

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ І
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**Навчально-науковий інститут енергетики, автоматики та
енергозбереження**

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

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

_____ **Опришко О.О.**

«___» _____ 2025

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Розробка системи автоматичного процесом сушіння зерна в шахтній зерносушарці із використанням комплексу технічних засобів Schneider Electric»

Спеціальність: 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Гарант освітньої програми:

д.т.н. проф.

(науковий ступінь)

Заєць Н.А.

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи:

к.пед.н. доц.

(науковий ступінь)

(підпис)

Лукін В.Є.

(ПІБ)

ВИКОНАВ

(підпис)

Мисник Р.С.

(ПІБ)

КИЇВ-2025

**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) (ПІБ)

" ____ " _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи студенту

Миснику Ростиславу Станіславовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність: 151 - "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології"

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

затверджена наказом ректора НУБіП України від "18" 11 2024 р. № 2056"С"

2. Термін подання завершеної роботи на кафедру "30" травня 2025 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. Дослідження технології процесу сушіння зерна.

4.2. Розробка та дослідження математичної моделі процесу сушіння зерна

4.3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань.

4.4. Розробка цифрової системи керування.

4.5. Схеми системи автоматизації.

4.6. Техніко-економічне обґрунтування.

5. Перелік графічних документів:

- 5.1. Функціональна схема автоматизації системи керування вологістю в сушарці для сушіння вермикуліту.
- 5.2. Система автоматизації процесу сушіння зерна в сушарці. Схема електрична принципова.
- 5.3. Система автоматизації процесу сушіння зерна в сушарці. Схема електрична з'єднань.
- 5.4. Система автоматизації процесу сушіння зерна в сушарці. Схема електрична підключень.
- 5.5. Система автоматизації процесу сушіння зерна у в сушарці. Зовнішній вигляд шафи керування.

Дата видачі завдання "21" листопада 2024 року

**Керівник
кваліфікаційної
бакалаврської роботи**

(підпис)

Лукін В.Є.
(П.І.Б.)

**Завдання прийняв до
виконання**

(підпис)

Мисник Р.С.
(П.І.Б.)

ЗМІСТ

ВСТУП.	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ.....	8
1.1 Технологічна сутність процесу.....	8
1.2 Принцип роботи шахтних зерносушарок.	9
1.3 Технічний опис зерносушарки Bonfanti B70/10 ECOS.	10
1.4 Розробка функціональної схеми автоматизації.....	11
РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.	15
2.1 Дослідження математичної моделі об'єкта керування.	15
2.2 Побудова математичної моделі об'єкта керування.	19
2.3 Визначення передатної функції зерносушильної установки за каналом регулювання температури продукту.	22
РОЗДІЛ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ.....	25
3.1 Обґрунтування та вибір алгоритму керування.	25
3.2 Визначення параметрів налаштування регулятора.	26
РОЗДІЛ 4. ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ.	28
4.1 Вибір програмованого логічного контролера, модуля розширення, людино-машинного інтерфейсу та мережевого обладнання.....	28
4.2 Вибір виконавчих механізмів системи автоматичного керування.	30
4.3 Вибір частотного перетворювача	35
4.4 Вибір вимірювальних перетворювачів та датчиків системи автоматичного керування.	36
РОЗДІЛ 5. СИНТЕЗ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....	40
5.1 Розробка цифрової системи керування.....	40
5.2 Аналіз цифрової системи керування.	42
РОЗДІЛ 6. СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.	44
6.1 Розробка електричної принципової схеми.	44
6.2 Розробка схеми з'єднань та підключень.....	46
6.3 Розробка зовнішнього вигляду шафи керування.	47
6.4 Вибір пуско-захисної апаратури.....	49
6.5 Вибір проводів та кабелів.....	52
РОЗДІЛ 7. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.....	55
7.1 Розробка програмного забезпечення програмованого логічного	

контролера та людино-машинного інтерфейсу.....	55
7.2 Розробка програмного забезпечення веб-інтерфейсу	60
РОЗДІЛ 8. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	64
ВИСНОВОК.....	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	71
ДОДАТОК А.....	73
РОЗДІЛ 1. ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	73
РОЗДІЛ 2. СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА.....	74
РОЗДІЛ 3. СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДНАНЬ.	81
РОЗДІЛ 4. СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНИХ ПІДКЛЮЧЕНЬ.	82
РОЗДІЛ 5. ЗОВНІШНІЙ ВИГЛЯД ШАФИ КЕРУВАННЯ.....	83
ДОДАТОК Б	84
ДОДАТОК В.....	85
ДОДАТОК Г	88
РОЗДІЛ 1.ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПЛК.....	88
РОЗДІЛ 2.ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЛМІ.	91

ВСТУП.

Агропромисловий сектор України відчуває потребу впровадження технологій, що гарантуватимуть якість продукції та енергоефективність технологічних процесів. Одним з ключових етапів обробки зерна є його сушіння, адже саме від нього залежить збереження якості зерна, його здатність до тривалого збереження та подальшої переробки. Спеціалістами агропромислової галузі було активно досліджено шляхи автоматизації цього процесу. Запропоновано низку технічних рішень, таких як: використання датчиків вологості продукту, температури сушильного агента, логічних системи керування технологічним процесом. Але, незважаючи на значні досягнення, досі залишається актуальною низка невирішених проблем, зокрема, пов'язаних з адаптацією систем до змінних умов сушіння, зниженням енерговитрат, покращенням прецизійності контролю параметрів, а також підвищення надійності такої системи. Доцільність проведення наукових досліджень у цій сфері обумовлена необхідністю вдосконалення наявних систем керування сушильними установками з метою оптимізації технологічного процесу, зменшення споживання енергії та підвищення ефективності зберігання зерна [2]. Особливого значення набуває впровадження цифрової техніки та сучасних алгоритмів управління, що дають змогу досягти високої точності у підтримці необхідних режимів сушіння.

Можемо зробити висновок, що актуальність теми автоматизації зерносушильних установок визначається потребою аграрного сектора в реалізації нових технологічних рішень, які дозволяють з більшою якістю автоматизувати процеси, зменшити втрати енергоресурсів, а також забезпечити необхідну якість вихідного продукту.

Метою цього дослідження є вдосконалення концепції систем управління процесом сушіння зерна шляхом створення автоматизованої системи з використанням сучасних засобів контролю та регулювання параметрів сушіння.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі завдання:

- аналіз існуючих технічних рішень та підходів до автоматизації процесу

сушіння зерна;

- розробка функціональної схеми системи автоматичного керування;
- вибір технічних засобів контролю і регулювання основних параметрів процесу;
- математичне моделювання процесу сушіння;
- розробка алгоритму керування та програмного забезпечення;
- оцінка ефективності та надійності запропонованої системи.

Об'єктом дослідження є процес сушіння зерна, а предметом дослідження - взаємозв'язок між параметрами технологічного процесу сушіння (температурою, вологістю, швидкістю потоку повітря) та їх впливом на ефективність автоматизованого управління.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ.

1.1 Технологічна сутність процесу.

Сушіння зерна є основною частиною післязбиральної обробки, що гарантує збереження якості продукції під час транспортування, зберігання та переробки. Після збору врожаю зерно має природну підвищену вологість, котра нерідко перевищує допустимі показники. Зберігання такого зерна без попереднього підсушування може призвести до його подальшого псування: активізуються процеси розмножуються плісняви, грибків, бактерій, виникає небезпека самозігрівання, що в кінцевому підсумку призводить до втрати якості або повного знищення зерна.

Процес сушіння спрямовано на зниження масової частки вологи у зерновій масі до показників, які є безпечними з точки зору стабільності показників продукту. В промислових умовах сушіння здійснюється в зерносушильних установках, де зерно піддається обробці сушильним агентом. Внаслідок контакту зерна з агентом сушіння волога з його поверхні та внутрішніх шарів перетворюється на пар і виводиться.

Технологія сушіння передбачає обов'язкове дотримання параметрів процесу, таких як температура сушильного агента, швидкість його подачі, тривалість перебування зерна в сушильній камері та інтенсивність подачі зернової маси. Відхилення від заданого режиму може спричинити негативні наслідки: перегрівання, пошкодження зерна, зниження схожості, зменшення харчової цінності та товарної якості.

Найкращі температурні умови сушіння пшениці залежать від мети її реалізації (продовольча, насіннева або фуражна) відображені в таблиці 1.1.

Пшениця що вважається сухою мусить мати відсоток вологості близько 14%. Продукт, що має вологість 14,5% і більше розглядається як такий, що потребує проходження процедури осушення.

Під час процесу сушіння пшениці температурний режим має основне значення, адже перевищення допустимих значень, може негативно вплинути на якість та структуру продукту. Рівномірне висушування сприяє зменшенню

ймовірності появи механічний пошкоджень, що важливо для його подальшого зберігання. Для насіння використання низьких температур під час сушіння є особливо важливим, адже це впливає на схожість посівного матеріалу. Тривала дія високих температур може зумовити злипання зерна в камері сушіння та порушення технологічного циклу.

Таблиця 1.1

Призначення	Температура сушильного агенту	Температура нагріву продукту
Продовольча	90°C	До 60°C
Насіннева	65°C	До 40°C
Фуражна	110°C	До 65°C

Підсумовуючи, можна зазначити, що технологічна суть процесу сушіння зерна полягає в контрольованому видаленні надлишкової вологи із маси зерна з дотриманням оптимальних параметрів сушіння.

1.2 Принцип роботи шахтних зерносушарок.

Шахтні зерносушарки належать до класу обладнання безперервної дії, спроектованого для сушіння різних зернових культур. Такі сушарки відрізняються простою конструкцією, високою продуктивністю та ефективним тепло-масообміном, що обумовлює широке використання в сільському господарстві.

Ключовим елементом зерносушильної установки такого типу є вертикальна шахта, в якій розташовується зернова маса. Внутрішній простір шахти розмежовано на зони сушіння, охолодження та вивантаження.

Процес сушіння в установках такого типу відбувається шляхом пропускання повітря крізь зернову масу. Сушильний агент подається через спеціальні повітряні канали. Завдяки цьому забезпечується рівномірне прогрівання та випаровування вологи по всьому шару зерна.

Принцип дії передбачає, що у верхній частині зерно піддається нагріванню, у середній - головному процесу випаровування вологи, а в нижній - охолодженню перед вивантаженням.

1.3 Технічний опис зерносушарки Bonfanti B70/10 ECOS.

Італійські зерносушарки BONFANTI відомі чудовим поєднанням високої результативності з простою, але надійною будовою, що гарантує безперебійне функціонування навіть в умовах непростого клімату.

Зерносушильні комплекси цієї марки сконструйовані з застосуванням передових технологічних досягнень, що дає змогу проводити швидке, енерго-ефективне та екологічне оброблення різноманітних культур, включно з особливо вимогливими, сільськогосподарськими культурами.

В межах даного дослідження зерносушарку Bonfanti B70/10 ECOS (рис. 1.1) було взято до уваги, оскільки вона зарекомендувала себе, як одна з найефективніших на ринку. Її вибір обґрунтовується низкою переваг, які об'єднують продуктивність, економічність та відповідність стандартам якості. Дана модель входить до лінійки зерносушарок безперервної дії, що характеризуються високою енергоефективністю (Таблиця 1.2). Її розробка базується на передових досягненнях у сфері теплотехніки. Збалансоване поєднання ціни та технічних параметрів. За умови прийнятної вартості, якщо порівнювати з аналогічним обладнанням, ця сушарка зерна демонструє високий рівень надійності, тривалості експлуатації та продуктивності [11]

Таблиця 1.2

Параметр	Значення
Вміст сушильної камери	12 тон
Вміст силосховища	6 тон
Д х Ш х В	4.3 х 2.5 х 10 м
Термічна потужність	814 кВт
Вживане повітря	42000 м ³ /год
Електрична потужність	19.6 кВт

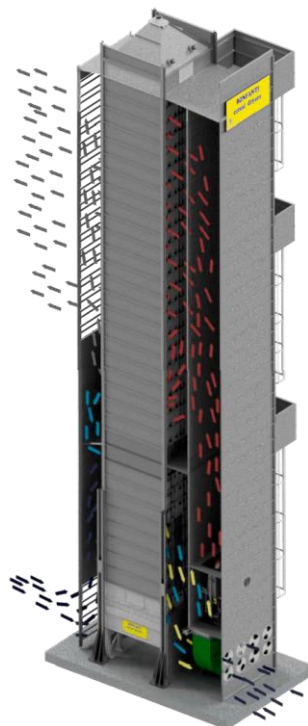


Рис. 1.1 Зовнішній вигляд зерносушарки Bonfanti B70/10 ECOS

За технічними параметрами, цей сушильний комплекс – ідеальний варіант для обробки пшениці. Він гарантує стабільний розподіл тепла та регульовану подачу повітря.

1.4 Розробка функціональної схеми автоматизації.

Функціональна схема автоматизації є ключовим проектним документом, що надає уявлення про взаємозв'язок елементів системи автоматичного керування. Документ є графічним представленням принципу роботи автоматизованої системи, відображаючи способи взаємодії контрольно-вимірювальних приладів, засобів автоматизації, технологічного обладнання та трубопроводів.

Основною причиною побудови функціональної схеми є створення єдиної моделі для проектування, аналізу, введення в експлуатацію, а також ремонту системи. Схема наглядно показує призначення кожного вузла, відображає зони потенційного ризику чи неузгодженості в алгоритмах керування. Функціональна схема широко використовується на всіх відтворення об'єкта керування.

Усі умовні графічні зображення елементів на схемі виконувалися згідно до діючого нормативного документу, а саме згідно з вимогами ДСТУ БА.2.4-

16:2008 «Автоматизація технологічних процесів. Зображення умовні приладів і засобів автоматизації в схемах» [12]. Відповідно до стандарту, схеми мають чітко відображати функціональне призначення елементів, напрямки керуючих і зворотних впливів, а також повинні бути придатними для однозначного інтерпретування фахівцями.

Повний вигляд функціональної схеми автоматизації відображений в розділі 1 додатку А бакалаврської кваліфікаційної роботи.

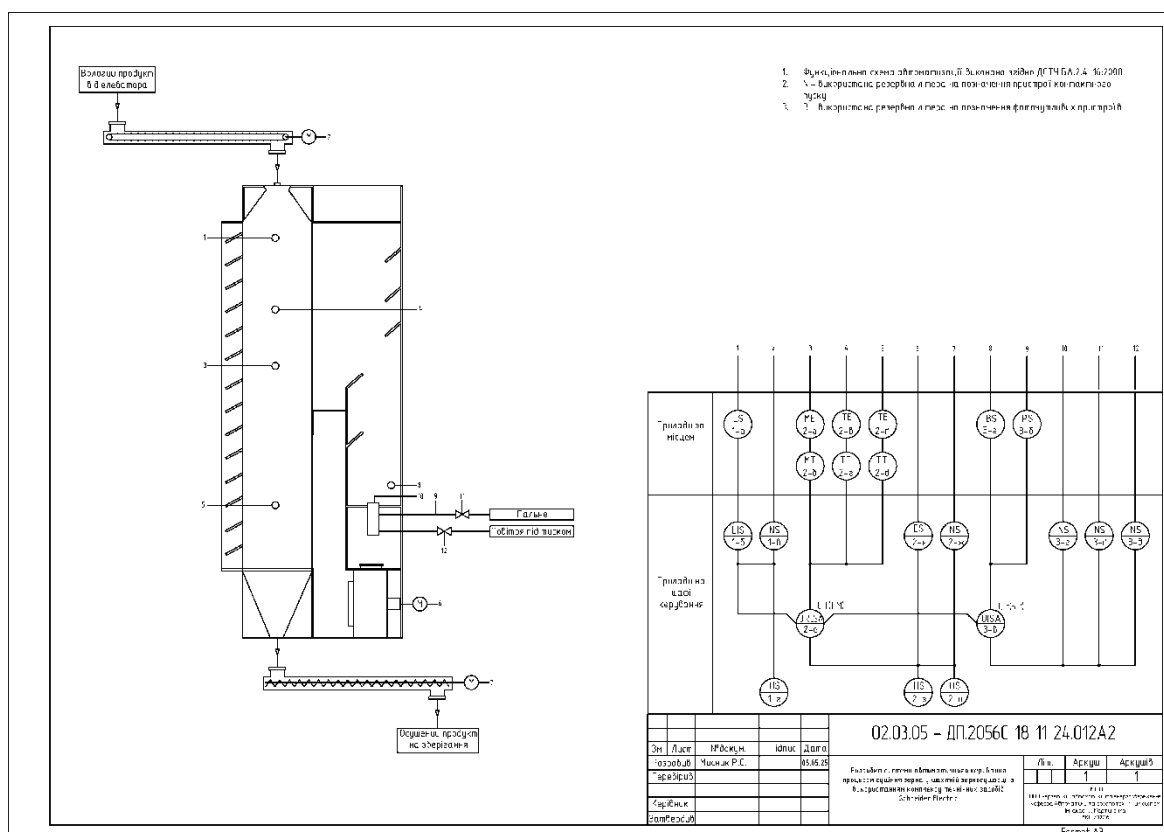


Рис. 1.2 Фрагмент функціональної схеми автоматизації ОК

LS(1-a) – Давач рівня продукту в шахті;

ME(2-a), MT(2-б) – Датчик вологості продукту в потоці;

TE(2-в), TT(2- г) – Датчик температури продукту в зоні осушення;

TE(2-г), TT(2- д) – Датчик температури продукту в зоні вивантаження;

BS(3-a) – Давач наявності полум'я;

PS(3-б) – Давач тиску в паливній системі;

NS(1-в; 2-ж) – Контактори транспортерів завантаження та вивантаження;

NS(3-г; 3- д; 3- г) – Реле запалу, клапана подачі повітря, клапана подачі палива;

ES(2-є) – Перетворювач частоти вентилятора;

HS(1-г; 2-з; 3-и) – Кнопки ручного керування.

Система автоматичного керування процесом сушіння зерна представлена трьома контурами управління:

1. Керування рівнем заповненості зерносушильної шахти;
2. Керування температуро-вологісними параметрами процесу;
3. Керування газовим пальником.

Опис першого контура керування: при ініціалізації початку роботи системи підпрограма ПЛК LIS(1-б) фіксує рівень в зерносушильній шахті за допомогою давача LS(1-а), якщо давач не в спрацьованому стані, підпрограма подає сигнал на завантаження зерносушильної установки та вмикає транспортер NS(1-г), коли рівень в шахті досягає спрацьовання давача підпрограма посиляє сигнал блокування роботи транспортера, та сигнал до ЛМІ, що зерносушильна шахта є заповненою. Для контура доступне ручне керування за допомогою кнопок запуску транспортера HS(1-г).

Опис другого контура керування: в разі завершення процесу завантаження, підпрограма ПЛК UIRCSA(2-є) зчитує поточну температуру продукту за допомогою вимірювального перетворювача вологості ME(2-а), MT(2-б), при значенні вологості більше 14% інформація аналізується підпрограмою та подається сигнал на продування зерносушильної шахти вентилятором ES(2-є) протягом 15 хвилин. Далі подається сигнал для запуску пальника і паралельно виконується третій контур керування. Після увімкнення пальника підпрограма шляхом регулювання подачі сушильного агенту вентилятором ES(2-є) керує температурою випарювання, що фіксується вимірювальним перетворювачем TE(2-в), TT(2-г), при цьому всі вимірювані параметри контура реєструються в пам'ять та відображаються за допомогою ЛМІ. Якщо в процесі осушення UIRCSA(2-є) зафіксує, що вологість продукту досягла 14% блокується робота вентилятора ES(2-є), контура управління пальником та посиляється сигнал на увімкнення транспортера NS(2-ж) на 50 хвилин. Якщо в процесі осушення, аналізуючи дані з вимірювального перетворювача TE(2-г), TT(2-д), який визначає температуру продукту на виході, підпрограма зафіксує температуру

більше 60°C, буде сформоване аварійне повідомлення на ЛМІ, заблокується робота вентилятора ES(2-є), заблокується робота контура керування пальником та буде поданий сигнал на увімкнення транспортера вивантаження NS(2-ж) на 50 хвилин, для швидкого вивантаження продукту щоб запобігти псуванню. Контур передбачає ручне керування транспортером вивантаження та вентилятором за допомогою кнопок HS(2-з), HS(2-и).

Опис третього контура керування: при подачі сигналу на запуск пальника від підпрограми другого контура UIRCSA(2-є), починає свою роботу підпрограма керування третього контура UISA(3-б). Підпрограма посилає сигнал на відкриття соленоїдного клапана подачі повітря NS(3-д), через 10 секунд відбувається подача сигналу на відкриття соленоїдного клапана пального NS(3-г), якщо після його відкриття підпрограма фіксує спрацювання давача тиску PS(3-б) відбувається індикація на ЛМІ та подається сигнал на увімкнення трансформатора запалу NS(3-г) протягом 5 секунд, якщо після проходження цього часу підпрограма зафіксувала, що спрацював давач наявності полум'я BS(3-а) відбувається індикація на ЛМІ та підпрограма вважається завершеною, контур буде працювати в такому стані доти, доки буде присутній сигнал від контура керування температуро-вологісними параметрами. В разі відсутності сигналу від давачів PS(3-б) та BS(3-а) на своєму етапі алгоритму керування, формується аварійне повідомлення на ЛМІ та алгоритм контура починається спочатку для повернення системи в штатний режим роботи.

РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.

2.1 Дослідження математичної моделі об'єкта керування.

Процес осушення можна представити двома етапами. Перший включає видалення вологи, що випаровується з поверхні продукту. Другий пов'язаний з видаленням зв'язаної вологи. В цей період тиск водяної пари на поверхні матеріалу визначається з допомогою температури матеріалу та його вологості на цій поверхні. Відповідно даної характеристики та табличних даних [3] було отримано рівняння (2.1), яке описує залежність тиску насиченої водяної пари від температури:

$$P = 5,343124 + 0,27872 * t + 0.032135 * t^2 - 3.40325 * 10^{-4} * t^3 + 7.719212 * 10^{-6} * t^4 \quad (2.1)$$

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

$$dn = 0,622 * \frac{\varphi * P}{Pb - \varphi * P'} \quad (2.2)$$

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

φ - відносна вологість повітря;

Pb – барометричний тиск парогазової суміші.

Розглянемо процес висушування зерна в статиці, за допомогою матеріальних та енергетичних балансів. Математична модель сушіння, подана у вигляді «чорного ящика» [3] зображена на рис. 2.1.

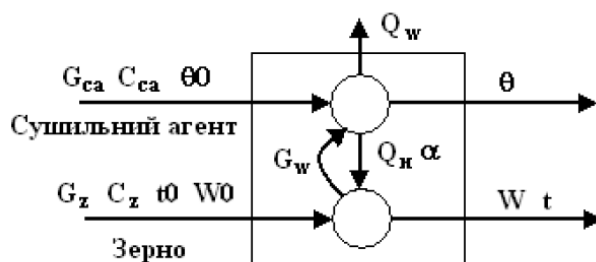


Рис. 2.1 Структурна схема процесу сушіння

В структурній схемі процесу сушіння представлені такі параметри як: G_{ca} , G_z

- витрати сушильного агента і зерна, C_{ca} , G_z – теплоємність повітря і зерна, t_0 і θ_0 – початкові значення температури зерна і сушильного агента, t і θ – температури цих продуктів на виході із сушильної установки, W_0 і W – початковий і кінцевий вологовміст зерна, G_w – волога, яка випарувалася із зерна, Q_n і Q_w – витрати тепла на нагрівання зерна і випарювання вологи, α - коефіцієнт тепловіддачі від повітря до зерна.

Складемо рівняння енергетичного балансу для агента сушіння та зерна. Прийmemo, що тепло гарячого повітря використовується для нагріву зерна та випаровування вологи з його поверхні.

$$G_{ca} * C_{ca} - Q_w - Q_n - Q_{ca.вих} = 0 \quad (2.3)$$

$$G_z * C_z + Q_n - Q_{z.вих} = 0$$

Рівняння матеріального балансу відносно зерна:

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

де: $Q_{ca.вих}$, $Q_{z.вих}$, $G_{z.вих}$ – витрата сушильного агента і зерна, а також маса зерна на виході із установки.

Оскільки перший період займає досить малу кількість часу, зосередимося на сушінні впродовж другого етапу. На цьому етапі процес сушіння визначається переміщенням вологи з внутрішніх шарів матеріалу до його поверхні. Рухомою силою цього етапу є різниця між фактичною вологістю зерна W і рівноважним вологовмістом W_p .

Швидкість сушіння матиме вигляд:

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

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

Коефіцієнт висушування визначається дослідно. Якщо на другому етапі залежність швидкості висушування є лінійною, то коефіцієнт висушування обчислюється за формулою (2.6)

$$K = \frac{1}{R} * \frac{1}{\frac{1}{\beta} + \frac{4 * R}{\pi^2 * \alpha_m}}, \quad (2.6)$$

де: R – геометричний розмір зерна, м;

β – коефіцієнт зовнішнього вологообміну, м/с.;

α_m – коефіцієнт потенціалопровідності масопереносу, м²/с.

