

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР.АКПм-01.00.00.000 ПЗ

Група АКПм-24-1

Данило Бабенко

2025

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Факультет автоматизації та енергетики
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Бабенко Данило Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 681.5
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення автоматичної системи керування промисловим комплексом для
(назва роботи)

сушіння та підготовки зерна

Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(назва освітньої програми)

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

Консультант з нормоконтролю

асистент

(посада)

Л.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Здобувач освітнього ступеня

АКПм-24-1

(шифр групи)

Д.О. Бабенко

(ініціали та прізвище)

Науковий керівник

доцент, к.т.н.

(науковий ступінь, вчене звання) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

А.І. Лагойда

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

А.І. Лагойда

(ініціали та прізвище)

Рецензент

доцент, к.т.н.

(посада)

(підпис)

(дата)

І.І. Чигур

(ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет автоматизації та енергетики

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Освітній рівень другий (магістерський)

Спеціальність 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та

(шифр і назва)

робототехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

(А.І. Лагойда)

« » _____ 20 року

**З А В Д А Н Н Я
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Бабенко Данило Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення автоматичної системи керування промисловим комплексом для сушіння та підготовки зерна

керівник роботи Лагойда Андрій Іванович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвердені наказом закладу вищої освіти від «10» листопада 2025 року № 699/7

2. Строк подання студентом роботи 08.12.2025

3. Вихідні дані до роботи Матеріали практик, науково-технічні журнали, довідники

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ. 1. Дослідження технологічного процесу сушіння та підготовки зерна як об'єкта автоматизованого керування. 2. Математичне моделювання зерносушильного агрегату. 3. Синтез автоматичної системи регулювання. 4. Розробка технічної документації та синтез SCADA-системи зерносушильного комплексу. Загальні висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 30.10.2024

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Дослідження технологічного процесу сушіння та підготовки зерна як об'єкта автоматизованого керування	02.12.2025	
2	Математичне моделювання зерносушильного агрегату	03.12.2025	
3	Синтез автоматичної системи регулювання	04.12.2025	
4	Розробка технічної документації та синтез SCADA-системи зерносушильного комплексу	05.12.2025	

Студент _____
(підпис)

Бабенко Д.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Лагойда А.І.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота на здобуття кваліфікації магістра за спеціальністю 174 - «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» та освітньою програмою - «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». - Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. - Івано-Франківськ, 2025.

Виконано детальний аналіз технологічної установки для сушіння та підготовки зерна як об'єкта автоматизації, з акцентом на процес сушіння посівного матеріалу за умов низькотемпературного режиму.

На основі експериментальних даних здійснено ідентифікацію об'єкта керування та отримано передавальні функції, параметри яких відповідають вимогам до технологічного процесу.

Синтезовано модель багатоконтурної системи автоматичного керування, розроблено коректор для виконавчого механізму в загальній структурі управління. Виконано налаштування регуляторів у контурах температури та вологості з урахуванням прямих і перехресних зв'язків, а також проведено порівняльний аналіз якісних показників функціонування системи.

Підготовлено технічну документацію для зерносушильного комплексу та здійснено вибір оптимальних технічних засобів автоматизації, необхідних для стабільної роботи установки.

Розроблено SCADA-систему керування зерносушильним комплексом і продемонстровано її роботу в режимі реального часу.

Ключові слова: зерно, система автоматизованого керування, технологічний процес, зерносушильний комплекс, регулятор, структурна схема, Matlab.

ANNOTATION

Master's thesis for obtaining a master's degree in specialty 174 - "Automation, computer-integrated technologies and robotics" and educational program - "Automation and computer-integrated technologies". - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. - Ivano-Frankivsk, 2025.

A detailed analysis of the technological installation for drying and preparing grain as an automation object was performed, with an emphasis on the process of drying seed material under low-temperature conditions.

Based on experimental data, the control object was identified and transfer functions were obtained, the parameters of which meet the requirements for the technological process.

A model of a multi-loop automatic control system was synthesized, a corrector for the actuator in the general control structure was developed. The regulators in the temperature and humidity circuits were adjusted, taking into account direct and cross-connections, and a comparative analysis of the qualitative indicators of the system's functioning was conducted.

Technical documentation for the grain drying complex was prepared and the optimal technical means of automation necessary for the stable operation of the installation were selected.

A SCADA control system for the grain drying complex was developed and its operation in real time was demonstrated.

Keywords: grain, automated control system, technological process, grain drying complex, controller, structural diagram, Matlab.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1	
ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ТА ПІДГОТОВКИ ЗЕРНА ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ.....	12
1.1. Функціональне призначення багатоконтурної автоматизованої системи керування технологічним комплексом сушіння та підготовки зерна.....	12
1.2. Аналіз сировини на зерносушильному комплексі.....	13
1.3. Основні типи зерносушильних комплексів.....	15
1.4. Режими та стандарти сушіння зерна.....	20
1.5. Аналіз існуючих систем управління зерносушильним комплексом.....	31
1.6. Постановка задачі.....	35
Висновки до розділу 1.....	36
РОЗДІЛ 2	
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗЕРНОСУШИЛЬНОГО АГРЕГАТУ.....	37
2.1. Планування і проведення активного експерименту на об'єкті керування.....	38
2.2. Ідентифікація каналів керування.....	41
2.3. Дослідження імітаційної моделі сушарки.....	52
Висновки до розділу 2.....	53
РОЗДІЛ 3	
СИНТЕЗ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ.....	54
3.1. Синтез АСК з перехресними зв'язками.....	55

3.2. Синтез АСК з коректором для калорифера.....	60
Висновки до розділу 3.....	66
РОЗДІЛ 4	
РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ ТА СИНТЕЗ SCADA-СИСТЕМИ ЗЕРНОСУШИЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ.....	68
4.1. Вибір технічних засобів автоматизації.....	68
4.2. Розробка функціональної схеми автоматизації.....	73
4.2.1 Особливості побудови функціональних схем.....	76
4.3. Характеристика SCADA-системи Proficy SCADA iFix.....	77
4.4. Розробка основного проєкту.....	78
4.5. Запуск та опис роботи проєкту.....	81
Висновки до розділу 4.....	89
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	90
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	92
ДОДАТКИ.....	94

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

АСК - автоматична система керування.

САР - система автоматична регулювання.

АСУТП - автоматизована система управління технологічними процесами.

ВМ - виконавчий механізм.

ОК - об'єкт керований.

PLC - програмований логічний контролер.

РО - регулюючий орган.

SCADA - supervisory control and data acquisition (супервізорний контроль та збір даних).

ВСТУП

Актуальність теми. В умовах активної діджиталізації аграрного сектору в Україні та світі зростає потреба у створенні високоефективних зерносушильних комплексів, здатних забезпечувати мінімальні витрати енергоресурсів, збереження високої схожості насінневого матеріалу та отримання якісного товарного зерна після сушіння.

Комплекс сушіння та підготовки зерна являє собою складну агротехнічну систему, у складі якої функціонує велика кількість взаємопов'язаних механізмів і пристроїв, основним завданням яких є контроль і підтримка стабільних параметрів технологічного процесу. Навіть незначні відхилення можуть призвести до аварійної зупинки лінії, що спричиняє суттєві матеріальні втрати.

Запровадження багатоконтурної автоматизованої системи керування (АСК) для промислового комплексу сушіння та підготовки зерна забезпечить повну автоматизацію контролю технологічного процесу, безперервний моніторинг обсягів зерна, а також контроль умов його зберігання у реальному часі.

Обґрунтування вибору теми дослідження. Під час сушіння однієї тонни зерна в середньому потрібно видалити близько 70–80 кг вологи, що при загальному врожаї в 35–40 млн тонн зумовлює значні енергетичні витрати - приблизно 0,4–0,7 млн тонн умовного палива.

Процеси сушіння та підготовки зерна до зберігання займають до 70% загального часу збирання врожаю, що свідчить про наявність широкого спектра нерозв'язаних технологічних і організаційних завдань у аграрному секторі.

Сучасний промисловий зерносушильний комплекс є технологічно досконалою системою, орієнтованою на відповідність ринковим вимогам і забезпечення високої енергоефективності. Під час розроблення проектної документації таких об'єктів особливу увагу слід приділяти впровадженню сучасних методів автоматизації виробничих процесів, адже використання електронних засобів керування надає можливість здійснювати стабільний моніторинг, підвищувати надійність функціонування та гарантувати безпеку технологічного процесу.

Мета і завдання дослідження. З огляду на динамічний розвиток аграрного сектору, можна стверджувати, що подальше зростання ефективності

сільськогосподарського виробництва неможливе без модернізації наявних зерносушильних комплексів.

Сучасний удосконалений комплекс сушіння та підготовки зерна має відповідати низці ключових вимог, серед яких:

- раціонально спроектована система приймання та відвантаження зерна;
- повна автоматизація технологічних процесів;
- урахування показників якості зерна на основі лабораторного аналізу;
- контроль рівномірності вологості по всьому об'єму сушильної камери з метою запобігання перегріванню та розтріскуванню зерна;
- точний облік продукції протягом усього циклу її перебування на території комплексу;
- екологічна безпечність технологічного процесу;
- використання енергоощадного обладнання та систем управління.

Реалізація такої багатофункціональної структури забезпечує низку вагомих переваг, зокрема:

- оптимізацію та плановість виробничих процесів в агропідприємстві;
- гарантоване збереження врожаю під час сушіння та зберігання;
- точний контроль і облік обсягів готової продукції;
- підвищення конкурентоспроможності підприємства та залучення нових клієнтів.

Об'єктом дослідження є багаторівнева система автоматичного керування технологічним комплексом сушіння та підготовки зерна.

Предмет дослідження є технологічний комплекс та автоматизовані системи керування процесом зерносушіння.

Методи дослідження. У дослідженні використано фундаментальні методи теорії автоматичного керування технологічними процесами, що охоплюють проведення активного експерименту, апроксимацію вхідних даних, визначення передавальних функцій та синтез моделі багатоконтурної автоматизованої системи керування. Виконано аналіз стійкості системи та оцінку якісних показників перехідних процесів. Під час створення математичної моделі враховано зміну температурного градієнта всередині зерна в процесі сушіння. Налаштування регуляторів здійснювалося із застосуванням інструментів пакета

«tune» у середовищі MATLAB/Simulink, що забезпечило оптимізацію параметрів системи керування.

Новизна отриманих результатів.

Наукова новизна роботи полягає у створенні математичної моделі зерносушильної установки, побудованої на основі результатів активного експерименту, а також у подальшому синтезі та аналізі багатоконтурної автоматизованої системи регулювання технологічного процесу сушіння зерна.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Тематика магістерської роботи відповідає держбюджетному напрямку роботи кафедри Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій. Результати, які отримувались під час виконання науково-дослідних робіт, котрі виконувались за планами наукових досліджень ІФНТУНГ в рамках держбюджетних тем: «Синтез комп'ютерних систем та розробка програмного забезпечення для об'єктів нафтогазового комплексу» (ДР № 011U605890), «Науково-організаційні засади нарощування видобутку вітчизняних нафти і газу та диверсифікації постачання енергетичних ресурсів для підвищення енергетичної безпеки України» (ДР № 0115U007099) стали науковою базою магістерської роботи.

Практичне значення отриманих результатів. На основі отриманих результатів проведених досліджень створено автоматизовану систему керування зерносушильним комплексом. Для реалізації управління процесом сушіння розроблено комп'ютерно-інтегровану систему на базі програмованого логічного контролера SIEMENS (модель 6ES7214-1BG40-0XB0) у поєднанні зі SCADA-системою iFix, що забезпечує високоефективне керування та моніторинг технологічного процесу в реальному часі.

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 1 додатка. Повний обсяг магістерської роботи становить 95 сторінок: обсяг основного тексту - 91 сторіна, 61 рисунок, 5 таблиць; список використаних джерел, що включає 12 найменувань та займає 2 сторінки; 1 додаток на 2 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ТА ПІДГОТОВКИ ЗЕРНА ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ

1.1. Функціональне призначення багатоконтурної автоматизованої системи керування технологічним комплексом сушіння та підготовки зерна

Зерносушильний комплекс використовується для підймання, очистки, сушіння, зберігання та відвантаження зерна в автомобільний або залізничний транспорт [1].

Багатоконтурна автоматизована система зерносушильним комплексом дає можливість керувати комплексом дистанційно через мережу Інтернет. Змінення параметрів технологічного процесу, оновлення та обслуговування ПЗ виконується дистанційно. У системі керування передбачено захист від помилки людського фактору і мінімізація простоїв від дій обслуговуючого персоналу. Автоматизована система зерносушильним комплексом призначена для керування технологічними процесами та електроприводами зерносушарки, сепараторів та іншого технологічного обладнання.

Деякі фахівці вважають зерносушильний комплекс одним із ключових, проте недооцінених технічних досягнень в історії розвитку сільського господарства. У певному сенсі це твердження можна віднести й до становлення аграрного сектору Сполучених Штатів, який відіграв вирішальну роль у формуванні економічної потужності держави. Уже наприкінці ХІХ століття, зокрема до 1890 року, американське сільське господарство зазнало стрімкої еволюції - від традиційного виробництва до високорозвиненої галузі, заснованої на комерційних і наукових засадах. У цей період зернові культури стали основним національним продуктом і визначальним експортним товаром США [2].

На сучасному етапі основне призначення зерносушильних комплексів залишається незмінним - це забезпечення повного технологічного циклу, який

охоплює приймання, очищення, сушіння, аналіз, зберігання та відвантаження зерна. Водночас суттєво трансформувався підхід до реалізації цих процесів. Упровадження автоматизованих систем керування у роботу зерносушильних агрегатів забезпечує низку істотних переваг, серед яких - усунення впливу людського фактору та мінімізація ймовірності помилкових дій. Завдяки автоматизації зникає потреба у постійному ручному контролі якості виконання операцій, оскільки система самостійно виконує задані функції, а оператор має можливість здійснювати моніторинг процесу дистанційно. Додатковою перевагою є зменшення потреби в робочій силі та зниження залежності від кадрового дефіциту, що сприяє підвищенню ефективності та економічної доцільності функціонування аграрного підприємства.

1.2. Аналіз сировини на зерносушильному комплексі

У масі свіжозібраного зерна, окрім основної культури, зазвичай міститься значна кількість сторонніх компонентів: зерна інших культур, уламки рослин, пошкоджене або дрібне зерно, а також органічні й мінеральні домішки, серед яких можуть бути шкідливі. Процес видалення таких небажаних включень здійснюється методом сепарування, що являє собою механічний поділ зернової суміші на більш однорідні фракції за фізико-механічними властивостями компонентів. Машина, призначена для виконання цієї операції, називають сепараторами.

Технологічний ланцюг операцій, спрямованих на очищення зерна та насіннєвого матеріалу, умовно поділяється на три основні етапи: попереднє очищення, первинне очищення та вторинне очищення із подальшим сортуванням зернової маси [3].

1) Попереднє очищення.

Попереднє очищення є початковим етапом технологічного процесу підготовки зерна та виконує допоміжну функцію у системі його обробки. Основною метою цієї операції є підготовка зернової маси до наступних

технологічних стадій, зокрема до процесу сушіння. Проведення попереднього очищення забезпечує підвищення стійкості зерна до розвитку небажаних фізико-біологічних процесів у зерновій масі, зокрема запобігає самозігріванню та погіршенню якості продукції.

У результаті виконання цієї операції відбувається розділення вихідної зернової маси на дві основні фракції - очищене зерно та відходи, що підлягають подальшій утилізації або переробці.

1) Первинне очищення зернового та насіннєвого матеріалу.

Ця технологічна операція здійснюється після завершення попереднього очищення та, за необхідності, сушіння зернової маси. У регіонах з низьким вмістом вологи у зібраному зерні первинне очищення зазвичай починається безпосередньо після збиральної обробки. Технологічно цей процес забезпечується спеціальними агрегатами, які здійснюють очищення зерна за допомогою потоків повітря та просіювання через решета. Основною метою первинного очищення є видалення максимальної кількості сторонніх домішок при мінімальних втратах основної продукції.

2) Вторинне очищення зернового та насіннєвого матеріалу [4].

Вторинна очистка застосовується переважно для підготовки зернового матеріалу, призначеного для посіву, з метою досягнення високої чистоти та однорідності насіння. Загальна технологічна схема проведення цих операцій наведена на рисунку 1.1.

Вторинне очищення зерна, яке також часто називають фінішною доробкою зерна, виконується за допомогою високотехнологічного обладнання для видалення домішок. До таких агрегатів належать сепаратори, вібропневмостоли та фотосепаратори. В процесі вторинного очищення зерно остаточно очищається від сторонніх включень та сортується на фуражне і насіннєве. Насіннєвий матеріал, у свою чергу, додатково поділяється на посівне та продовольче зерно, забезпечуючи високу якість кінцевої продукції.

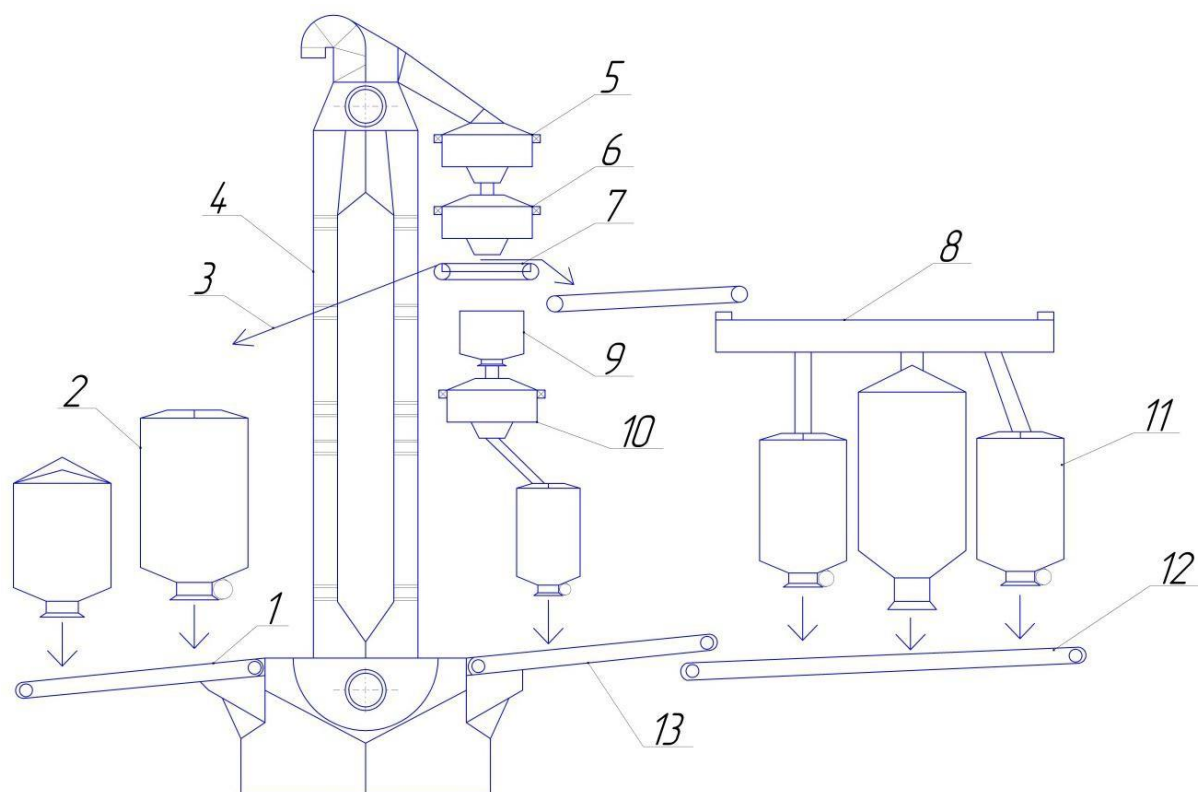


Рис. 1.1. Загальна схема технологічного процесу: 1 - прийомний транспортер; 2 - прийомні ваги; 3 - відпускний пристрій; 4 - норія; 5- надваговий бункер; 6- ваги (ковшові або порційні); 7 - розподільчі труби; 8 - надсилосний транспортер; 9 - надсепараторний бункер; 10 - сепаратор; 11 - силоси для зберігання зерна; 12 - підсилосний транспортер; 13 - підсепараторний бункер

1.3. Основні типи зерносушильних комплексів

Зерносушарка - це спеціалізований пристрій, призначений для рівномірного обдування зерна нагрітим повітрям. Головне призначення агрегату полягає у зниженні вологості зернових, бобових та олійних культур до таких значень, які забезпечують їх безпечне тривале зберігання без ризику утворення осередків самозігрівання. При правильному підборі режиму сушіння відбувається фізіологічне дозрівання зерна, що сприяє підвищенню його якісних показників.

Зерносушарки класифікують за кількома ознаками.

За мобільністю:

- Мобільні – застосовуються переважно малими сільськогосподарськими

підприємствами.

- Стационарні – призначені для середніх та великих аграрних комплексів.

За принципом сушіння:

- Поточкові – здійснюють сушіння зерна за допомогою рухомого потоку нагрітого повітря.

Процес сушіння зерна в поточкових та циклічних зерносушарках має свої особливості та переваги.

Поточкові зерносушарки забезпечують одночасне завантаження, сушку, охолодження та вивантаження зерна у безперервному режимі. Серед переваг - здатність обробляти великі партії зерна. До недоліків належить складність сушіння зерна з високою вологістю, яке часто потребує багаторазового пропускання через сушарку.

Циклічні зерносушарки виконують завантаження, сушку, охолодження та вивантаження послідовно, у циклічному режимі. Перевагою є універсальність: за один цикл можна зменшити вологість зерна як на 2%, так і на 20%. Недоліком є обмежений обсяг оброблюваного зерна за один цикл.

За видом палива зерносушарки поділяють на ті, що працюють на природному або зрідженому газі, дизельному паливі або твердому паливі.

За продуктивністю:

- Фермерські – до 10 т/год.

- Середньої потужності – до 50 т/год, придатні для малих та середніх підприємств.

- Великої потужності – понад 50 т/год, використовуються на великих агропромислових комплексах із власними елеваторами для зберігання та перевалки зерна.

Далі розглянемо основні конструктивні види зерносушарок:

- Шахтні сушарки.

