_datchik_signalizator_predelnogo_urovnja_sypuchih_materialov_dpu-10
30. Шахтні зерносушарки Law
Режим доступу:
<http://www.zernosushilki.com/>
31. Зерносушарки потокові (поточні)
Режим доступу:
<https://ravaro.com.ua/products-ua/zernosusharki-potochni>
32. Сушіння зерна та вибір сушарок в господарствах Скандинавії
Режим доступу:
<https://hipzmag.com/tehnologii/hranenie/sushka-zerna-i-vybor-sushilok-v-hozyajstvah-skandinavii/>
33. Економічні зерносушарки LAW із рециркуляцією
Режим доступу:
<https://kaltes.lv/ru/primary-grain-processing/grain-dryers/mine-type-grain-dryers/economical-grain-dryers/#prev>
34. Головінський Б.Л., Мартиненко І.І. Автоматизація виробничих процесів у сільському господарстві. — К.: Урожай, 2005.

ДОДАТКИ

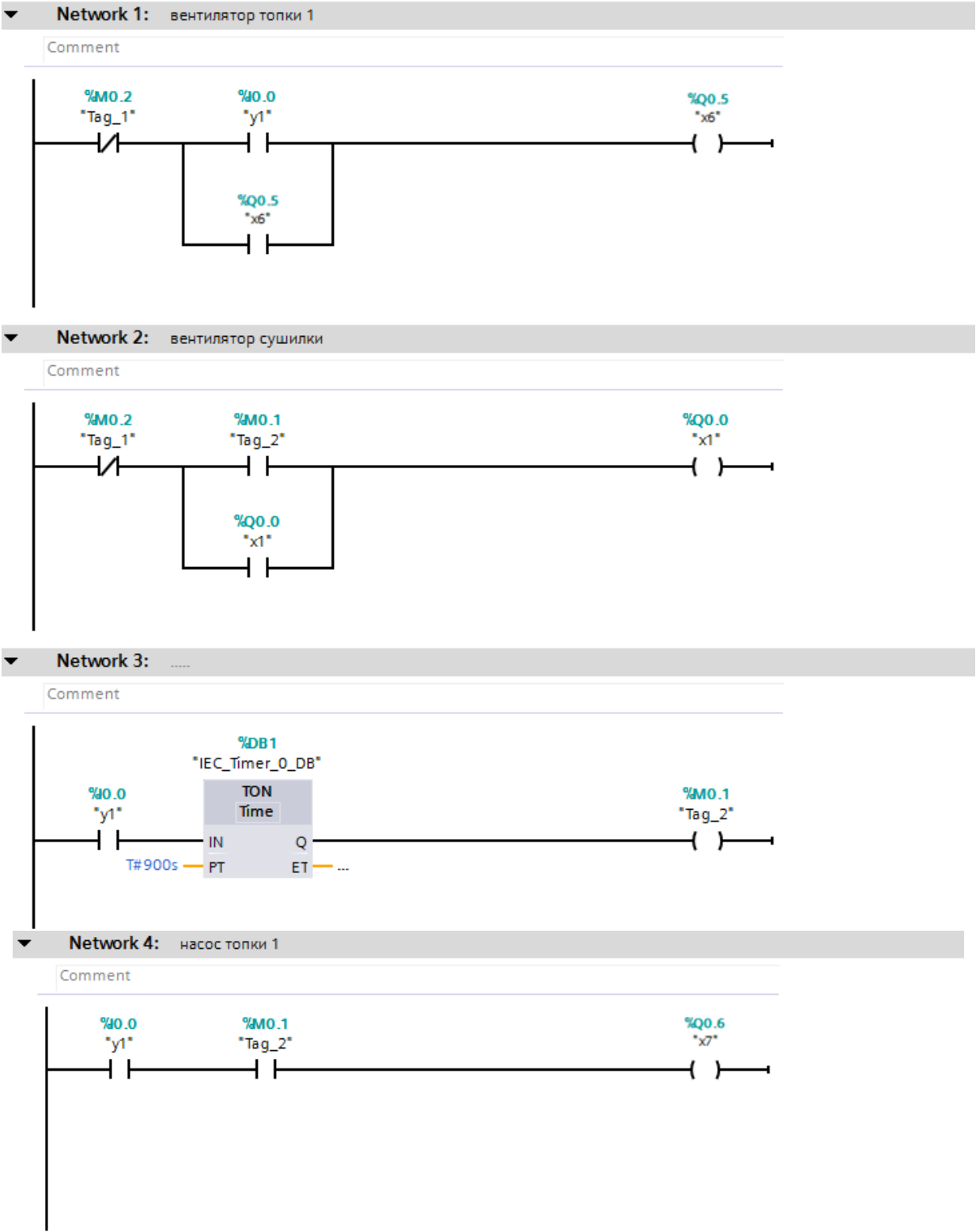
Додаток А

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

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