Коефіцієнт потенціалопровідності масопереносу, подібно до коефіцієнта температуропровідності, описує внутрішнє перенесення вологи в речовині.

Прийmemo процес нагрівання одиниць матеріалу за умови відсутності градієнта температури, а вологість розподілена рівномірно у всьому об'ємі. Знехтуємо також витратами тепла у навколишнє середовище. Відтворимо рівняння теплового балансу, щоб показати взаємодію між нагріванням та інтенсивністю сушіння. Для періодичного процесу сушіння це рівняння показуватиме зміни температури і вологості протягом часу:

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

У випадку безперервного процесу сушіння, температура та вологість зерна зазнають змін по всій довжині сушильної установки:

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

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 продукту;

α - коефіцієнт теплообміну;

F – площа поверхні матеріалу;

Розглянемо процес сушіння у сушарці безперервної роботи. Для спрощення моделі не беремо до уваги початковий етап сушіння — нагрівання зерна.

Коефіцієнт тепловіддачі від сушильного агента до зерна вважатимемо за постійний. Значення змінних, що використовуються у рівняннях для визначення коефіцієнта сушіння K , рівноважного вологовмісту W_p , взято на підставі даних фахівців, котрі вивчали процес сушіння зернових культур.

Отже, рівняння для рівноважного вологовмісту, поданого у частках до вмісту сухих речовин, має такий вигляд:

$$W_p = 0,01 * \left[\frac{|\ln(1 - \varphi)|}{5,47 * 10^{-6} * (t + 273)} \right]^{0,435} \quad (2.9)$$

Значення відносної вологості повітря знайдемо з рівняння:

$$\varphi = \frac{(P_b - P) * d_n}{0,0622 * P} \quad (2.10)$$

Коефіцієнт сушіння, 1/с, знайдемо з рівняння:

$$K = \frac{5,55 * 10^{-4} * t^2 - 0,00796 * t}{3600} \quad (2.11)$$

Рівняння, яке визначає статичне сушіння, трансформуємо в динаміку. Отже, створимо систему диференціальних рівнянь, що відображає зміни трьох ключових величин з плином часу:

- температура продукту (°C),
- температура сушильного агента (°C),
- вологість зерна (у частках від сухої маси).

Приведемо рівняння:

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

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

$$\frac{dW}{d\tau} = -K * (W - W_p), \quad (2.14)$$

де σ – питома поверхня зерна м²/кг;

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

r – теплота пароутворення, Дж/кг.

2.2 Побудова математичної моделі об'єкта керування.

Створимо модель у Simulink MATLAB. Вставимо рівняння, які утворюють систему диференціальних рівнянь та розраховують температуру та вологість зерна.

Для допоміжних рівнянь створимо підсистему, що визначатиме тиск насиченої водяної пари, відносну вологість повітря, рівноважну вологість та коефіцієнт сушіння, створимо окрему підсистему.

Прийmemo за початкові, дані про сушіння пшениці продовольчого використання з літературних джерел і аналізу об'єкта керування та використаємо їх для імітаційного моделювання технологічного процесу :

Витрати зерна на сушіння: $G_z = 3,3$ кг/с

Початкова температура зерна: $t_0 = 15^\circ\text{C}$;

Початковий вологовміст: $W_0 = 0.18$;

Теплоємність зерна: $C_z = 2000$ Дж/(кг * °C);

Сушильний агент подається в кількості: $G_{ca} = 4,5$ кг/с;

Температура сушильного агента: $\theta_0 = 90^\circ\text{C}$;

Теплоємність сушильного агента: $C_{ca} = 1010$ Дж/(кг * °C);

Питома поверхня зерна $\sigma = 2,47\text{м}^2/\text{кг}$ [3];

Вологовміст пароводяної суміші в сушарці $dn = 0,006$ кг п./кг с. п.

Теплота пароутворення $r = 2500 * 10^3$ Дж/кг ;

Барометричний тиск $Pb = 750$ мм. рт. ст ;

Коефіцієнт тепловіддачі від повітря до зерна $\alpha = 15$ Вт/(м² * °C)

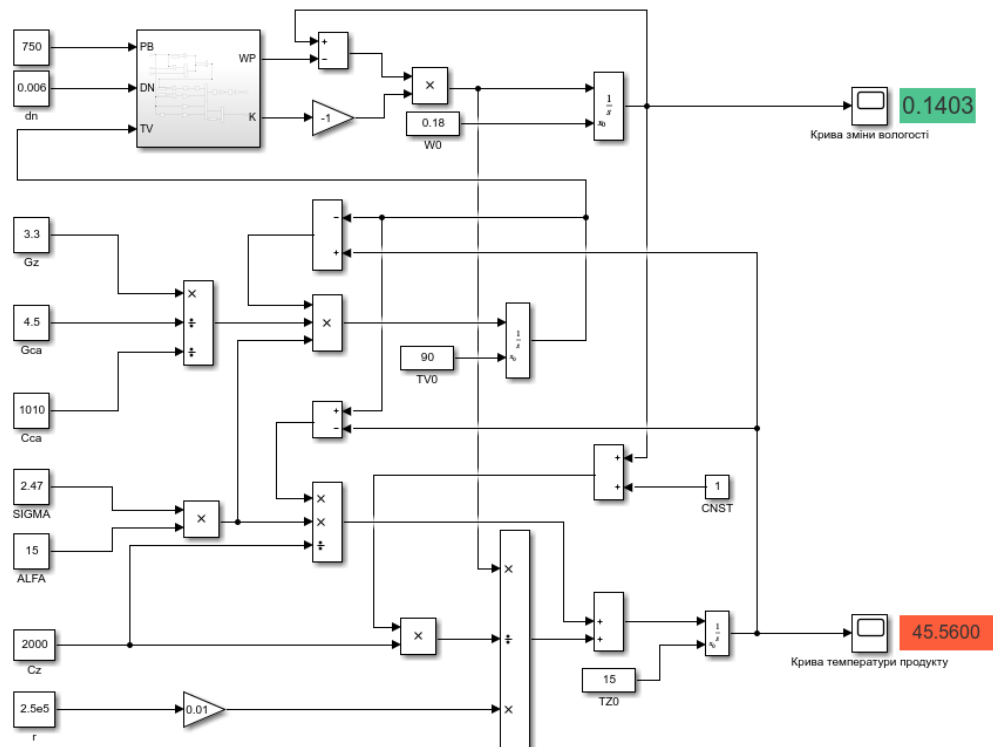


Рис. 2.2 Імітаційна модель розрахунку температури та вологості зерна

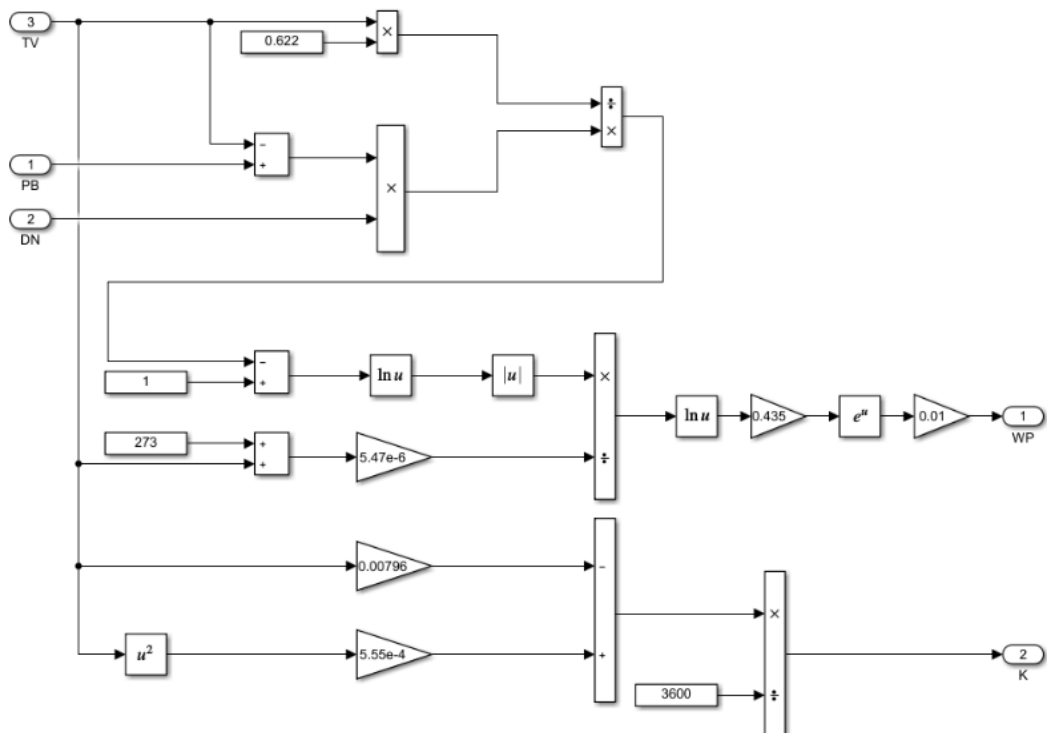


Рис. 2.3 Підпрограма імітаційної моделі визначення тиску насиченої водяної пари, відносної вологості повітря, рівноважної вологості та коефіцієнта сушіння

В результаті з моделі отримаємо графіки зміни температури (див. рис. 2.4) та вологості продукту (див. рис. 2.5).

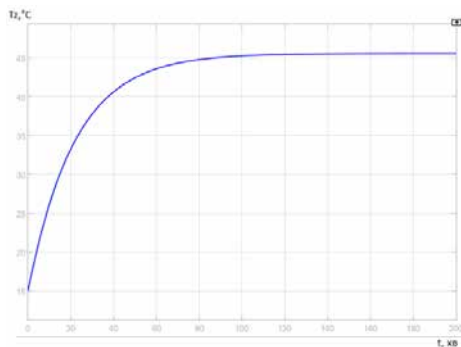


Рис. 2.4 Крива зміни температури продукта

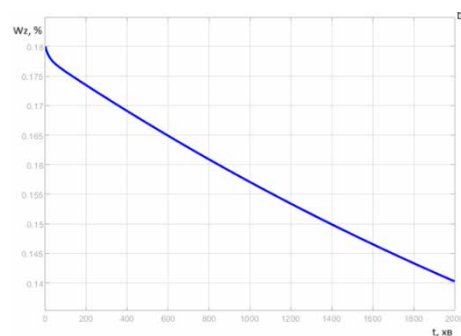


Рис. 2.5 Крива зміни вологості продукта

Дослідимо вплив витрати сушильного агента на температуру продукта та вологовміст на виході при постійному початковому вологовмісті $W_0 = 0.18$ та температурі сушильного агента $\theta_0 = 90^\circ\text{C}$.

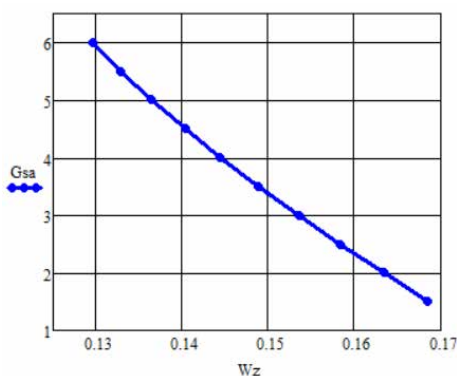


Рис. 2.6 Вплив витрати сушильного агента на вологовміст

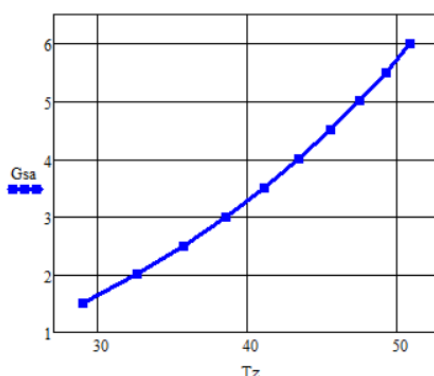


Рис. 2.7 Вплив витрати сушильного агента на температуру продукту

При доведенні температури зерна від 15°C до граничного допустимого значення 57°C (при $W_{\text{гр}} = 60^\circ\text{C}$) зміна температури зерна матиме вигляд згідно рис. 2.8.

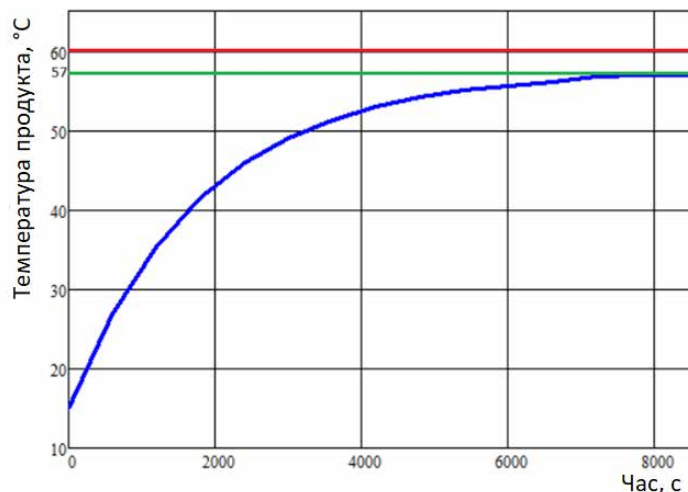


Рис. 2.8 Розгінна крива нагрівання продукту від 15°C до 57°C

Дослідження з використанням імітаційної моделі дозволило сформулювати висновки щодо впливу об'єму сушильного агента на параметри об'єкта дослідження. Аналіз графічних матеріалів (див. рис. 2.7 та 2.8) демонструє, що зі зростанням витрати сушильного агента фіксується зменшення вологості та підвищення температури продукту. Цей факт вказує на обґрунтованість застосування даного параметру для керування температуро-вологісного режиму сушіння. Зокрема, для забезпечення необхідних параметрів вологості та температури оптимальним рішенням є налаштування витрати сушильного агента на рівні $G_{ca} = 4,5 \text{ кг/с}$ при сталій температурі агента $\theta_0 = 90^\circ\text{C}$. За таких умов кінцева вологість продукту досягає $W_z = 0.1403$, а температура зерна утримується в межах допустимих значень – $T_z = 45,6^\circ\text{C}$.

2.3 Визначення передатної функції зерносушильної установки за каналом регулювання температури продукту.

Для дослідження динамічних особливостей шахтної зерносушарки як об'єкта управління було застосовано її розгінну характеристику – взаємозв'язок температури продукту з часом, що виникає у відповідь на ступінчасту зміну керуючого впливу. Цього досягають шляхом зменшення часу сушіння завдяки збільшенню подачі сушильного агента. Графік розгінної характеристики побудовано на базі експериментальних результатів (див. рис. 2.8).

Здійснимо нормування розгінної характеристики, керуючись виразом:

$$y_H(t_i) = \frac{y(t_i) - y(t_0)}{y(t_{max}) - y(t_0)} = \frac{y(t_i) - 15}{57 - 15}, \quad (2.15)$$

Результати розрахунку занесені в таблицю (див. додаток Б), нормована розгінна характеристика шахтної зерносушарки для каналу регулювання зображена на рис. 2.9.

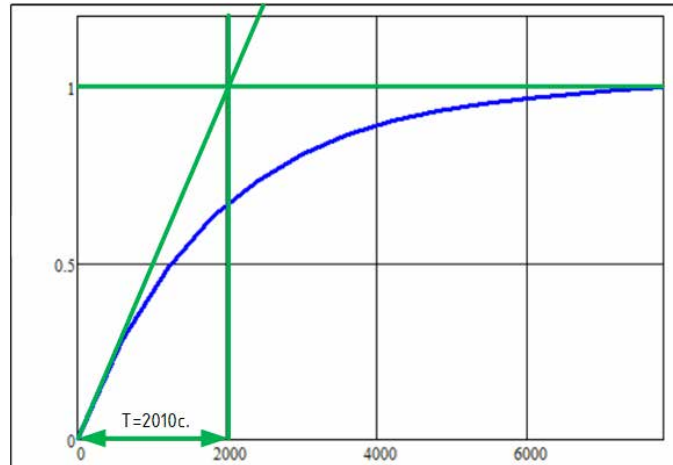


Рис. 2.9 Нормована розгінна характеристика шахтної зерносушарки для каналу регулювання температури сушіння продукта

Значення постійної часу об'єкта керування знаходимо за допомогою дотичної, яку проведемо до точки перегину розгінної характеристики (див. рис. 2.9). Точка перегину відповідає середині відрізка часу, на якому спостерігається максимальний приріст кривої розгону [5]. Відповідно графічного аналізу видно $T = 2010c.$

Визначимо запізнення для каналу регулювання за виразом:

$$\tau = \frac{V_{п.п.}}{V_{с.а.}}, \quad (2.16)$$

де: $V_{п.п.}$ – об'єм повітропроводу, m^3 ; $V_{с.а.}$ – об'єм сушильного агенту.

$$V_{п.п.} = \pi * R^2 * L = S * L \quad (2.17)$$

$$V_{с.а.} = \frac{G_{са}}{\rho}, \quad (2.18)$$

де: R – радіус повітропроводу, L – довжина повітропроводу, ρ – густина сушильного агенту.

$$V_{п.п.} = 1 * 10 = 10m^3 \quad (2.19)$$

$$V_{\text{с.а.}} = \frac{4,5}{1,293} = 3,48 \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.20)$$

$$\tau = \frac{10}{3.48} = 2.87 \text{ с.} \quad (2.21)$$

Коефіцієнт передачі об'єкта керування визначаємо за формулою:

$$k = \frac{T_{\text{к}} - T_{\text{п}}}{L_{\text{к}} - L_{\text{п}}}, \quad (2.22)$$

де: $T_{\text{к}}$ та $T_{\text{п}}$ – кінцева та початкова температура, °С; $L_{\text{к}}$ та $L_{\text{п}}$ – відповідно кінцеве та початкове значення продуктивності системи подачі сушильного агента, %. $T_{\text{к}} = 57^\circ\text{С}$, $T_{\text{п}} = 15^\circ\text{С}$, $L_{\text{к}} = 100\%$, $L_{\text{п}} = 0\%$.

$$k = \frac{57 - 15}{100 - 0} = \frac{42}{100} = 0,42 \text{ }^\circ\text{С}/\% \quad (2.23)$$

Отримаємо передатну функцію шахтної зерносушильної установки для каналу керування температурою сушіння.

$$W(s) = \frac{0.42}{2010 * s + 1} * e^{-2.87*s} \quad (2.24)$$

РОЗДІЛ 3. ОБҐРУНТУВАННЯ ТА ВИБІР АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ.

3.1 Обґрунтування та вибір алгоритму керування.

Динамічні властивості об'єктів керування дають змогу на стадії проектування визначити алгоритм керування. Для цього проаналізуємо співвідношення між сталою часу та часом запізнення об'єкта керування. Якщо $0,2 \leq \tau / T \leq 1$, то рекомендують лінійний алгоритм керування; за умов, коли $\tau / T > 1$ – імпульсний, а при $\tau / T < 0,2$ – позиційний алгоритм керування [5].

$$\frac{\tau}{T} = \frac{2.87}{2010} = 0.0014 \quad (3.1)$$

Згідно з методикою, передбачено застосування алгоритму позиційного управління. Але зважаючи на те, що позиційне регулювання призводить до значних амплітудних коливань, його використання в даному випадку є недоцільним. Це пояснюється тим, що однією з найважливіших технологічних вимог є уникнення перегріву продукту. До того ж, система управління процесом, передбачає неперервну подачу сушильного агенту до продукту сушіння.

Згідно технології сушіння визначимо такі якісні характеристики перехідного процесу, які має забезпечити наша система:

- a) Тип перехідного процесу: аперіодичний;
- b) Перерегулювання: $\sigma < 5\%$
- c) Час регулювання: $T_p < 5000c$;
- d) Статична похибка: $\Delta < 0.5\%$;
- e) Кількість коливань: $N=1$.

Визначимо динамічний коефіцієнт регулювання за формулою 3.2 та проведемо вибір регулятора за графічним відомостями.

$$R_d = \frac{y_1}{K * y_{зб}} \quad (3.2)$$

де: $y_{зб}$ – максимально можливе значення збурення щодо навантаженням, для нашого об'єкту керування 40%; y_1 – максимальне динамічне відхилення

$$R_d = \frac{3}{0,42 * 40} = 0,178 \quad (3.3)$$

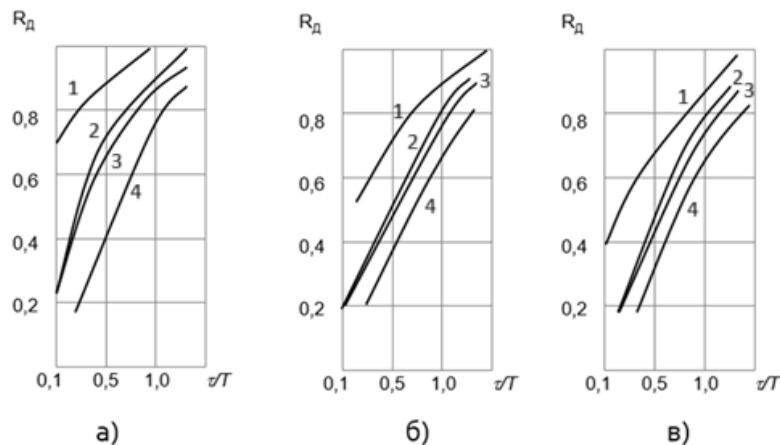


Рис. 3.1 Залежність динамічного коефіцієнта регулювання від динамічних властивостей об'єкта керування: а-для типового аперіодичного перехідного процесу; б-для типового перехідного процесу з 20%-ним перерегулюванням; в-для типового перехідного процесу з мінімальним інтегральним показником якості;

1-П-алгоритм керування, 2-І-алгоритм керування; 3-ПІ-алгоритм керування;
4-ПІД-алгоритм керування

Відповідно графічній відомостей (див. рис. 3.1) за параметром динамічного коефіцієнта регулювання для типового аперіодичного перехідного процесу бачимо, що задані якісні параметри задовільнить ПІД-регулятор [5].

3.2 Визначення параметрів налаштування регулятора.

Для лінійних систем автоматичного регулювання розрахунок параметрів налаштування регуляторів, за якими їх обирають, ведуть за трьома інженерними методиками:

- на заданий запас стійкості за амплітудою;
- на заданий частотний показник коливальності;
- на заданий кореневий показник коливальності.

Для системи керування процесом сушіння зерна по каналу регулювання температури сушіння було обрано методику вибору за параметрів ПІД-

регулятора на заданий частотний показник коливальності [7], що рівний $M = 1.3$.

Використаємо математичний пакет Mathcad для визначення оптимальних параметрів за даною методикою.

Першочергово необхідно задати вектор початкових значень часу ізодрому (для нашої системи це вісім значень: 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800) та побудувати годограф АФЧХ розімкненої системи з параметрами регулятора $K_{\pi} = 1, T_i = \tau$ та провести на графіку пряму, що проходить через центр координат під кутом β .

Далі для всіх восьми значень часу ізодрому необхідно підібрати такі параметри кола, щоб воно дотикалося і до прямої і до годографа, слід зауважити, що годограф АФЧХ з ПД-регулятором має особливу форму і має дві кривизни, відповідно при малих значення часу ізодрому (для даного випадку: 100, 200, 300, 400), коло дотикається до першої «великої», а при малих (для даного випадку: 500, 600, 700, 800) до другої «меншої».

З отриманого вектора радіусів кола розраховуємо вектор K_{π} . Будуємо лінію межових співвідношень. Лінія межових співвідношень має чітко виражений злам, це спричинено «переходом» забороненої зони між кривизнами годографа. Провівши пряму також від центру координат до точки зламу, в дотичній будуть оптимальні параметри налаштування регулятора. Для даної системи вони дорівнюють. $K_{\pi} = 75, T_i = 500, T_{\pi} = 250$.

Передатна функція регулятора матиме вигляд:

$$W_{\text{ПД}}(s) = 75 * \left(1 + \frac{1}{500 * s} + 250 * s\right) \quad (3.4)$$

Детальний процес визначення оптимальних параметрів ПД-регулятора відображено в додатку В бакалаврської кваліфікаційної роботи.

РОЗДІЛ 4. ВИБІР ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ.

4.1 Вибір програмованого логічного контролера, модуля розширення, людино-машинного інтерфейсу та мережевого обладнання.

Для керування технологічним обладнанням було обрано ПЛК M221CE16R (див. рис. 4.1) та модуль розширення аналогових входів та виходів TM3AM6G марки Schneider Electric (див. рис. 4.2).



Рис. 4.1 ПЛК M221CE16R, Schneider Electric



Рис. 4.2 Модуль розширення TM3AM6G, Schneider Electric

Контролер Schneider Electric TM221CE16R, що належить до серії Modicon M221, створений для виконання основних задач автоматизації в промисловості. Він забезпечує керування дискретними та аналоговими сигналами, включає вбудовані інтерфейси зв'язку, такі як Ethernet, USB та послідовний порт. Цей контролер є використовується для автоматизації невеликих систем керування, де головними аспектами є надійність, компактність та гнучкість використання. Технічні характеристики приведено в таблиці 4.1.