Зерносушарки прямої дії призначені для сушіння зерна будь-яких культур і широко використовуються як основна лінія обробки на підприємствах. Сушіння відбувається у вертикальних шахтах, де зерно пересувається самопливом у

тонкому шарі (близько 140 мм), що дозволяє значно зменшити витрати палива та підвищити швидкість процесу. Такий тип конструкції забезпечує широкий діапазон регулювання вологості: за один прохід сировини вологість зерна може знижуватися на 15–18%, що є високим показником ефективності. Шахтні зерносушарки придатні для всіх видів культур завдяки стінкам із суцільного металу товщиною 2 мм із додатковим утепленням та жаростійким наповнювачем. Продуктивність сушарки залежить від комплектації; для середнього господарства площею до 1000 га достатньо обладнання потужністю 100–150 тонн зерна на добу.

- Колонкові сушарки.

Конструкція сушарки виконана модульно і складається з колон, у яких здійснюється поперечна подача агента сушіння. Продуктивність установки прямо пропорційна кількості секцій. Завантаження зерна відбувається у верхній частині сушарки, де матеріал рівномірно розподіляється і надходить у колони. До основних недоліків цієї конструкції відносяться інтенсивне утворення зернового пилу, обмеження за розміром зерна через конструктивні особливості стінок, їх пошкодження під час руху зернової маси, а також недостатній відвід пари, що виділяється під час процесу сушіння.

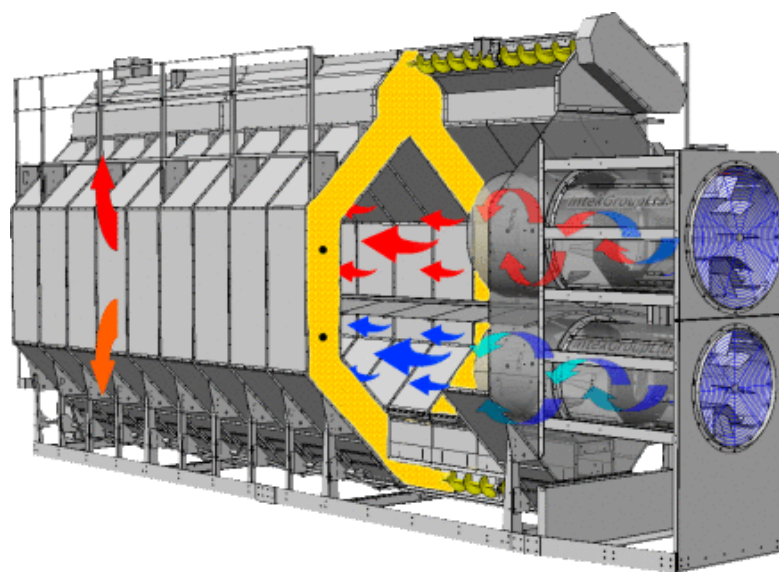


Рис. 1.2. Принцип роботи колонкових сушарок зерна

- Карусельні сушарки.

Карусельна зерносушарка призначена для висушування зерна і складається з сушильної камери, обмеженої зовнішніми та внутрішніми огорожами, з перфорованим днищем, виконаним у вигляді обертової карусельної платформи. Це обладнання прямої дії, у якому зерно переміщується вертикальним шаром під час сушіння. Така конструкція дозволяє ефективно обробляти зерно з високим вмістом вологи, однак її продуктивність нижча, а енергоспоживання перевищує показники шахтних сушарок.

- Баштові сушарки.

Принцип роботи карусельної зерносушарки аналогічний до інших потокових сушарок: вологе зерно подається зверху, а після проходження через сушильну камеру з верхньої частини воно виходить сухим та охолодженим [7]. Нагрівання здійснюється шляхом спалювання природного газу, проте конструкцію можна адаптувати для використання альтернативних джерел палива, таких як пелети, дрова або брикети із соломи чи відходів соняшника. Процес сушіння відбувається за рахунок продування нагрітим агентом через простір між двома вертикально розташованими сітчастими циліндрами, всередині яких встановлено кілька змішувачів зерна для забезпечення рівномірного сушіння. Основними перевагами такої конструкції є відсутність налипання та блокування зерна завдяки оптимальній відстані до 320 мм між стінками циліндрів, що сприяє ефективному просушуванню. Додатковою перевагою є технологія попереднього нагріву повітря шляхом рекуперації тепла із висушеного зерна.

- Мобільні сушарки.

Такі зерносушарки можуть функціонувати як у циклічному, так і у потоковому режимі, залежно від комплектації та потреб користувача. Серед мобільних зерносушарок найбільш популярними є циклічні моделі завдяки простоті налаштування та мобільності – можливості швидко переміщати обладнання на інші ділянки. Вони відзначаються високою зручністю у використанні та економічністю, оскільки не потребують додаткових будівельних робіт, проектної документації та погоджень. Модельний ряд мобільних

зерносушарок досить широкий і охоплює об'єми від 9 до 102 м³ готового продукту за один цикл сушіння, що дозволяє їм конкурувати зі стаціонарними сушарками. При використанні цих конструкцій слід враховувати, що деякі зернові та олійні культури, такі як кукурудза чи соя, під час нагрівання до робочої температури здатні збільшувати об'єм (залежно від сорту, початкової вологості, вмісту клейковини та інших параметрів), а під час завершального сушіння та охолодження – зменшуватися.



Рис. 1.3. Баштова зерносушарка

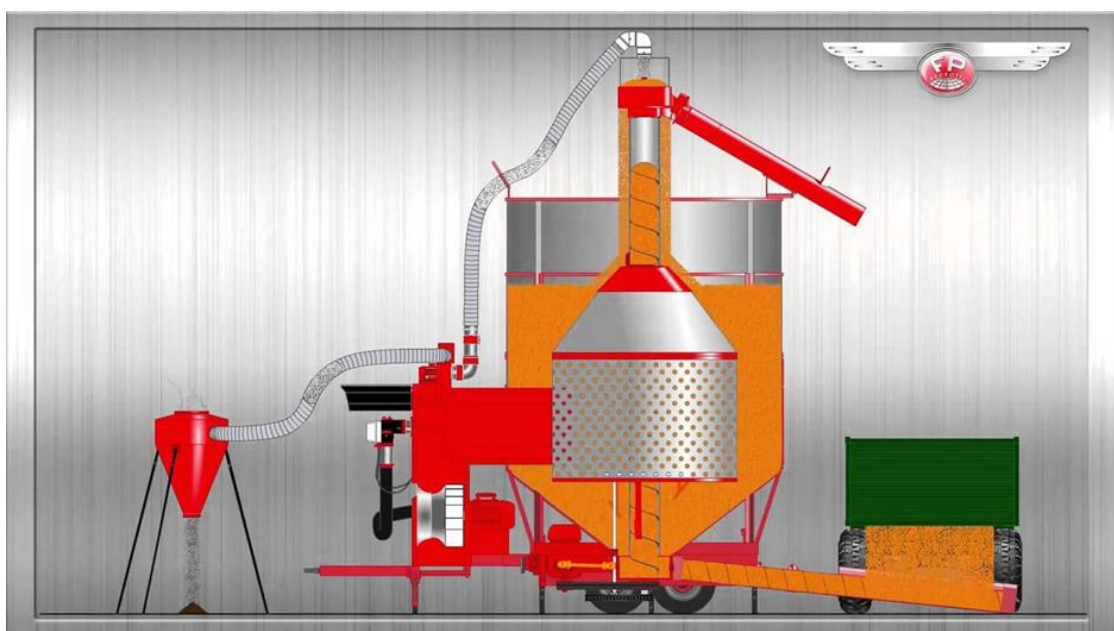


Рис. 1.4. Мобільна зерносушарки під час завантаження

У розділі, присвяченому видам зерносушильних комплексів, доцільно зазначити питання їхнього технічного обслуговування та ремонту. Загалом ремонтні роботи включають різні види втручань, серед яких: фарбування фасадів, герметизація швів, зашпаровка тріщин тощо. Особлива увага приділяється безпосередньо зерносушильному обладнанню, зокрема пальникам і теплогенераторам, від справності яких суттєво залежить якість обробленого зерна. Для забезпечення тривалого збереження зерна у кондиційному стані необхідно запобігати проникненню повітря та вологи в ємності. Враховуючи специфіку конструкції зерносушильних комплексів, ремонтні роботи повинні виконуватись виключно кваліфікованими фахівцями, які мають практичний досвід обслуговування подібних агрегатів.

1.4. Режими та стандарти сушіння зерна

Різні види сільськогосподарських культур потребують диференційованого підходу до процесу сушіння. Якість обробленого зерна та його придатність до тривалого зберігання визначаються умовами та стандартами, за якими здійснюється процес сушіння [8].

Допустимі технологічні показники вологості зерна залежно від тривалості його зберігання наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Величина рівня вологості у % в залежності від термінів зберігання

Культура	Термін зберігання, місяці		
	До 6	Від 6 до 12	Більше 12
Пшениця	14	13	13
Ячмінь	14	12	12
Овес	14	12	12
Жито	13	12	12
Гречка	16	13	13

Продовження таблиці 1.1

Культура	Термін зберігання, місяці		
	До 6	Від 6 до 12	Більше 12
Льон	9	7	7
Ріпак	10	8	8
Просо	10	9	9
Сорго	14	13	13
Соя	13	12	11
Насіння соняшника	10	9	9
Соняшник олійний	10	8	8
Кукурудза	15	14	13
Боби	16	14	13

Добре зберігається переважно сухе зерно, тобто зерно з вологістю на 1–2% нижчою за допустиму технологічну межу. Це пояснюється значно зниженою ймовірністю розвитку плісені та інших грибкових захворювань у таких умовах. Проте навіть сухе зерно не здатне тривалий час зберігатися без проведення повітряної аерації - продування зерна свіжим сухим повітрям через спеціально передбачені канали, закладені під час проєктування зерносховищ.

Сучасні методи вентиляції включають використання аераторів зерна, які представляють собою пустотілі шнеки діаметром від 150 до 250 мм. Їх встановлюють безпосередньо в масив зерна (зазвичай у складах із насипом до 5 м висоти) за допомогою спеціальної техніки. Після підключення до повітряної мережі через перфоровану поверхню шнека відбувається подача повітря під тиском у нижні шари зерна, що забезпечує ефективну аерацію.

При зберіганні зерна середньої вологості виникає ризик посилення біохімічного дихання, а також розвитку мікроорганізмів і шкідників. Зокрема, зерно з вологістю, що перевищує критичний рівень на 2–3%, швидко втрачає свої якісні показники, що суттєво обмежує терміни його зберігання.

Сушіння застосовується при підвищеній вологості зібраного зерна, а також для термічного знезараження від шкідників. У разі наявності різних партій насамперед обробляють зерно з високою вологістю, уражене або з ознаками самозігрівання. При заготівлі різних сортів пшениці пріоритет віддається сушінню зерна твердих, міцних та цінних сортів [9].

Сушіння є критичною операцією, що потребує суворого дотримання технологічних правил та інструкцій. До основних положень процесу належать:

- формування однорідних за вологістю партій зерна, бажано очищеного, особливо при використанні прямоочних зерносушарок. Різниця вологості між окремими партіями не повинна перевищувати 2–3%, що забезпечує рівномірний режим сушіння, прискорює процес та зменшує витрати палива;

- дотримання рекомендованих температурних режимів відповідно до термостійкості культури, її початкової вологості та призначення зерна. Це є критично важливим для насінневого та продовольчого зерна, оскільки забезпечує збереження схожості та високих технологічних властивостей;

- завершення сушіння при встановленій вологості для конкретної культури, оскільки пересушування призводить до підвищеного подрібнення зерна та збільшення енергетичних витрат;

- охолодження нагрітого зерна, що гарантує його стабільне та надійне зберігання.

Різні види зернових культур потребують диференційованого підходу до процесу сушіння. Зокрема, пшеницю обробляють із застосуванням варіабельних температурних режимів з урахуванням властивостей клейковини: при низькій якості клейковини температуру підвищують для її зміцнення, тоді як для міцної клейковини її знижують, щоб зберегти або покращити якість зерна. Підвищені температури сприяють певному зміцненню клейковини, а понижені – ні.

М'які температурні режими застосовують для сушіння цінних, сильних та твердих сортів пшениці. Проросле або пошкоджене шкідниками зерно, яке формує слабку клейковину, сушать із підвищеною температурою, проте з постійним контролем режиму. Водночас сильно заражене або пошкоджене зерно

може виявитися недоцільним для сушіння з економічної точки зору.

Вибір режиму сушіння визначається також конструктивними особливостями зерносушарки. Для шахтних прямоточних зерносушарок параметри режиму встановлюють відповідно до вимог, наведених у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

**Режими сушіння продовольчого зерна пшениці у сушарках шахтних
прямоточних**

Якість клейкови- ни (число одиниць приладу ІДК)	Воло- гість, %	Пропуск крізь су- шарку	Максималь- на темпера- тура нагрі- ву, °С	Максимальна температура тепло- носія, °С		
				Одноступінчас- тий режим	Двоступінчас- тий режим	
					Перша зона	Друга зона
Добра (45-75)	≤20,0	-	50,0	140,0	130,0	150,0
	>20,0	Перший	45,0	110,0	100,0	120,0
		Другий	50,0	130,0	120,0	140,0
Міцна (до 40)	≤20,0	-	45,0	120,0	110,0	130,0
	>20,0	Перший	40,0	90,0	80,0	100,0
		Другий	45,0	110,0	100,0	120,0
Слабка (понад 80)	≤20,0	-	60,0	150,0	140,0	160,0
	>20,0	Перший	55,0	120,0	110,0	130,0
		Другий	60,0	140,0	130,0	150,0
Пшениця сильна, тверда. Цінних сортів	≤20,0 >20,0	-	50,0	100,0	100,0	110,0
		Перший	45,0	90,0	90,0	100,0
		Другий	50,0	100,0	100,0	110,0

Під час кожного проходження зерна крізь сушильну установку його вологість повинна зменшуватись не більш ніж на 6–8%. Якщо необхідно досягти більшого зниження вологості, зерно пропускають через сушарку кілька разів.

У рециркуляційних зерносушарках процес відбувається ефективніше - зниження вологості забезпечується за один пропуск завдяки постійній циркуляції зернових потоків у шахтах. При цьому близько двох третин уже висушеного зерна повертається для повторного змішування з вологим матеріалом, а решта третина надходить у зерносховище [11].

Технологічна схема рециркуляційного сушіння передбачає п'ять послідовних етапів:

1. Змішування сирого холодного зерна з попередньо висушеним і нагрітим матеріалом.
2. Нагрівання суміші до заданої температури впродовж короткого проміжку часу.
3. Відлежування зернової суміші в спеціальній ємності для вирівнювання вологи та температури.
4. Основне сушіння, під час якого відбувається інтенсивне видалення вологи.
5. Охолодження зерна до температури, що забезпечує його безпечно подальше зберігання.

Серед різних технологічних схем рециркуляційного сушіння найбільш ефективною вважається двоконтурна система, яка забезпечує оптимальний баланс між енергоефективністю та стабільністю технологічного процесу. Застосування двох контурів дозволяє спростити експлуатацію обладнання, підвищити рівень автоматизації процесу сушіння, а також досягти приросту загальної ефективності, зниження енергетичних витрат і підвищення рентабельності виробництва.

Температурний режим у рециркуляційних зерносушарках визначається комплексом факторів, зокрема вихідною вологістю зерна, якісними характеристиками клейковини, а також наявністю чи відсутністю систем попереднього нагрівання.

У сушарках без систем попереднього підігріву температурні режими встановлюються згідно з нормативними значеннями, наведеними у таблиці 1.3.

У рециркуляційних сушарках, оснащених пристроями для попереднього

підігрівання зерна, температурні параметри визначаються відповідно до значень, наведених у таблиці 1.4, що дозволяє забезпечити більш рівномірне сушіння та знизити теплові втрати.

Таблиця 1.3

Режими сушіння продовольчого зерна пшениці у сушарках шахтних рециркуляційних без додаткового підігрівання

Якість клейкови- ни (число одиниць приладу ІДК)	Воло- гість, %	Пропуск крізь су- шарку	Максималь- на темпера- тура нагрі- ву, °С	Максимальна температура тепло- носія, °С		
				Одноступінчас- тий режим	Двоступінчас- тий режим	
					Перша зона	Друга зона
Добра (45,0-75,0)	≤20,0	Перший	50,0	140,0	130,0	150,0
	>20,0	Другий	50,0	130,0	120,0	140,0
Міцна (до 40,0)	≤20,0	Перший	45,0	120,0	110,0	130,0
	>20,0	Другий	45,0	110,0	100,0	120,0
Слабка (понад 80,0)	≤20,0	Перший	60,0	150,0	140,0	160,0
	>20,0	Другий	60,0	140,0	130,0	150,0
Пшениця сильна, тверда. Цінних сортів	≤20,0	Перший	50,0	105,0	100,0	110,0
	>20,0	Другий	50,0	95,0	90,0	100,0

**Режими сушіння продовольчого зерна пшениці у сушарках шахтних
рециркуляційних із додатковим підігріванням**

Якість клейкови- ни (число оди- ниць приладу ІДК)	Вологість, %	Максимальна тем- пература нагрівання зерна, °С	Максимальна тем- пература в камері нагрівання зерна, °С
Добра (45,0-75,0)	≤20,0	50,0	350,0
	>20,0	50,0	330,0
Міцна (до 40,0)	≤20,0	45,0	300,0
	>20,0	45,0	250,0
Слабка (понад 80,0)	≤20,0	60,0	370,0
	>20,0	60,0	350,0
Пшениця сильна, тверда. Цінних сортів	≤20,0	50,0	330,0
	>20,0	50,0	300,0

Як допоміжні елементи технологічного комплексу застосовуються теплообмінні колонки різного типу дії - із вільним падінням зернової маси або з режимом псевдозрідження. У зазначених пристроях тривалість перебування зерна в зоні теплового впливу не перевищує 8–10 секунд, що дозволяє підвищити температуру агента сушіння на вході до теплогенератора у межах 250–370 °С, залежно від показників якості клейковини продовольчої пшениці. При цьому суворо контролюється, щоб температура нагрітого зерна не перевищувала гранично допустимих значень, оскільки перевищення цього параметра може призвести до втрати технологічних властивостей та зниження якості кінцевого продукту.

Рециркуляційні зерносушарки характеризуються комплексом технологічних переваг, що забезпечують підвищену ефективність процесу сушіння.

По-перше, відсутня необхідність попереднього сортування зернових партій за рівнем вологості, оскільки технологічна схема забезпечує автоматичне

вирівнювання параметрів зернової маси під час рециркуляції.

По-друге, процес сушіння може здійснюватися в енергоощадному, так званому «м'якому» режимі, що дозволяє зменшити теплові втрати та оптимізувати витрати енергоресурсів. Додаткове оснащення сушильного обладнання попередніми нагрівальними пристроями сприяє подальшій інтенсифікації процесу сушіння та зниженню енергетичних витрат, забезпечуючи при цьому стабільність якості висушеного матеріалу.

Температурні режими теплоносія, наведені в таблицях 1.2–1.4, переважно відповідають умовам експлуатації вітчизняних шахтних зерносушарок типу ДСП, у яких реалізовано традиційну технологію сушіння пшениці. Для зарубіжних зерносушильних агрегатів, що відрізняються конструктивними особливостями, параметри теплоносія задаються відповідно до паспортних технічних характеристик обладнання, однак температура нагрівання зерна повинна відповідати рекомендованим нормативним значенням [12].

Ключовим параметром, який визначає ефективність і безпечність процесу сушіння, є температура зернової маси. У сушильних установках, що не оснащені системою дистанційного термометричного контролю, температуру зерна доцільно вимірювати з інтервалом не рідше ніж один раз на дві години для запобігання перегріву.

Кожна культура має свої специфічні температурні межі сушіння. Зокрема, жито та ячмінь характеризуються підвищеною термостійкістю, що дозволяє здійснювати нагрівання зерна до 60 °С, за винятком пивоварного ячменю, який вимагає збереження високої схожості. Для останнього гранично допустима температура становить 40 °С при вологості до 19 % і 45 °С за підвищеного вмісту вологи.

Овес характеризується відносно високою термостійкістю і може нагріватися до температури 50 °С незалежно від початкової вологості зерна. Проте під час процесу сушіння необхідно здійснювати постійний контроль стану зернової маси, оскільки внаслідок підсихання можливе відшарування плівки від ядра, що зумовлює погіршення тепло- та масообмінних умов у зерносушарці.

Горох відзначається підвищеною чутливістю до температурного впливу, тому під час сушіння існує ризик розтріскування оболонки зерна. З огляду на це процес слід проводити у щадному режимі: нагрівання зерна до 40–45 °С, зниження вологості не більше ніж на 2–3 % за один цикл сушіння, з обов'язковим проміжним відлежуванням зернової маси для вирівнювання внутрішньої вологи.

Ріпак товарний із початковою вологістю до 13 % висушують за температури теплоносія 80–90 °С, забезпечуючи нагрівання насіння до 50 °С. За підвищеної вологості показники температури необхідно зменшити відповідно на 10–20 °С для теплоносія і на 5–10 °С для насіння. У сушарках без системи перемішування насіння температуру теплоносія обмежують рівнем 60 °С. Для забезпечення стабільності процесу сушіння сушильні установки, призначені для обробки ріпаку, слід максимально герметизувати, запобігаючи винесенню насіння з робочої шахти апарата.

Насіннєве зерно підлягає сушінню за помірних теплових режимів, що забезпечує збереження його схожості та біологічної активності. У шахтних зерносушарках температуру нагрівання насіння встановлюють залежно від початкової вологості та виду культури. За вологості до 19 % температура нагрівання не повинна перевищувати 40 °С для пшениці, жита, ячменю та вівса, і 35 °С - для гороху. При підвищеній вологості температуру зменшують на 5 °С, застосовуючи ступінчасті режими сушіння, які сприяють більш рівномірному видаленню вологи та мінімізації термічних пошкоджень.

Для насіння ріпаку оптимальні температурні умови визначаються за рівнем вологості:

- за 17 % і нижче - нагрівання до 40 °С;
- при 17–19 % - 37 °С;
- за вологості понад 19 % - 35 °С.

Контроль температурного режиму проводять у коробах нижнього ярусу сушильної шахти, що забезпечує можливість оперативного моніторингу теплового впливу на насіннєвий матеріал та своєчасного коригування параметрів процесу для запобігання перегріванню й втраті посівних якостей [13].

У сучасній агропромисловій практиці експлуатують широкий спектр сушильних установок, серед яких найпоширенішими є шахтні прямоточні та рециркуляційні, колонкові та бункерні конструкції, що можуть виконуватись у стаціонарному або пересувному виконанні. Вибір конкретного типу обладнання зумовлюється технологічними параметрами виробництва, необхідною продуктивністю та вимогами до кінцевої якості зерна.