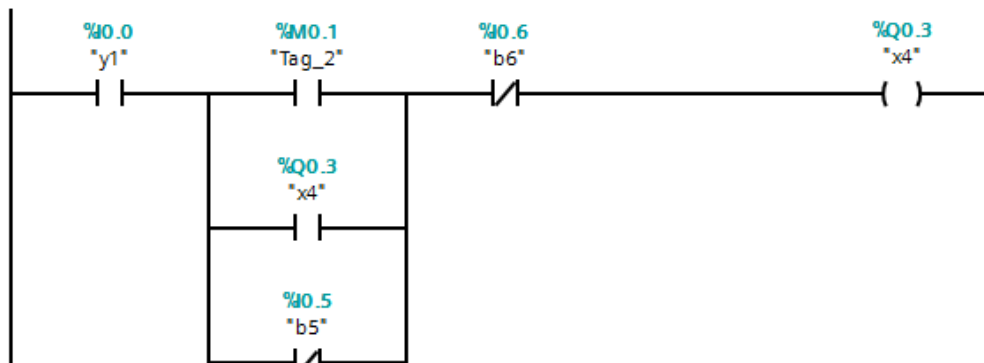
ДОДАТОК Б

Програма керування для контролера Modicon M238



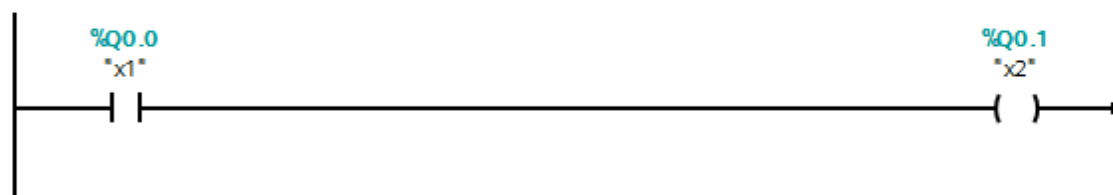
▼ **Network 5** нория загрузки зерна

Comment



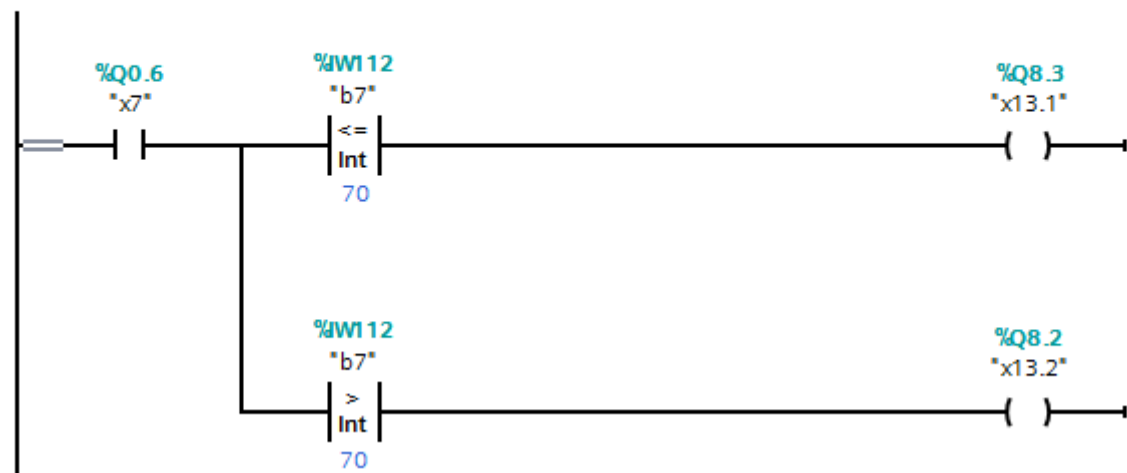
▼ **Network 6:** вентилятор рекупирации

Comment



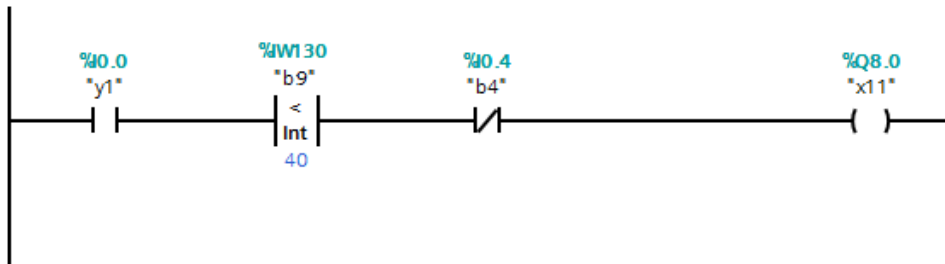
▼ **Network 7:** большой огонь тг

Comment



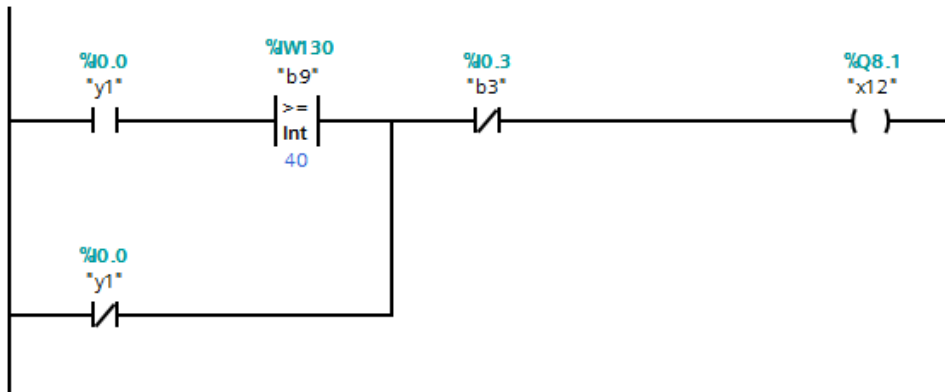