Модуль Schneider Electric TM3AM6G призначений для роботи з контролерами серії M221. Оснащений 4 аналоговими входами та 2 виходами, адаптованими для роботи як зі струмовими сигналами, так і з сигналами по напрузі. Підключення реалізується за допомогою пружинних клем, а живлення забезпечується від джерела 24 В постійного струму. Цей модуль призначений для обробки аналогових сигналів у системах автоматизації, забезпечуючи значну точність вимірювань завдяки 12-бітній роздільній здатності. Технічні характеристики приведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.1.

Характеристика	Значення
Номінальна напруга живлення, В	100-240В AC
Кількість дискретних входів	9
Тип дискретних входів	PNP/NPN
Кількість дискретних виходів	7
Тип дискретних виходів	Реле
Кількість аналогових входів	2
Тип аналогових входів	0-10В
Комунікаційні порти	USB, Serial, Ethernet

Таблиця 4.2.

Номінальна напруга живлення, В	24В
Кількість аналогових входів	4
Тип аналогових входів	0(4)-20мА; -10(0)-10В
Кількість аналогових виходів	2
Тип аналогових виходів	0(4)-20мА, -10(0)-10В
Роздільна здатність аналогового входу	12 біт (11+знак)

Для забезпечення зв'язку між оператором та автоматизованою системою використано ЛМІ – панель Harmony HMIST6400 марки Schneider Electric (див. рис. 4.3)



Рис. 4.3 HMI Harmony HMIST6400, Schneider Electric

Панель оператора Schneider Electric HMIST6400 — це інтерфейс користувача для керування й моніторингу промислових процесів. HMIST6400 належить до

серії Harmony ST6, що орієнтована на надійність, легкість інтеграції та зручність оператора. Завдяки компактному дизайну HMIST6400 використовується в автоматизованих рішеннях, де потрібен надійний локальний інтерфейс.

Автоматизована система передбачає інтеграцію вбудованого веб-інтерфейсу, що забезпечує дистанційний контроль стану устаткування в локальній мережі. Дане рішення є ефективним, як на етапі експлуатації, так і під час пуско-налагоджувальних робіт, також може виступати як альтернативний канал спостереження за критичними показниками системи у разі виникнення непередбачених ситуацій, що забезпечить вищу надійність. Реалізація відбувається за допомогою промислового маршрутизатора Teltonika RUT240 (див. рис. 4.4) у парі з мережевим комутатором Modicon Standard MCSESU053FN0 від Schneider Electric (див. рис. 4.5).



Рис. 4.4 Промисловий маршрутизатор RUT240, Teltonika



Рис. 4.5 Мережевий комутатор Modicon Standard MCSESU053FN0, Schneider Electric

4.2 Вибір виконавчих механізмів системи автоматичного керування.

В попередніх розділах було визначення, що для керування процесом сушіння зерна для даного об'єкту керування буде відбуватися за допомогою безперервної регульованої подачі сушильного агента в зерносушильну шахту з вологим продуктом.

Реалізація такого принципу можлива з використанням вентилятора з регулюванням обертів.

Слід врахувати, що виконавчий механізм повинен забезпечити певну

продуктивність та тиск для проходження сушильного агента крізь шар маси продукта. Статичний тиск який задовільнить цю потребу має перебувати в межах від 2000 до 2600 Па, а продуктивність має знаходитися в межах 20 тис. м³/год для даного об'єкту керування.

Відповідно до набору критеріїв вибору було обрано радіальний відцентровий вентилятор ВЦ 12-46 (див. рис.4.6). Технічні характеристики приведені в таблиці 4.3



Рис. 4.6 Вентилятор ВЦ 12-46

Таблиця 4.3

Вентилятор	Потужність електродвигуна, кВт	Швидкість обертання робочого колеса, об/хв	Продуктивність, тис. м ³ /год	Тиск, Па
ВЦ 12-46	18,5	1500	17	2570

Для приводу даного вентилятора вирішено використати асинхронний трифазний електродвигун Siemens 1LA5183-4AA10-Z D22 (див. рис. 4.7), технічні характеристики відображено в таблиці 4.4 [14].



Рис. 4.7 Електродвигун Siemens 1LA5183-4AA10-Z D22

Таблиця 4.4

Характеристика	Значення
Потужність, кВт	18,5
Номінальний струм	
Напруга живлення, В	380
Частота обертання валу, об./хв.	1500
Частота обертання валу (фактична), об./хв.	1470
$\cos\varphi$	0,81
ККД, %	94,2
Момент інерції, $\text{кг} * \text{м}^2$	0,17
Термічний клас ізоляції обмоток	F (до 150°C) IP55
Ступінь захисту	IP55
Вага, кг	153

Найбільш ефективним способом регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна є керування по частоті. Розглянемо методику визначення передатної функції електродвигуна з частотним регулюванням [8] для даного об'єкта керування. Передатна функція для виконавчого механізму даної системи буде мати вигляд згідно виразу 4.1.

$$W_{\text{ВМ}}(s) = \frac{k_{\text{ВМ}}}{T_{\text{ВМ}} * s + 1}; \quad (4.1)$$

$$k_{\text{ВМ}} = \frac{\omega_{\text{Н}}}{f}; \quad (4.2)$$

$$T_{\text{ВМ}} = \frac{J_{\text{ЗВ}}}{\beta}, \quad (4.3)$$

де: $\omega_{\text{Н}}$ – номінальна швидкість двигуна, f – частота на якій працює двигун, $J_{\text{ЗВ}}$ – зведений момент інерції електродвигуна та вентилятора, β – жорсткість механічної характеристики.

$$\beta = \frac{2 * M_{кр}}{\omega_0 * s_{кр}}, \quad (4.4)$$

де: $M_{кр}$ - критичний момент електродвигуна; $s_{кр}$ - критичне ковзання електродвигуна; ω_0 - початкова швидкість електродвигуна.

Розрахуємо необхідні величини для визначення передатної функції за виразами (4.1 - 4.4). Вихідні дані - технічні характеристики електродвигуна Siemens 1LA5183-4AA10-Z D22 наведені в таблиці 4.4.

Визначимо номінальний крутний момент електродвигуна: (4.4)

$$M_H = 9550 * \frac{P_H}{n_H} = 9550 * \frac{18,5}{1470} = 120,33 \text{ (Н * м)}.$$

Визначимо критичний крутний момент електродвигуна:

$$M_{кр} = M_H * \mu_{кр} = 120,33 * 2,7 = 324,891 \text{ (Н * м)}. \quad (4.5)$$

Визначимо номінальне ковзання: (4.6)

$$s_H = \frac{n_0 - n_H}{n_0} = \frac{1500 - 1470}{1500} = 0,02.$$

Визначимо коефіцієнт запасу за пусковим моментом: (4.7)

$$\mu_1 = \frac{\mu_{кр}}{\mu_{пуск}} = \frac{2,7}{2,5} = 1,08.$$

Визначимо критичне ковзання: (4.8)

$$s_{кр} = \frac{s_H + \sqrt{s_H * \frac{\mu_{кр} - 1}{\mu_1 - 1}}}{1 + \sqrt{s_H * \frac{\mu_{кр} - 1}{\mu_1 - 1}}} = \frac{0,02 + \sqrt{0,02 * \frac{2,7 - 1}{0,34 - 1}}}{1 + \sqrt{0,02 * \frac{2,7 - 1}{0,34 - 1}}} = 0,407.$$

$$\omega_0 = \frac{2 * \pi * n_0}{60} = \frac{2 * 3,14 * 1500}{60} = 157 \text{ (рад./с)}. \quad (4.9)$$

$$\omega_H = \frac{2 * \pi * n_H}{60} = \frac{2 * 3,14 * 1470}{60} = 153,86 \text{ (рад./с)}. \quad (4.10)$$

Звідси:

$$\beta = \frac{2 * M_{кр}}{\omega_0 * s_{кр}} = \frac{2 * 324,891}{157 * 0,407} = 10,17 \left(\frac{Н * м}{рад/с} \right) \quad (4.11)$$

$$T_{вм} = \frac{J_{кр}}{\beta} = \frac{0.17}{10.17} = 0.016 \text{ с.} \quad (4.12)$$

$$k_{вм} = \frac{\omega_H}{f} = \frac{153,86}{50} = 3,07 \left(\frac{рад./с}{Гц} \right) \quad (4.13)$$

Отже, передатна функція електродвигуна Siemens 1LA5183-4AA10-Z D22 при частотному керуванні:

$$W_{вм}(s) = \frac{3,07}{0,016 * s + 1} \quad (4.14)$$

Проведемо вибір виконавчих механізмів для інших складових системи, згідно функціональної схеми (рис.1.) це транспортери вивантаження та завантаження NS (1-в); NS(2-ж), соленоїдні клапани NS(3-г); NS(3-д) та трансформатор запалу NS(3-г).



Рис. 4.7



Транспортер

NS(1-в) ланцюговий
скребковий

Agroheliх та двигун

Siemens 1LE1002-

1AA42-2AA4-Z D22



Рис. 4.8



Транспортер

NS(2-ж) гвинтовий
Agroheliх та двигун

Siemens 1LE1002-

1AA42-2AA4-Z

D22



Рис. 4.9

Клапан

соленоїдний
NS(3-г); (3-д)

GESA

AV050FO-F DN



Рис.4.10

Трансформатор

розпалу NS(3-г)

Danfoss EBI4

052F4030

Відповідно до характеристики зерносушильної установки (таблиця 1.1), вміст зерносушильної шахти та силосховища дорівнюють 18 тон продукту, отже

важливою характеристикою при виборі транспортерів завантаження та вивантаження є продуктивність. Транспортери Agrohelix [25].

] в парі з двигунами Siemens 1LE1002-1AA42-2AA4-Z D22 (потужність 3кВт) [14], забезпечують продуктивність в 50 т/год, що є оптимальним для нашої системи.

Для керування подачею повітря та газу до пальника було обрано соленоїдні клапани GECA AV050FO-F DN, які мають вибухозахищене виконання та забезпечують коректну роботи при заданому тиску в системі до 360мбар.

Для керування процесом запалювання в газовому пальнику, використано трансформатор запалу Danfoss EBI4 052F4030, який здатен генерувати напругу до 15 кВ для отримання дуги запалу, з максимальним струмом 40мА.

4.3 Вибір частотного перетворювача

Для автоматизованої системи управління процесом сушіння зерна було вибрано частотний перетворювач, моделі ATV630D22M3, марки Schneider Electric (див. рис. 4.11). Цей пристрій призначений для регулювання частоти обертання електродвигуна та повністю відповідає специфікаціям нашого технологічного процесу [15].

Номінальна потужність (22 кВт) та максимальний вихідний струм (92,6 А), які забезпечує перетворювач, є достатніми для ефективної та стабільної роботи з асинхронним двигуном Siemens 1LA5183-4AA10-Z D22. Враховуючи потребу в реалізації надійного управління з використанням як аналогових, так і дискретних сигналів, важливою вимогою до обладнання була наявність відповідних каналів вводу/виводу.

Частотний перетворювач ATV630D22M3 відповідає цим вимогам, оскільки оснащений: трьома програмованими аналоговими входами, призначені для прийому уніфікованих аналогових сигналів керування; двома програмованими аналоговими виходами, призначеними для видачі уніфікованих аналогових сигналів, також на борту пристрою є 7 дискретних входів та 3 виходи.



Рис. 4.11 Частотний перетворювач ATV630D22M3, Schneider Electric

4.4 Вибір вимірювальних перетворювачів та давачів системи автоматичного керування.

При виборі перетворювачів слід зважати на низку факторів, продиктованих системою автоматичного управління, а саме:

- наявність прямолінійної та однозначної статичної характеристики, з дозволеним ступенем нелінійності, що не перевищує діапазон 0,1–3,0%;
- висока чутливість до коливань контрольованого параметра;
- стійкість параметрів функціонування впродовж тривалого періоду експлуатації;
- задовільна швидкодія;
- несприйнятливність до агресивного впливу навколишнього середовища;
- мінімальний вплив на вимірювану фізичну величину
- простоту монтажу, технічного обслуговування та заміни обладнання.

Основоположним критерієм вибору вимірювального перетворювача є гарантування необхідного діапазону вимірювань, адаптованого до умов конкретного технологічного процесу. Відповідно до функціональної схеми автоматизації (розділ 1 додатку А), перетворювачі температури ТЕ/ТТ(2-г) та ТЕ/ТТ(2-д) встановлені безпосередньо в сушильній шахті. Таким чином, їх робочий діапазон має відповідати температурному режиму продукту, який, як оголошено в таблиці 1.2, варіюється в межах від 15 °С до 65 °С.

Для мінімізації динамічної похибки, постійна часу вимірювального перетворювача $T_{\text{вм}}$ має бути значно меншою за постійну часу об'єкта управління $T_{\text{ок}}$. Для нашого об'єкта значення $T_{\text{ок}}$ дорівнює 2010 секундам.

Зважаючи на вищевказані умови, доцільно обрати термоперетворювачі IFM TA2105 (див. рис. 4.9) [16]

, що характеризується уніфікованим вихідним сигналом. Конструктивно пристрої складається з вимірювального елемента (транsd'юсера) та інтегрованого перетворювача сигналу (трансмiтера), який забезпечує стандартний струмовий вихід.



Рис. 4.9 Вимірювальний перетворювач TA2105, IFM

Технічні характеристики вимірювального перетворювача подані в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3.

Характеристика	Значення
Діапазон вимірювань	-50...150°C
Вимірювальний елемент	Pt1000, клас А
Абсолютна похибка	$\pm 0,3^\circ\text{C}$
Робоча напруга	18...32В, DC
Вихідний сигнал	4-20мА
Теплова інерція	3 с.
Тип з'єднання	G 1/4
Налаштування	IO-Link

Діапазон вимірювань даного приладу стандартно дорівнює від -50°C до 150°C , з можливістю зміни діапазону вимірювань за допомогою програмування через протокол IO-Link.

Приймемо зменшення діапазону вимірювання від 0°C до 100°C , що є

ближчим до діапазону технологічного процесу та дозволить покращити відносну точність отриманої вимірювальної величини.

За динамічними властивостями перетворювач є інерційною ланкою, передатна функція якого має вигляд:

$$W_{\text{ВП}}(s) = \frac{k_{\text{ВП}}}{T_{\text{ВП}} * s + 1} \quad (4.15)$$

де: $k_{\text{ВП}}$ – коефіцієнт передачі вимірювального перетворювача; $T_{\text{ВП}}$ – постійна часу вимірювального перетворювача.

$$k_{\text{ВП}} = \frac{\Delta I}{\Delta T} = \frac{20 - 4}{100 - 0} = 0.16, \quad (4.16)$$

де: ΔI - різниця струмів, що відповідає значенням температур в робочому діапазоні, мА; ΔT - різниця значень вимірюваних датчиком температур, °С.

Враховуючи, що показник теплової інерції сприймаючого елемента складає $T_{\text{ВП}} = 3$ с. відповідно технічних характеристик, передатна функція вимірювального перетворювача:

$$W_{\text{ВП}}(s) = \frac{0,16}{3 * s + 1} \quad (4.17)$$

Підберемо вимірювальні прилади для інших складових системи, згідно функціональної схеми це вимірювальний перетворювач вологості продукту МЕ/МТ(2-б), давач рівню LS(1-а), давач наявності полум'я BS(3-а) та давач тиску PS(3-б).



Рисунок 4.2.2. – Датчик вологості зерна Aquaro System A315



Рисунок 4.2.3. – Давач рівня IFM KI5002



Рисунок 4.2.4. – Давач наявності полум'я Siemens QRB1B-A033B40B



Рисунок 4.2.5. – Давач тиску DUNGS GW 3 A6

Вологомір А315 є мікрохвильовим резонансним багатопараметричним пристроєм, принцип дії якого ґрунтується на діелектричній проникності зерна та води в діапазоні надвисоких частот. Вологомір є оптимальним вибором для даної системи керування, оскільки дозволяє спостерігати за зміною вологості продукту в реальному часі, не звертаючись до лабораторних перевірок вологості, що значно збільшує час технологічного процесу. Діапазон вимірювань для даного датчика від 4 до 50%. Аналоговий вихідний сигнал 4-20мА.

Давач IFM KI5002 [16] функціонує на основі ємнісного принципу. Він генерує електричне поле навколо чутливого елемента. У випадку потрапляння об'єкта з певним значенням діелектричної проникності в це поле, відбувається зміна ємності між електродами. Ця зміна реєструється електронікою датчика. Даний датчик підходить для визначення наявності сипучих матеріалів. Діапазон чутливості 15 мм. Вихідний сигнал дискретний.

Давач наявності полум'я Siemens QRB1B-A033B40B реагує на світло, що потрапляє на світлочутливий компонент (фоторезистор), спричиняючи зміни електричного опору. Ці коливання фіксуються електронною системою, яка визначає присутність або відсутність полум'я. Датчик підходить для визначення наявності полум'я в пальникових системах. Вихідний сигнал дискретний.

Давач тиску Dungs GW A6 – це електромеханічний прилад, розроблений для контролю надлишкового тиску газу або повітря в автоматизованих системах управління. Принцип його функціонування ґрунтується на механічній дії тиску середовища на чутливий компонент, що викликає замикання чи розмикання електричних контактів при досягненні заздалегідь визначеного значення тиску. Діапазон тиску на спрацювання для даного давача від 0 до 500мбар. Вихідний сигнал дискретний.

РОЗДІЛ 5. СИНТЕЗ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.

5.1 Розробка цифрової системи керування.

Сучасні рішення в автоматизації базуються на цифрових системах управління, гарантуючи значну точність, надійність та адаптивність керування технологічними процесами. Завдяки цифровій обробці сигналів та можливості програмування параметрів, ці системи легко підлаштовуються під зміни у виробництві, дають змогу реалізувати комплексні алгоритми регулювання, інтегруватися з іншими підсистемами та обмінюватися даними за допомогою промислових мереж.

Першочерговою задачею в розробці цифрової системи керування є визначення граничного часу дискретизації.

Використаємо математичний пакет Mathcad.

Побудуємо АЧХ лінійної розімкнутої системи, розрахуємо 5% від максимальної амплітуди $A(0)$ та знайдемо частоту, що відповідає даній амплітуді (див. рис. 5.1).

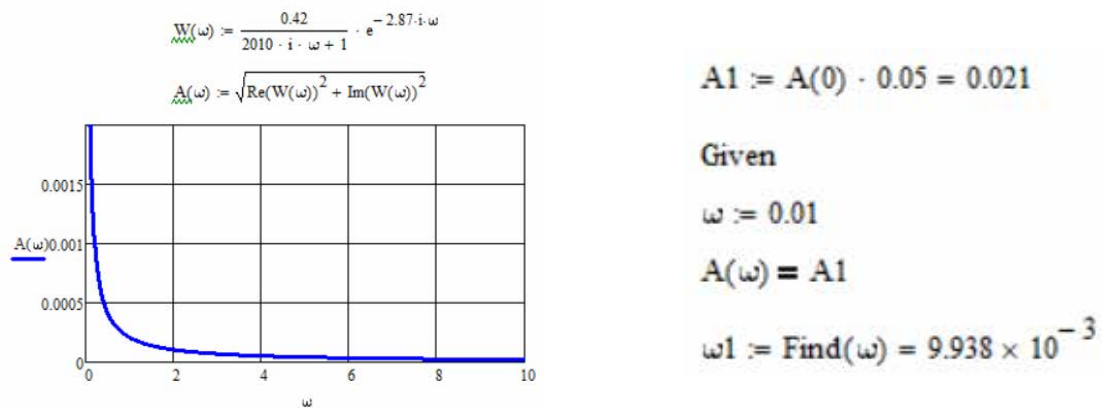


Рис. 5.1 Побудова АЧХ лінійної розімкнутої системи та визначення частоти

Розрахуємо граничне значення часу дискретизації за формулою:

$$\frac{\pi}{\omega1} = 316.125$$

Рис. 5.2 Розрахунок граничного часу дискретизації

Отже, граничний час дискретизації для даної системи автоматичного керування становить $t_r = 316\text{с}$.

Визначимо коефіцієнти передачі, інтегрування та диференціювання для цифрової системи керування, використовуючи налаштування регулятора п. 3.2 за формулами:

$$K_p = K_p = 75 \quad (4.18)$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = \frac{75}{500} = 0,15 \quad (4.19)$$

$$K_d = K_p * T_n = 75 * 250 = 18750 \quad (4.20)$$

Складаємо цифрову схему керування з часом дискретизації $t_d < t_r$, Нехай $t_d = 0,316$ с.

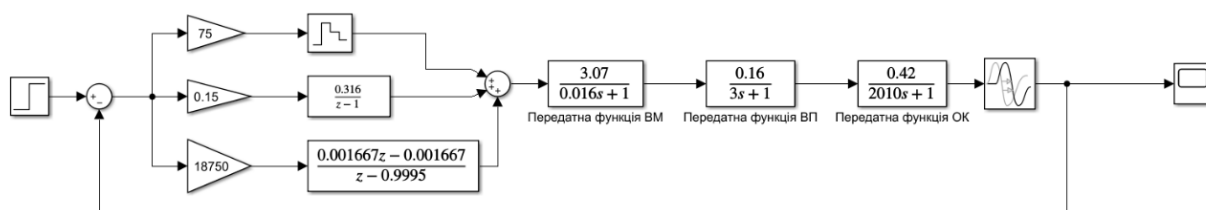


Рис. 5.3 Схема цифрової системи керування

Отримаємо Z – перетворення інтегральної для диференційної складових ПІД-регулятора. Для передатної функції диференційної складової використаємо постійну час, що рівна $T = 600$ секунд, оскільки для реального регулятора, така постійна часу забезпечує найкращий вигляд перехідного процесу.

```
>> w1 = tf(1,[1,0])           >> c2d(w1,0.316)           >> w2 = tf([1,0],[600,1])   >> c2d(w2,0.316)
w1 =                           ans =                           w2 =                           ans =
  1                               0.316                          s                               0.001667 z - 0.001667
  -                               -----                          -----                          -----
  s                               z - 1                          600 s + 1                          z - 0.9995
Continuous-time transfer function. Sample time: 0.316 seconds   Discrete-time transfer function.   Continuous-time transfer function. Sample time: 0.316 seconds
Discrete-time transfer function.                               Discrete-time transfer function.
```

Рис. 5.4 Z – перетворення
інтегральної складової

Рис. 5.5 Z – перетворення
диференційної складової

Отримуємо графік перехідного процесу з цифровим ПІД-регулятором (рис. 5.6).

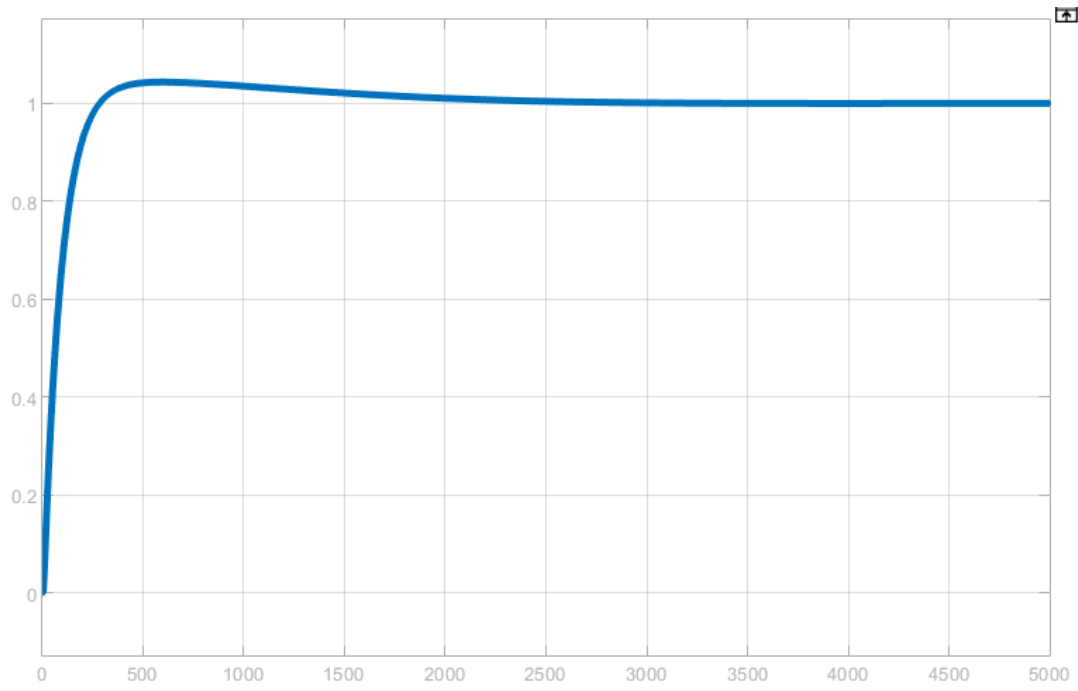


Рис. 5.6 Перехідний процес системи керування з цифровим ПІД-регулятором

5.2 Аналіз цифрової системи керування.