Ефективність процесу сушіння визначається насамперед дотриманням оптимальних температурно-вологісних режимів для кожної культури, збереженням посівних і технологічних властивостей зерна, а також раціональним використанням енергетичних ресурсів при забезпеченні стабільної продуктивності сушильного процесу.

До найпоширеніших зразків вітчизняного обладнання належать зерносушарки типів АІ-ДСП-50, АІ-УЗМ, ДСП-32от, СЗМ-540, АІ-УСШ, тоді як серед зарубіжних аналогів широко застосовуються установки компаній SUKUP, MC, GSI, DELUX (США), RIELA (Німеччина) та інших виробників.

Перспективним напрямом розвитку є використання блочно-модульних сушильних систем, які забезпечують поступове масштабування потужності залежно від потреб господарства, а також мобільних зерносушарок, призначених для оперативного висушування зерна безпосередньо в місцях його збирання.

Зарубіжні сушильні комплекси вирізняються підвищеною енергоефективністю та меншими питомими витратами палива, тоді як вітчизняні установки характеризуються вищою рівномірністю процесу сушіння, що досягається завдяки зменшеній товщині шару зерна між коробами (до 200 мм), яка забезпечує більш однорідне прогрівання зернової маси та зменшення термічних втрат.

Продуктивність зерносушильних установок оцінюють у планових одиницях, де за базову приймають 1 т продовольчого зерна пшениці, висушеного зі стартової вологості 20% до кінцевої 14%. Для визначення фактичної продуктивності сушарки у планових одиницях застосовують наступну формулу:

$$M_{пл} = M_{ф} \cdot K_{в} \cdot K_{к} ,$$

де $M_{пл}$ - маса зерна після сушіння, використана для розрахунку планової продуктивності, позначається як маса просушеного зерна, вимірюється у тоннах (т) і служить вихідним параметром для обчислення планових одиниць;

$M_{ф}$ - маса зерна перед сушінням, тобто сирого зерна, вимірюється у тоннах (т) і використовується як базовий параметр для розрахунку обсягу сировини, що підлягає обробці у зерносушарці;

K_v, K_k - коефіцієнти перерахунку маси висушеного зерна у планові одиниці визначаються з урахуванням вологості зернової маси, виду культури та її функціонального призначення.

Проектну витрату палива під час процесу сушіння прийнято визначати у вигляді умовної величини. Під умовним паливом розуміють теоретичний вид палива, що при повному згорянні виділяє 29,2 МДж теплоти. Для оцінки питомої витрати такого палива застосовують відповідну розрахункову формулу, що дозволяє уніфікувати показники енергоспоживання та порівнювати ефективність різних сушильних установок:

$$B_n = K_n \cdot B_n \div M_{пл},$$

де B_n - питома витрата умовного палива на одну планову одиницю зерна, кг/т;

B_n - маса фактично використаного природного палива, кг;

$M_{пл}$ - маса зерна, приведена до планових одиниць, т;

K_n - коефіцієнт переведення маси натурального палива в умовне з урахуванням його теплотворної здатності.

У ході сушіння спостерігається зменшення маси зерна, що визначається початковим та кінцевим вмістом вологи [14]. Однак фактичне зниження маси не дорівнює прямій різниці вмісту вологи, тому для точного визначення втрат застосовують наступну формулу:

$$X = M_{ф} \cdot 100 \cdot (a - b) \div 100 - b ,$$

де X - відносна втрата маси зерна у відсотках, %;

a - початковий вміст вологи в зерні перед сушінням, %;

b - кінцевий вміст вологи після сушіння, %;

M_{ϕ} - маса висушеного зерна, приведена до планових одиниць, кг.

1.5. Аналіз існуючих систем управління зерносушильним комплексом

Більшість обладнання на сучасних зерносушильних комплексах адаптовано під комп'ютерне керування та може контролюватись оператором з віддаленого терміналу. Окрім покращення візуалізації процесів сушіння, зберігання, транспортування зерна і управління параметрами обладнання, комп'ютер повністю виключає помилки в комутаціях потоку зерна, що є дуже важливим при функціонуванні великого і складного комплексу [15].

Мікропроцесорна система з дисплеєм Touch Screen (керуванням торканням) здійснює наступні дії:

- керування роботою механізмів сушіння та обладнання елеватора;
- автоматичне керування параметрами роботи сушки та обладнання елеватора;
- контроль правильності складання транспортних магістралей;
- контроль руху зерна транспортними магістралями;
- затримка (блокування) роботи пристроїв при помилках у комутації потоку зерна.

Платформа «ПоТ» зерносушильного комплексу.

Метою диспетчерського управління є максимально ефективно ведення виробничих процесів згідно з встановленими плановими показниками, підготовленими на етапі планування виробництва.

ПоТ платформа – це програмне забезпечення, призначене для підключення промислових інтернет-речей (датчиків, контролерів та інших пристроїв) до хмари і віддаленого доступу до них [16].

Дана система виконує наступні функції:

- Автоматизацію обладнання та технологічних процесів на лінійних елеваторах;
- Об'єднання всіх процесів в єдину послідовну систему.

До систему віддаленого управління можна віднести технологічний моніторинг процесів виробництва, планування та облік сировини, контроль за дотриманням технологічних регламентів, контроль стану технологічного обладнання, контроль ключових показників, звітність виробництва.

Усі диспетчерські завдання та процеси реєструються у системі та виконується контроль їх прогресу. Вибудований процес централізованого та розосередженого контролю позаштатних та аварійних ситуацій: індикація, ідентифікація, інформування.

Схематично робота системи автоматизації зерносушильного комплексу зображена на рисунку 1.5.

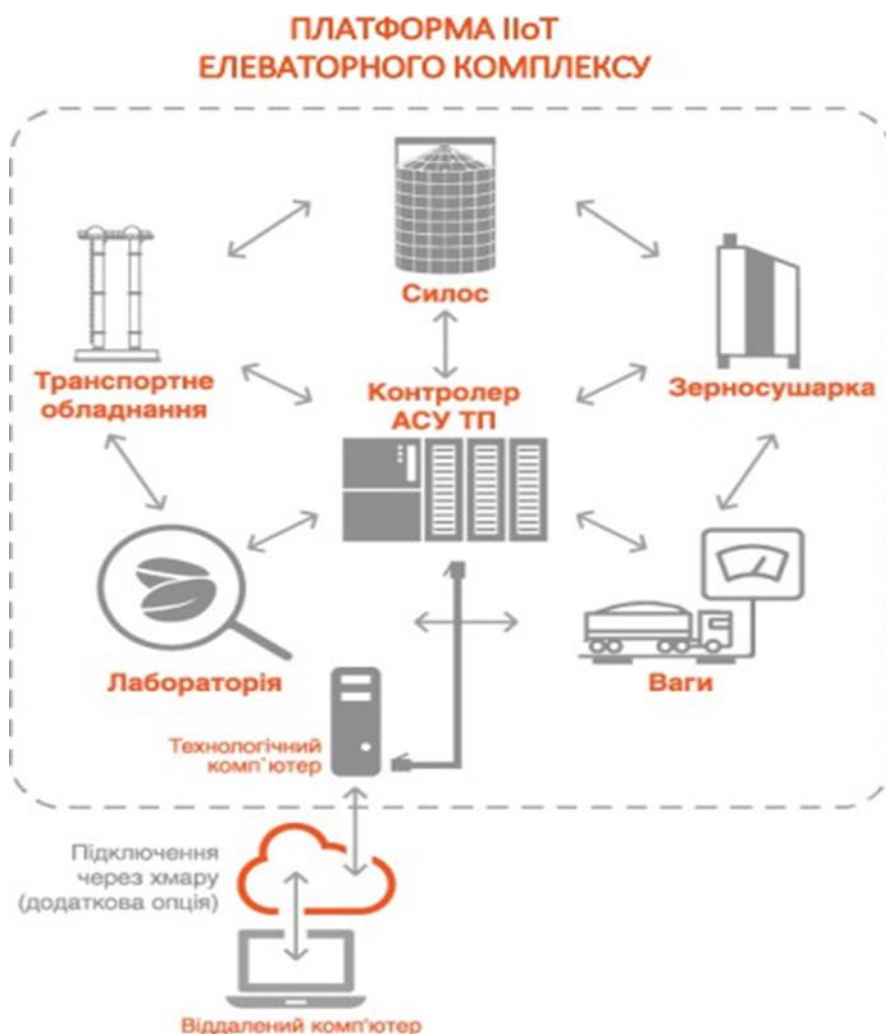


Рис. 1.5. Схема роботи автоматизованого зерносушильного комплексу

Основними перевагами даної системи є наступні пункти:

- База даних працює через клієнтський сервер.

- Хмарне зберігання даних.
- Інтеграція у будь-яку бухгалтерську систему.
- Відкритий код.
- Можливість віддаленого налаштування.

Програмне рішення реалізовано на платформі «PLCnext Technology» німецького електротехнічного гіганта «Phoenix Contact».

Відкритий код - це:

- Об'єктно-орієнтовані мови програмування.
- Використання програм із відкритим доступом.
- Забезпечення безпеки даних.
- Робота із великим обсягом даних (Big Data).

Приклад готової системи зображений на рисунку 1.6.

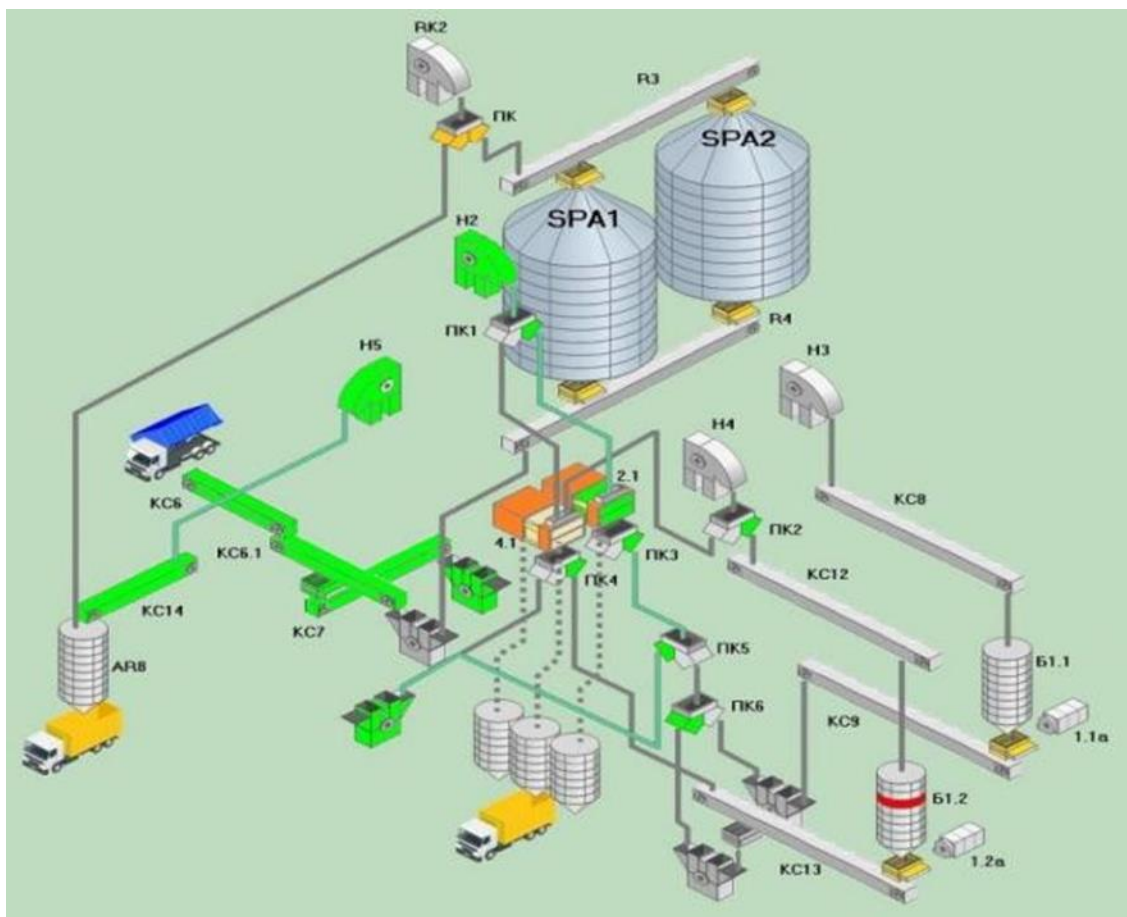


Рис. 1.6. Система віддаленого управління

Оперативне отримання інформації про простой устаткування з рівня

обладнання, проте є деякі стандартні варіанти автоматизації модульних та баштових зерносушилок виробництва GSI, Farm Fans (FFi), Mathews Company (MC), Sukup, Delux, Brock (Meyer), ADA Kurutma, TECO, Neodry та їх конструктивних аналогів [17]. Система дозволяє керувати завантаженням, вивантаженням, швидкістю вивантаження, роботою вентиляторів та пальників в автоматичному та ручному режимах з візуалізацією роботи пристроїв. Встановлення автоматизованої системи дозволить здійснювати контроль та введення робочих параметрів через сенсорну ПК панель, на яку виводяться всі необхідні для цього дані, такі як: температура сушильного агента у всіх існуючих камерах сушіння, температура продукту, що піддається сушці, параметри роботи пальника, швидкість шнеків завантаження і вивантаження, повідомлення системи безпеки. АСК зерносушильних комплексів дозволяє автоматично регулювати швидкість вивантаження відповідно до показань температури зерна в обраній камері сушіння.

1.6. Постановка задачі

Призначення розробки багатоконтурної АСК для зерносушильного комплексу полягає у тому, щоб мати можливість контролювати градієнт температури зерна у процесі сушіння та не пересушувати зернову масу. Розроблена система повинна чітко підтримувати задану температуру сушіння зерна та вологість зерна на виході із комплексу. Особливість даної системи у тому, що вона враховує вхідну вологість та температуру сушильного агента і за допомогою перехресних каналів підбирає оптимальний темп сушіння.

Метою магістерської роботи є дослідження функціонування зерносушильних комплексів за складних метеорологічних умов.

Для досягнення поставлених задач необхідно виконати такі взаємопов'язані завдання:

- Проаналізувати існуючі методи контролю температури та вологості на зерносушильних комплексах.

- Провести ідентифікацію експериментальних даних за допомогою програмного продукту Matlab.
- Виконати моделювання системи із передавальними функціями, знайденими в процесі ідентифікації.
- Розрахувати значущість передавальних функцій та проаналізувати, який контур є більш важливим у регулюванні.
- Спробувати декілька варіантів моделювання системи у програмному продукті Matlab, Simulink та вибрати оптимальний.
- Розробити імітаційну SCADA-систему у середовищі iFix.

Висновки до розділу 1

В результаті проведення аналізу технологічного процесу сушіння та підготовки зерна було вибрано структуру об'єкта керування та виявлено основні вхідні та вихідні величини: вхідна витрата сушильного агента, потужність механізму нагрівання сушильного агента на вході в агрегат; вихідні: температура сировини, вологість сировини.

Проілюстровані основні технологічні елементи комплексу для сушіння зерна. Описано принцип роботи та різновиди технічної апаратури. Детально описано обладнання, яке автоматизується для покращення роботи зерносушильного комплексу, що забезпечує кращу якість продукту та безпеку персоналу.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗЕРНОСУШИЛЬНОГО АГРЕГАТУ

Одним із найважливіших етапів у аграрній справі в Україні та у світі є потреба в створенні та розробці високоефективної математичної моделі зерносушильної техніки, яка б забезпечувала мінімальні витрати енергії та високу схожість насіннєвого матеріалу[18].

Регулювання температури повітря, у камері згорання зернових сушарок, є найважливішим фактором усього автоматизованого процесу сушіння зерна. Важливо дотримуватися правильної технології сушіння, що є неможливим без автоматизації установки. Загальна структура установки для сушіння зерна зображена на рисунку 2.1.

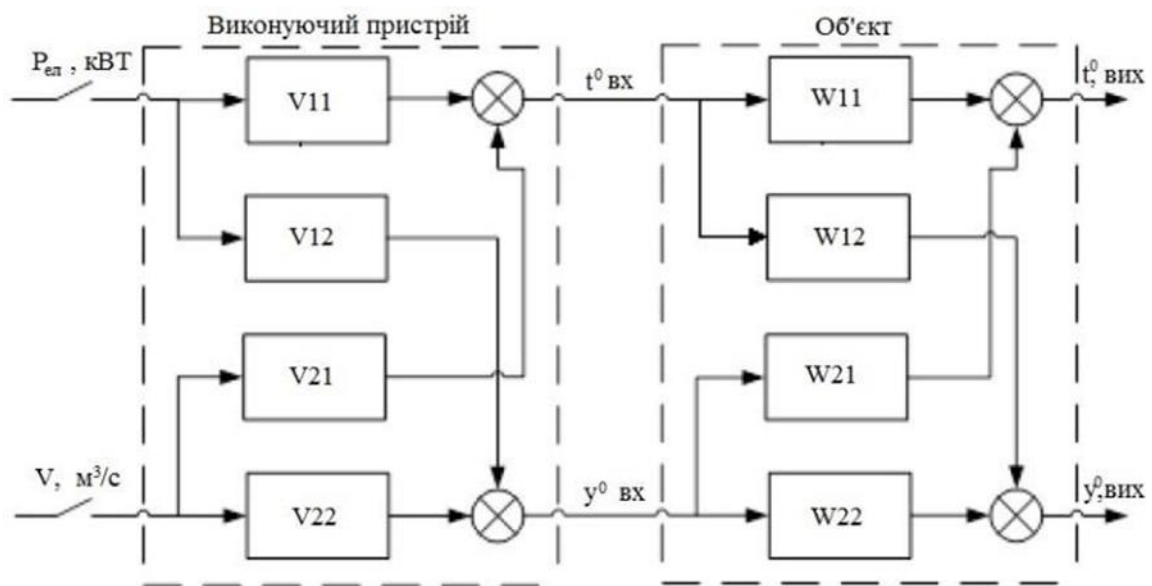


Рис. 2.1. Загальна структура установки для сушіння зерна

Де, функції V12, V11, V22, V21 та W12, W11, W22, W21 - це передавальні функції усього комплексу.

Для розуміння, як працює зернова сушарка розроблено принципову схему сушильного агрегату (рис 2.2). Роботу установки показано на прикладі мобільної сушарки циклічної дії з дизельним видом палива для нагрівання сушильного агента. Спосіб нагрівання агента буває різний, проте мета – однакова.

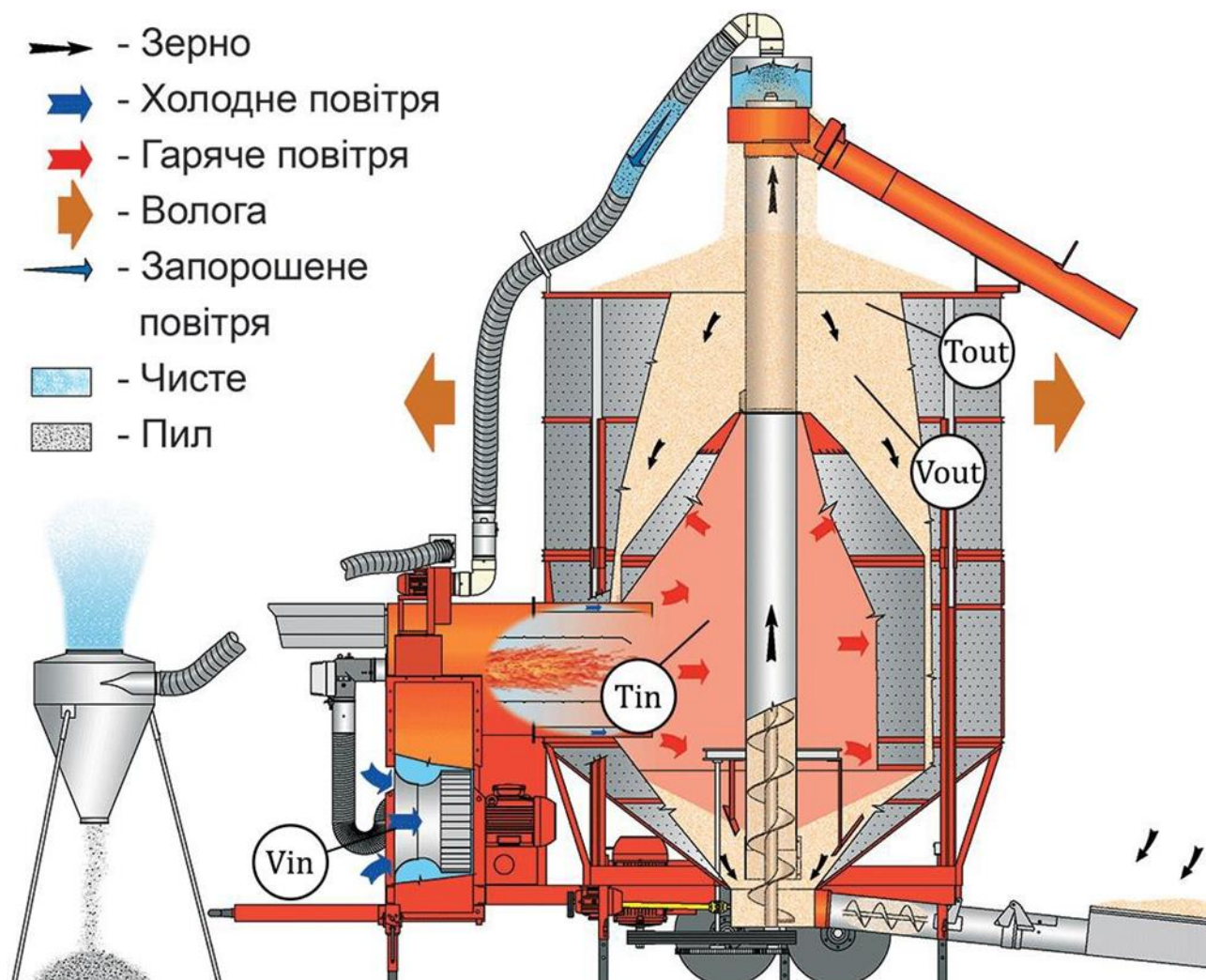


Рис. 2.2. Принципова схема мобільної зерносушарки: T_{in} - температура сушильного агента; T_{out} - температура зерна; V_{in} - вологість сушильного агента; V_{out} - відносна вологість зерна

2.1. Планування і проведення активного експерименту на об'єкті керування

У сушильних агрегатах, призначених для оброблення сільськогосподарської продукції, технологічні параметри змінюються поступово вздовж певних просторових координат. На відміну від об'єктів із зосередженими параметрами, у яких можна виокремити скінченну акумулюючу ємність, для систем із розподіленими параметрами таке виділення неможливе. У цьому випадку розглядається нескінченно мала елементарна ділянка - умовна акумулююча

ємність, що являє собою тонкий просторовий шар, орієнтований перпендикулярно до напрямку зміни основного технологічного параметра.