Network 8: клапан на рекупирацию

Comment



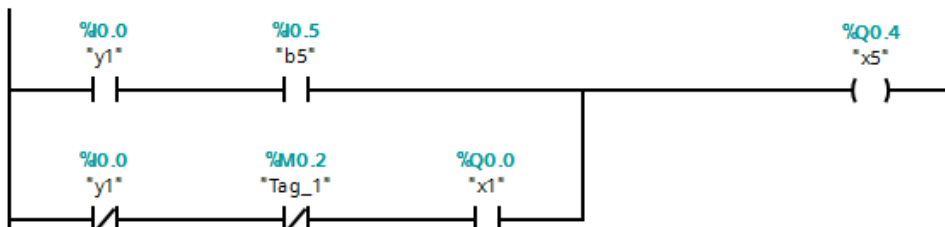
Network 9: клапан на выброс

Comment



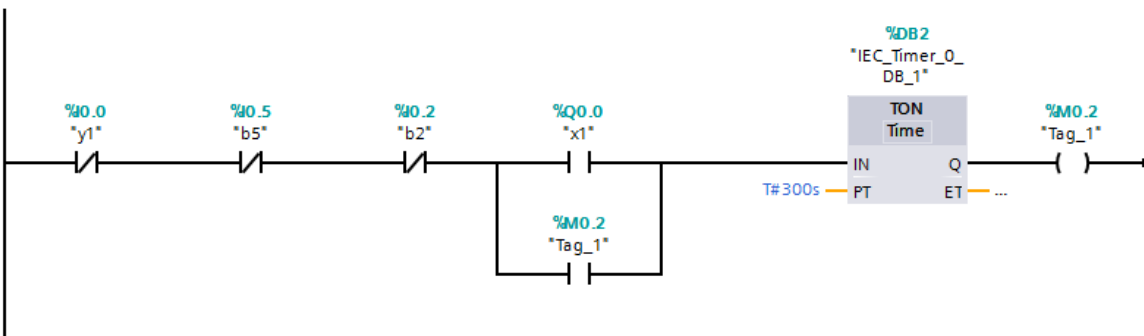
Network 10: выгрузка

Comment



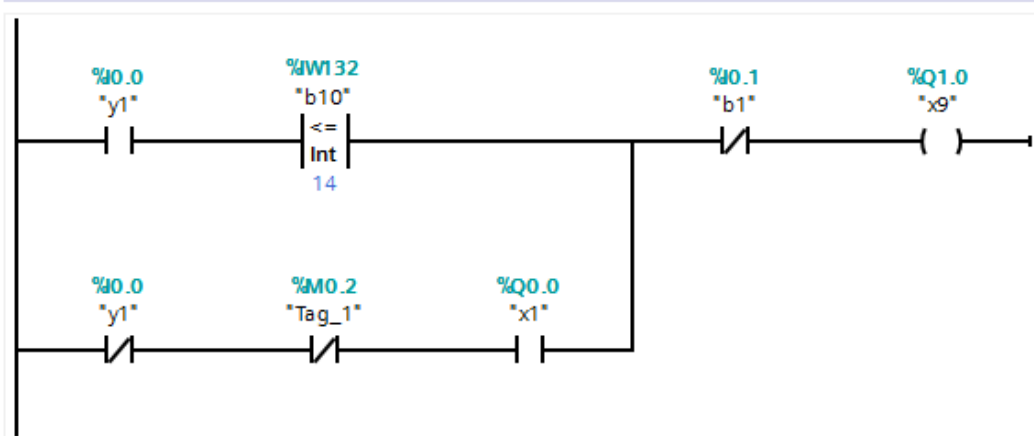
Network 13:

Comment



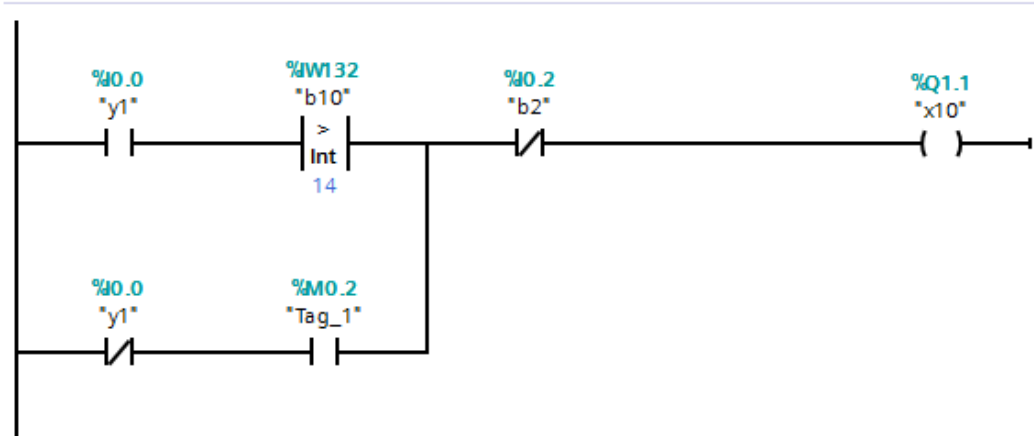
▼ **Network 11:** заслонка на выгрузку

Comment



▼ **Network 12:** заслонка на повторную сушку

Comment



▼ **Network 14:**

Comment