Порівнюємо якісні властивості, що були визначені у п.3.1, з тими, що отримані після синтезу перехідного процесу цифрової системи керування.

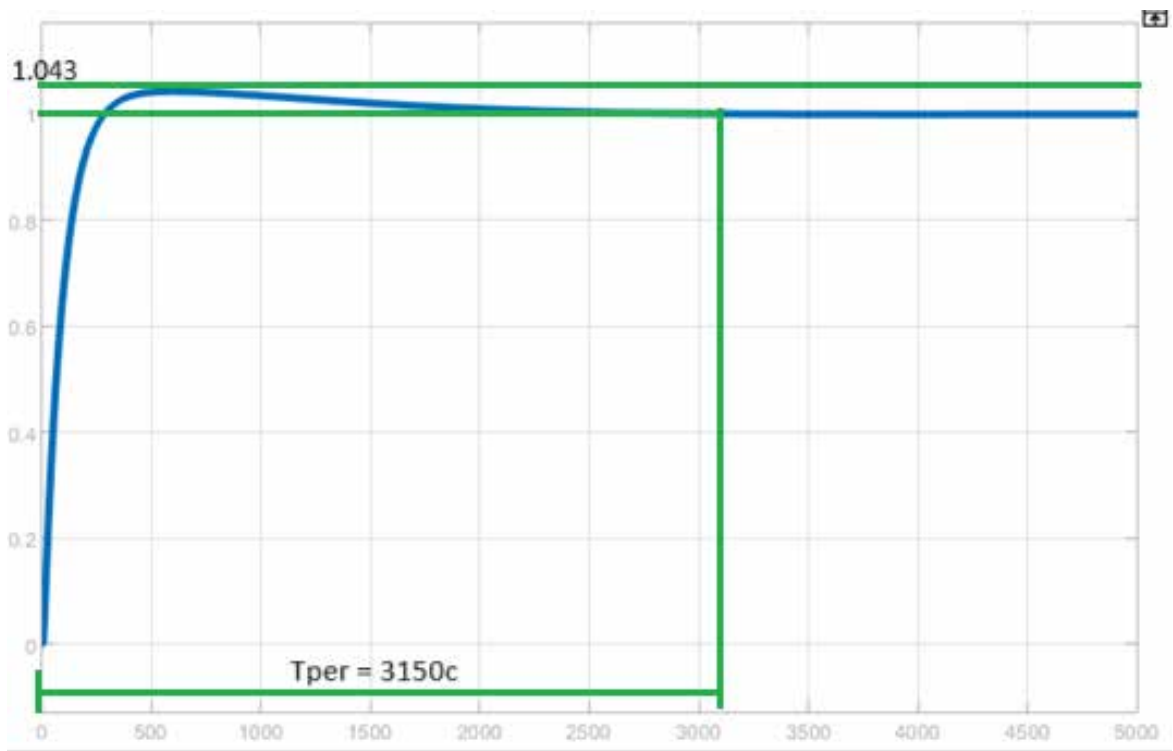


Рис. 5.7 Аналіз перехідного процесу з цифровим ПІД-регулятором

На основі рис. 5.7, що ілюструє аналіз перехідного процесу системи з

цифровим ПІД-регулятором, можна зробити наступні висновки:

- a) Тип перехідного процесу: аперіодичний;
- b) Перерегулювання: $\sigma = \frac{y_{max} - y_{уст}}{y_{уст}} * 100\% = \frac{1,043 - 1}{1} * 100\% = 4.3\%$
- c) Час регулювання: $T_p < 3150c$;
- d) Статична похибка: $\Delta = 0\%$;
- e) Кількість коливань: $N=1$.

Отже, дана система з цифровим ПІД-регулятором відповідає вимогам до якісних показників перехідного процесу, зазначених у п.3.1. Зокрема, система забезпечує швидке встановлення заданої величини без значного перерегулювання та з нульовою статичною похибкою, що свідчить про ефективність розробленого регулятора.

РОЗДІЛ 6. СХЕМИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.

6.1 Розробка електричної принципової схеми.

Система автоматизованого управління процесом сушіння зерна в шахтній зерносушарці побудована з використанням комплексу технічних засобів Schneider Electric і має декілька рівнів електричних та логічних схем. Вона чітко структурована на сторінки, кожна з яких виконує окрему функціональну роль у системі. Повна схема представлена в розділі 2 додатку А бакалаврської кваліфікаційної роботи.

На першій сторінці відображено схему введення живлення та розподільчої частини. Живлення подається від головного розподільного щита через автоматичний вимикач QF1. Через роз'єднувач QS1 напруга надходить до пристрою захисту від імпульсних перенапруг FV1, що забезпечує захист обладнання від перенапруг в мережі. до розеток XS1-2 та блоку живлення G1, який перетворює змінну напругу на постійну: +24 В і -24 В постійного струму для живлення керуючих кіл. Запобіжники FU1-FU5 захищають окремі ланцюги, запобігаючи перевантаженням або коротким замиканням. Використані розподільні клеми для заземлення та -24В.

Друга сторінка присвячена силовим ланцюгам та управлінню трьома основними двигунами. Перший двигун M1 відповідає за роботу транспортера завантаження, другий M2 — за транспортера вивантаження, обидва мають потужність по 3 кВт. Третій двигун M3 потужністю 18,5 кВт забезпечує подачу сушильного агента і управляється за допомогою частотного перетворювача UZ1 ATV630D22M3. Двигуни захищені автоматичними вимикачами QF2, QF3 та QF4, а також мають відповідні контактори KM1-KM3, які забезпечують комутацію живлення до них. керування кожного двигуна здійснюється за допомогою реле KV1-KV3. Також в цій частині схеми присутні соленоїдні клапани Y1 та Y2, трансформатор запалювання TV1, їх захисні та пускові пристрої, а також сигнальні лампи HL2-HL4, що сигналізують про роботу відповідних приводів.

На третій сторінці зображено логіку управління. Встановлено перемикачі

SA1-SA3 для вибору між автоматичним і ручним режимом управління двигунів, при ручному режимі, приводи керуються за допомогою кнопок, а при автоматичному, керування відбувається на стороні контролера. Кнопки SB1-SB9 реалізують команди «Пуск», «Стоп», «Скидання аварії» та «Аварійна зупинка». Індикаційні лампи HL5-HL8 відображають стан системи та інформують оператора про активність обладнання. Важливу роль відіграє реле безпеки U1 XPSBAC14AC, яке забезпечує аварійне вимкнення системи при виникненні небезпечної ситуації. Реле KA1 та KA2 відповідають за блокування роботи обладнання.

Четверта сторінка містить інформацію про програмований логічний контролер A1 (M221CE16R) для роботи з дискретними сигналами, до якого підключено модуль A2 (TM3AM6G) для роботи з аналоговими сигналами. Через модуль гальванічної розв'язки U2-U4 (ACT20M-CI-CO-OLP-S) всі аналогові сигнали з вимірювальних перетворювачів проходять фільтрацію від перешкод і потенційних завад, що збільшує точність вимірювання та безпеку контролера. Всі сигнали від сенсорів надходять до ПЛК, який обробляє дані та, відповідно до заданого алгоритму, керує виконавчими механізмами за допомогою дискретних виходів та проміжних реле KL1-KL7. Через модуль розширення також здійснюється передача аналогових сигналів до частотного перетворювача UZ1 для керування та отримання зворотного зв'язку по частоті.

На п'ятій сторінці представлено мережеві зв'язки системи. Програмований логічний контролер A1, операторська панель A3 HMIST6400, промисловий маршрутизатор A5 Teltonika RUT240, та персональний комп'ютер, підключені до комутатора A4 для забезпечення зв'язку між різними рівнями автоматизованої системи.

Останні дві сторінки схеми містять специфікацію всіх компонентів, застосованих у проекті. У таблиці наведені позиційні позначення, тип, кількість, а також виробники пристроїв. Основну частину складових системи становлять компоненти компанії Schneider Electric, включаючи автоматичні вимикачі, блоки живлення, контактори, реле, кнопки, сигнальні лампи, ПЛК та частотний

перетворювач.

Схема охоплює повний цикл керування — від живлення та захисту, керування приводами, логіку та індикацію, до взаємодії з оператором та обміну даними з мережею. Її модульна структура, використання сучасних промислових компонентів, а також можливість масштабування забезпечують високу гнучкість, точність контролю технологічного процесу та можливість інтеграції в сучасні цифрові аграрні комплекси.

6.2 Розробка схеми з'єднань та підключень.

Схеми з'єднань відтворюються для конкретної одиниці обладнання: щита, пульта, станції управління. На них повністю відображаються всі пристрої, прилади та елементи автоматики, які передбачені у принциповій електричній схемі. Позиційні позначення пристроїв та маркування ділянок кіл повинні повністю відповідати тим, що використовуються у принципових схемах.

Залежно від поставлених задач, схеми розробляються за допомогою адресного, графічного або табличного методів. При використанні адресного або графічного методу шафи та щити розгортають в одну площину, зберігаючи реальне розташування обладнання. Елементи зображаються у спрощеному вигляді — у формі прямокутників без масштабу. Над прямокутником вказують порядковий номер, а під ним — позиційне позначення згідно з принциповою схемою. Внутрішні схеми апаратів подаються лише за необхідності, а для однотипних реле, встановлених поруч, зображається лише одна схема. Затискачі позначаються колами з відповідним маркуванням всередині; якщо заводське маркування відсутнє, використовують умовні позначення. Плати маркуються порядковим номером, а позначення елементів розміщують безпосередньо біля їх графічних символів.

Адресний метод передбачає відсутність зображення ліній зв'язку на схемі. Натомість, біля точки підключення проводу вказується цифрова або літерно-цифрова адреса елемента, з яким необхідно встановити електричний зв'язок. Це дозволяє зробити схему компактною, більш інформативною та зручною для читання.

Схема підключень – елемент технічної документації, що відображає фізичне з'єднання зовнішніх пристроїв до шафи управління. Її основна задача – наочно продемонструвати, яким чином підключаються виконавчі механізми, пристрої керування та силові компоненти до відповідних клем електричних шаф, складових системи.

На таких схемах зображено прокладання кабелів, позначення клемних колодок, маркування кабелів, тип та переріз провідників, а також позначення пристроїв, що підключаються. Всі з'єднання виконуються відповідно до логіки керування системи та вимог щодо безпеки та надійності електричних мереж. Завдяки цьому забезпечується правильна робота устаткування після монтажу.

Завдяки чіткій структурі, схема підключень дозволяє забезпечити правильне підключення всіх елементів.

Графічні матеріали схем електричних з'єднань та підключень представлені в розділах 3-4 додатку А.

6.3 Розробка зовнішнього вигляду шафи керування.

Для реалізації системи автоматичного керування процесом сушіння зерна було обрано електротехнічну шафу PanelSET SFN IP55, що призначена для встановлення електричних та електронних компонентів систем автоматизації. Дана модель має ступінь захисту IP55, що забезпечує захист від пилу та водяних бризок, що особливо важливо в умовах сільськогосподарського виробництва.

Габарити шафи складають:

- Висота – 1800 мм
- Ширина – 800 мм
- Глибина – 350 мм



Рис. 6.1 Шафа PanelSET SFN IP55, Schneider Electric

Було розроблено зовнішній вигляд шафи (див. рис. 6.2; розділ 5 додатку А), де визначені розміри та місця встановлення елементів керування та індикації. Ергономіка розташування органів керування враховує зручність користування, швидкий доступ до елементів, а також безпечну експлуатацію системи.

Елементи, розміщені на передній панелі шафи:

HL1 – Лампа індикації живлення

QS1 – Роз'єднувач живлення

A3 – ЛМІ

SB7 – Кнопка аварійної зупинки

HL2, HL3, HL4, HL8 – Лампи індикації стану системи

SA1, SA2, SA3 – Двопозиційні перемикачі

SB1–SB6, HL5–HL7 – Кнопки з лампою в зборі (комбіновані елементи, що поєднують кнопку керування та індикаторну лампу в одному корпусі).

Розподілені наступним чином:

SB1–SB2 + HL5 – Керування транспортером завантаження

SB3–SB4 + HL6 – Керування транспортером вивантаження

SB5–SB6 + HL7 – Керування вентилятором

SB8 – Кнопка скидання аварії

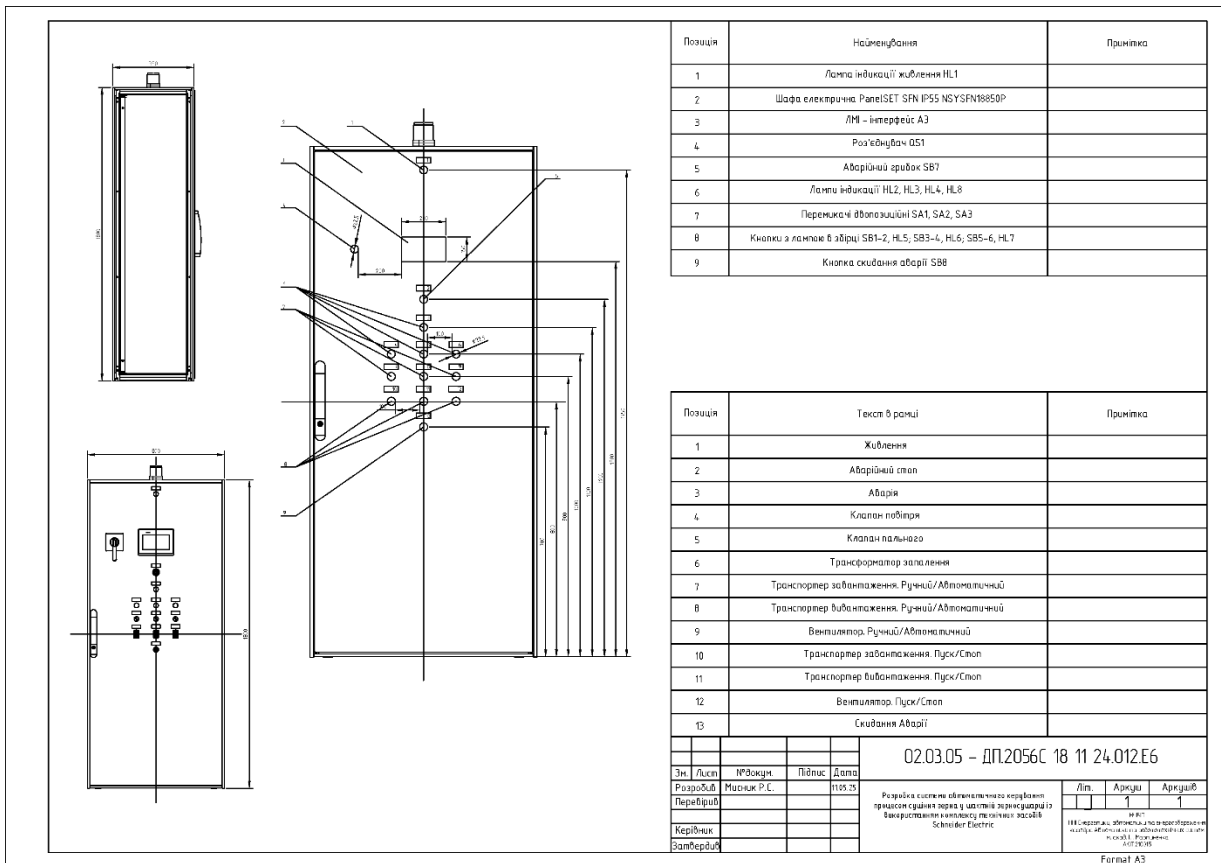


Рис. 6.2 Фрагмент зовнішнього вигляду шафи керування

6.4 Вибір пуско-захисної апаратури.

Проект передбачає застосування трьох асинхронних електродвигунів: два двигуни з потужністю 3 кВт Siemens 1LA5183-4AA10-Z D22 та один двигун з потужністю 18.5 кВт Siemens 1LE1002-1AA42-2AA4-Z D22. Для гарантування надійного та безпечного запуску, а також для захисту електродвигунів від перенавантаження, короткого замикання та інших аварійних ситуацій, важливо коректно підібрати пускозахисну апаратуру.

Розрахуємо номінальні струми двигунів транспортерів завантаження, вивантаження та вентилятора. Для двигунів транспортерів використаємо значення $\cos\varphi$ та η двигуна Siemens 1LE1002-1AA42-2AA4-Z D22, оскільки вони є ідентичними, звернемося до таблиці 4.4:

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{P}{\sqrt{3} * U * \cos\varphi * \eta} = \frac{3000}{\sqrt{3} * 380 * 0,81 * 0,942} = 5.97(A) \quad (6.1)$$

$$I_{\text{ном}} = \frac{P}{\sqrt{3} * U * \cos\varphi * \eta} = \frac{18000}{\sqrt{3} * 380 * 0,81 * 0,942} = 35.85(\text{A}) \quad (6.2)$$

Для двигунів транспортерів, як захисний пристрій оберемо автоматичні вимикачі захисту двигуна з тепловим роз'єднувачем Schneider Electric GV2P10 (рис. 6.1) з струмом роз'єднування 4-6.3А та характеристикою С, що дозволить запобігти використанню теплових реле та спростить схему керування.



Рис. 6.1 Автоматичний вимикач захисту двигуна Schneider Electric GV2P10

Для двигунів вентилятора, як захисний пристрій оберемо автоматичний вимикач Schneider Electric A9F89340 (рис. 6.2) з струмом роз'єднування 40А та характеристикою С.



Рис. 6.2 Автоматичний вимикач Schneider Electric A9F89340

При виборі електромагнітних пускачів звернемося до наступних умов: номінальна напруга електромагнітного пускача має дорівнювати напрузі живлення електричної мережі або перевищувати її:

$$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{мережі}} \quad (6.3)$$

$$380\text{В} \geq 380\text{В} \quad (6.4)$$

Номінальний струм комутації силових контактів контактора повинен дорівнювати або перевищувати номінальний струм споживачів:

$$I_{\text{ном}} \geq I_{\text{двигунів}} \quad (6.5)$$

$$5,97 \geq 9\text{А} \quad (6.6)$$

$$35,85 \geq 40\text{А} \quad (6.7)$$

Номінальна напруга котушки має дорівнювати номінальній напрузі ланцюга керування:

$$U_{\text{ном.кот}} \geq U_{\text{мережі.кер}} \quad (6.8)$$

$$220\text{В} \geq 220\text{В} \quad (6.9)$$

Відповідно до умов оберемо контактори Schneider Electric LC1D09M7 (рис.6.3) для двигунів транспортерів та Schneider Electric LC1D40M7 для двигуна вентилятора (рис. 6.4).



Рис. 6.3 Контактор Schneider Electric
LC1D09M7



Рис. 6.4 Контактор Schneider Electric
LC1D40M7

Для інших електричних кіл системи автоматичного керування оберемо захисні та пускові прилади, відповідно до рекомендацій від виробника електричних споживачів. Обрані прилади відображені в переліку елементів (див. рис.6,5; розділ 2 додатка А).

броні кабель надійно захищений від механічних ушкоджень, що робить його придатним для сільськогосподарського середовища, де існує загроза пошкодження шкідниками.

Контрольні лінії. Для кіл керування використано КВБбШвнг — броньований контрольний кабель з мідними жилами та ПВХ-оболонкою, яка не підтримує горіння (див. рис.6.7). Призначений для передавання сигналів керування та автоматизації.

Вимірювальні кола. Для підключення до вимірювальних перетворювачів обрано ÖLFLEX® CLASSIC 110 CY — гнучкий екранований кабель з мідними жилами, ПВХ-ізоляцією та загальним екраном з мідного обплетення (див. рис.6.8). Забезпечує надійний захист від електромагнітних перешкод. Підходить для передачі аналогових сигналів (4–20 мА, 0–10 В).

Мережеві лінії. Для мережевих підключень обрано мережевий кабель Corning U/UTP Cat 6 AWG 24 LSZH (див. рис. 6.9).

Відповідно до схеми підключень для кабелю №1, що живить шафу керування розрахуємо тривалодопустимий струм за формулою:

$$I_{\text{тр.до.в.к.}} = K * \sum I_{\text{спож}} + I_{\text{кер}}, \quad (6.10)$$

де: K – коефіцієнт одночасної роботи (приймемо, що всі споживачі працюють одночасно, $K=1$); $I_{\text{кер}}$ – струм керування (приймемо $I_{\text{кер}}=1\text{А}$).

$$I_{\text{тр.до.в.к.}} = 1 * 35,85 + 5,97 + 5,97 + 3,1 + 16 + 16 + 0,315 = 83,205 \quad (6.11)$$

Звернемося до ПУЕ 2017 [13] для вибору поперечних перерізів кабелю.

Сформуємо таблицю вибору кабелів даної системи згідно схеми підключень:



Рис.6.6 Кабель
ВБбШвнг



Рис.6.7 Кабель
КВБбШвнг



Рис.6.8 Кабель
ÖLFLEX®
CLASSIC 110 CY

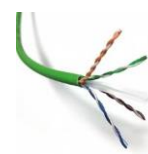


Рис.6.9 Corning
U/UTP Cat 6 AWG
24 LSZH

Таблиця 6.1

№ Кабелю	Призначення	Тип кабелю	Характеристики
№1	Живлення шафи керування	ВБбШвнг	5x10, прокладання в землі
№2-3	Живлення двигунів М1 та М2	ВБбШвнг	4x1.5, повітряне прокладання
№4	Живлення двигуна М3	ВБбШвнг	4x6, повітряне прокладання
№5-7	Живлення виконавчих механізмів	ВБбШвнг	2x0,5, повітряне прокладання
№8	Кнопка аварійної зупинки	КВБбШвнг	2x0,5, повітряне прокладання
№9-11	Сигнали від давачів	КВБбШвнг	2x0,5, повітряне прокладання
№12-14	Сигнали від вимірювальних перетворювачів	ÖLFLEX® CLASSIC 110 CY	2x0,5, повітряне прокладання
№15	Побудова мережі	Corning U/UTP Cat 6 AWG 24 LSZH	AWG 24 0,51 мм

РОЗДІЛ 7. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.

7.1 Розробка програмного забезпечення програмованого логічного контролера та людино-машинного інтерфейсу.

Ключовою керуючою ланкою системи управління процесом сушіння є програмований логічний контролер (ПЛК) Schneider Electric M221CE16R з модулем розширення ТМ3АМ6G. Контролер відповідає за збір інформації з датчиків, обробку сигналів, впровадження логічного алгоритму керування та формування керуючих впливів на виконавчі пристрої. Обрана модифікація контролера має достатню кількість дискретних та аналогових входів/виходів, а також обладнана вбудованим Ethernet-портом для зв'язку за протоколом Modbus TCP/IP. Це дає змогу інтегрувати систему в локальну технологічну мережу.

Контролер виконує функції описані функціональною схемою автоматизації, яка визначає логіку дій та взаємодію між компонентами системи. Згідно з цією схемою реалізовано програмний алгоритм, що представлено на рис. 7.1, який охоплює увесь цикл роботи системи – від її запуску до завершення технологічного процесу або аварійної зупинки.

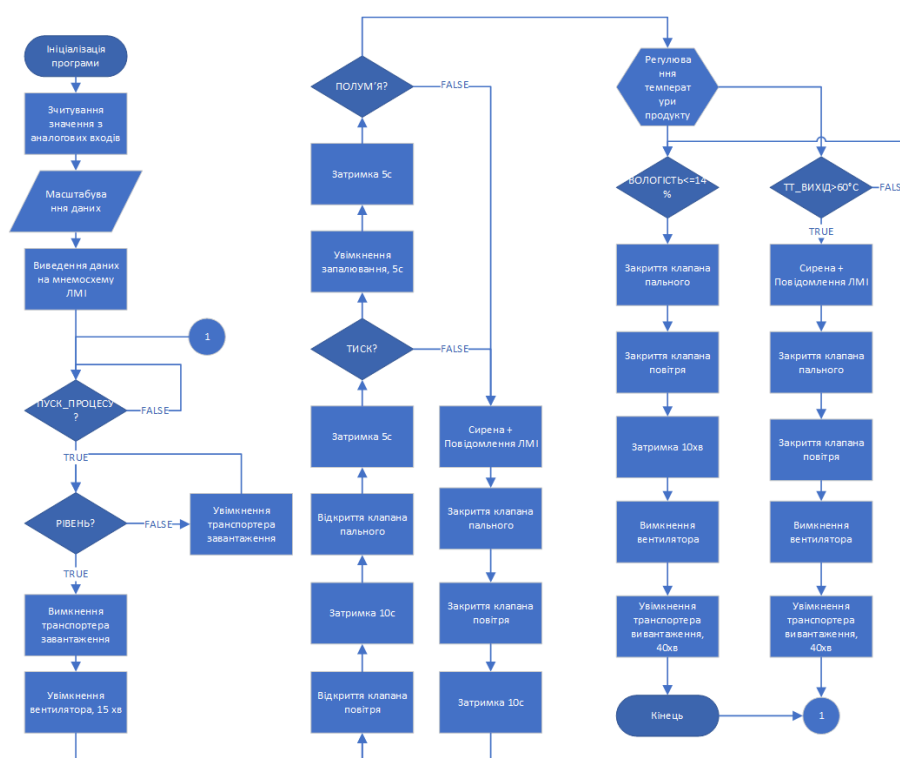


Рис. 7.1 Алгоритм роботи програмного забезпечення ПЛК

Після подачі живлення на шафу керування, програма переходить у режим ініціалізації. На цій стадії зчитуються показників з аналогових входів, після чого дані масштабуються відповідно до конфігурації входних модулів. Оброблені значення передаються на операторський інтерфейс для візуального контролю.