Побудова математичних моделей таких систем передбачає складання балансних рівнянь для зазначених елементарних об'ємів, у яких враховується перерозподіл масо- та теплових потоків. Отримані рівняння, що описують статику або динаміку цих нескінченно малих об'ємів, не є завершеними математичними моделями самі по собі - для їх повної формалізації необхідно задати відповідні граничні та, у разі динамічних процесів, початкові умови.

Моделювання сушильних установок як технологічних об'єктів із просторовим розподілом параметрів потребує врахування напрямів варіації температури, вологості чи інших характеристик у робочому об'ємі апарата. Ці зміни можуть мати лінійний характер - наприклад, уздовж осі (X), що описує зміну температури в шарі зерна, або радіальний - у разі аналізу температурного поля в циліндричному корпусі сушарки. У деяких випадках спостерігається комбінований характер розподілу, коли параметри змінюються одночасно в лінійному та радіальному напрямках, або сферичний розподіл, характерний для об'єктів із симетричними тепловими полями.

У кожному з наведених випадків підхід до вибору нескінченно малої буферної ємності є різним: при одномірному лінійному розподілі параметра це - пластина нескінченно малої товщини; при дво- або тривимірному лінійному розподілі - прямокутник чи паралелепіпед нескінченно малих розмірів; при радіальному розподілі - циліндр скінченного діаметра і нескінченно малої товщини; при сферичному розподілі параметра - порожниста сфера (оболонка) нескінченно малої товщини.

Раціональний вибір форми та розташування нескінченно малої акумулюючої ємності визначається геометрією об'єкта моделювання та напрямками просторового розподілу основних параметрів. Така елементарна ємність повинна бути розташована у довільній точці моделювального об'єкта. Граничні зміни визначального параметра в межах простору описуються через граничні умови, які задають допустимі межі його варіювання та визначають

просторове положення вибраної нескінченно малої ємності. Для можливості віднесення цієї ємності до будь-якої точки об'єкта необхідно обрати відповідну систему координат, орієнтовану за напрямками зміни визначального параметра.

Виходячи з наведеного, можна узагальнити, що процес математичного моделювання сушильного агрегату як об'єкта з розподіленими параметрами нерозривно пов'язаний із вибором відповідної просторової системи координат, накладеної на робочу область. У цій системі розташовується модельований об'єкт відповідно до напрямків зміни основного (визначального) параметра. Приклад фрагмента вхідних даних подано в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Фрагмент масиву початкових (вхідних) даних

Часовий діапазон, с	Температурний показник сушильного агента, °С	Відносна вологість повітряного теплоносія, %	Температурний стан зернової маси, °С	Вологісний вміст зернової маси у відносних одиницях, %
0	16,0	48,050	15,70	36,9050
2,43597	15,90	48,1350	15,60	36,890
4,87194	15,90	48,2350	15,60	36,790
7,30791	15,80	48,320	15,60	36,890
9,74388	15,80	48,320	15,60	36,790
12,17985	15,80	48,320	15,60	36,690
14,61582	15,80	48,320	15,60	36,790
17,05179	15,80	48,420	15,60	36,890
19,48776	15,80	48,420	15,60	36,790
21,92373	15,80	48,420	15,60	36,790
24,3597	15,80	48,420	15,60	36,890
26,79567	15,80	48,520	15,60	36,890
29,23164	15,80	48,520	15,60	36,690

Продовження таблиці 2.1

Часо- вий діапа- зон, с	Температур- ний показник сушильного агента, °С	Відносна вологість повітряного теплоносія, %	Температур- ний стан зернової маси, °С	Вологісний вміст зернової маси у відносних одиницях, %
31,66761	15,80	48,620	15,60	36,490
34,10358	15,80	48,620	15,60	36,390
36,53955	15,80	48,720	15,60	36,390
38,97552	15,80	48,620	15,60	36,390
41,41149	15,80	48,620	15,60	36,390
43,84746	15,80	48,620	15,60	36,190
46,28343	15,80	48,520	15,60	36,090
48,7194	15,80	48,520	15,60	36,190
51,15537	15,80	48,620	15,60	36,190
53,59134	15,80	48,620	15,60	36,190
56,02731	15,80	48,720	15,60	36,190
58,46328	15,80	48,820	15,60	36,190
60,89925	15,80	48,820	15,60	35,890
63,33522	15,80	48,920	15,60	35,790
65,77119	15,80	48,920	15,60	35,890
68,20716	15,80	48,820	15,60	36,090
70,64313	15,80	48,820	15,60	35,890

2.2. Ідентифікація каналів керування

Проведемо ідентифікацію об'єкта керування, спираючись на експериментальні дані. Для цього використовують ділянку встановлених значень приростів відповідних вхідних та вихідних змінних, отриманих за умови

ступінчастого впливу одного з керуючих параметрів, зокрема потужності нагрівача.

Завантажимо масив даних у ПП Matlab (рис. 2.3).



Name	Value
mi	2x2 idtf
mp	2x2 idss
out	1x1 SimulationOutput
steam	1112x2x2 iddata
t	1112x1 double
Tin	1112x1 double
Tout	1112x1 double
Vin	1112x1 double
Vout	1112x1 double

Рис. 2.3. Масив даних

Масив вхідних даних складається із наступних показників:

- Вхідна вологість – вологість атмосферного повітря, або вологість повітря, взятого із зони охолодження зерна. Умовне позначення – Vin.
- Вихідна вологість – вологість зерна на виході зерносушарки або під час сушіння зерна. Умовне позначення – Vout.
- Вхідна температура – температура повітря у камері згорання зерносушильного комплексу. Умовне позначення – Tin.
- Вихідна температура – температура зерна на виході зерносушарки або під час сушіння зерна. Умовне позначення – Tout.

Враховуючи, що канали регулювання є перехресними, необхідно провести ідентифікацію з урахуванням декількох входів та декількох виходів, так званим методом «TISO».

Запишемо масиви даних у код для ідентифікації (рис 2.4). Отримані дані необхідні для подальшої роботи та виведення графів залежності, це дасть змогу оцінити як відбувається кожний окремий процес.

```
>> steam = iddata([Tout,Vout],[Tin,Vin],2.435);
%steam1 = iddata([Tout,Vout1],[Tin,Vin],2.435);
steam.InputName = {'Tin';'Vin'};
steam.OutputName = {'Tout';'Vout'};
fx >>
```

Рис. 2.4. Запис даних

Виведемо графіки вихідних та вхідних змінних (рис. 2.5 - 2.8).

Запишемо у командному вікні Matlab наступні команди:

```
plot(steam(:,1,1))
```

```
grid on
```

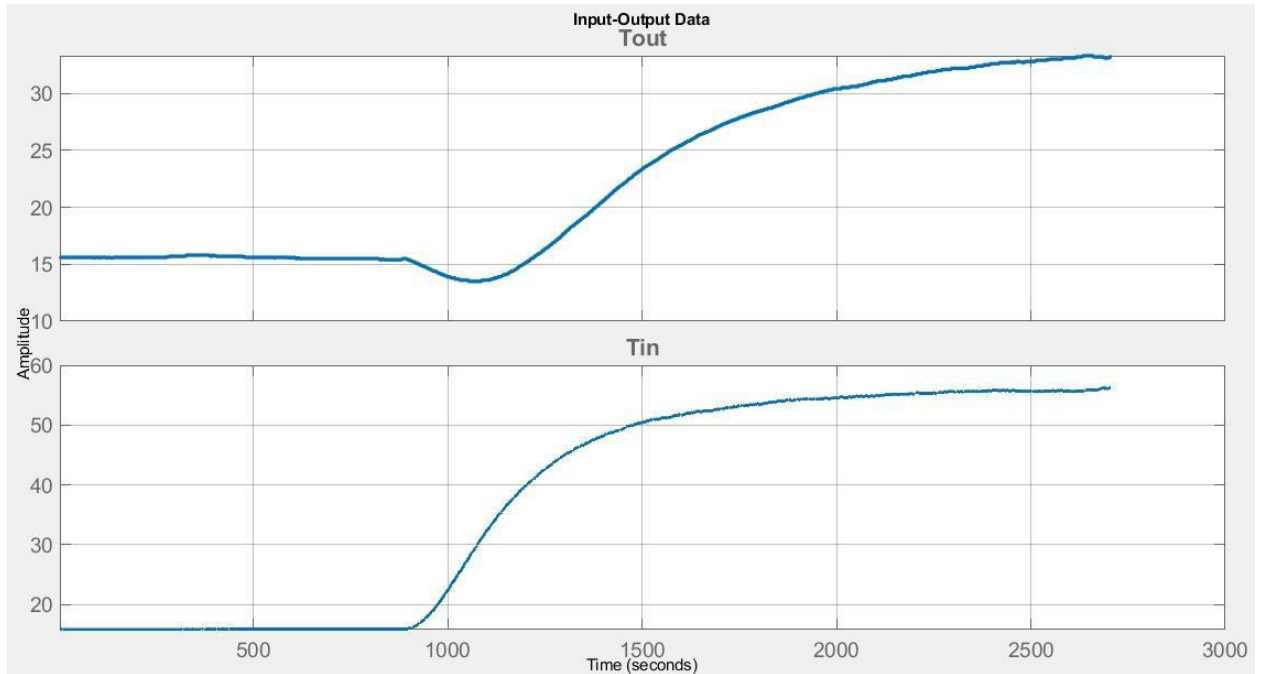


Рис. 2.5. Граф вихідної температури та вхідної температури

Як можна бачити з рис. 2.5, вихідна температура, тобто температура зерна у камері сушіння сильно залежить від вхідної температури, тобто температури нагрітого сушильного агента (в даному випадку повітря), так і має бути, оскільки це нормальний процес нагріву. На інтервалі часу приблизно від 900 до 1250 секунд можна спостерігати незначне зменшення температури зерна, це явище відбувається тому, що при нагріванні зерно спершу почне виділяти вологу з ядра, через що його показник вологості короткочасно стане більший, ніж був до нагрівання, а по-тім почнеться активний процес випаровування вологи і значення температури почне зростати до робочої.

```
plot(steam(:,1,2))
```

```
grid on
```

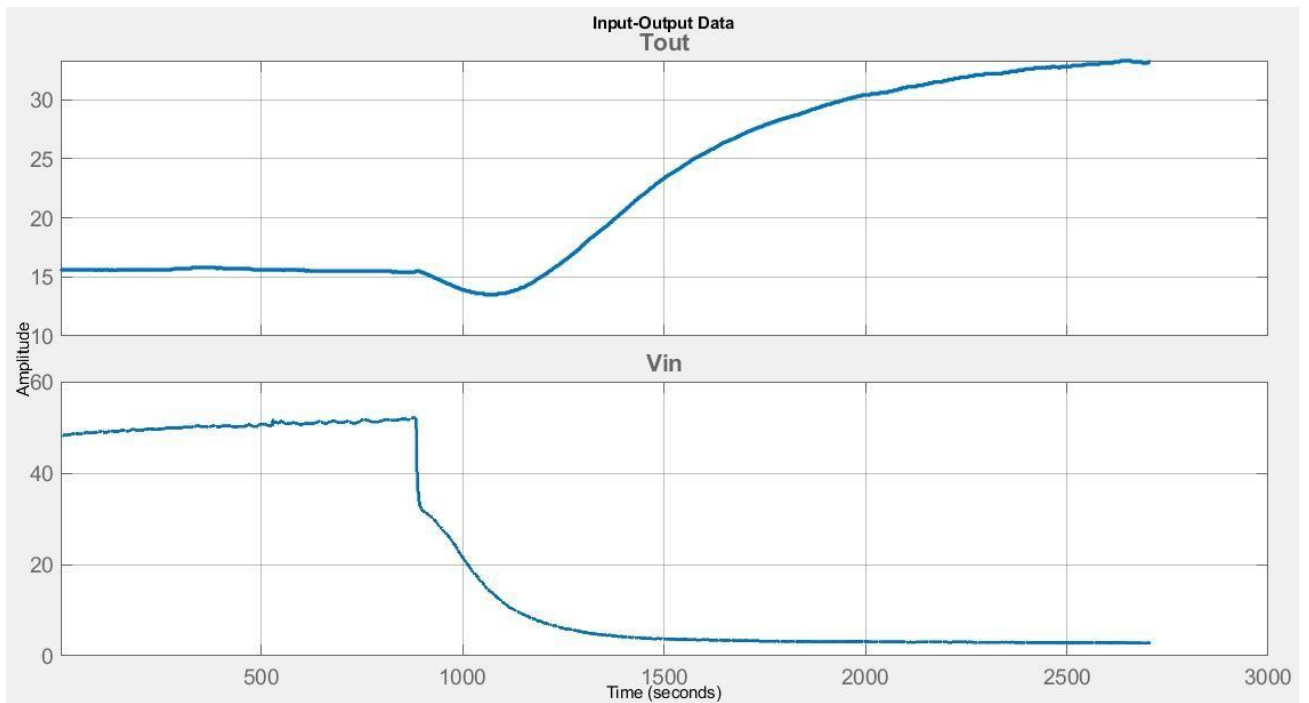


Рис. 2.6. Граф вихідної температури та вхідної вологості

```
plot(steam(:,2,1))
```

```
grid on
```

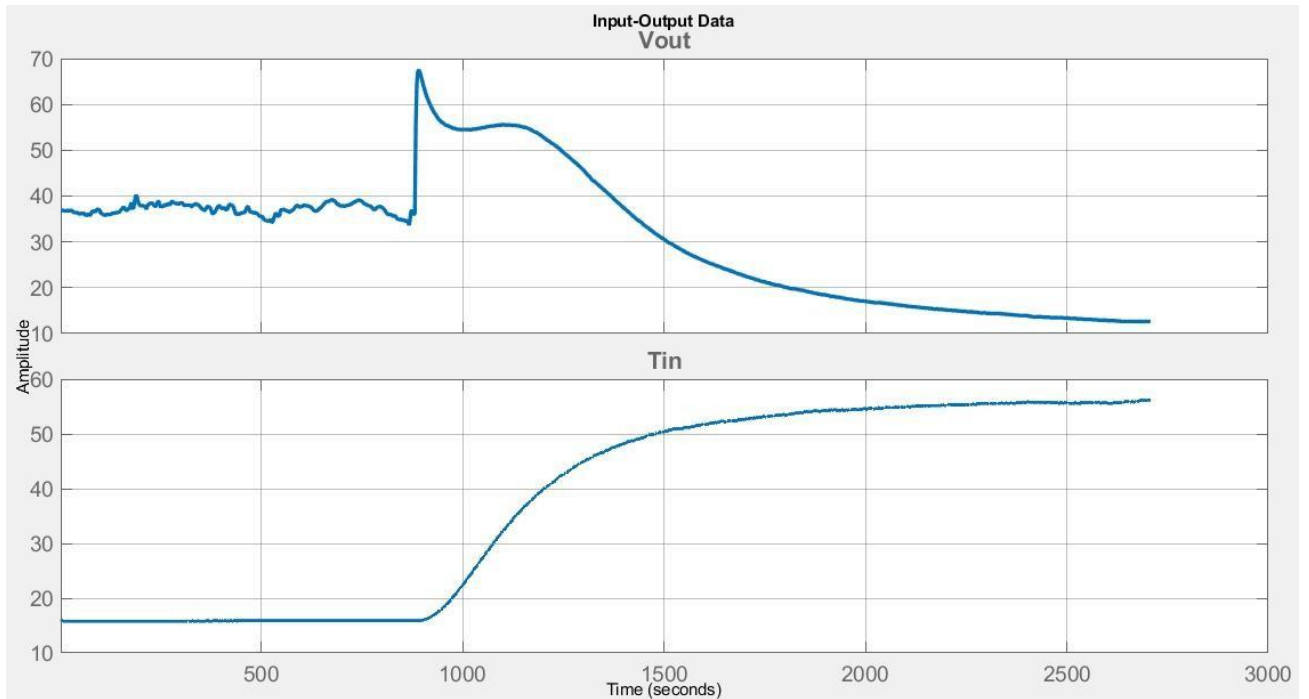


Рис. 2.7. Граф вихідної вологості та вхідної температури

```
plot(steam(:,2,2))
```

```
grid on
```

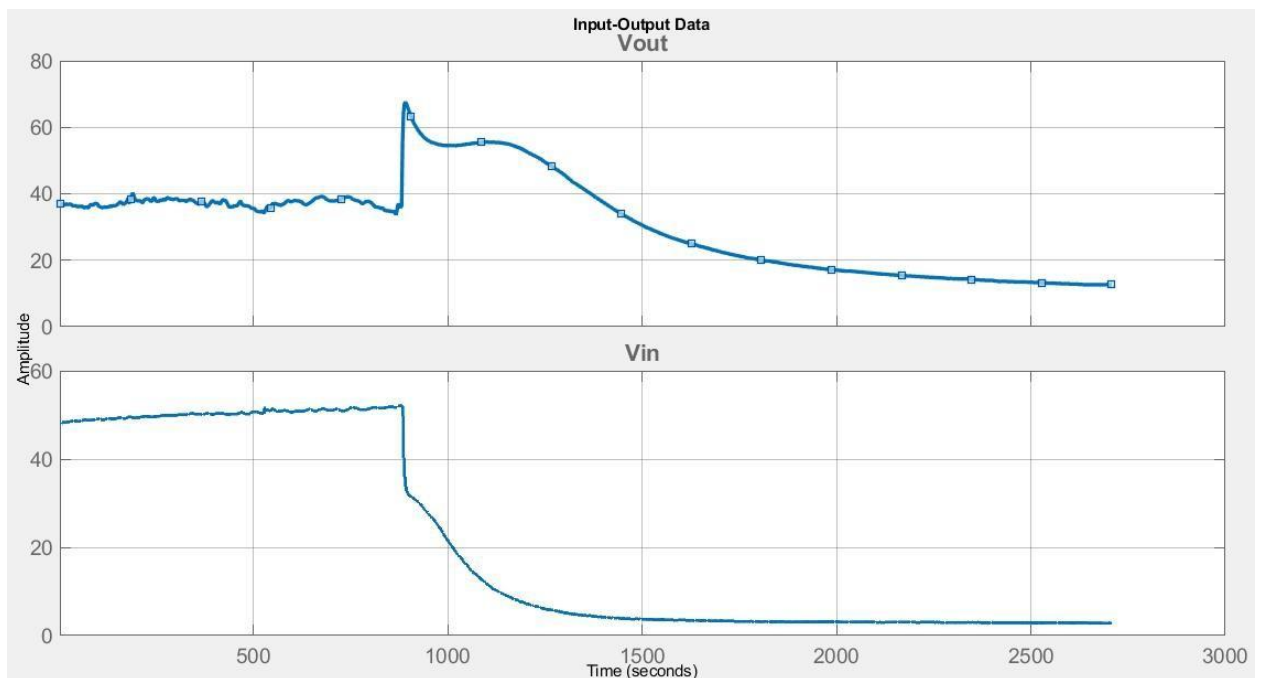


Рис. 2.8. Граф вихідної вологості та вхідної вологості

На графі вихідної вологості можна спостерігати неприродний стрибок (приблизно на $t=800$). Цей аномальний показник не дасть змоги отримати правильні передавальні функції об'єкта, оскільки на практиці такого різкого збільшення якісного показника не відбувається. Для вирішення даної проблеми необхідно виконати згладжування графа. На результат синтезу моделі це не вплине в негативному вигляді, оскільки ми тримаємо більш реалістичний граф вхідних даних, та точніше зможемо визначити передавальні функції для майбутньої системи.

Виконаємо операцію згладжування за допомогою медіанної фільтрації.

У варіанті за замовчуванням $y = \text{medfilt1}(x)$ застосовує одновимірний медіанний фільтр третього порядку до вхідного вектора « x ». Функція вважає сигнал рівним 0 за кінцевими точками. Вихід « y » має таку саму довжину, що й « x ».

Запишемо команду:

```
>> Vout=medfilt1(Vout,91);
```

```
hold on
```

```
plot(t,Vout);
```

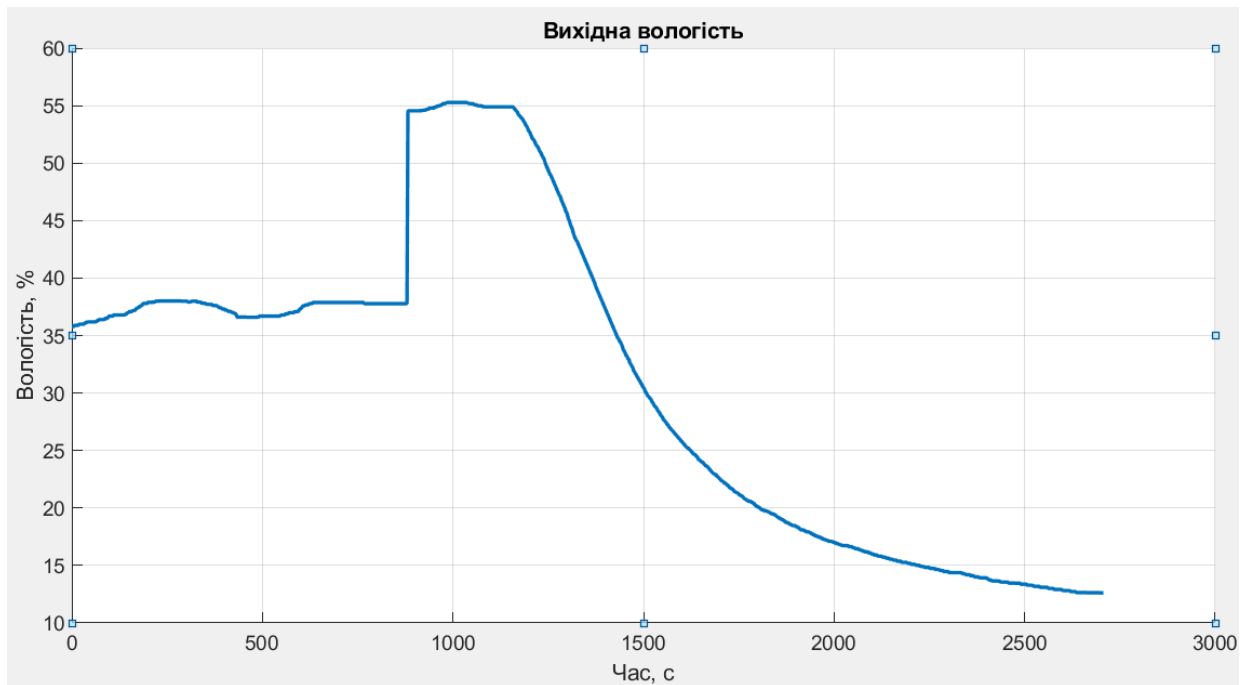


Рис. 2.9. Граф вихідної вологості після згладжування

Оцінимо значущість відповідей, тобто силу впливу входів на виходи (рис. 2.10). Введемо наступну команду: `showConfidence(impulseplot(mi),3)`.

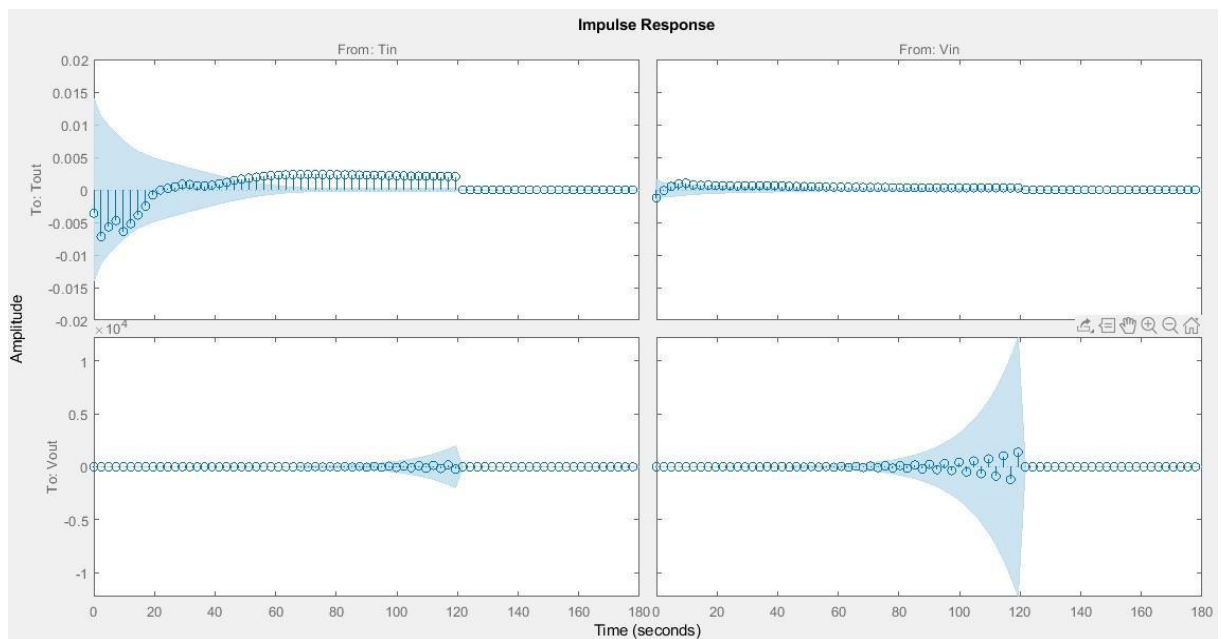


Рис. 2.10. Крокові та імпульсні реакції

З рисунку 2.24 можна зробити висновки, що домінують недіагональні впливи. Тобто на «Tout» в основному впливає «Tin», а «Vout» залежить від «Tin» та від «Vin». Дія «Vin» на «Tout» є слабкою.

Модель два входи – два виходи. Зробимо перевірку моделювання. Запишемо команду:

```
mp = ssest(steam(1:1112))
```

Отримаємо наступні результати:

mp = Continuous-time identified state-space model:

$$\frac{dx}{dt} = A x(t) + B u(t) + K e(t)$$

$$y(t) = C x(t) + D u(t) + e(t)$$

A = x1 x2 x3

x1 -0.002297 0.003406 0.003177

x2 -0.006717 -0.01958 -0.01282

x3 -0.009839 -0.01515 -0.02126

B = Tin Vin

x1 9.092e-05 -2.143e-05

x2 -0.0005514 1.818e-05

x3 -0.0006992 0.000183

C = x1 x2 x3

Tout -74.54 -4.775 0.1022

Vout151 -106.8 0.4764

D = Tin Vin

Tout0 0

Vout0 0

K = Tout Vout

x1 -0.001863 0.0003106

x2 -0.002225 -0.005054

x3 -0.01208 0.003619

Fit to estimation data: [99.56;95.72]% (prediction focus)

FPE: 0.0004012, MSE: 0.3596

Модель із двома входами та одним виходом (Two-Input-Single-Output Model).

Дослідження по каналі вологи.

Запишемо код:

```
steam=iddata([Tout,Vout],[Tin,Vin],2.435)
steam.InputName = {'Tin';'Vin'};
steam.OutputName = {'Tout';'Vout'};
m4 = tfest(steam(1:1112,'Vout',:),[1 2],[1 2])
compare(steam(1:1112),m4)
```

Результат виконання:

m4 = From input "Tin" to output "Vout":

$$W_{12} = \frac{1.827 \cdot s + 0.00008733}{s + 0.004903}$$

From input "Vin" to output "Vout":

$$W_{22} = \frac{-0.8451 \cdot s^2 + 0.004444 \cdot s + 0.00000402}{s^2 + 0.008855 \cdot s + 0.000002672}$$

Параметри: кількість полів: [1 2] кількість нулів: [1 2]

Кількість вільних коефіцієнтів: 8

Fit to estimation data: 93.05% FPE: 0.9211, MSE: 0.903

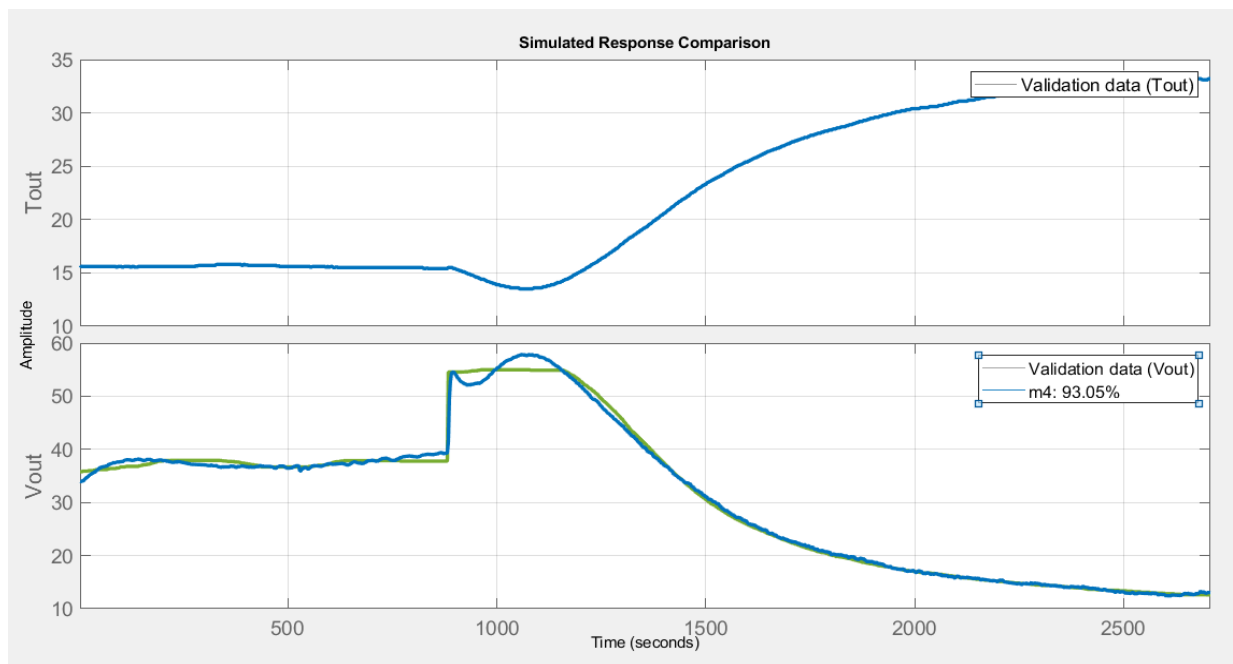


Рис. 2.11. Модель TISO по каналі вологи

Виведомо перехідні процеси по каналах вологи. Запишемо команду наступного змісту:

`step(tf(m4.num{1},m4.den{1}))`

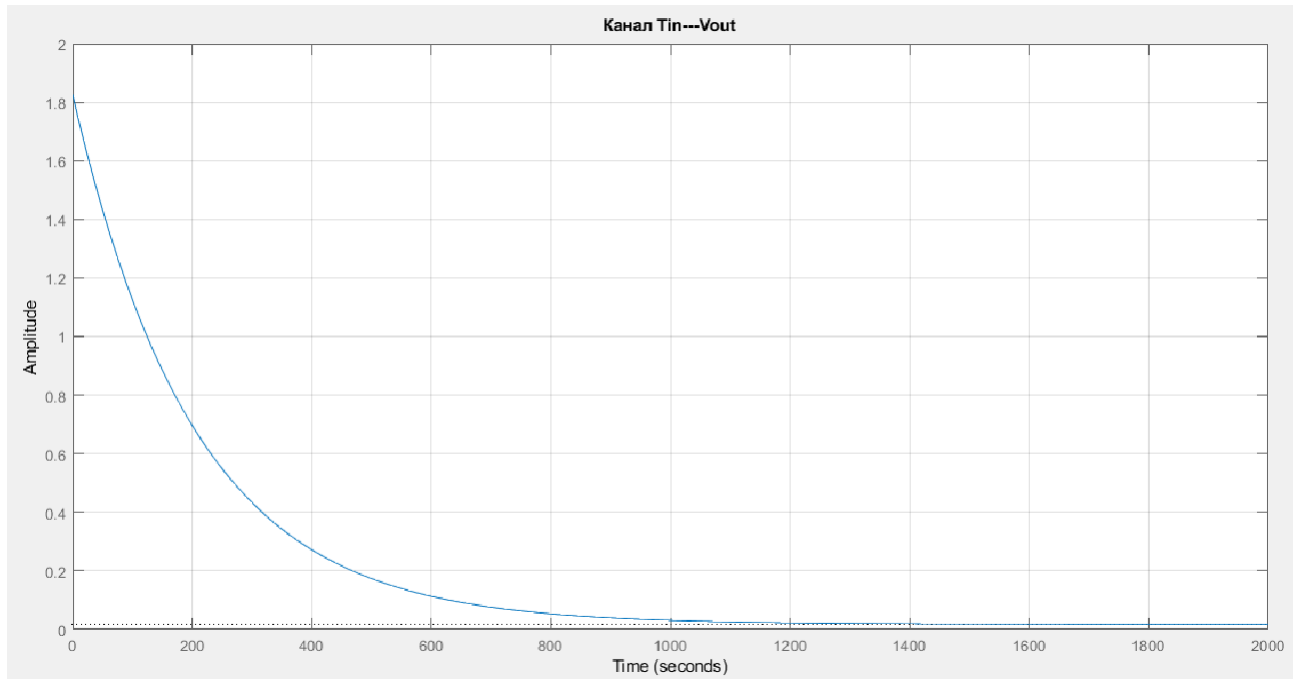


Рис. 2.12. Канал Tin---Vout

Введемо код: `step(tf(m4.num{2},m4.den{2}))`

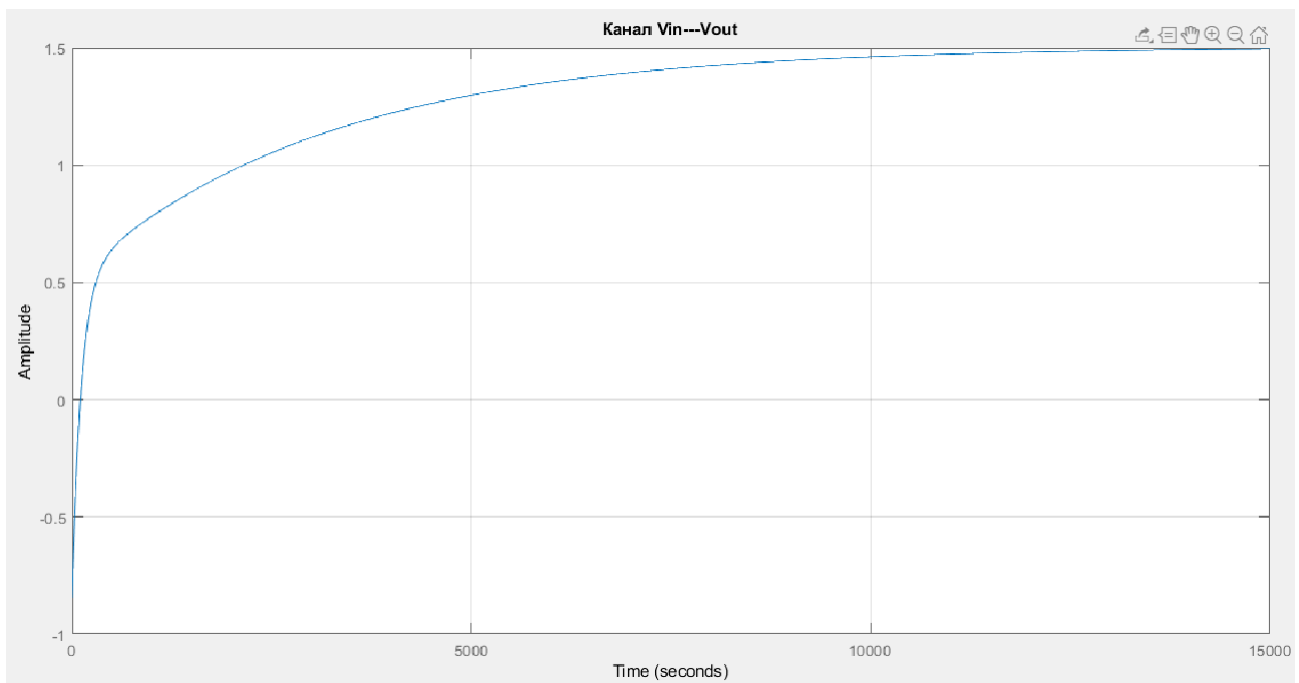


Рисунок 2.13. Канал Vin---Vout

Дослідження по каналі температури. Запишемо команду:

`m5 = tfest(steam(1:1112,'Tout',:),[1 1],[0 0])`

```
compare(steam(1:1112),m5)
```

Результат виконання:

m5 = From input "Tin" to output "Tout":

$$W_{11} = \frac{0.001833}{s + 0.00306}$$

From input "Vin" to output "Tout":

$$W_{21} = \frac{0.001981}{s + 0.01677}$$

Parameterization:

Number of poles: [1 1] Number of zeros: [0 0]

Number of free coefficients: 4 Status:

Fit to estimation data: 97.22% FPE: 0.04344, MSE: 0.04298

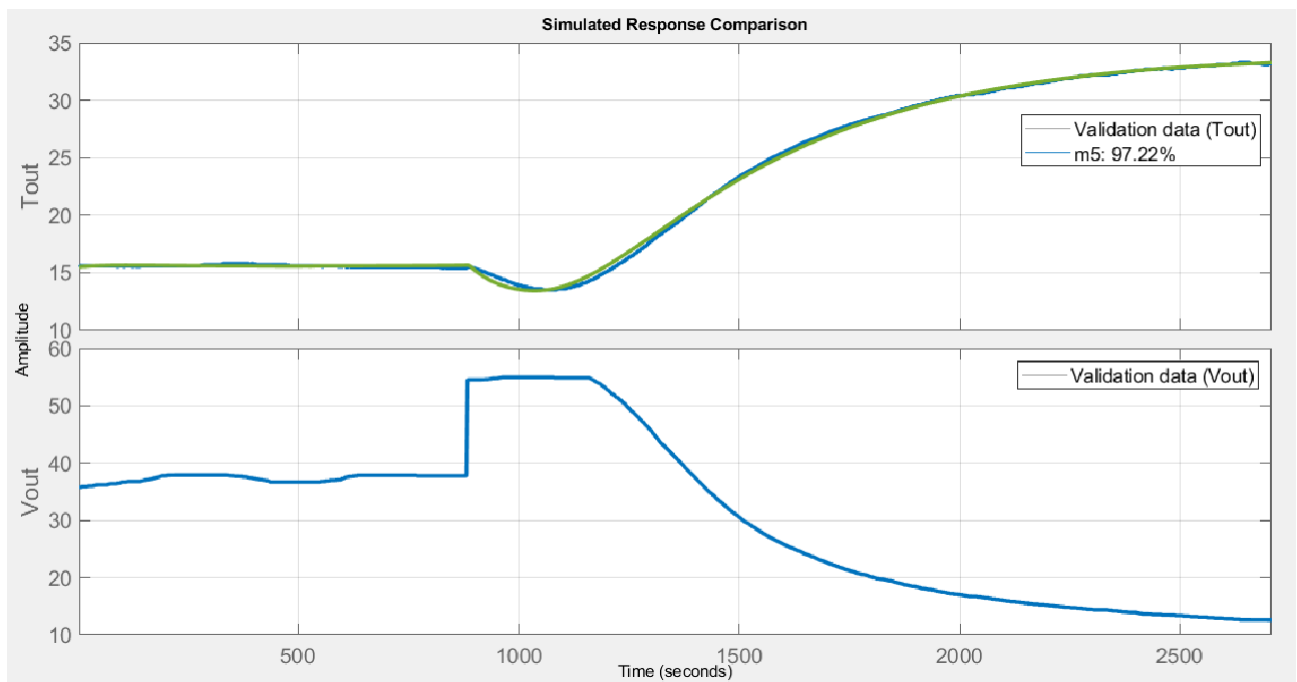


Рис. 2.14. Модель TISO по каналі температури

Виведомо перехідні процеси по каналах температури.

Запишемо команду:

```
step(tf(m5.num{1},m5.den{1}))
```

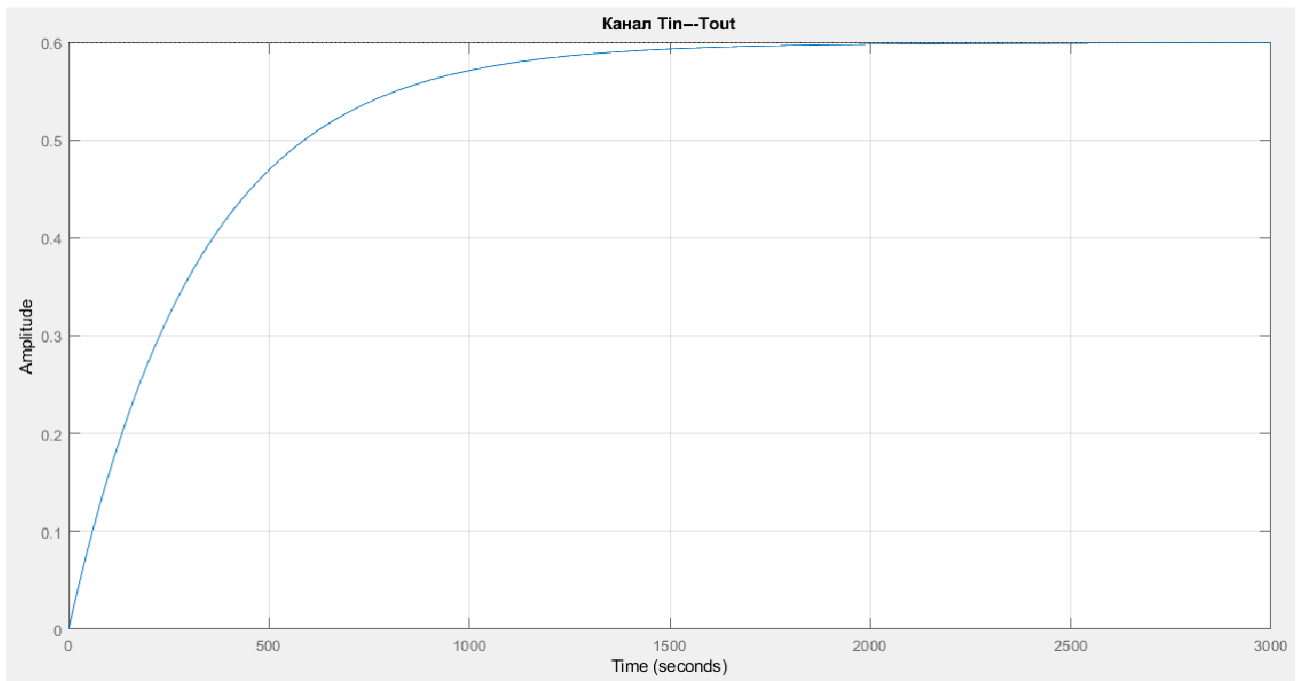


Рис. 2.15. Канал Tin---Tout

Введемо код:

```
step(tf(m5.num{2},m5.den{2}));
```

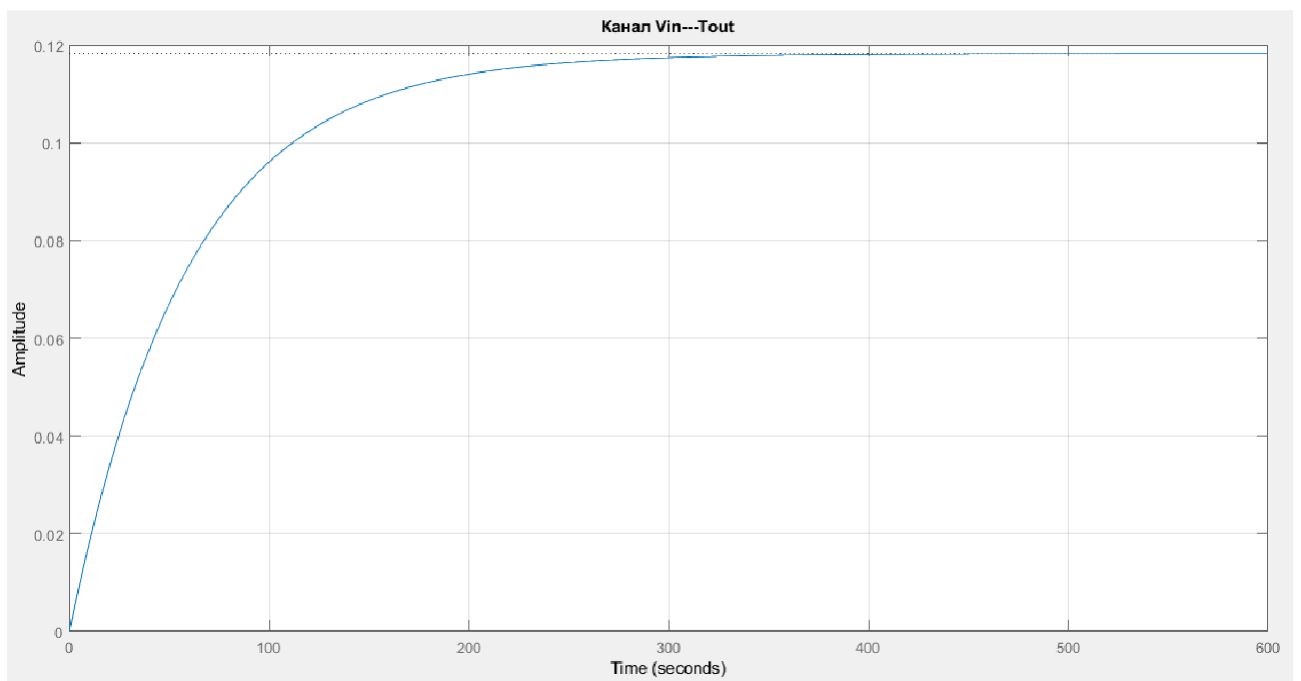


Рис. 2.16. Канал Vin---Tout

Апроксимація ОК завершена. Знайдено передавальні функції.