Далі перехід у робочий режим здійснюється після активації команди «ПУСК ПРОЦЕСУ». Система перевіряє рівень продукту у завантажувальній шахті. Якщо рівень досягає не досяг зони спрацювання давача рівня, вмикається транспортер завантаження, якщо шахта зерносушильної установки заповнена завантаження припиняється, і запускається вентилятор на 15 хвилин.

Наступним етапом є запуск пальника. Послідовно відчиняються клапани подачі повітря та пального із встановленими затримками, після чого аналізується наявність тиску в системі та активується система запалювання. Через п'ять секунд відбувається перевірка наявності полум'я.

У разі відсутності полум'я або тиску в процесі запуску або роботи пальника, система переходить в аварійний режим. Вмикається сигналізація, генерується повідомлення на ЛМІ, закриваються клапани пального та повітря, через 10 секунд процес розпалювання повторюється з початку.

У штатному режимі, при успішному розпалюванні, система переходить у стан регулювання температури продукту. Управління температурним режимом здійснюється автоматично на основі поточних даних з вимірювального перетворювача. Водночас контролюються вологість продукту та температура на виході сушильної установки.

Якщо температура вихідного продукту перевищує 60 °С, система формує аварійне повідомлення, закриває подачу пального та повітря, вентилятор зупиняється, і запускається транспортер вивантаження для запобігання псування продукту.

У штатному режимі вивантаження з послідовним вимкненням виконавчих механізмів відбувається після того як система досягне 14% вологості продукту.

На завершення система переходить у вихідний стан, готова до повторного запуску, з відображенням актуального статусу на ЛМІ.

Програмування ПЛК виконувалося в середовищі EcoStruxure Machine Expert – Basic, призначене для контролерів серії M221. Програма системи автоматичного керування процесом сушіння зерна (див. рис 7.2) розроблялась на мовах LD (Ladder Diagram) та IL(Instruction List). За допомогою IL був розроблений блок масштабування аналогових сигналів, LD була використана як основна мова програмування, яка описує всі основні алгоритми.

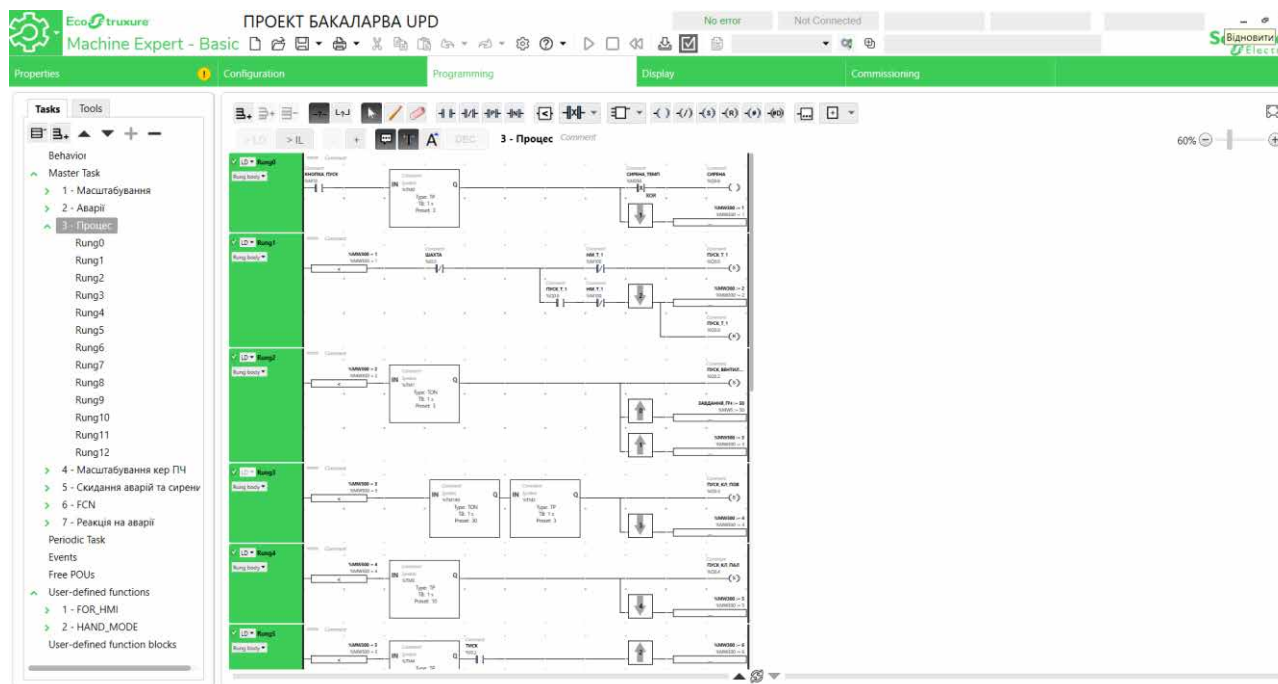


Рис. 7.2 Фрагмент програми системи автоматичного керування

Панель оператора Schneider Electric HMIST6400 слугує для забезпечення зручної взаємодії між людиною та автоматизованими системами управління на промислових об'єктах. Вона діє як центр візуалізації, через який оператор може спостерігати за технологічними процесами, отримувати дані з пристроїв системи, видавати команди, а також швидко реагувати на аварійні ситуації.

У системі автоматичного керування сушінням зерна панель використовується для контролю таких критичних параметрів, як температура, вологість, швидкість подачі повітря, а також для перемикання між автоматичним та ручним режимами. Вона дає змогу не тільки візуально спостерігати за станом обладнання, а й впливати на процес у реальному часі, гарантуючи оптимальні умови сушіння та знижуючи втрати продукції.

Програмне забезпечення EcoStruxure Operator Terminal Expert, є середовищем

для розробки людино-машинних інтерфейсів на основі панелей серії HMIST. На прикладі головного екрана (див. рис. 7.3), можна побачити комплексну візуалізацію всіх основних параметрів процесу. Центральне місце займають індикатори температури, вологості, частоти та рівня, та стану пальника, що дозволяють оператору оцінювати стан технологічного процесу.

Справа розташовані функціональні кнопки для переходу на додаткові екрани — перегляд трендів, налаштувань, ручного режиму, а також журналу аварій. Це дає змогу оператору не лише стежити за поточними значеннями, а й аналізувати історію даних, коригувати параметри та перемикатися між автоматичним та ручним режимами керування. Окремі блоки схеми візуалізують подачу палива, повітря та стан роботи приводів.

В результаті був створений інтуїтивно зрозумілий, ергономічний інтерфейс, що підвищує надійність системи, дозволяє зменшити ймовірність помилок оператора та забезпечує ефективне управління технологічним процесом.



Рис. 7.3 Головний екран ЛМІ

Повний вигляд програмного забезпечення ПЛК та ЛМІ відображено в розділі 1-2 додатку Г бакалаврської кваліфікаційної роботи.

З'єднавши програмований логічний контролер (ПЛК) та панель оператора (НМІ) Schneider Electric HMIST6400 в єдину мережу, ми зможемо створити повноцінний макет для демонстрації роботи зв'язку між цими компонентами.

Оскільки мережа між даними пристроями в нашій системі побудована на інтерфейсі Ethernet з використанням протоколу Modbus TCP/IP, першим кроком

є надання статичних IP-адрес кожному пристрою в мережі для забезпечення їхньої однозначної ідентифікації та стабільності з'єднання. На даному макеті IP-адреса для ПЛК встановлюється як 192.168.0.1, а для панелі НМІ — 192.168.0.2. Це дозволяє ЛМІ безпосередньо звертатися до ПЛК як до Modbus-сервера, запитуючи або записуючи дані в регістрах, що відповідають за параметри процесу (наприклад, температура, вологість, частота обертання вентиляторів, стан аварійних сигналів тощо).

Наступний етап — фізичне з'єднання обладнання за допомогою Ethernet-кабелю.

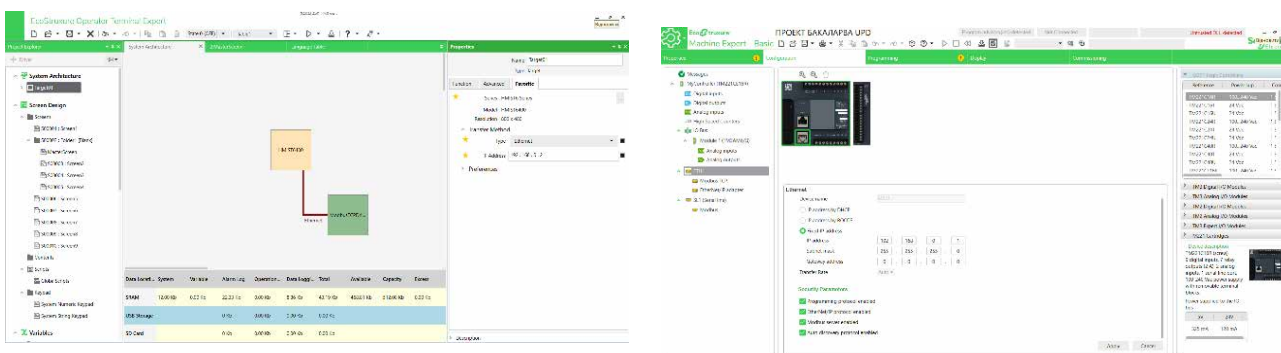


Рис. 7.4 Налаштування параметрів обміну даними

Макет (див. рис. 7.5; 7.6; 7.7) реалізується з використанням технічного обладнання кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка.



Рис. 7.5 Підключення M21CE16R на макеті



Рис. 7.6 Підключення NMIST6400 на макеті



Рис. 7.7 Загальний вигляд макету системи автоматичного керування процесом сушіння зерна в шахтній зерносушарці

7.2 Розробка програмного забезпечення веб-інтерфейсу

Веб-інтерфейс у автоматизованих системах реалізується для створення зручного та ефективного доступу користувачів до системи через веб-браузер. За його допомогою реалізується дистанційне спостереження за станом устаткування та технологічного процесу.

Веб-інтерфейс забезпечує доступ з різних видів пристроїв — стаціонарних комп'ютерів, ноутбуків, планшетів або смартфонів.

Сформуємо схему мережі з IP - адресами для системи автоматичного керування процесом сушіння зерна (рис. 7.8).

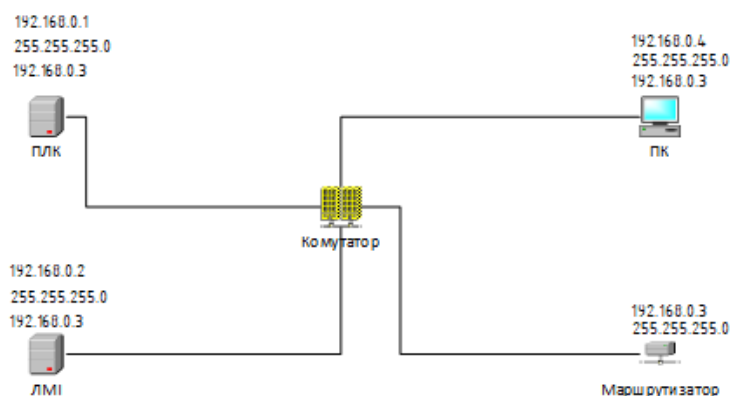


Рис. 7.8 Схема побудови мережі системи автоматичного керування
В процесі налаштування мережевої інфраструктури системи автоматичного

контролю головним аспектом є конфігурування IP-адрес для всіх пристроїв. Застосування статичних IP-адрес забезпечує стабільне і прогнозоване об'єднання вузлів мережі. Система передбачає використання підмережі з індексом «0», використовуючи маску 255.255.255.0, що дозволить уникнути зайвої маршрутизації, зменшить час затримки при передачі даних і збільшити надійність обміну інформацією.

Програмований логічний контролер згідно схеми отримує IP-адресу 192.168.0.1. В якості шлюзу вказується адреса маршрутизатора — 192.168.0.3, що дає змогу при потребі забезпечити доступ ПЛК для віддаленого моніторингу. Аналогічним чином налаштовується операторська панель, котрій надається адреса 192.168.0.2 з тією ж маскою підмережі та шлюзом. Це забезпечить безперебійний обмін даними з ПЛК за допомогою протоколу Modbus TCP/IP.

Комп'ютер, який застосовується для налагодження, моніторингу та технічного обслуговування системи, налаштовується з IP-адресою 192.168.0.4, маскою підмережі 255.255.255.0 та шлюзом 192.168.0.3.

Маршрутизатор, в свою чергу, виконує функції шлюзу мережі та має статичну IP-адресу 192.168.0.3. Він забезпечує бездротовий доступ до мережі в зоні своєї дії.

Таким чином, запропонована схема IP-адресації дозволяє побудувати структуровану мережу, що відповідає вимогам промислової автоматизації, забезпечує надійний зв'язок між всіма компонентами системи та гарантує можливість розширення чи інтеграції з іншими інформаційними платформами.

Реалізуємо веб-панель моніторингу за процесом використовуючи програмне середовище Node-Red, яке дозволить зчитати відповідні регістри програми ПЛК для подальшої візуалізації. Сконфігуруємо середовище на зчитування та візуалізацію аналогових даних (рис. 7.9), що надходять до ПЛК. На панелі відобразимо поточні значення частоти вентилятора, вологості та температури продукта. Для значень вологості та температури в зоні осушення відтворимо графіки зміни параметра в реальному часі.

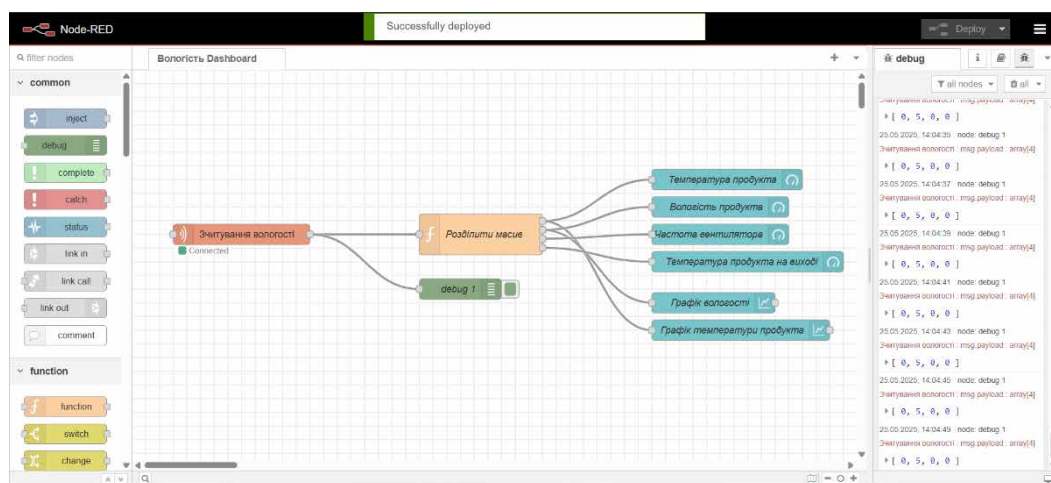


Рис. 7.9 Конфігурація програмного забезпечення веб-інтерфейсу

Як бачимо структура конфігурації складається з 4 типових блоків. Відповідно рис. 7.9 видно, що зліва розташований блок зчитування параметрів через протокол Modbus TCP/IP, в даному блоці описані дані мережі, адреси регістрів зчитування та період зчитування даних. До нього під'єднані два блоки: блок функції та блок спостереження. Блок функції виконує роль винесення значень із масива зчитаних даних. Блок спостереження використаний для моніторингу за даними в процесі конфігурації інтерфейсу. Блоки, що розташовані праворуч слугують для відтворення інформації безпосередньо на панелі з якою буде працювати користувач.

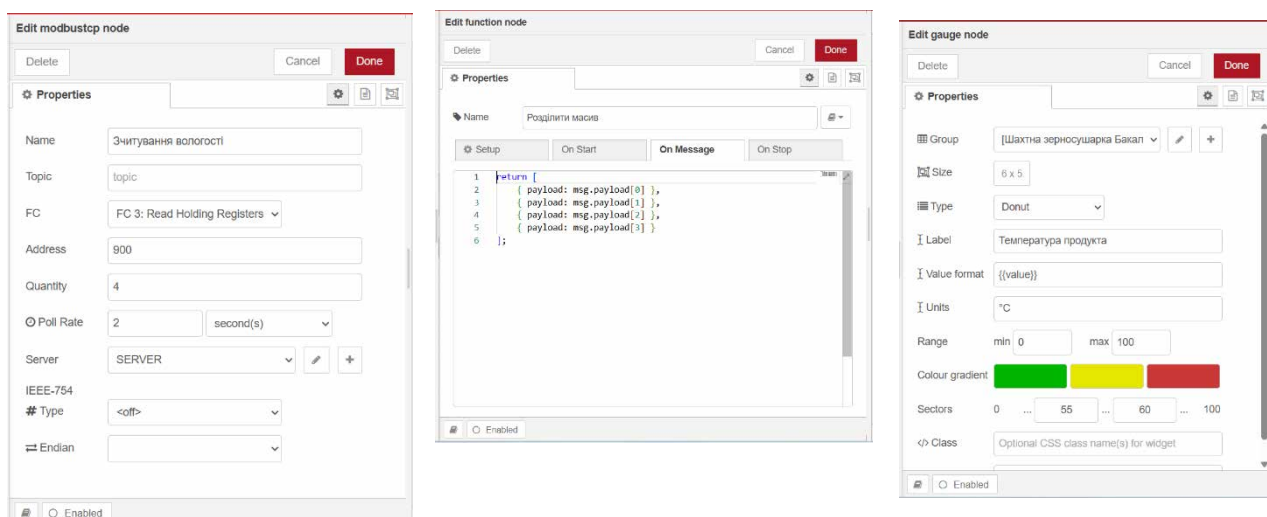


Рис. 7.10 Конфігурація блоків програмного забезпечення веб-інтерфейсу

В результаті конфігурації, після підключення будь якого пристрою до локальної мережі та набору в адресному рядку браузера

«<http://192.168.0.4:1880/ui>» користувач отримає на екрані веб-панель з поточними значеннями критичних параметрів системи (рис. 7.11).

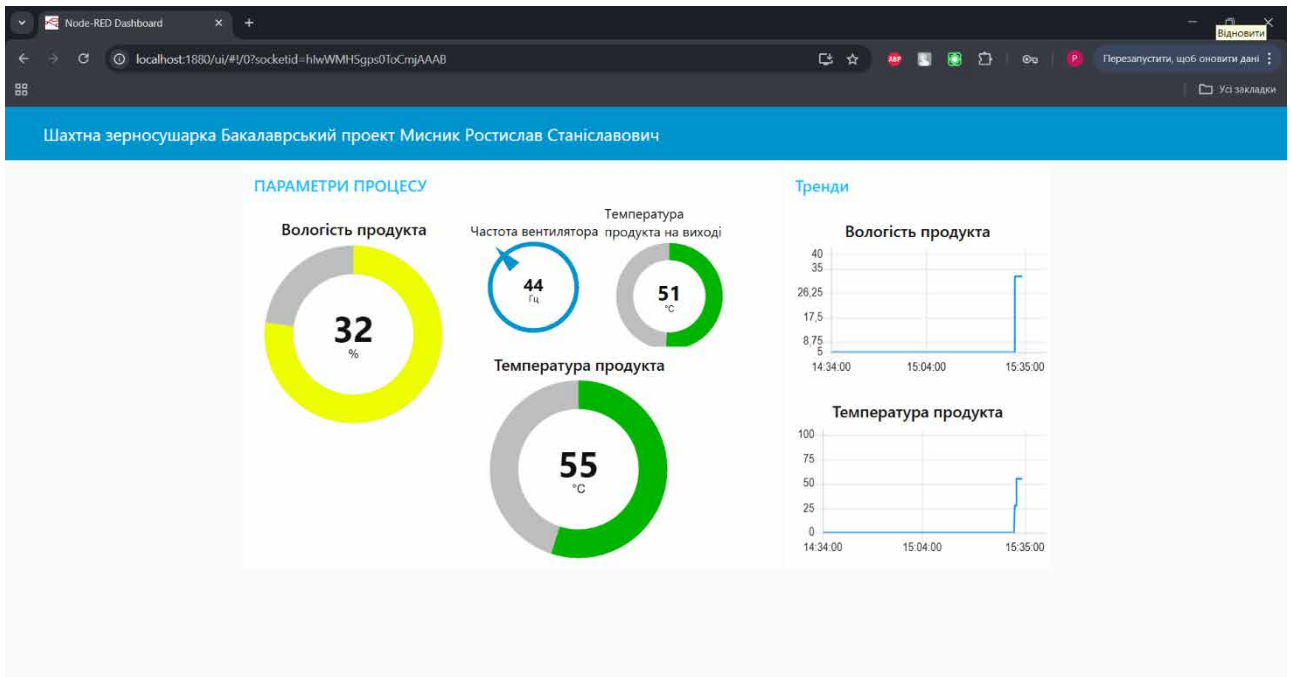


Рис. 7.11 Веб-інтерфейс системи автоматичного керування

РОЗДІЛ 8. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.

Системи автоматизованого управління чинять вагомий вплив на виробничий процес та економічний успіх підприємства, де вони використовуються. До ключових переваг впровадження подібних систем слід зарахувати: зменшення потреби у робочій силі, що відчутно відображається на фінансовому плануванні компанії завдяки скороченню фонду оплати праці; збільшення ефективності виробництва, адже автоматизовані системи розробляються та вводяться в експлуатацію з метою суттєвої оптимізації виробничих процесів, що в свою чергу позитивно позначається на якості продукції та її вартості; раціоналізацію енерговитрат, оскільки рішення, вбудовані в системи автоматизації, дозволяють суттєво економити на енергетичних рахунках.

Зведені витрати визначаються за виразом:

$$B_{зв.} = P + E_n * K, \quad (8.1)$$

де $B_{зв.}$ – зведені витрати, грн./рік; P – річні експлуатаційні витрати, грн./рік; K – капітальні витрати, грн.; E_n – нормальний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, рік (прийmemo $E_n=0,15$).

Щоб оцінити експлуатаційних витрати системи врахуємо наступні компоненти:

1. Витрати на оплату праці персоналу ($C_{зп}$), що визначаються посадовими окладами працівників та їхнім робочим часом (прийmemo $C_{зп} = 30$ грн/год)

2. Відрахування на амортизацію (C_a), компонент, що враховує витрати на знос обладнання. Вартість амортизації розраховується, як відсоток від балансової вартості обладнання (прийmemo $C_a = 14,2\%$)

3. Витрати на ремонт (C_p): ці витрати включають у себе витрати на проведення поточного ремонту обладнання. Виражаються у відсотках від балансової вартості обладнання (прийmemo $C_p = 18\%$).

4. Витрати на енергоресурси (C_e): Цей компонент включає витрати на електроенергію, використану в процесі експлуатації системи. Розраховується як добуток споживаної кількості ресурсу на одиницю часу та відповідного тарифу.

(прийmemo тариф 2025р 4,32грн/кВт*год)

$$C_e = P_{\text{сп.}} * \Gamma * 4,32, \quad (8.2)$$

де: $P_{\text{сп.}}$ – потужність електричної енергії; Γ – кількість годин роботи споживачів на рік

Інші витрати візьmemo як 1% від всієї суми експлуатаційних витрат.

$$C_i = 0,01 * (C_{\text{зп}} + C_a + C_p + C_e), \quad (8.3)$$

При розрахунку капітальних вкладень для впровадження автоматизованої системи керування необхідно враховувати наступні складові:

1. Витрати на придбання необхідних технічних засобів автоматизації (K_3)

2. Торгівельно-транспортні витрати ($K_{\text{тт}}$): Приймаються, як 11% від вартості технічних засобів:

$$K_{\text{тт}} = 0,11 * K_3, \quad (8.4)$$

3. Витрати на монтаж (K_m): Розраховуються як 15-20% від вартості технічних засобів. Прийmemo значення 17%:

$$K_{\text{пр}} = 0,17 * K_3, \quad (8.5)$$

4. Витрати на проведення електричної проводки ($K_{\text{пр}}$)

5. Інші витрати (K_i):

$$K_i = 0,02 * K_3, \quad (8.7)$$

Загальна вартість технічних засобів автоматизації системи автоматичного керування процесом сушіння зерна в шахтній зерносушарці представлена в таблиці 8.1.