2.3. Дослідження імітаційної моделі сушарки

Перед проведенням дослідження імітаційної моделі сушарки слід відзначити, що на відміну від класичної постановки задачі, у нашому випадку компенсація взаємозв'язків між каналами об'єкта керування реалізована через каскадне з'єднання двовимірної моделі сушильної камери та двовимірної моделі виконавчого механізму (нагрівач–вентилятор). Відповідно, буде спроектована система керування як для виконавчого пристрою, так і для сушильної камери.

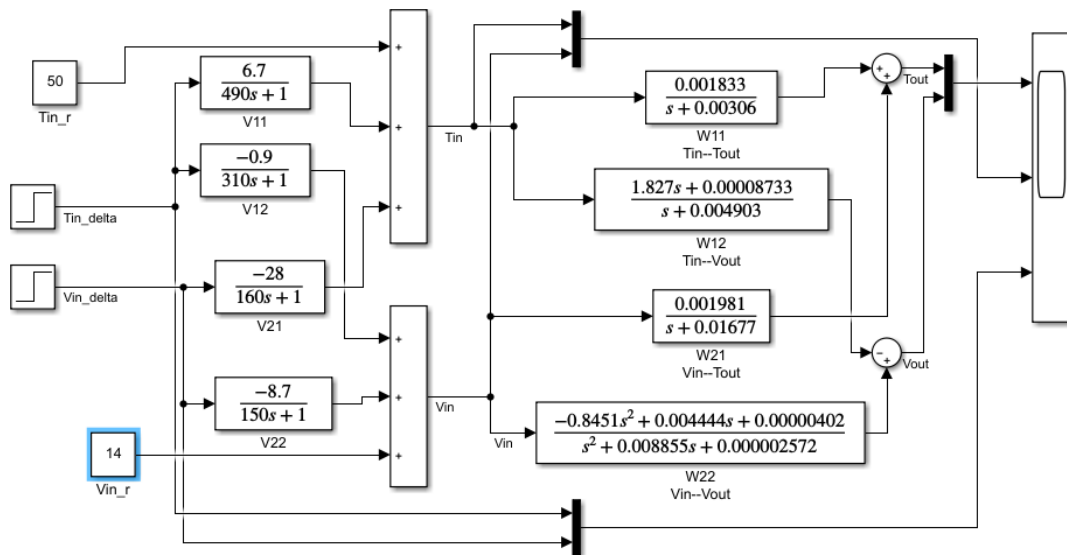


Рис. 2.17. Система для виконавчого пристрою

Відкриємо блок Scope для одержання графів впливу системи.

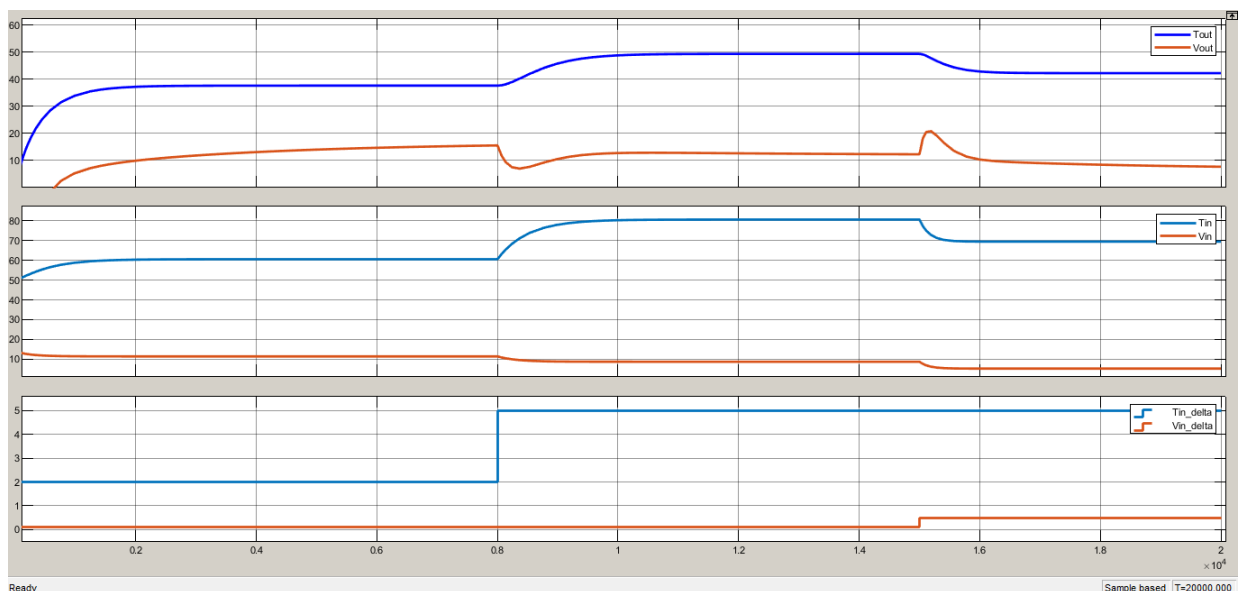


Рис. 2.18. Графи системи для виконавчого пристрою

Проаналізувавши отримані графи системи на рисунку 2.18, можна сказати, що моделювання проведено успішно. Графи повністю відтворюють фізико-механічні процеси, котрі є близькими до еталонних. Поставлені у цьому розділі цілі досягнуті.

Висновки до розділу 2

Проведено експериментальні дослідження та визначені перехідні функції каналів регулювання у контурах температури та вологи. Виконано обчислення оптимальних параметрів налаштування ПД регуляторів багатоконтурної АСК методом параметричної оптимізації.

Змодельована система добре відтворює якісні показники при визначених параметрах об'єкта керування.

РОЗДІЛ 3

СИНТЕЗ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ

Синтез систем автоматичного керування - визначення і реалізація бажаних динамічних характеристик систем автоматичного керування (САК) згідно з вибраним критерієм оптимальності. При визначенні бажаних характеристик САК (передавальною і імпульсною перехідною функцій або частотних характеристик) разом з обліком критерію оптимізації (швидкодія, інтегральний квадратичний критерій тощо) або заданих показників якості (стала помилка, перерегулювання, час перехідного процесу) і апріорних відомостей про завдавальну і збурювальну діях, повинні братися до уваги обмеження, що накладаються властивостями об'єкта або незмінної частини системи (обмежена потужність, допустимі перевантаження тощо), умовами фізичної здійсненності й грубості [20].

Зерносушильні комплекси повинні забезпечувати збереження або підвищення якості зернової продукції та реалізацію наступних технічних вимог:

- забезпечення однорідного прогрівання та сушіння зернової маси;
- можливість сушіння зерна з будь-яким рівнем початкової вологості до заданого значення протягом одного технологічного циклу;
- проведення сушіння без попередньої очистки зерна;
- організація безперервного приймання та обробки зерна в потоці;
- забезпечення економічності процесу за рахунок мінімізації витрат палива та електроенергії, а також оптимізації капітальних інвестицій.

В системі автоматичного управління зерносушильним комплексом є два типи змінних, керовані та керуючі.

До керованих змінних відносяться:

- температура зерна;
- температура сушильного агента;
- об'єм подачі сушильного агента до камери сушіння;
- вологість зерна.

До керуючих відносяться такі змінні:

- потужність нагрівача;
- витрати сушильного агента.

Система керування змінними технологічного процесу може бути представлена у вигляді структурної схеми (рис. 3.1).

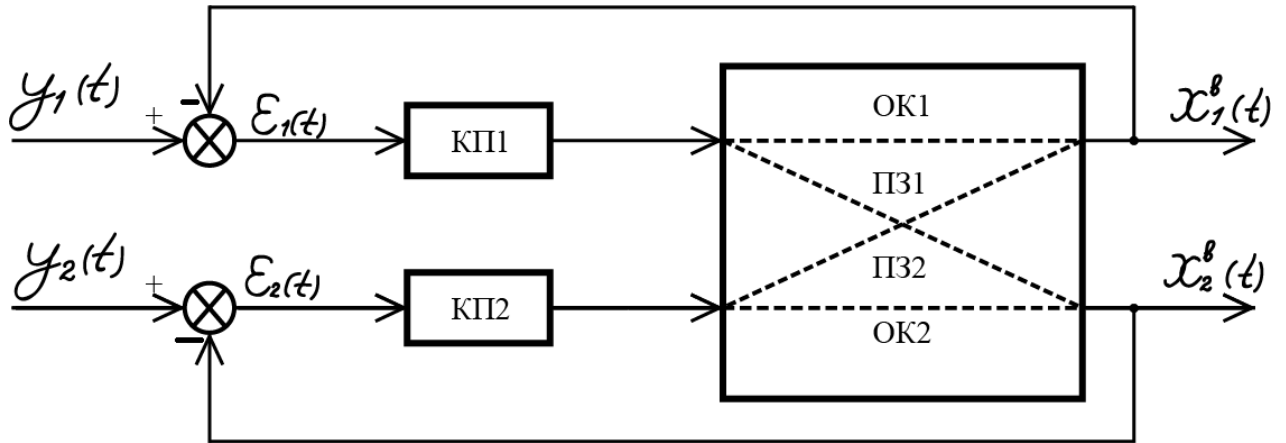


Рис. 3.1. Структурна схема двомірної системи автоматичного керування зерносушильним комплексом

На представлений схемі (рис. 3.1) $Y(t)$ відображає вектор вхідного сигналу системи автоматичного керування, що задає необхідне (еталонне) значення контрольованого параметра. У конкретному випадку його розрахунок здійснюється за формулою (3.1):

$$Y(t) = (y_1(t) \cdot y_2(t)), \quad (3.1)$$

де $y_1(t)$ - задане (потрібне) значення вологості зерна на виході;

$y_2(t)$ - задане (потрібне) значення температури сушіння зерна.

Векторний вихідний сигнал – формула (3.2):

$$X(t) = (x_1^g(t) \cdot x_2^g(t)), \quad (3.2)$$

де $x_1^g(t)$ – реальне значення вологості зерна;

$x_2^g(t)$ – реальне значення температури зерна.

3.1. Синтез АСК з перехресними зв'язками

Математичне моделювання об'єктів із розподіленими параметрами

передбачає визначення оптимальної системи просторових координат, у межах якої найбільш доцільно відобразити просторовий розподіл параметрів [6]. На рис. 3.2 подано схему виконавчого механізму сушарки. Для врахування взаємного впливу каналів керування температурою та вологістю всередині виконавчого механізму до системи вводиться перехресний зв'язок.

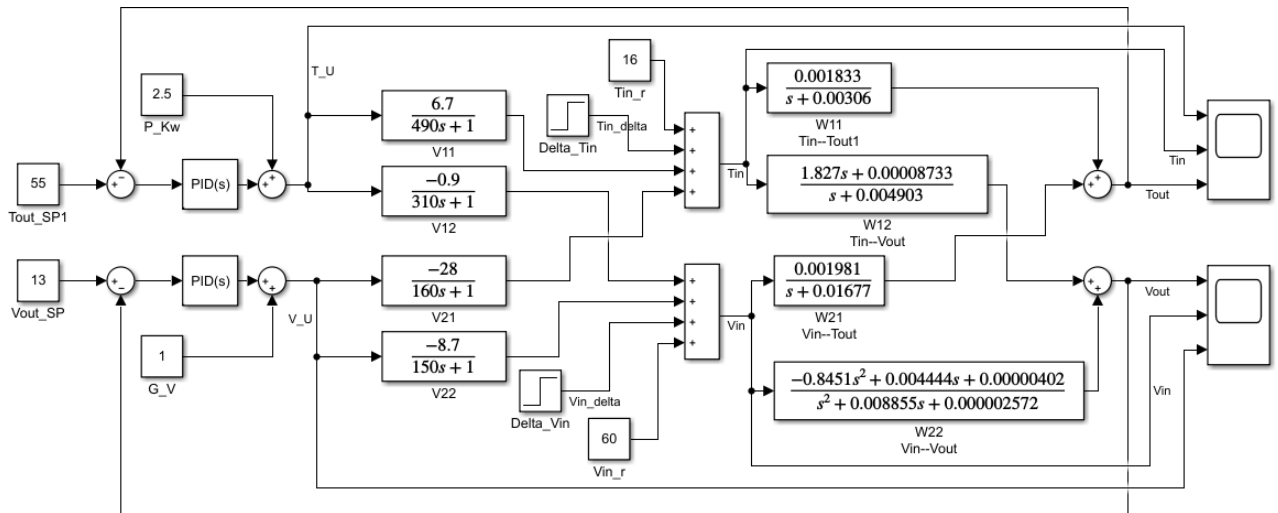


Рис. 3.2. Структурна схема зерносушильного комплексу: P_Kw – потужність нагрівального елемента; G_V – об'єм подачі сушильного агента у камеру сушіння

На схемі, зображеній на рисунку 3.2, є блок «Tout_SP», у даний блок записується бажане значення температури зерна. Параметри блока зображені на рисунку 3.3.

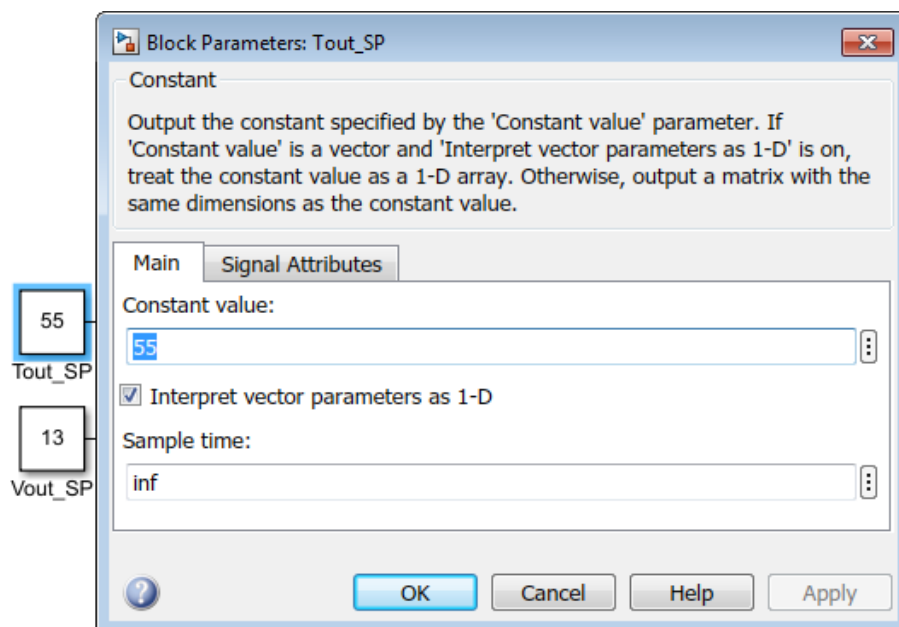


Рис. 3.3. Параметри блока «Tout_SP»

У блок «Vout_SP» записується значення потрібної вологості зерна після процесу сушіння. Параметри блока зображені на рисунку 3.4.

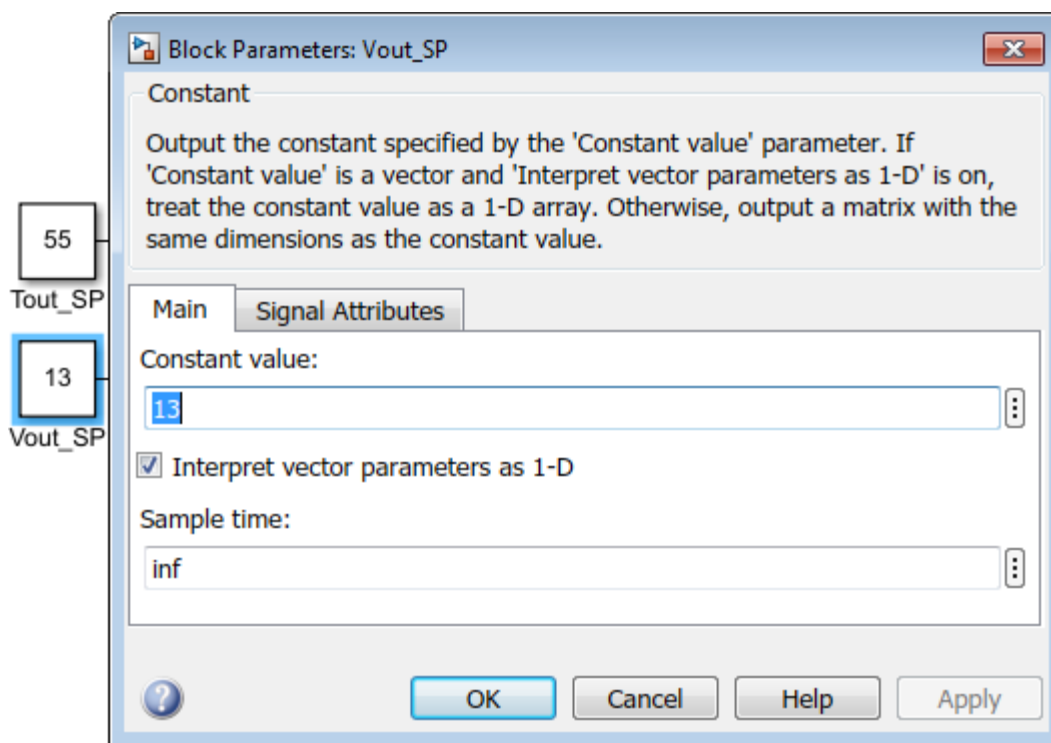


Рис. 3.4. Параметри блока «Vout_SP»

Налаштування параметрів та структура PID-регулятора для контуру температури зображена на рисунках 3. 5, 3.6.

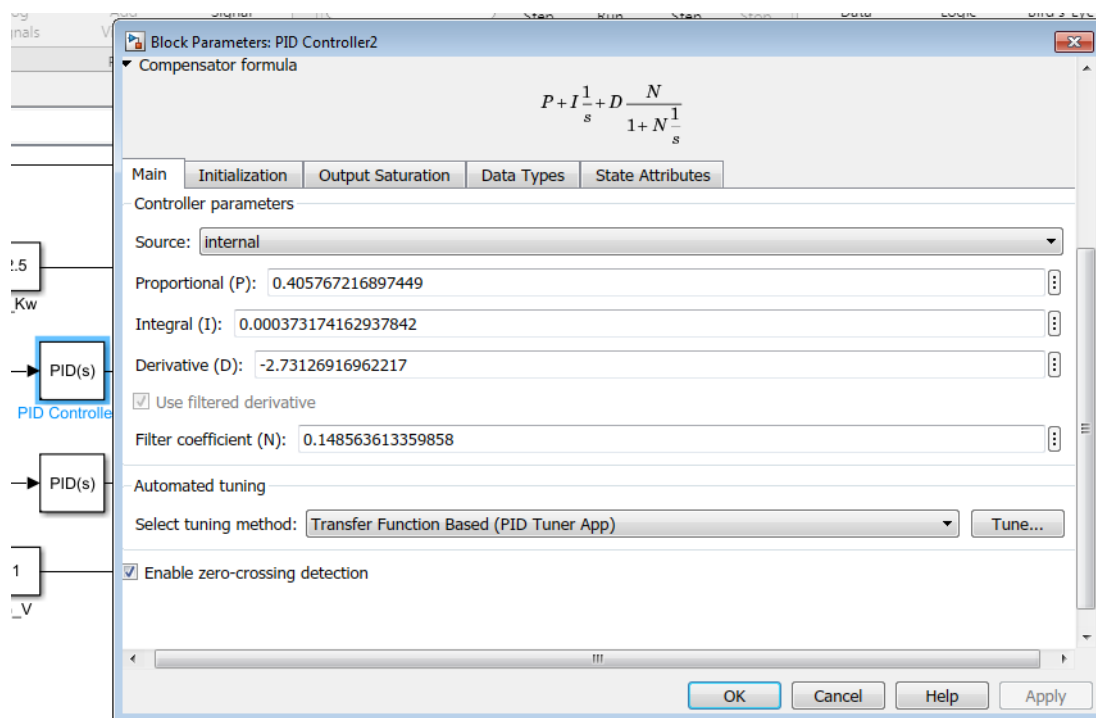


Рис. 3.5. Налаштування PID-регулятора по контуру температури

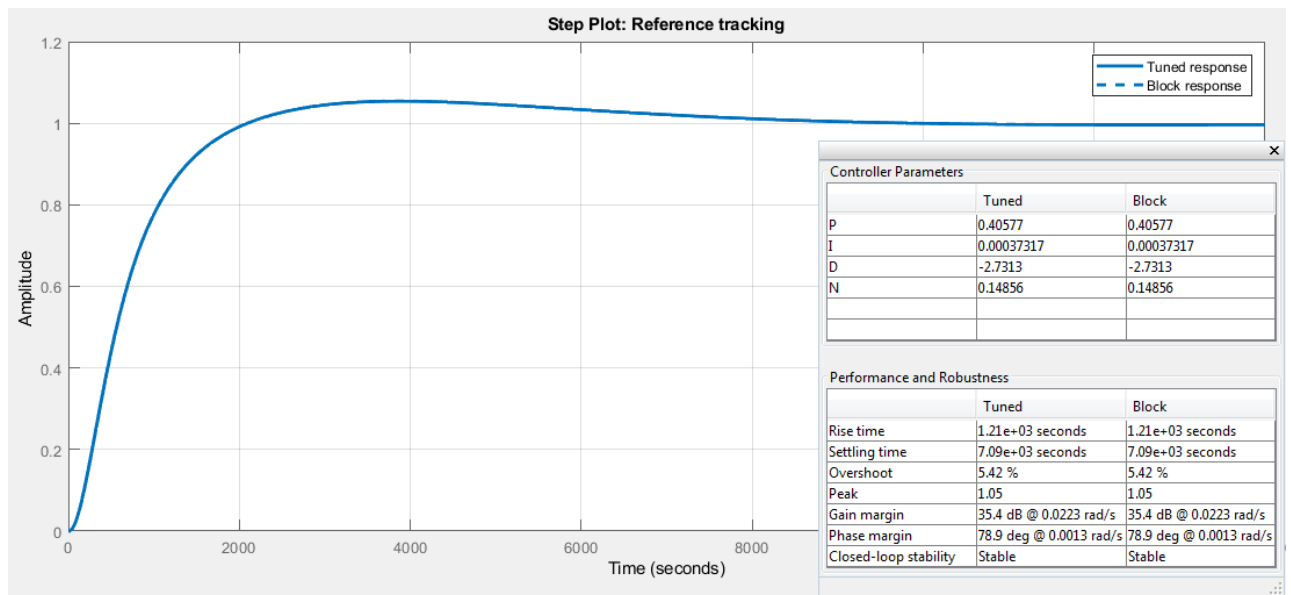


Рис. 3.6. Налаштування PID-регулятора по контурі температури у тул боксі «Tune»

Важливим параметром у таких налаштуваннях є значення запасу по фазі.