Таблиця 8.1

№	Назва приладу	Тип	К-ть	Ціна/шт	Ціна
1	Автоматичний вимикач	COMPACT NSX100F 36kA 4P4D 80A	1	10 900,05	10 900,05
2	Роз'єднувач	TeSys VCCF5 100A	1	5000,00	5000,00
3	Автоматичний вимикач	EZ9F34116	1	140,00	140,00
4	Автоматичний вимикач	EZ9F34106	2	185,00	370,00
5	Автоматичний вимикач	EZ9F34206	5	400,50	2 002,50
6	Автоматичний вимикач	GV2P10	2	2 180,25	4 360,5
7	Автоматичний вимикач	iC60H	1	2180,50	2186,5
8	Розетка	A9A15310	2	450,00	900,00
9	Блок живлення	ABLS1A24031	1	1800,00	1800,00
10	ПЗП	EZ9L33720	1	3100,00	3100,00
11	LED-лампа	PLD E 409 W 350 MS	1	300,00	300,00
12	Тримач запобіжника	TeSys DF81	5	200,00	1000,00
13	Запобіжник	ABE7FU100	5	50,00	250,00
14	Сигнальна лампа	XB4BV61	1	300,00	300,00
15	Контактор	LC1D09M7	2	1250,00	2500,00
16	Доп. Контакт Контактора	LADN20	3	320,00	960,00
17	Контактор	LC1D040M	1	5000,00	5000,00
18	Частотний перетворювач	ATV630D22N4	1	93000,00	93000,00
19	Звуковий модуль	XVB	1	2500,00	2500,00
20	Сигнальна лампа	XB4BVM3	6	550,00	3300,00

Продовження таблиці 8.1

21	Перемикач	XB4BD33	3	540,00	1 620,00
22	Кнопка Старт/Стоп	XB5AW73731M5	3	1200,00	3600,00
23	Кнопка аварійна	XB4BS84441	1	1070,00	1070,00
24	Пост аварійного зупину	XALK178E	1	1400,00	1400,00
25	Кнопка	XB5AA31	1	260,00	260,00
26	Реле електромеханічне	RSB2A080BDPV	3	390,00	1170,00
27	Реле електромеханічне	RXM4AB2BDPVS	2	525,00	1050,00
28	Реле електромеханічне	RXG12BDPV	7	470,00	3290,00
29	Реле безпеки	XPSBAC14AC	1	6100,00	6100,00
30	Сигнальна лампа	XB5AVB4	1	400,00	400,00
31	ПЛК	TM221CE16R	1	10770,00	10770,00
32	Модуль розширення	TM3AM6G	1	8880,00	8880,00
33	ЛМІ	HMIST6400	1	21610,00	21610,00
34	Комутатор	MCSESU053FN0	1	5400,00	5400,00
35	Маршрутизатор	RUT240	1	8400,00	8400,00
36	Модуль гальванічної роз'язки	ACT20M-CI-CO- OLP-S	3	10500,00	31500,00
37	Клема	NSYTRV22	26	305,00	7 320,00
38	Клема	NSYTRV102	4	837,00	348,00
ВСЬОГО					249387

Повні капітальні витрати можна визначимо за формулою:

$$K = K_z + K_{\text{тТ}} + K_{\text{М}} + K_{\text{пр}} + K_i \quad (8.8)$$

Визначимо торгівельно-транспортні витрати:

$$K_{\text{тг}} = 0,11 * K_3 = 0,11 * 249387 = 27432,57 \text{ грн} \quad (8.9)$$

Визначимо витрати на монтаж:

$$K_{\text{м}} = 0,17 * K_3 = 0,17 * 249387 = 42395,79 \text{ грн} \quad (8.10)$$

Визначимо витрати на електропроводку:

$$K_{\text{пр}} = 150 * 20 = 3000 \text{ грн} \quad (8.11)$$

Визначимо інші витрати:

$$K_i = 0,02 * K_3 = 0,02 * 249387 = 4987,74 \text{ грн} \quad (8.12)$$

Визначимо повну суму вкладень:

$$\begin{aligned} K &= 249387 + 27432,57 + 42395,79 + 3000 + 4987,74 \\ &= 327202,31 \text{ грн} \end{aligned} \quad (8.13)$$

Звідси відрахування на амортизацію:

$$C_a = 0,142 * K = 0,142 * 327202,31 = 46462,72 \text{ грн} \quad (8.14)$$

Розрахуємо відрахування на ремонтні роботи:

$$C_{\text{пр}} = 0,18 * K = 0,18 * 327202,31 = 58896,41 \text{ грн} \quad (8.15)$$

Визначимо вартість енергоресурсів за час роботи установки:

$$C_e = 25 * 2920 * 4,32 = 315360 \text{ грн} \quad (8.16)$$

Оплата праці персоналу:

$$C_3 = 12 * 7200 = 86400 \text{ грн} \quad (8.17)$$

Отже, можемо визначити річні експлуатаційні витрати:

$$\begin{aligned} C &= C_3 + C_a + C_{\text{пр}} + C_e = 86400 + 46462,72 + 58896,41 + 315360 \\ &= 507119,13 \text{ грн} \end{aligned} \quad (8.18)$$

Знайдемо значення зведених витрат:

$$B_{\text{зв}} = 507119,13 + 0,15 * 327202,31 = 556119,13 \text{ грн} \quad (8.19)$$

Чистий прибуток дорівнює:

$$R = \Delta C_z + \Delta C_e = 259200 \text{ грн} \quad (8.20)$$

Розрахунок окупності визначимо за формулою

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{R} = \frac{327202,31}{259200} \approx 460 \text{ діб} \quad (8.21)$$

Після аналізу отриманих даних, можемо спостерігати, що чистий прибуток складає 259200 грн., і система автоматичного управління процесом сушіння зерна в шахтній зерносушарці окупиться і працюватиме на прибуток через 1,2 роки. Можна зробити висновок, що дана система є економічно ефективною і впровадження її на підприємстві є доцільним.

ВИСНОВОК

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

В результаті дослідження було визначено вимоги до системи керування, розроблено функціональну схему автоматизації, імітаційну модель, обґрунтовано вибір алгоритму керування, визначено параметри його налаштування та відтворено цифрову систему керування.

При перевірці якості функціонування системи автоматичного керування було виявлено, що система задовільнила задані якісні характеристики: час регулювання складав 3150 с, відсутня статична похибка, а перерегулювання склало 4,3%.

Для реалізації системи автоматичного керування було обґрунтовано вибір технічних засобів. Зокрема було обрано частотний перетворювач ATV630D22M3, Schneider Electric, програмований логічний контролер M221CE16R та модуль розширення TM3AM6G, Schneider Electric, розроблені електричні схеми: принципова, з'єднань та підключень, також було відтворено зовнішній вигляд шафи керування.

Розроблено програмне забезпечення системи автоматичного керування, та побудована відповідна локальна мережа. Була створена програма керування ПЛК, ЛМІ та веб-інтерфейсу. Програмне забезпечення було перевірено за допомогою відтвореного макету системи.

Техніко-економічне обґрунтування показало доцільність впровадження розробленої системи управління установкою, відповідно розрахунків строк окупності складав 1,2 роки.

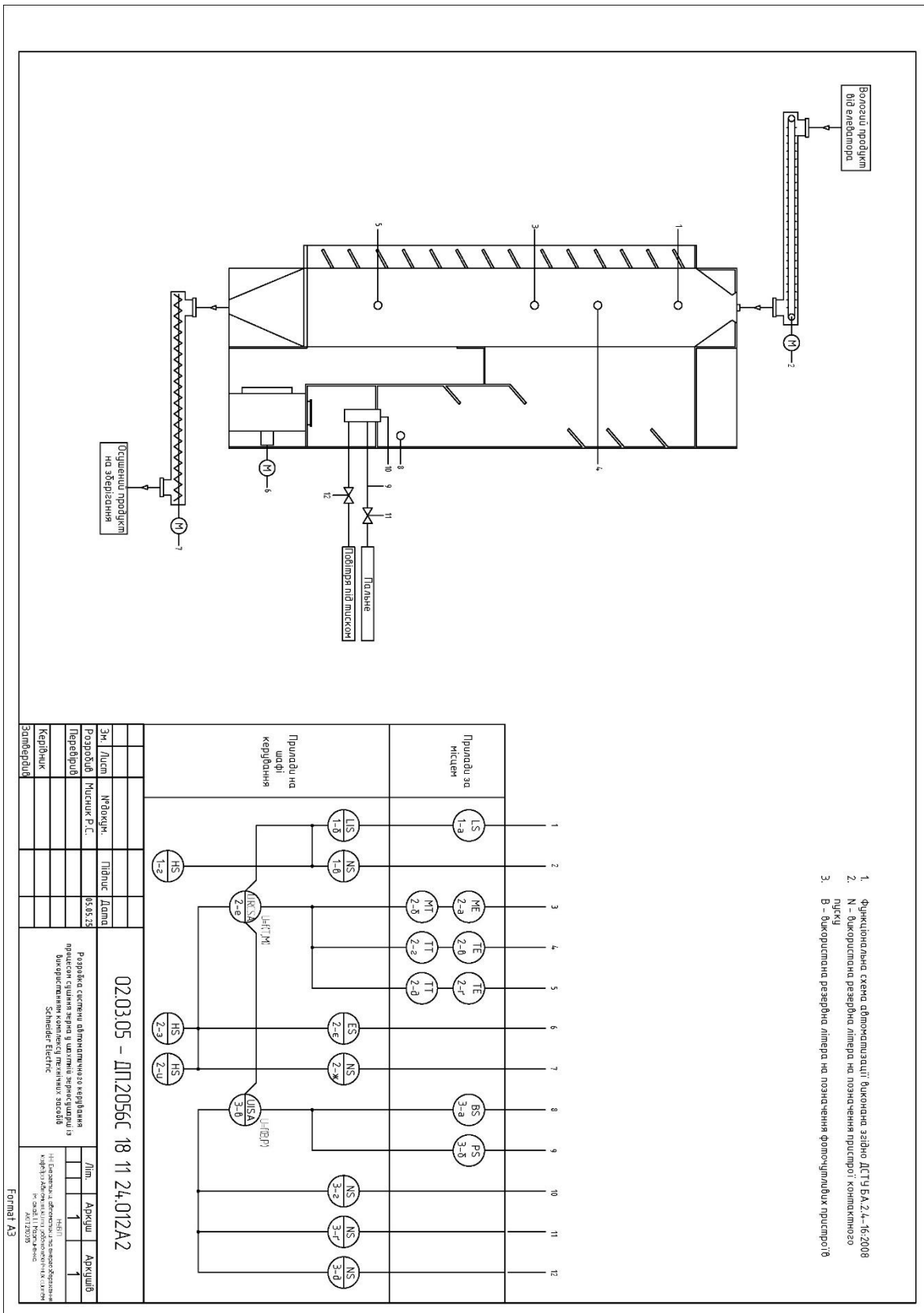
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. - М.: Пищевая промышленность, 1973. - 527с
2. Гірник М. А Механізація і автоматизація післязбиральної обробки зерна. - К.: Урожай, 1970. - 190с.
3. 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.
4. Корчемний М., Федорейко В., Щербань В. Енергозбереження в агропромисловому комплексі. - Тернопіль: Підручники & посібники, 2001. – 977с.
5. Мартыненко И.И. Лысенко В.Ф. Проектирование систем автоматики. 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Агропромиздат, 1990 г. - 243 с.
6. 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
7. Лисенко В.П., Дудник А.О., Мірошник В.О., Руденський А.А., Заєць Н.А. Основні методи та методики підготовки кваліфікаційної роботи бакалаврів. -2023,. -228с.
8. 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
9. Станкевич Г.М., Страхова Т.В., Атаназевич В.И. Сушка зерна. - К.: Либидь, 1997. - 351с.
10. А.М. Сільвестров, М.Я. Островерхов, О.В. Шефер, Н.А. Ладік, Д.К. Зіменков. - Системи автоматичного керування технологічними комплексами, 2022. -261с.

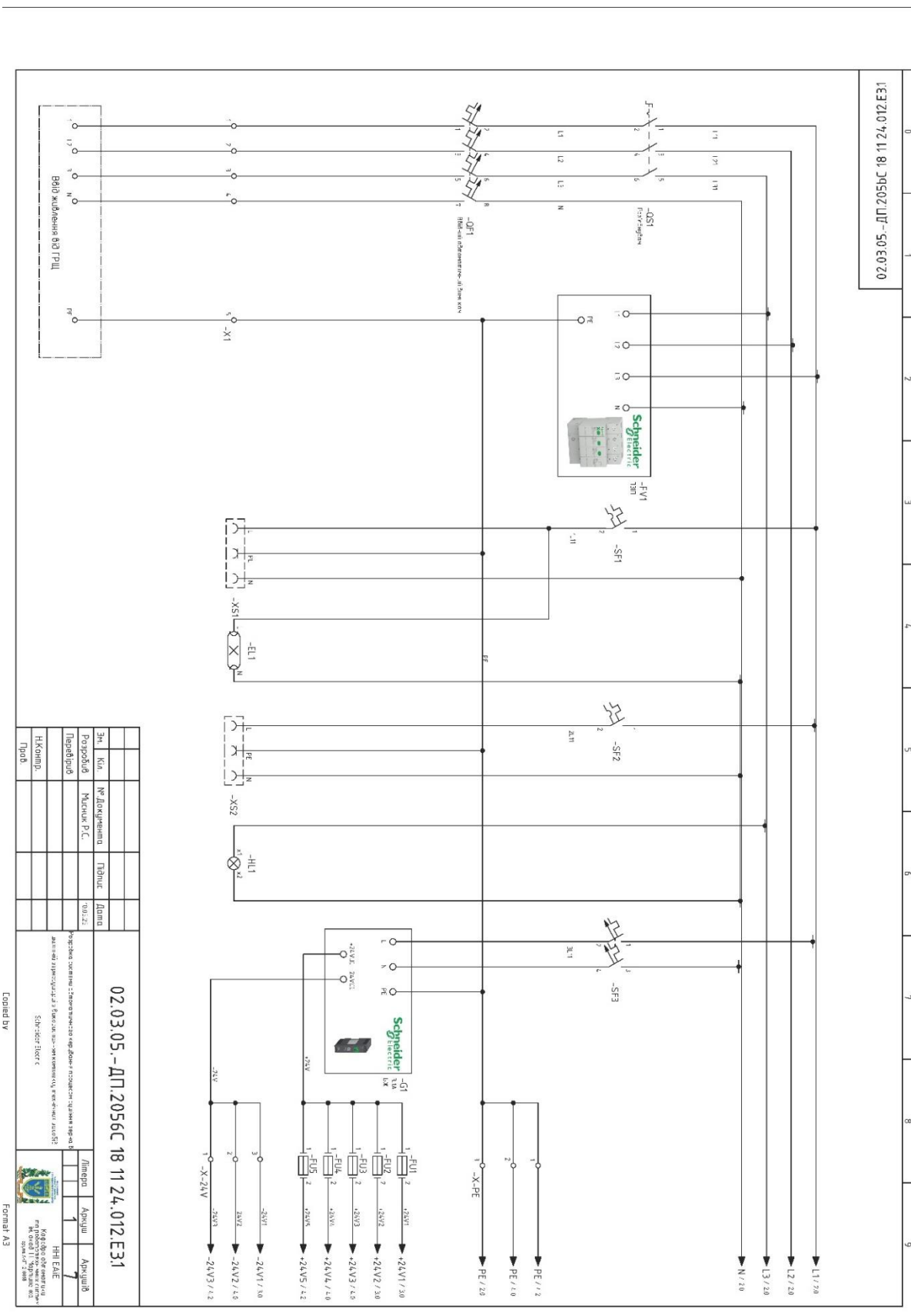
11. Зерносушарка Bonfanti B70/10 ECOS [Електронний ресурс]
Режим доступу:
<https://boez.com.ua/obladnannya-u-nayavnosti/>
12. Нормативний документ функціональної схеми автоматизації [Електронний ресурс]
Режим доступу:
https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25075
13. ПУЕ Правила улаштування електроустановок (перше переглянуте, перероблене, доповнене та адаптоване до умов України видання. – 21.07.2017. [Електронний ресурс]
Режим доступу:
https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=72758
14. Каталог двигунів Siemens [Електронний ресурс]
Режим доступу:
<https://simat.com.ua/cat-engines>
15. Каталог частотних перетворювачів Schneider Electric [Електронний ресурс]
Режим доступу:
<https://www.se.com/us/en/product-category/2900-variable-speed-drives/>
16. Каталог вимірювальних приладів IFM [Електронний ресурс]
Режим доступу:
<https://www.ifm.com/ua/uk/category>

ДОДАТОК А

РОЗДІЛ 1. ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ.



РОЗДІЛ 2. СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА.



02.03.05.-ДП.2055С 18 11 24.012.Е31

Знак	Код	№ документа	Титул	Лист
Розробив	Михайло Р.С.			
Перевірив				
Н.Комп.				
Лист				

02.03.05.-ДП.2055С 18 11 24.012.Е31

Формат А3

Сторінка 1 з 1

Корпорація "ІТЕ" (ІТ Електроніка)

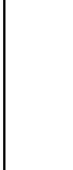
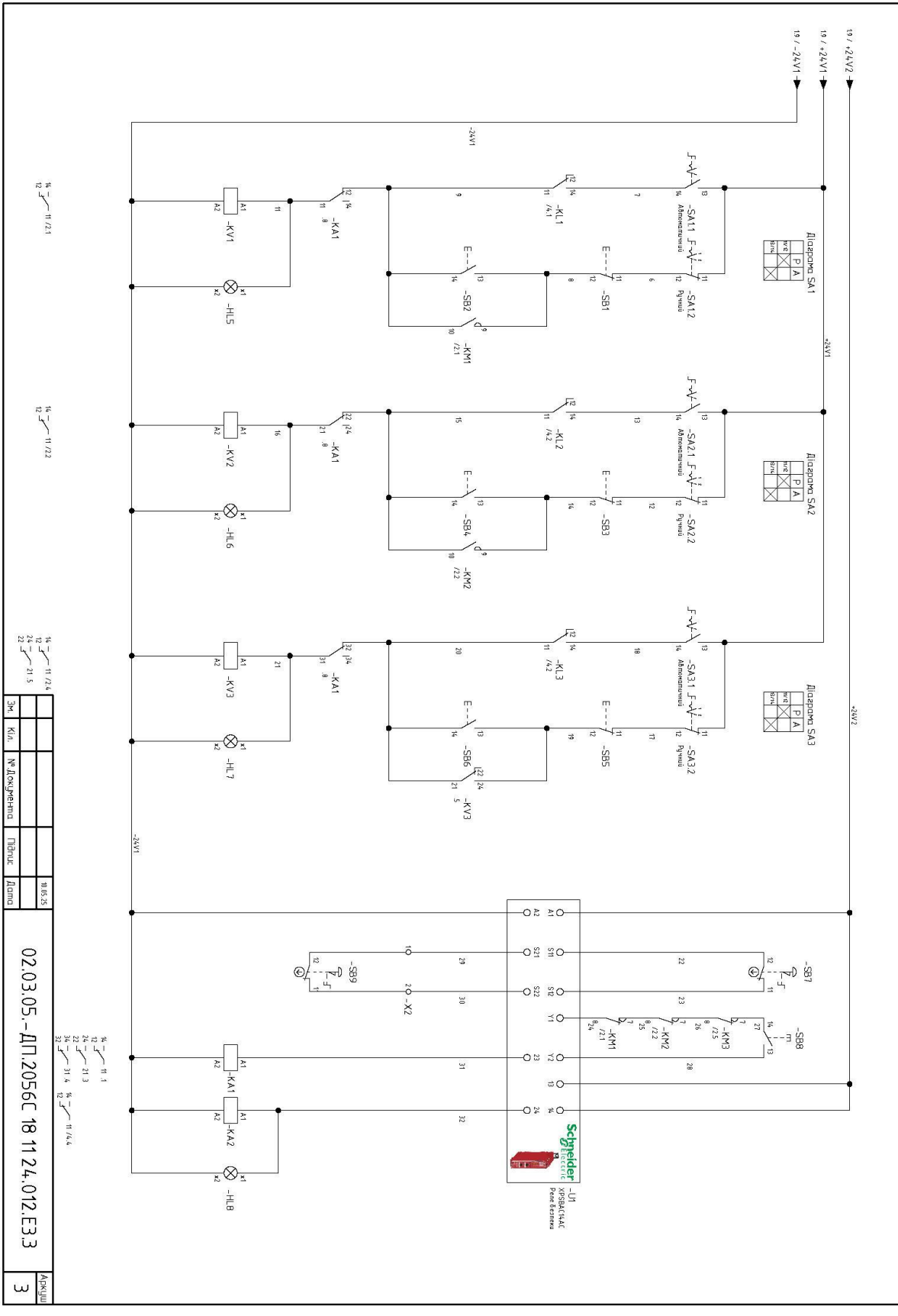
Україна, м. Київ, вул. Митрополита Василя Лемківського, 99

Тел: +380 44 250 00 00

Факс: +380 44 250 00 01

Е-mail: ite@ite.com.ua

02.03.05.-ДП.2056С-18.11.24.012.Е3.3



№	См.	Кл.	№ Дочерняя	Панель	Длина	Итого
11/24						100.25
21/5						

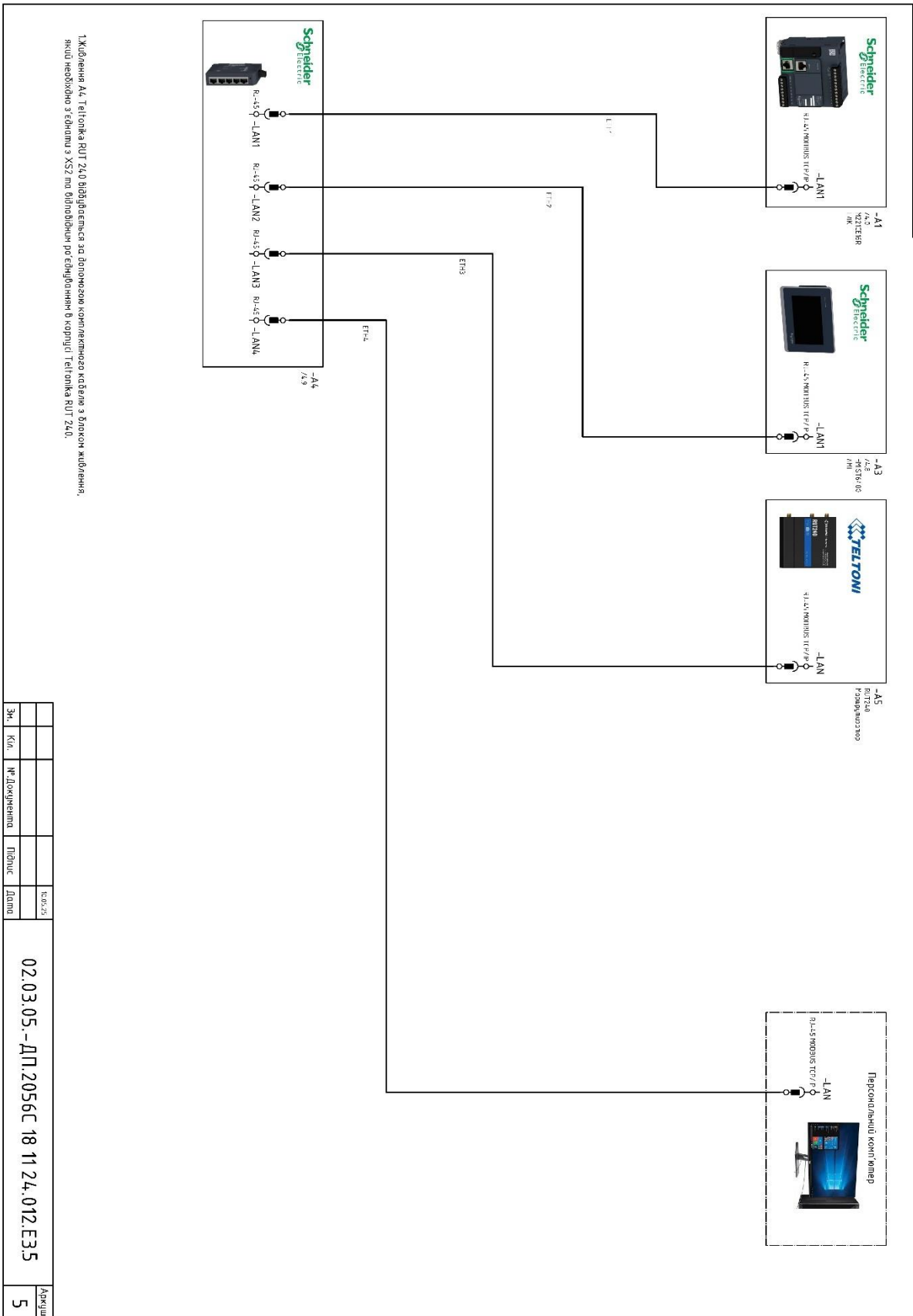
02.03.05.-ДП.2056С-18.11.24.012.Е3.3

Formed by

Formal /A.3

3

02.03.05.-ДП.2056С 18 11 24.012.Е35



1.Живлення АА. Телітка РІТ 24.0 ввідається до допоміжної комплексу кабелів з блоком живлення, який необхідно з'єднати з XS2 по відповідним реєстраційним в'єднанням в корпусі Телітка РІТ 24.0.