Налаштування параметрів та структура PID-регулятора для контуру вологи зображена на рисунках 3.7, 3.8.

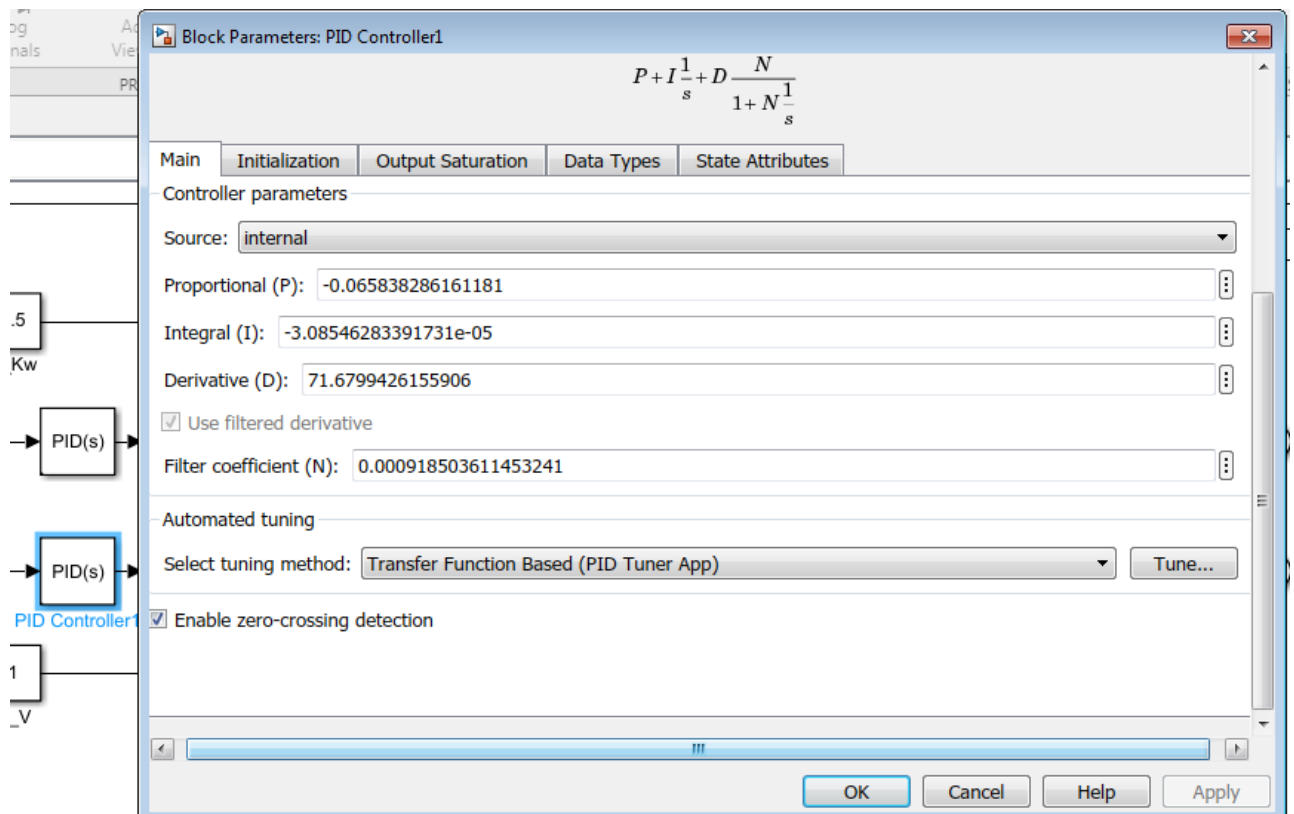


Рис. 3.7. Налаштування PID-регулятора по контурі вологи

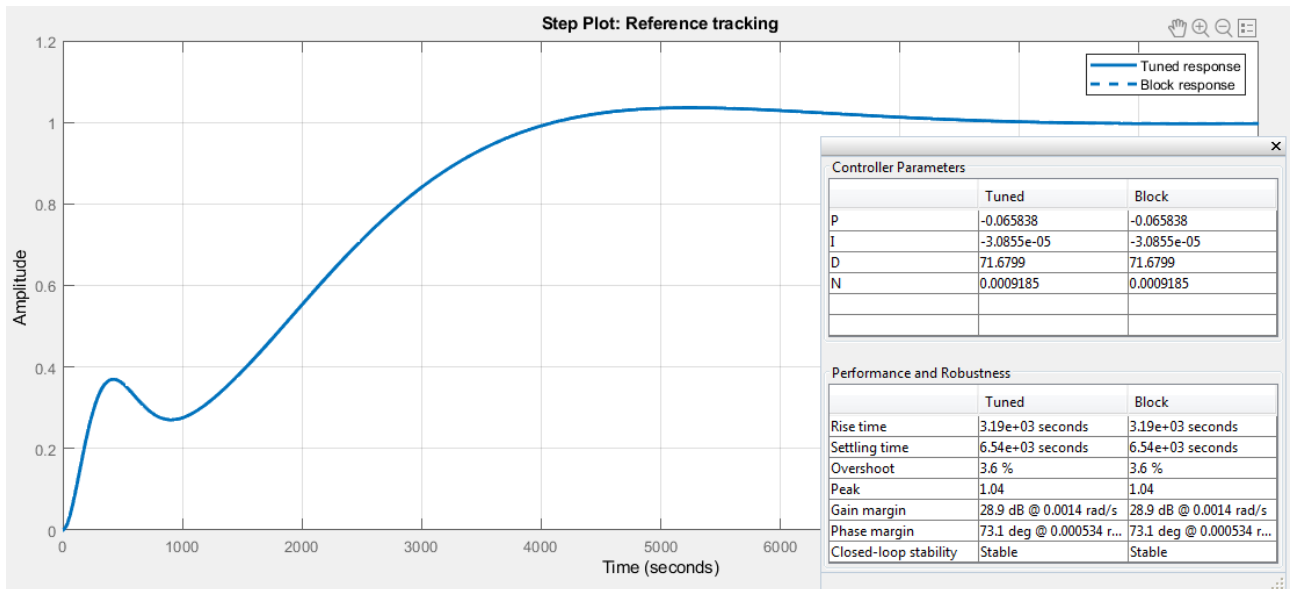


Рис. 3.8. Налаштування PID-регулятора по контурі вологи у тул боксі «Tune»

Вихідні графі системи регулювання можна отримати шляхом переходу у блок «Score». Виведемо графі по контурі температури (рис 3.9).

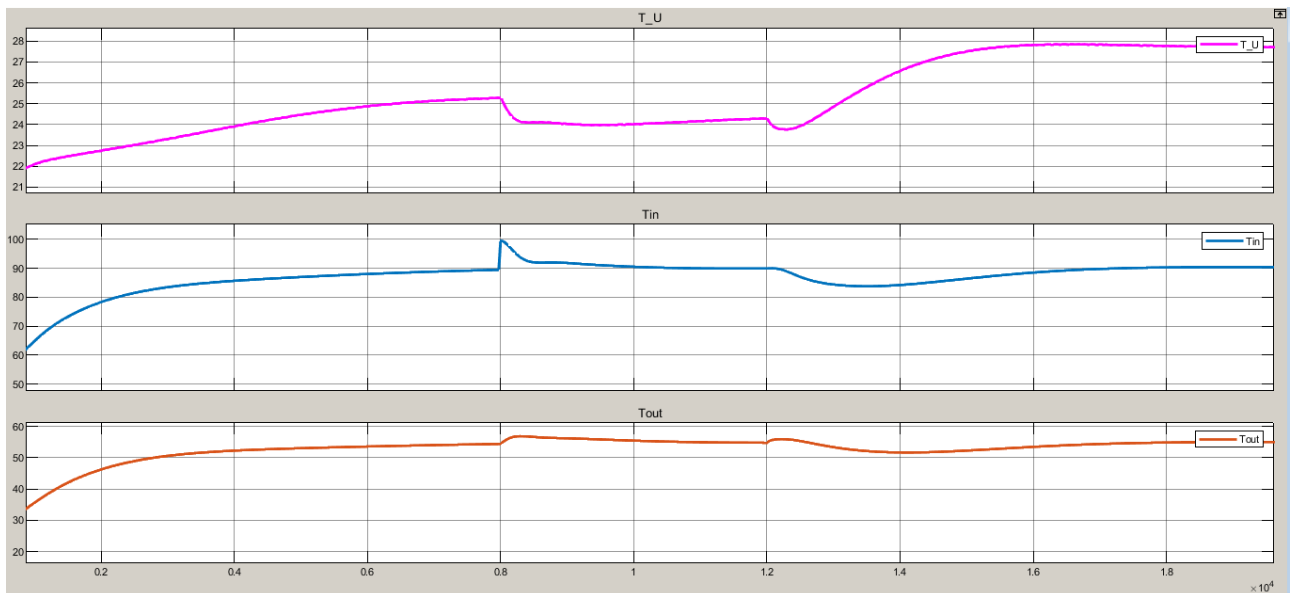


Рис. 3.9. Графі по контурі температури

Із зображень вихідних графів на рисунку 3.9 можна зробити висновки, що по контурі температури складена вірно; процеси регулювання є стабільними; система виконує поставлені завдання. Можна спостерігати стрибок системи на 8000 та 12000 секунд. У цей момент система отримує «поштовх» та налаштовується відповідно до нових умов. Як бачимо, цей процес відбувається відмінно.

Виведемо графи по контурі вологи (рис 3.10).

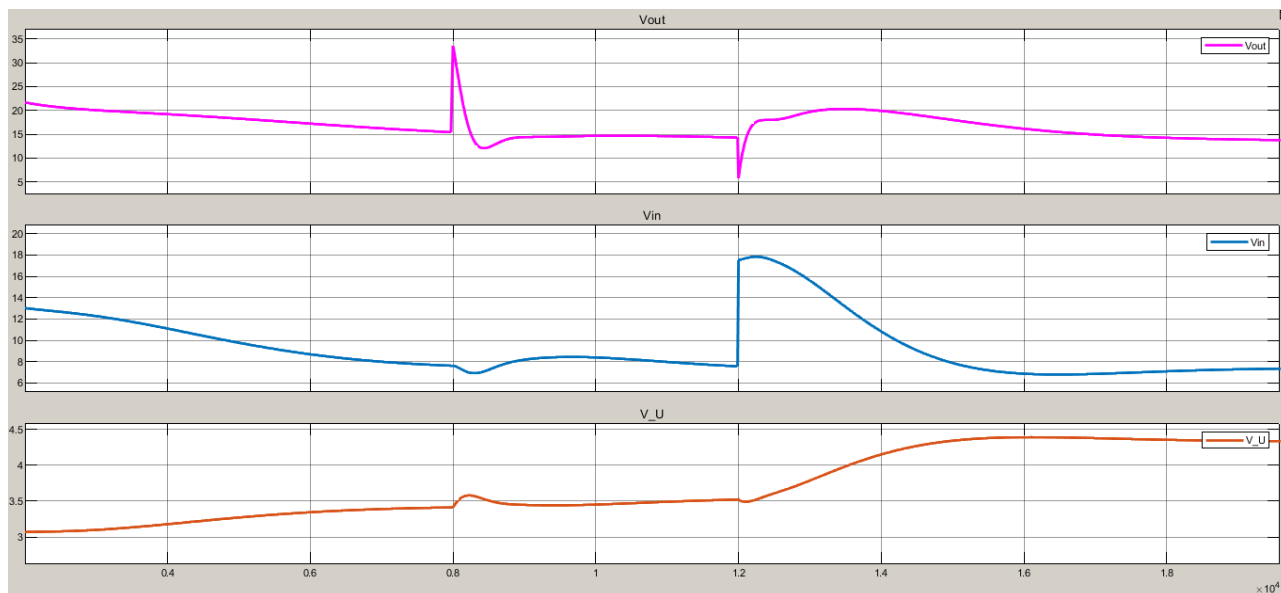


Рис. 3.10. Графи по контурі вологи

Із зображень вихідних графів на рисунку 3.10 можна зробити висновки, що по контурі вологи схема складена вірно; процес регулювання є стабільними; система виконує поставлені завдання. У контурі вологості можна бачити досить значне перерегулювання в момент, коли система переходить у фінальні значення, проте проблем зі стабільністю змодельованої системи немає.

3.2. Синтез АСК з коректором для калорифера

Головним недоліком схеми виконавчого механізму зерносушильного комплексу, представленої на рис. 3.2, є наявність взаємного впливу між каналами керування: управління одним каналом призводить до зміни параметрів іншого через перехресні зв'язки, що унеможливорює незалежне регулювання процесу. Для усунення цього ефекту та забезпечення автономного контролю температури і вологості доцільно інтегрувати коректор безпосередньо у виконавчий механізм. За ідеєю коректор повинен не тільки розв'язати перехресні зв'язки, а й зробити систему ще швидшою, надійнішою та покращити основні якісні показники регуляторів. Звісно, немає гарантій, що виконання даного кроку дасть результат.

Схема автоматичного регулювання з компенсатором для калорифера

зображена на рисунку 3.11.

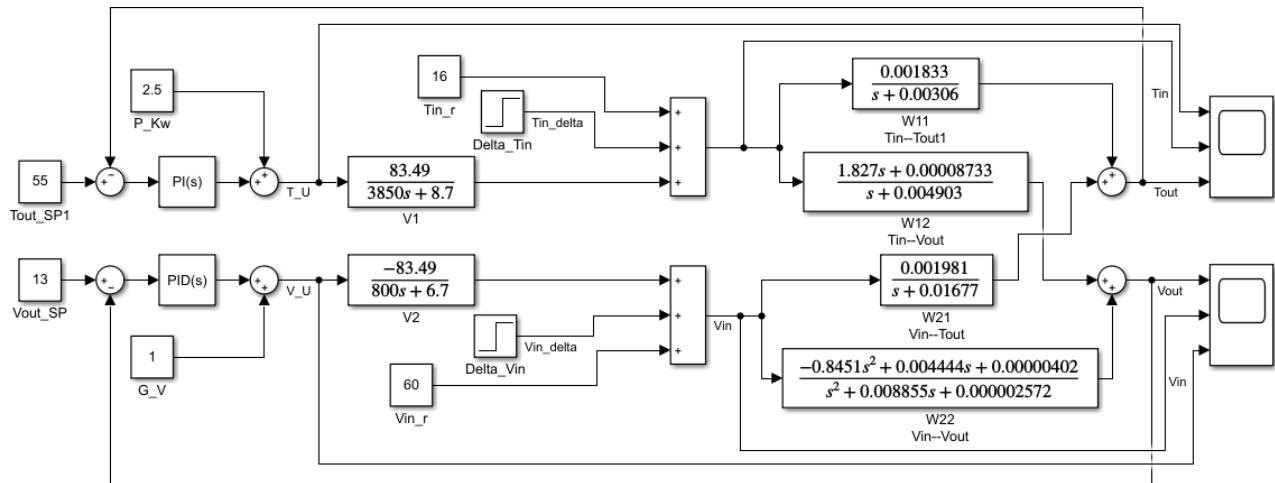


Рис. 3.11. Модель АСК з компенсаторами у контурах температури та вологи з розв'язаними каналами: V1 та V2 – передавальні функції виконавчого механізму (калорифера) по каналах температури та вологості відповідно; W12, W11, W22, W21 – передавальні функції прямих та перехресних зв'язків ОК (камери сушіння)

Щоб отримати передавальні функції коректорів V1 а також V2 запишемо наступні формули по контурах температура та вологості агента котрий потребує сушіння на виході з калорифера:

$$t_1 = (P + G \cdot V_2) \cdot V_{11} + (G + P \cdot V_1) \cdot V_{21} \quad (3.3)$$

$$y_1 = (G + V \cdot V_1) \cdot V_{22} + (P + G \cdot V_2) \cdot V_{12} \quad (3.4)$$

Виконаємо групування членів за змінними P та G:

$$t_1 = (P \cdot V_{11} + P \cdot V_1 \cdot V_{21}) + (G \cdot V_{21} + G \cdot V_2 \cdot V_{11}) \quad (3.5)$$

$$y_1 = (G \cdot V_{22} + G \cdot V_2 \cdot V_{12}) + (P \cdot V_{12} + P \cdot V_1 \cdot V_{22}) \quad (3.6)$$

Винесемо множники P та G за дужки:

$$t_1 = (V_{11} + V_1 \cdot V_{21}) \cdot P + (V_{21} + V_2 \cdot V_{11}) \cdot G \quad (3.7)$$

$$y_1 = (V_{22} + V_2 \cdot V_{12}) \cdot G + (V_{12} + V_1 \cdot V_{22}) \cdot P \quad (3.8)$$

З рівняння (3.7) встановимо рівність нулю членів, помножених на (V), а з рівняння (3.8) - членів, помножених на (P), отримавши:

$$V_{21} + V_2 \cdot V_{11} = 0 \quad (3.9)$$

$$V_{12} + V_1 \cdot V_{22} = 0 \quad (3.10)$$

Знайдемо передавальні функції коректора, через уже відомі, зображені на

рисунку 3.1 передавальні функції V_{11} , V_{12} , V_{21} , V_{22} .

Формули для знаходження коректорів будуть мати наступний вигляд:

$$V_1 = -(V_{21} / V_{11}) \quad (3.11)$$

$$V_2 = -(V_{12} / V_{22}) \quad (3.12)$$

Де, формула 3.11 для коректора по контурі температури, формула 3.12 – для коректора по контурі вологи.

Налаштуємо ПІ-регулятор для контуру температури (рис. 3.12, 3.13). У попередніх ітерація застосовувався регулятор за ПІД законами регулювання, а у даній системі такий метод не працював належним чином. На вихідних графах було видно сильні стрибки та дуже довгий час перехідного процесу, що в результаті, давало унеможлиблювало якісне регулювання системи. Налаштування регулятора за ПІ законом регулювання дало змогу отримати гарні показники перехідного процесу.