Зм.	Кол.	№ документа	Типово	Діапа	Таб.35

02.03.05.-ДП.2056С 18 11 24.012.Е35

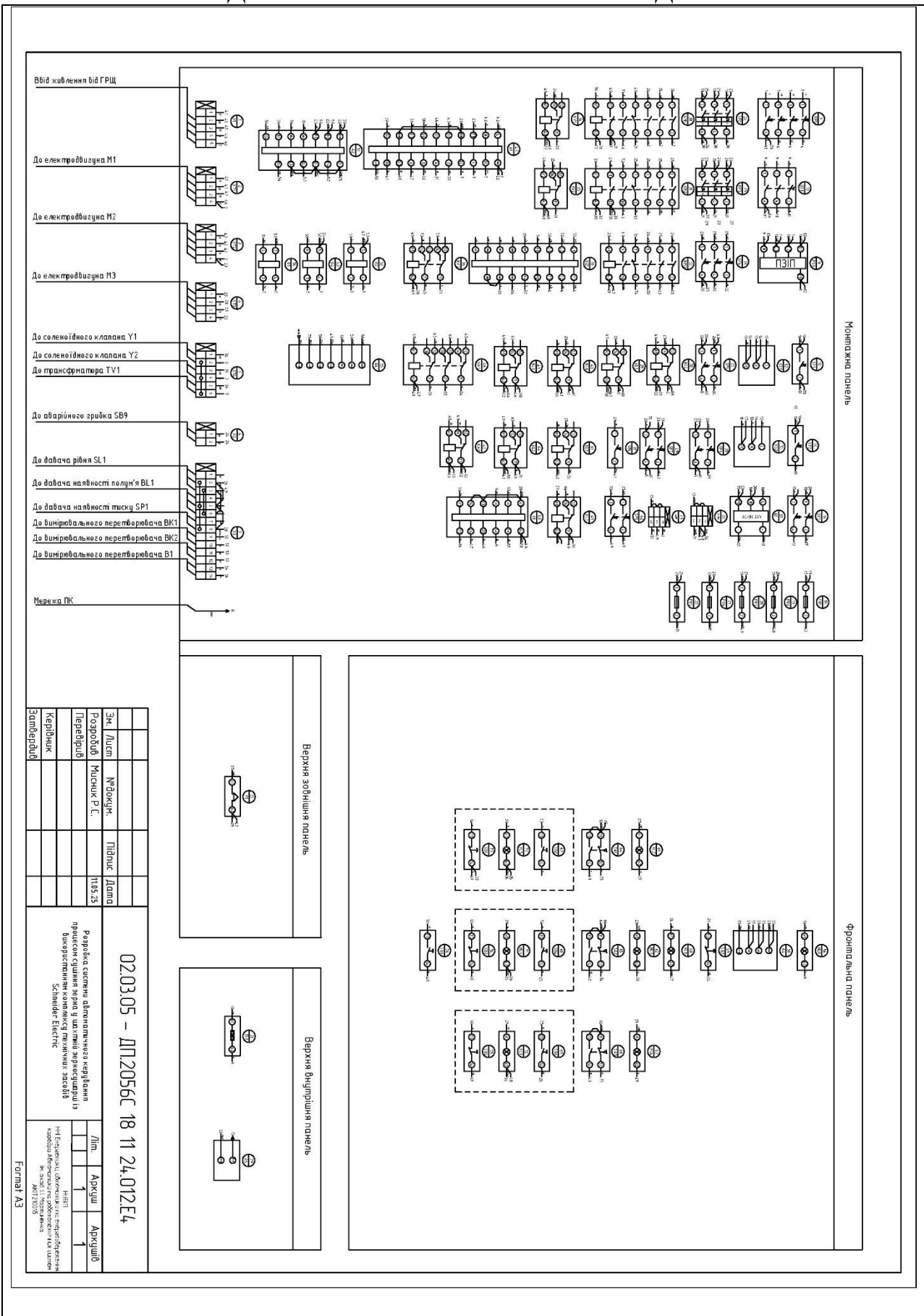
Сторінка 5 з 5

Формат А3

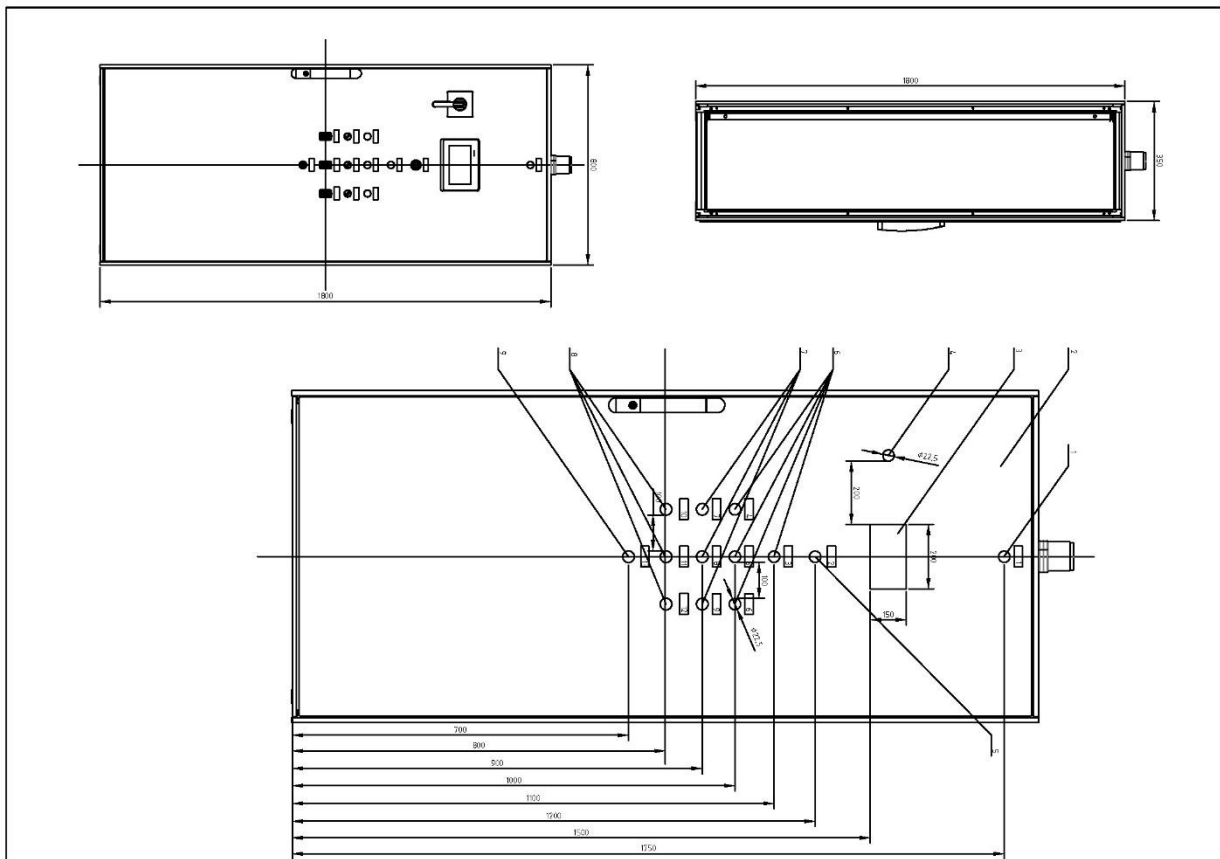
5

Позиційне позначення	Найменування	К-ть	Примітка
QF1	АВТОМАТИЧНИЙ ВИМИКАЧ COMPACT NSX100F 36kA 4P40 80A, Schneider Electric	1	
QS1	Роз'єднувач TeSys VCCF5 100A, Schneider Electric Telemecanique	1	
SF1	АВТОМАТИЧНИЙ ВИМИКАЧ EZ9, 1P, 16A, Schneider Electric	1	
SF2, SF4	АВТОМАТИЧНИЙ ВИМИКАЧ EZ9, 1P, 6A, Schneider Electric	2	
SF3, QF5-7, SF5	АВТОМАТИЧНИЙ ВИМИКАЧ EZ9, 2P, 6A, Schneider Electric	5	
QF2-3	АВТ.ВИМИКАЧ З КОМБ.РОЗЧІП.4-6,3А GV2P10, Schneider Electric	2	
QF4	АВТОМАТИЧНИЙ ВИМИКАЧ іС60Н ЗР 40А, Schneider Electric	1	
XS1-2	Розетка Acti9 DIN іРС, 2Р+Е, 16А, , Schneider Electric	2	
G1	БЛОК ЖИВЛЕННЯ ОПТИМІЗОВАНИЙ 1Ф 24В 3,1АВЛS1A24031	1	
FV1	ПЗІП EZ9L33720 Schneider Electric	1	
EL1	PLD E 409 W 350 MS - LED лампа для шафи керування	1	
FU1-5	Тримач запобіжника Schneider Electric TeSys DF81	5	
	ЗАПОБІЖНИК 5X20 1А АВЕ7FU100	5	В комплекті з FU1-5
HL1	СИГНАЛЬНА ЛАМПА 22ММ БІЛА З ПІДСВІТКОЮ ХВ4ВВ61	1	
KM1-2	Контактор Schneider Electric 9 А 3+2P 220 В 50/60 Гц (LC1D09M7)	2	
	ДОДАТ.КОНТ.БЛОК 2НО ФР.МОНТ. LADN20	2	В комплекті з KM1-2
KM3	Контактор Schneider Electric 40А 3+2P 220 В 50/60 Гц (LC1D040M7)	1	
	ДОДАТ.КОНТ.БЛОК 2НО ФР.МОНТ. LADN20	1	В комплекті з KM3
UZ1	Частотний перетворювач ATV630D22M3 Schneider Electric	1	
H1	Звуковий модуль Schneider Electric Harmony XVВ	1	
HL2-4	СИГНАЛЬНА ЛАМПА 22ММ 230В ЗЕЛЕНА З ПІДСВІТКОЮ ХВ4ВVM3	6	
SA1-3	ПЕРЕМИКАЧ двопозиційний ХВ4ВD33	3	
SB1-6	Кнопка Старт-Стоп ІNO+ІNC 22мм Harmony ХВ5АW7373ІM5 Schneider Electric	3	HL5-7 в корпусі
SB7	КНОПКА АВАРІЙНА ГРИБК ЧЕРВ Д 22 SCHNEIDER ELECTRIC ХВ4BS84441	1	
SB9	КНОПКА АВАРІЙНА ГРИБК ЧЕРВ Д 22 SCHNEIDER ELECTRIC ХАLK178E	1	
SB8	КНОПКА 22ММ ЗЕЛЕНА З ПОВЕРНЕННЯМ ХВ5АА31	1	
KV1-3	РЕЛЕ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНЕ ІНТЕРФЕЙСНЕ В ЗБОРІ, 2СО, =24В RSB2A080BDPV	3	
KA1-2	РЕЛЕ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНЕ ІНТЕРФЕЙСНЕ В ЗБОРІ, 4СО, =24В RХM4AB2BDPVS	2	
KL1-7	РЕЛЕ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНЕ ІНТЕРФЕЙСНЕ В ЗБОРІ, 1СО, =24В RSB1A160P7S	7	
02.03.05 - ДП.2056С 18 11 24.012.E3.6			
Зм.	Лист	№докум.	Підпис
Розробив	Мисник Р.С.		10.05.25
Перевірив			
Керівник			
Затвердив			
Розробка системи автоматичного керування процесом сущіння зерна у шахтній зерносушарці із використанням комплексу технічних засобів Schneider Electric			
Літ.	Аркуш	Аркуші	
	6	7	
ННБП НН Енергетики, автоматики та енергозбереження кафедра Автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мазуренка AKIT210015			

РОЗДІЛ 3. СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНИХ З'ЄДНАНЬ.



РОЗДІЛ 5. ЗОВНІШНІЙ ВИГЛЯД ШАФИ КЕРУВАННЯ.



Позиція	Найменування	Примітка
1	Лампа індикації живлення НЛ1	
2	Шафа електрична PanelSET SFN IP55 NS/SFN10080P	
3	ЛМ - імерфейс А3	
4	Роз'єднувач DST1	
5	Аварійний зрубок SB7	
6	Лампи індикації НЛ2, НЛ3, НЛ4, НЛ8	
7	Перемикач двопозиційний SA1, SA2, SA3	
8	Кнопки з лампою в з'єдну SB1-2, НЛ5, SB3-4, НЛ6, SB5-6, НЛ7	
9	Кнопка скидання аварії SB8	

Позиція	Текст в рамці	Примітка
1	Живлення	
2	Аварійний стоп	
3	Аварія	
4	Клапан підігрів	
5	Клапан пального	
6	Трансформатор запалення	
7	Транспортер задвижки. Ручний/Автоматичний	
8	Транспортер задвижки. Ручний/Автоматичний	
9	Вентилятор. Ручний/Автоматичний	
10	Транспортер задвижки. Пуск/Стоп	
11	Транспортер задвижки. Пуск/Стоп	
12	Вентилятор. Пуск/Стоп	
13	Скидання аварії	

02.03.05 - ДП2056С 18 11 24,012Е6

Розробка системи адміністративного керування процесом сучасної системи управління з використанням технологій Schneider Electric

Лист	№ документа	Підрозділ	Дата
1	105.25	105.25	10.05.25

Формат А3

ДОДАТОК Б

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

Час t, c	Температура $T, ^\circ C$	$Y_H(t_i)$
0	15	0
600	26.83	0.285
1200	35.35	0.485
1800	41.47	0.63
2400	45.88	0.735
3000	49.05	0.811
3600	51.33	0.865
4200	52.97	0.904
4800	54.15	0.932
5400	55	0.952
6000	55.6	0.967
6600	56.05	0.977
7200	56.67	0.992
7800	57	1

ДОДАТОК В

Визначення параметрів налаштувань ПД -регулятора на заданий частотний показник коливальності для системи керування процесом сушіння зерна в шахтній зерносушарці

1. Задаємо вектор початкових значень T_i та будуємо годограф АФЧХ розімкненої системи з параметрами регулятора ($K_p = 1$, $T_i = \tau$), проводимо на графіку пряму, що проходить через центр координат під кутом β .

$$W_0(\omega) := \frac{0.42}{2010 \cdot i \cdot \omega + 1} \cdot e^{-2.87 \cdot i \cdot \omega}$$

$$W(\omega, T) := \left(1 - i \cdot \frac{1}{T \cdot \omega} + i \cdot 0.5 \cdot T \cdot \omega \right) \cdot W_0(\omega)$$

$$y(x) := \tan\left(\operatorname{asin}\left(\frac{1}{M}\right)\right) \cdot x$$

$$x := 0..-200$$

$$\omega := 0, 0.0001.. 1.2$$

$$M := 1.3$$

$$T := \begin{pmatrix} 100 \\ 200 \\ 300 \\ 400 \\ 500 \\ 600 \\ 700 \\ 800 \end{pmatrix}$$

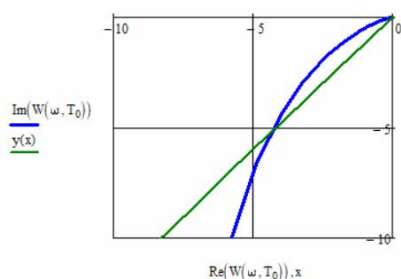


Рисунок 1

2. Підбираємо такі параметри кола, щоб воно дотикалося і до прямої і до годографа, а його центр знаходився на від'ємній дійсній напівосі для всіх восьми значень часу ізодрому.

$$i := 0..7$$

$$R_i := \begin{pmatrix} 10 \\ 4.2 \\ 2.1 \\ 0.8 \\ 0.025 \\ 0.22 \\ 0.25 \\ 0.29 \end{pmatrix} \quad x0_i := -R_i \cdot M \quad x0 = \begin{pmatrix} -13 \\ -5.46 \\ -2.73 \\ -1.04 \\ -0.033 \\ -0.286 \\ -0.325 \\ -0.377 \end{pmatrix}$$

$$Y0(x) := -\sqrt{(R_0)^2 - (x - x0_0)^2} \quad Y6(x) := -\sqrt{(R_6)^2 - (x - x0_6)^2}$$

$$Y1(x) := -\sqrt{(R_1)^2 - (x - x0_1)^2} \quad Y7(x) := -\sqrt{(R_7)^2 - (x - x0_7)^2}$$

$$Y2(x) := -\sqrt{(R_2)^2 - (x - x0_2)^2}$$

$$Y3(x) := -\sqrt{(R_3)^2 - (x - x0_3)^2}$$

$$Y4(x) := -\sqrt{(R_4)^2 - (x - x0_4)^2}$$

$$Y5(x) := -\sqrt{(R_5)^2 - (x - x0_5)^2}$$

$$x1 := 0..-0.001..-30$$

Рисунок 2.1

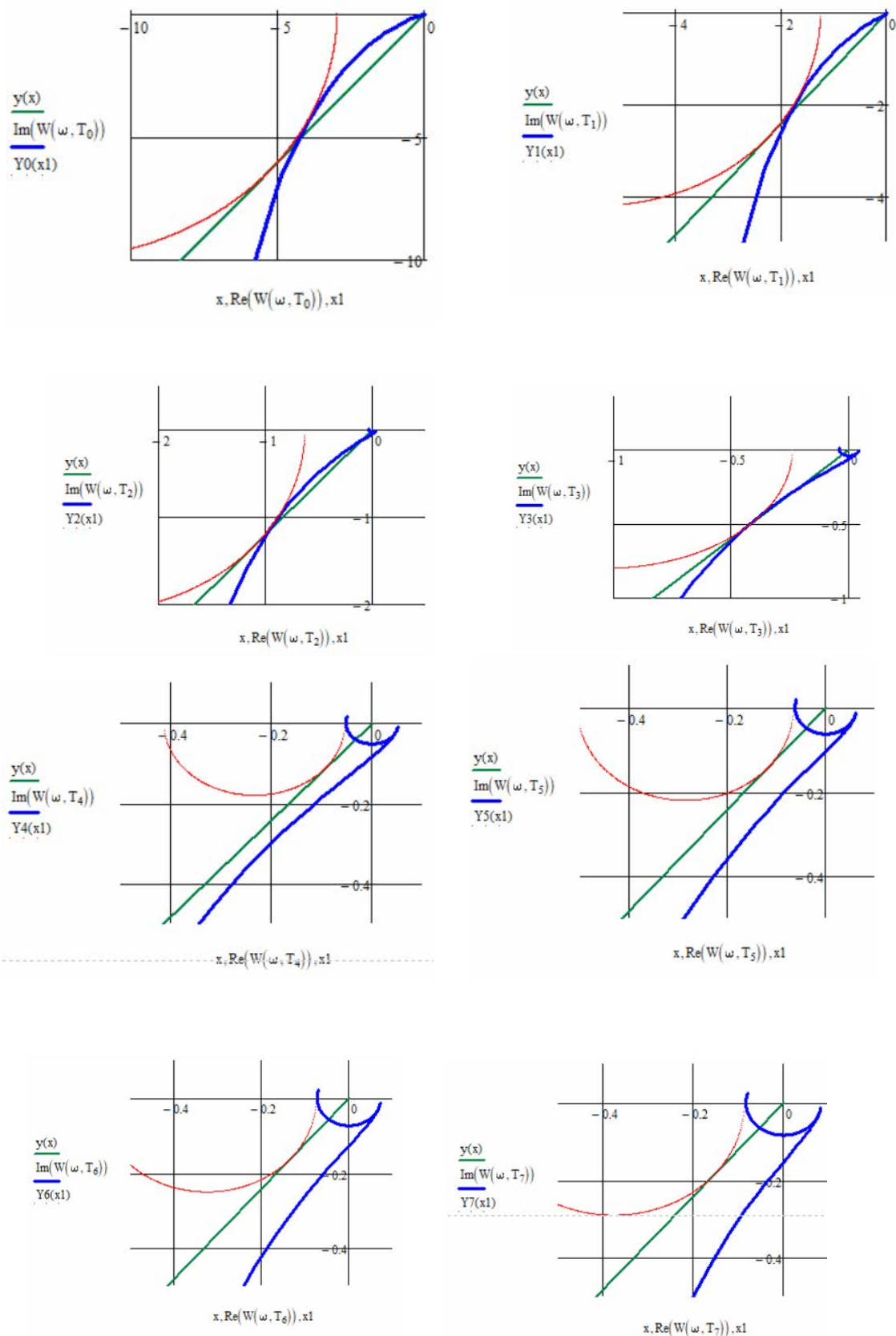


Рисунок 2.2

3. З отриманого вектора радіусів розраховуємо вектор коефіцієнтів передачі K_p , будемо лінію межових співвідношень та проводимо дотичну до

випуклої частини через центр координат. Точка дотику і визначатиме оптимальні параметри налаштування регулятора.

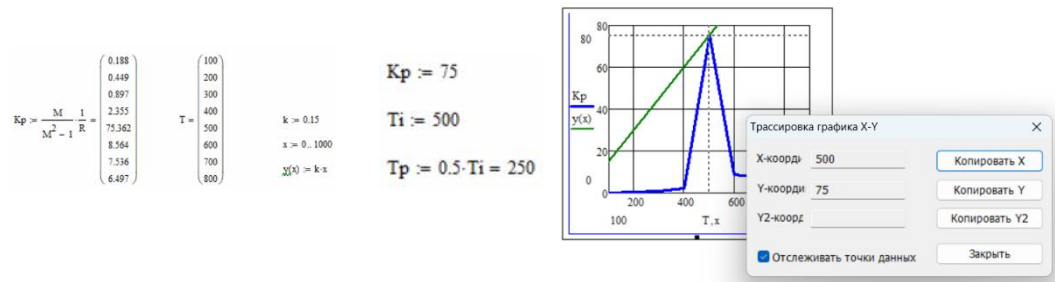


Рисунок 3

ДОДАТОК Г

РОЗДІЛ 1. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПЛК

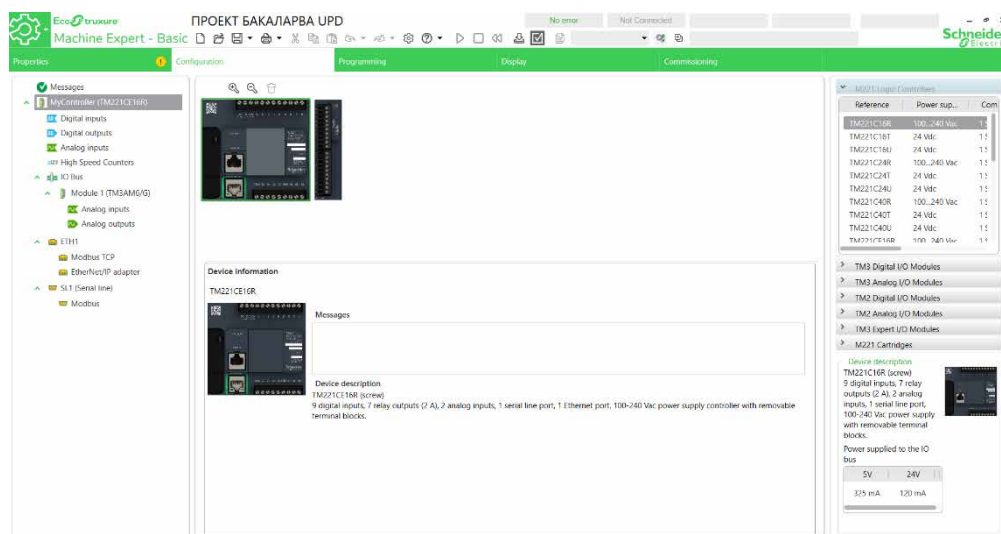


Рис. 1.1 Конфігурація ПЛК

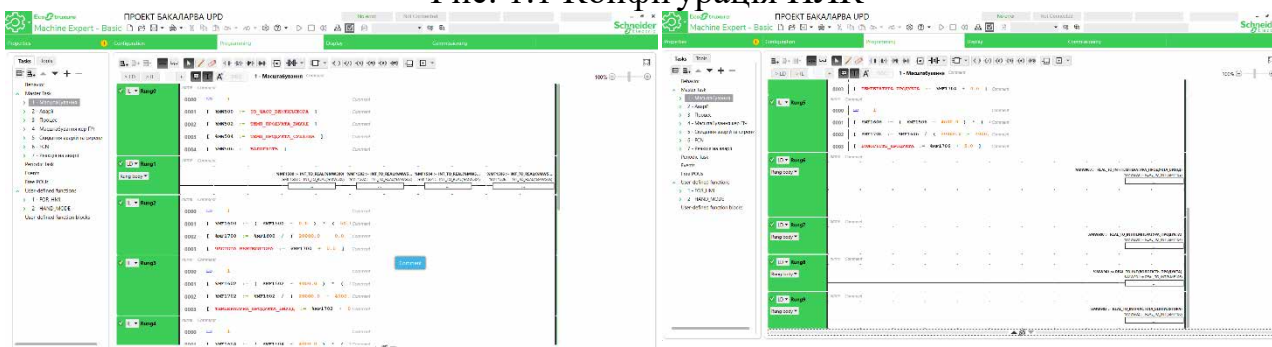


Рис. 1.2 Масштабування сигналів вимірвальних перетворювачів та зворотного зв'язку ПЧ

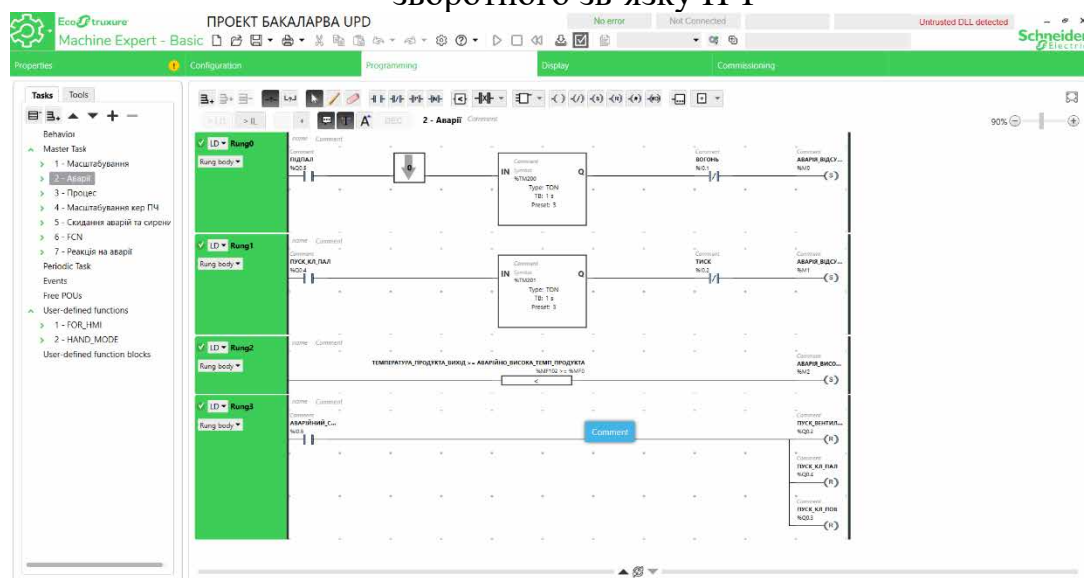


Рис. 1.3 Ініціалізація аварій

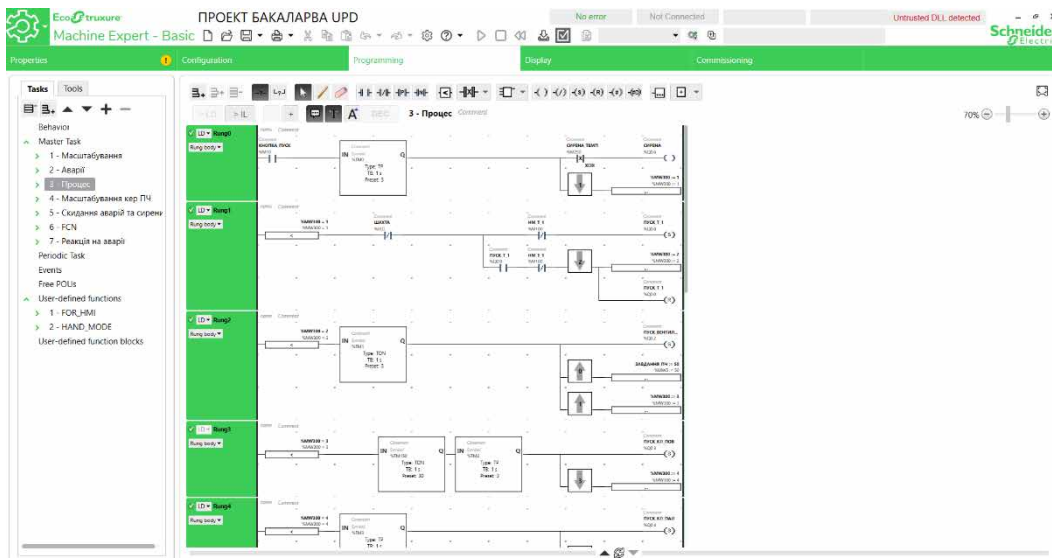


Рис.1.4 Алгоритм технологічного процесу 1

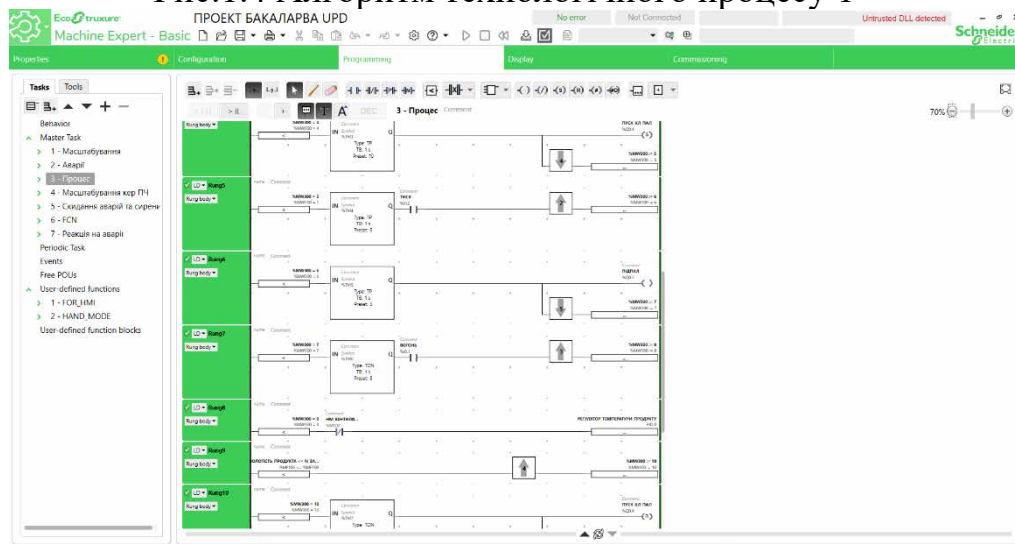


Рис.1.5 Алгоритм технологічного процесу 2

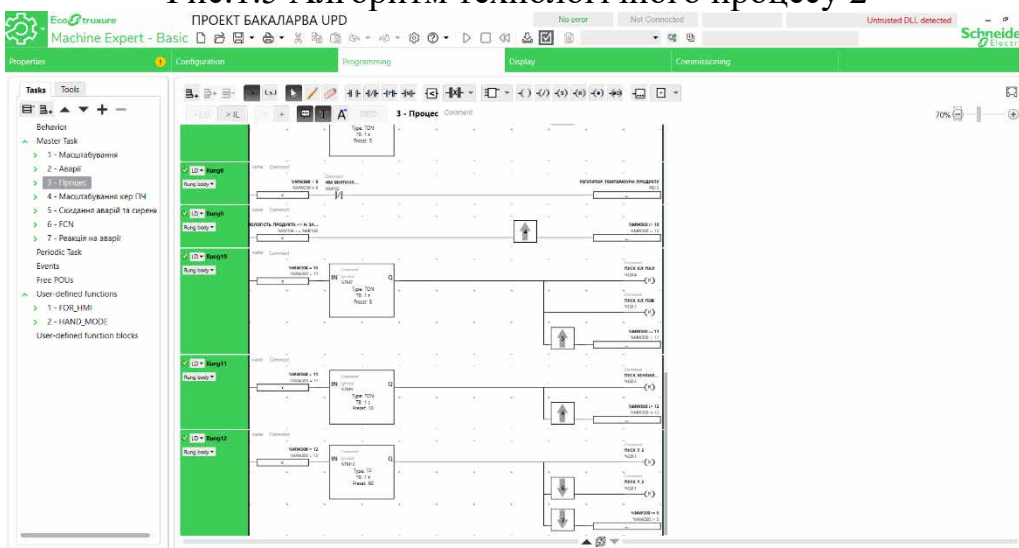


Рис.1.6 Алгоритм технологічного процесу 3

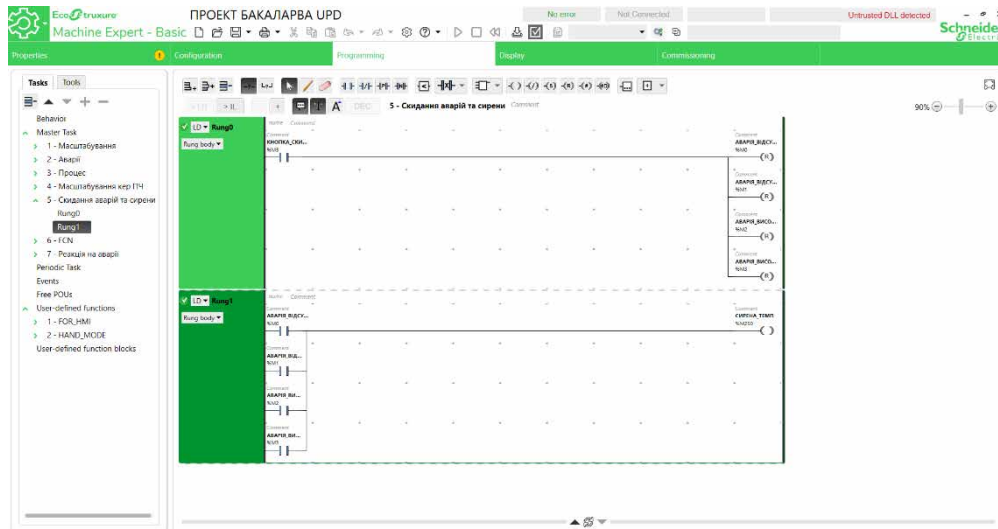


Рис.7 Блок скидання та ініціалізації сирени

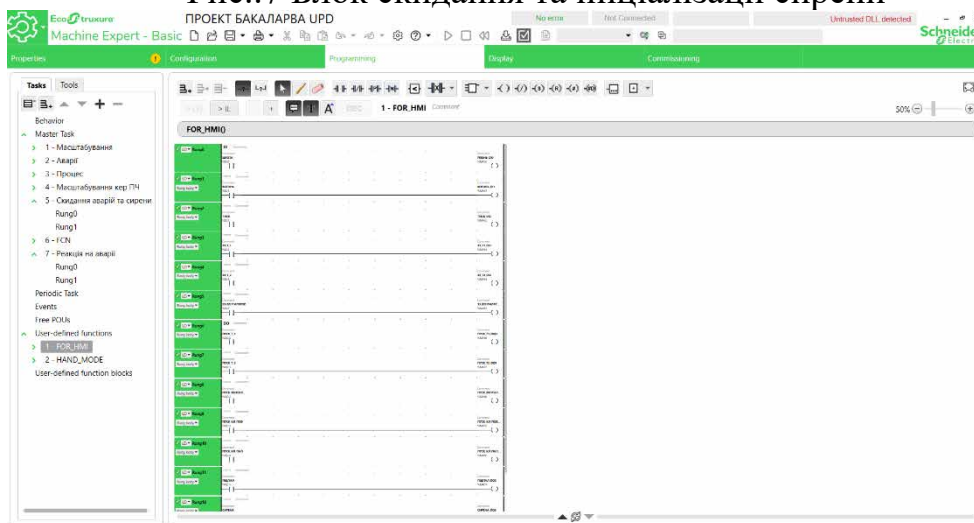


Рис.1.8 Функція передачі значень до ЛМІ

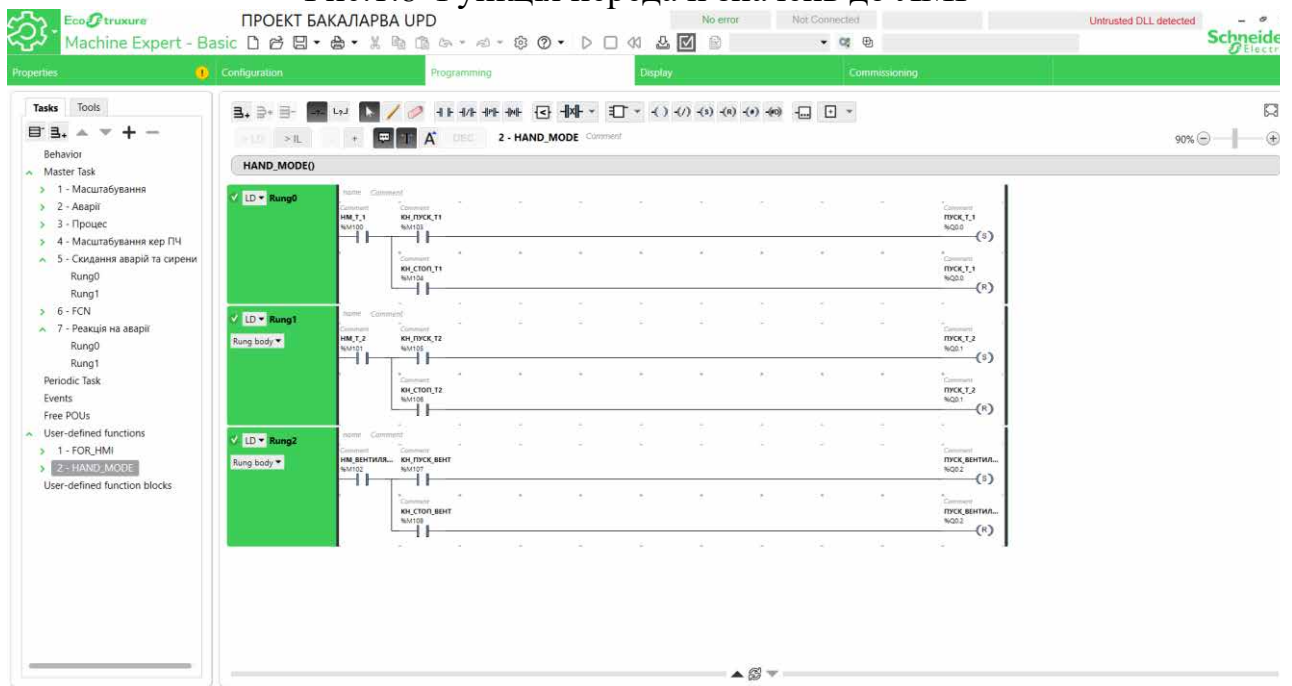


Рис.1.9 Функція роботи ручного режиму

РОЗДІЛ 2. ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЛМІ.

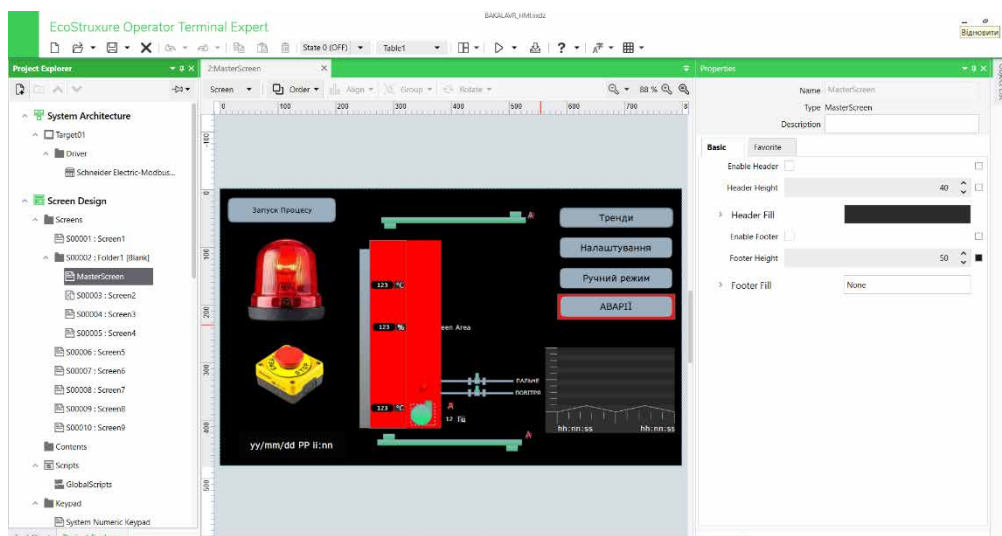


Рис.2.1 Вигляд головного екрану ЛМІ

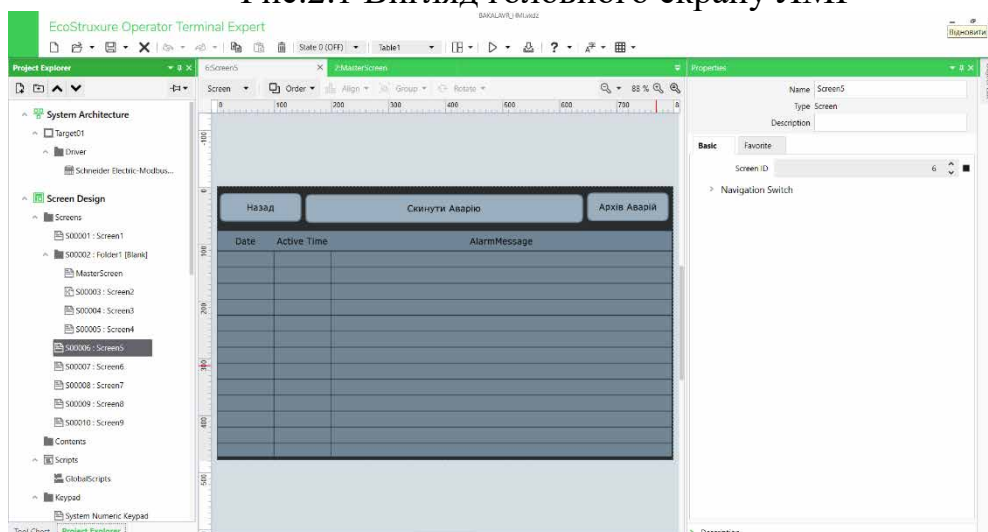


Рис.2.2 Вигляд екрану журналу аварій

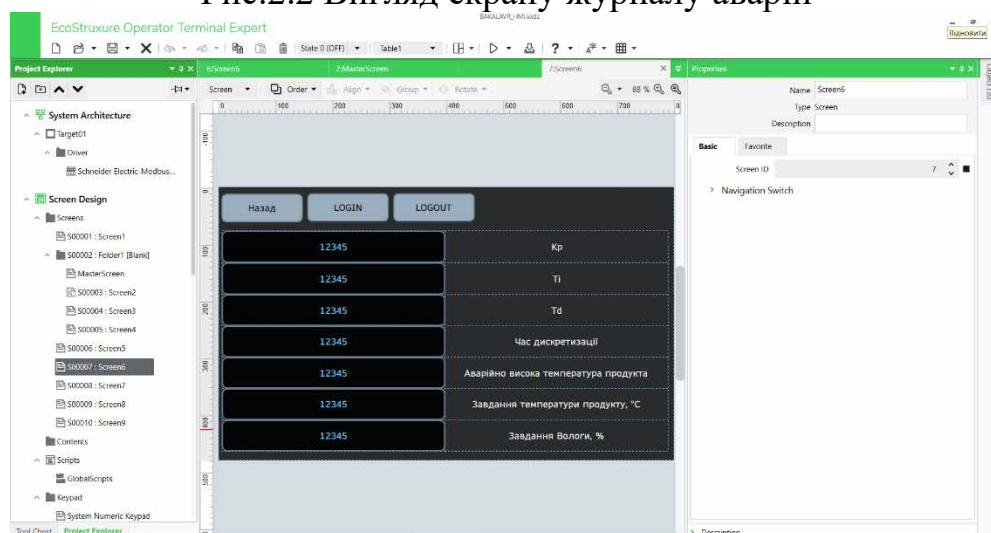


Рис.2.2 Вигляд екрану налаштувань

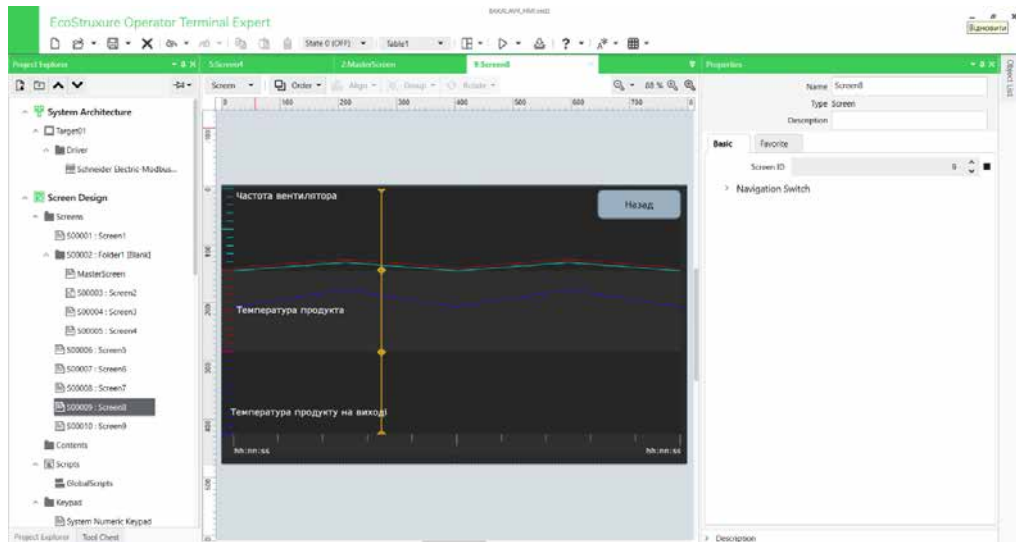


Рис.2.3 Вигляд екрану трендів

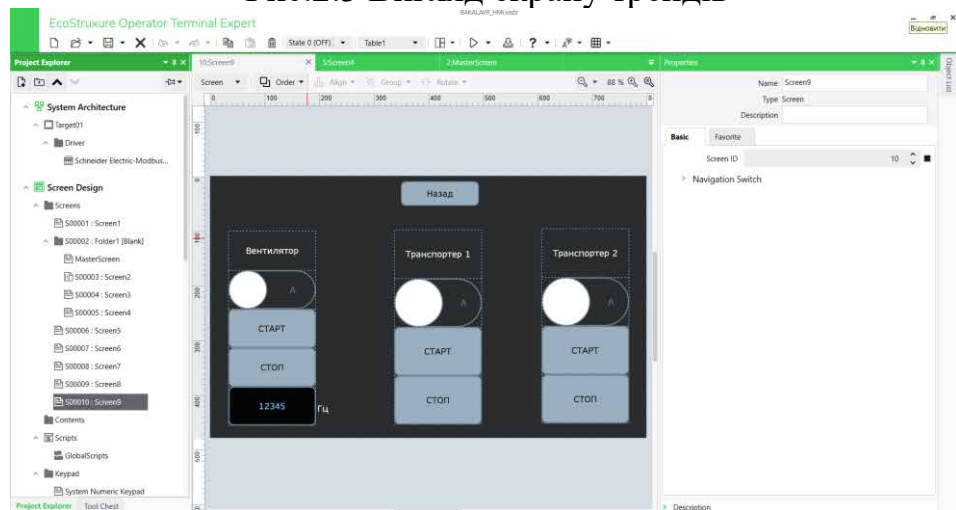


Рис.2.4 Вигляд екрану ручного режиму

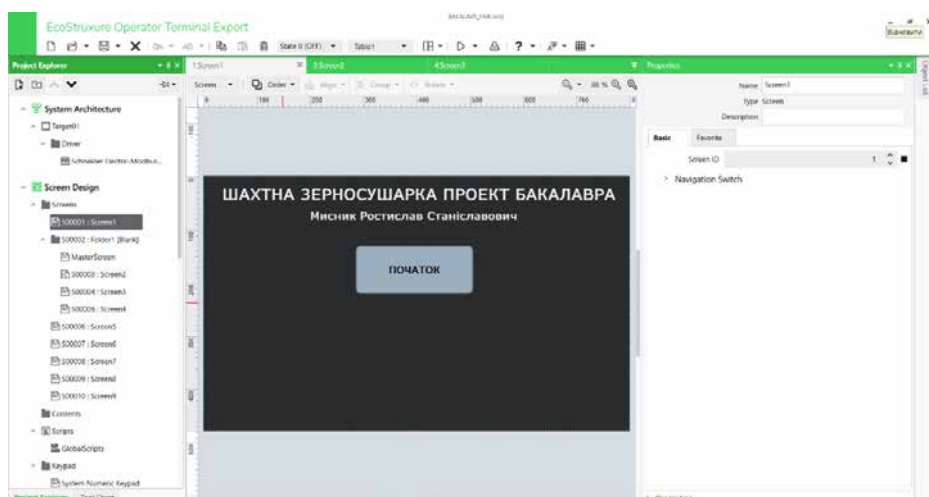


Рис.2.5 Вигляд екрану ініціалізації