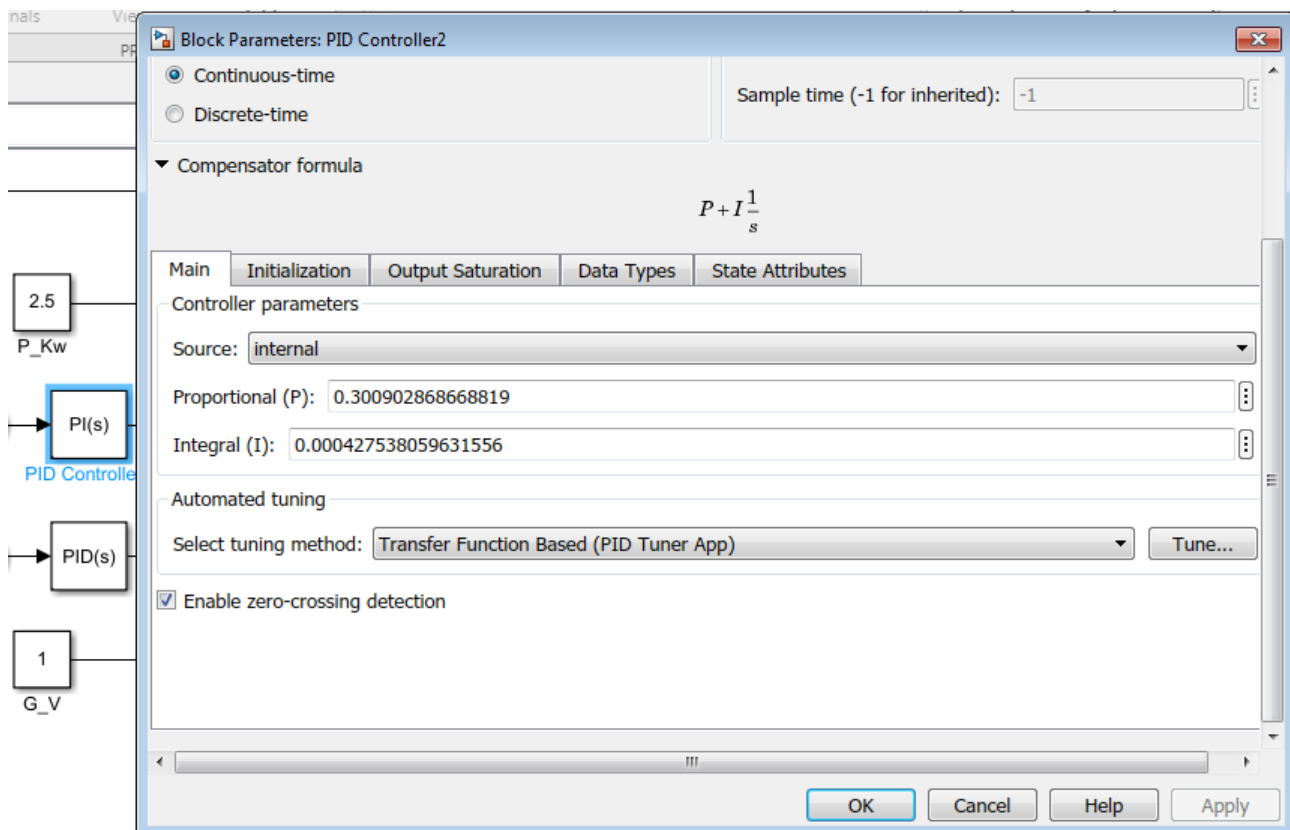


Рис. 3.12. Налаштування ПІ-регулятора по контурі температури

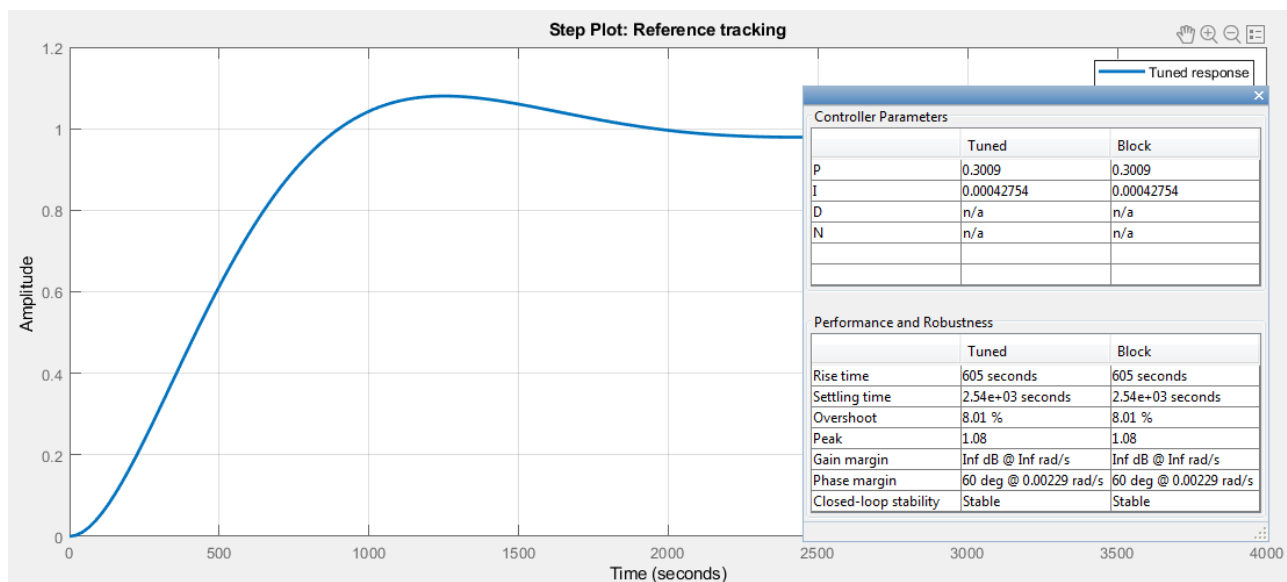


Рис. 3.13. Налаштування PI-регулятора по контурі температури у тул боксі «Tune»

Налаштуємо PID-регулятора для контуру вологи. Процес налаштування показано на рисунках 3. 14, 3.15. Для даного контуру система показала хороші якісні показники перехідного процесу у випадку встановлення ПІД-регулятора. Проводилися експерименти з регуляторами ПІ та ПД, налаштування не успішне.

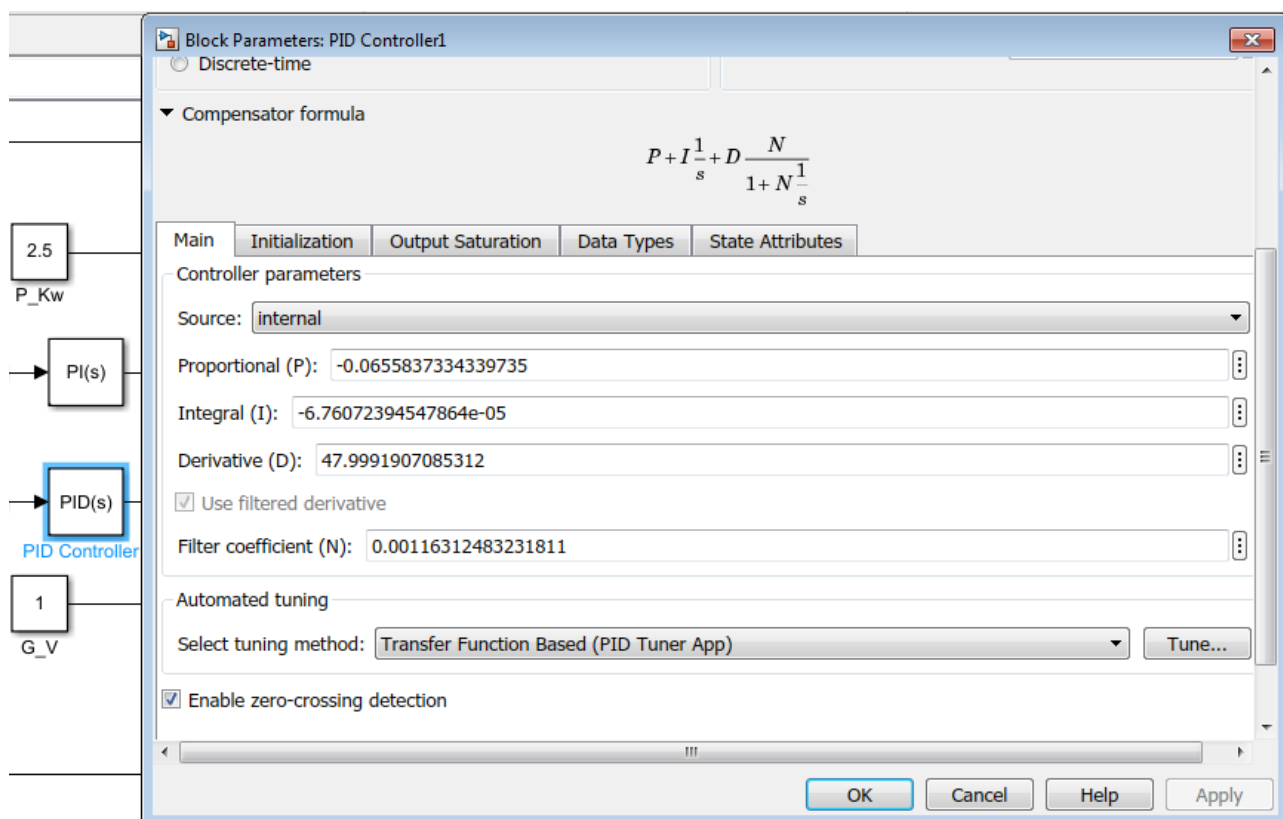


Рис. 3.14. Налаштування PID-регулятора по контурі вологи

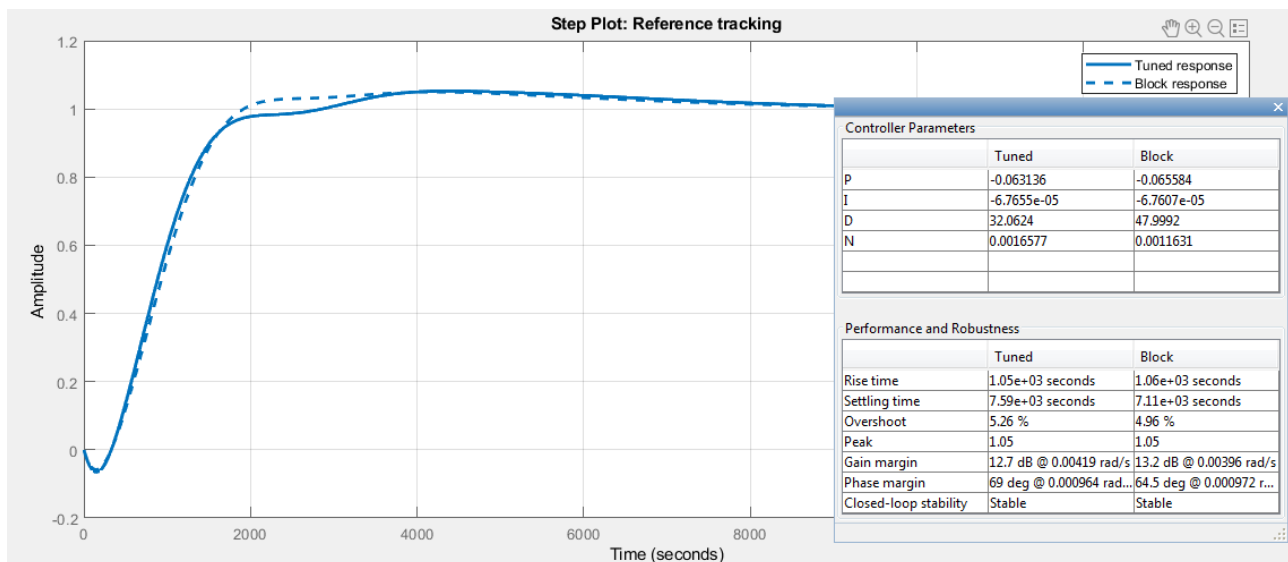


Рис. 3.15. Налаштування PID-регулятора по контурі вологи у тул боксі «Tune»

Виведемо графі регулювання по контурі температури (рис 3.16).

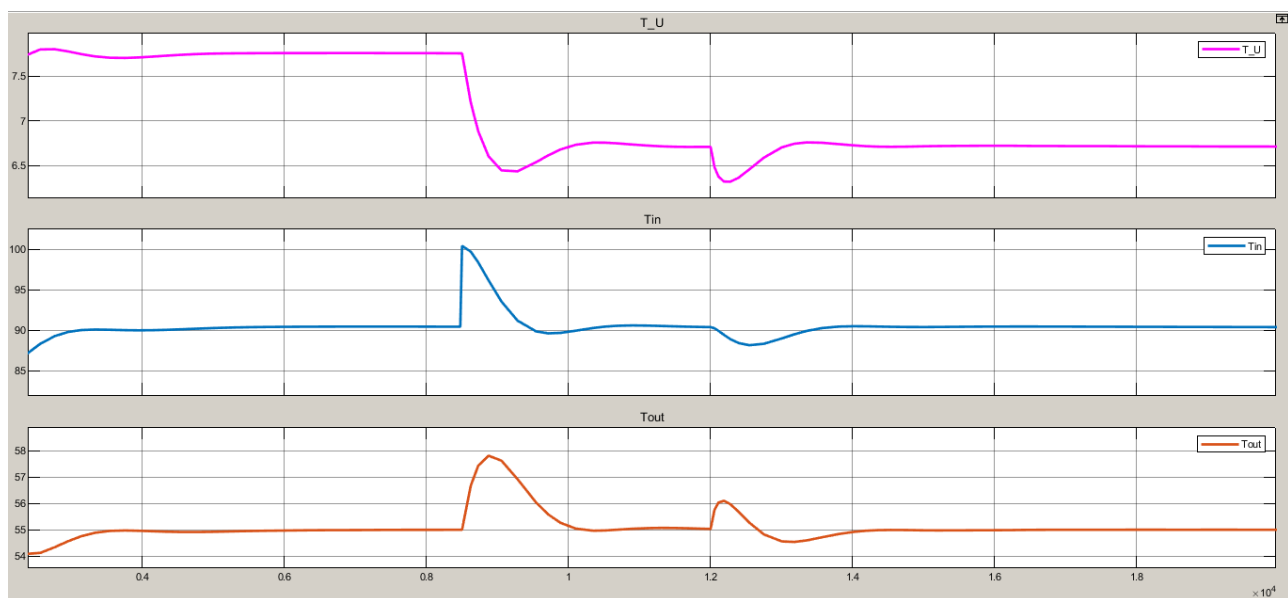


Рис. 3.16. Графі по контурі температури

Із зображень вихідних графів на рисунку 3.16 можна зробити висновки, що по контурі температури регулювання параметрів відбувається добре. Система дуже добре реагує на стрибки системи і налаштовується. Гарно прослідковується різке збільшення вихідної температури при збільшенні вхідної, що з точністю повторює результати експерименту на початку роботи. Це свідчить, що дана схема є придатною для використання.

Виведемо графи по контурі вологи (рис 3.17).

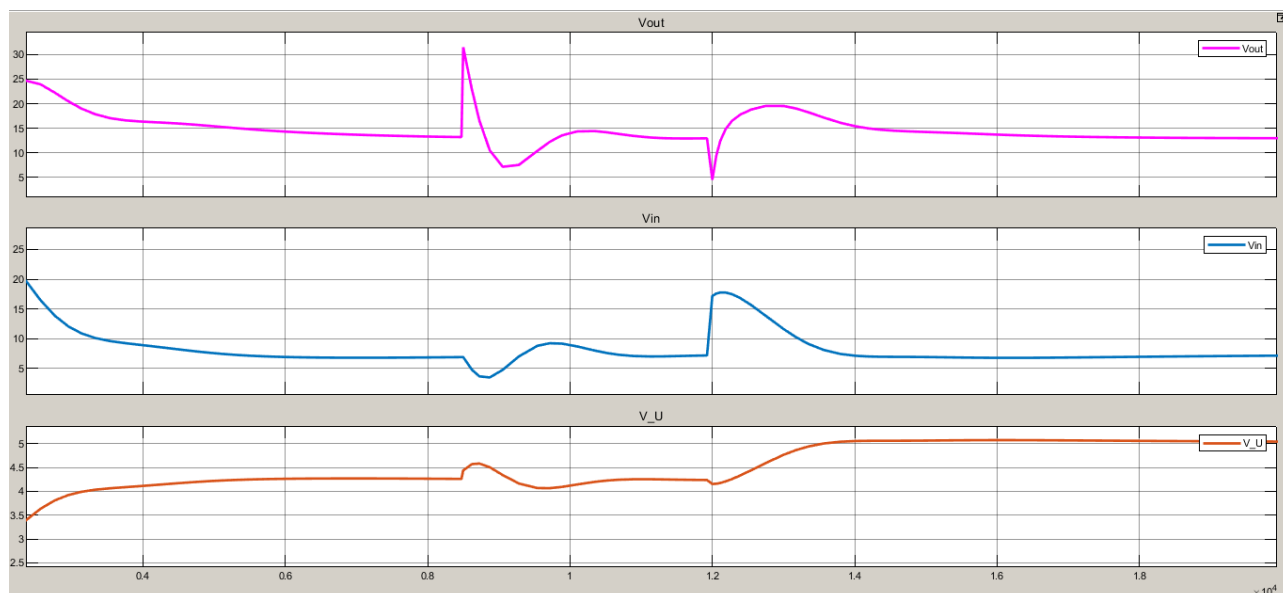


Рис. 3.17. Графи по контурі вологи

Із зображень вихідних графів на рисунку 3.17 можна зробити висновки, що по контурі вологи регулювання параметрів відбувається добре.

Підіб'ємо підсумки. Якісні показники налаштування регуляторів без коректорів зображені на рисунку 3.18.

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	0.40577	0.40577
I	0.00037317	0.00037317
D	-2.7313	-2.7313
N	0.14856	0.14856

Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	1.21e+03 seconds	1.21e+03 seconds
Settling time	7.09e+03 seconds	7.09e+03 seconds
Overshoot	5.42 %	5.42 %
Peak	1.05	1.05
Gain margin	35.4 dB @ 0.0223 rad/s	35.4 dB @ 0.0223 rad/s
Phase margin	78.9 deg @ 0.0013 rad/s	78.9 deg @ 0.0013 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

а)

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	-0.065838	-0.065838
I	-3.0855e-05	-3.0855e-05
D	71.6799	71.6799
N	0.0009185	0.0009185

Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	3.19e+03 seconds	3.19e+03 seconds
Settling time	6.54e+03 seconds	6.54e+03 seconds
Overshoot	3.6 %	3.6 %
Peak	1.04	1.04
Gain margin	28.9 dB @ 0.0014 rad/s	28.9 dB @ 0.0014 rad/s
Phase margin	73.1 deg @ 0.000534 r...	73.1 deg @ 0.000534 r...
Closed-loop stability	Stable	Stable

б)

Рис. 3.18. Якісні показники налаштування регуляторів без коректорів:

а) - показники регулятора по каналі температури; б) - показники регулятора по каналі вологості

Якісні показники налаштування регуляторів з коректором для виконавчого механізму зображені на рисунку 3.19.

Controller Parameters		
	Tuned	Block
P	0.3009	0.3009
I	0.00042754	0.00042754
D	n/a	n/a
N	n/a	n/a

Performance and Robustness		
	Tuned	Block
Rise time	605 seconds	605 seconds
Settling time	2.54e+03 seconds	2.54e+03 seconds
Overshoot	8.01 %	8.01 %
Peak	1.08	1.08
Gain margin	Inf dB @ Inf rad/s	Inf dB @ Inf rad/s
Phase margin	60 deg @ 0.00229 rad/s	60 deg @ 0.00229 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

а)

б)

Рис. 3.19. Якісні показники налаштування регуляторів без коректорів:

а) – показники регулятора по каналі температури з коректором; б) – показники регулятора по каналі вологості з коректором

Порівнявши дані, які були отримані в процесі синтезу АСК, можна сказати, що система стійка в обох випадках, проте є деталі системи, котрі підходять краще в окремих ситуаціях, наприклад, показники перерегулювання у системи без коректорів кращі, ніж з коректором, а значення стабільності системи за децибелами у контурі температури кращі, у системі з коректором для виконавчого механізму. У нашому випадку оптимальним буде варіант з коректорами для виконавчого механізму.

Висновки до розділу 3

Здійснено імітаційне моделювання багатоконтурної автоматичної систем керування в результаті якого встановлено якісні характеристики. Синтезована модель АСК з перехресними та прямими зв'язками для зерносушильного комплексу. Проведено налаштування регуляторів з використанням коректорів та

без них. Здійснено порівняння якісних показників системи.

В загальному, синтез імітаційної моделі виконано добре.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА ТЕХНІЧНОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ ТА СИНТЕЗ SCADA-СИСТЕМИ ЗЕРНОСУШИЛЬНОГО КОМПЛЕКСУ

4.1. Вибір технічних засобів автоматизації

Автоматизація зерносушильного комплексу передбачає:

- Впровадження в роботу схем захисту і блокувань.
- Інтерфейс, що не вимагає сторонньої допомоги або спеціального навчання.
- Захищені методи обліку та розмежування прав користувачів.
- Легкість збільшення продуктивності системи автоматизації.
- Високу надійність і довговічність АСУ.

Система автоматичного керування допомагає в повному обсязі стежити за роботою обладнання і управляти технічними процесами переміщення, зберігання та переробки зерна в автоматичному режимі, практично без втручання обслуговуючого персоналу.

Температура та волога. Система моніторингу температури та вологи у сушарці – Grain-Watch.



Рис. 4.1. Grain-Watch - система регулювання температури та вологості в зерносховищах і силосах

Grain-Watch займає провідне місце серед продуктів, що випускаються компанією Liros. Термопідвіска GWSL1100/2100 Grain –Watch разом з вимірювальними списами, сенсорними лініями вологості GWML3100 і

програмним забезпеченням складають надійну систему контролю температури та вологості в зерносушильних комплексах та зерносховищах.

Модульна архітектура Grain-Watch дозволяє фахівцям сушарок самостійно встановити у себе систему термометрії. По суті Grain-Watch це конструктор, деталі якого необхідно встановити і під'єднати між собою.

Температурні підвіски оснащені високоякісними цифровими датчиками та інноваційної 2-х провідної системою. Термопідвіски для контролю температури зерна легко монтуються у бункерних сушарках циклічного методу роботи.

Цифрові датчики розроблені у відповідності з вимогами ГОСТ-Р, ІЕСЕх, АТЕХ і не вимагають калібрування і щорічного технічного обслуговування.

Термопідвіски GWSL1100/2100 і підвіски вологості GWML3100 є сенсорами в системі моніторингу температури GRAIN-WATCH, які можуть містити до 48-ми датчиків температури та 26-ти датчиків вологості. Сенсорний кабель містить рівномірно встановлені датчики всередині захисного армованого сталю кабельного лотка, з інтервалами 2-3 метри по всій довжині кабелю. Кабель занурюється в зерно, щоб вимірювати температуру та вологість зерна по всій висоті бункера сушарки.

GRAIN WATCH - це не просто термопідвіска, це ціла система, яка дає змогу:

- візуалізувати температуру та вологість у сировині;
- контролювати наповнення за допомогою датчика рівня;
- визначати вологість і температуру в надсилосному просторі;
- автоматичне керування вентиляторами при зміні температури.

Магнітні пускачі. Віддалений запуск або зупинка двигунів, що приводять у дію стрічкові конвеєри, норії, шнекові транспортери та інших засоби автоматизації на зерносушильному комплексі здійснюється за допомогою магнітного пускача КМІ-22510, 25А, 380В / АС3 +1 з (ПЗ) ІЕК (ККМ21-025-400-10) або інших моделей. Такі пускачі також використовуються для керування різноманітними активними та індуктивними навантаженнями. Трьох- та чотириполюсні пускачі низької напруги серії ПМ у комбінації з тепловим реле

становлять поширений засіб захисту та комутації електродвигунів. Вони монтуються на монтажних панелях або DIN-рейках.



Рис. 4.2. Пускач КМІ-22510

Магнітний пускач КМІ-22510 забезпечить довгу та безвідмовну роботу обладнання.

Основні технічні параметри:

- Номінальний струм: 25 А.
- Напруга ізоляції: 660 В.
- Номінальна робоча напруга: 380 В.
- Умовний тепловий струм I_{th} (при $t^\circ < 40^\circ \text{C}$), АС-1: 40 А.
- Максимальне короткочасне навантаження ($t \leq 1 \text{ с}$): 450 А.
- Умовний струм короткого замикання I_{nc} : 40 А.
- Комутаційна зносостійкість для режиму АС-3: 1,4 млн циклів.
- Механічна зносостійкість: 12 млн циклів.
- Потужність споживання котушки при номінальній напрузі U_c :
- Під час спрацьовування ($\cos \varphi = 0,75$): 90 ВА.
- Під час утримання ($\cos \varphi = 0,3$): 7,5 ВА.
- Діапазони робочої напруги управління:
- Спрацьовування: $0,8 \div 1,1 U_c$.
- Відпускання: $0,3 \div 0,6 U_c$.

Монтажні параметри:

- Ступінь захисту корпусу: IP20.
- Габаритні розміри: висота 84 мм, ширина 56 мм, глибина 93 мм.
- Маса пристрою: 0,4 кг.
- Метод кріплення: на DIN-рейку або безпосередньо на монтажну панель.

Рівнемір MOLOSbob LF20. Система вимірювання рівня MOLOSbob LF20.

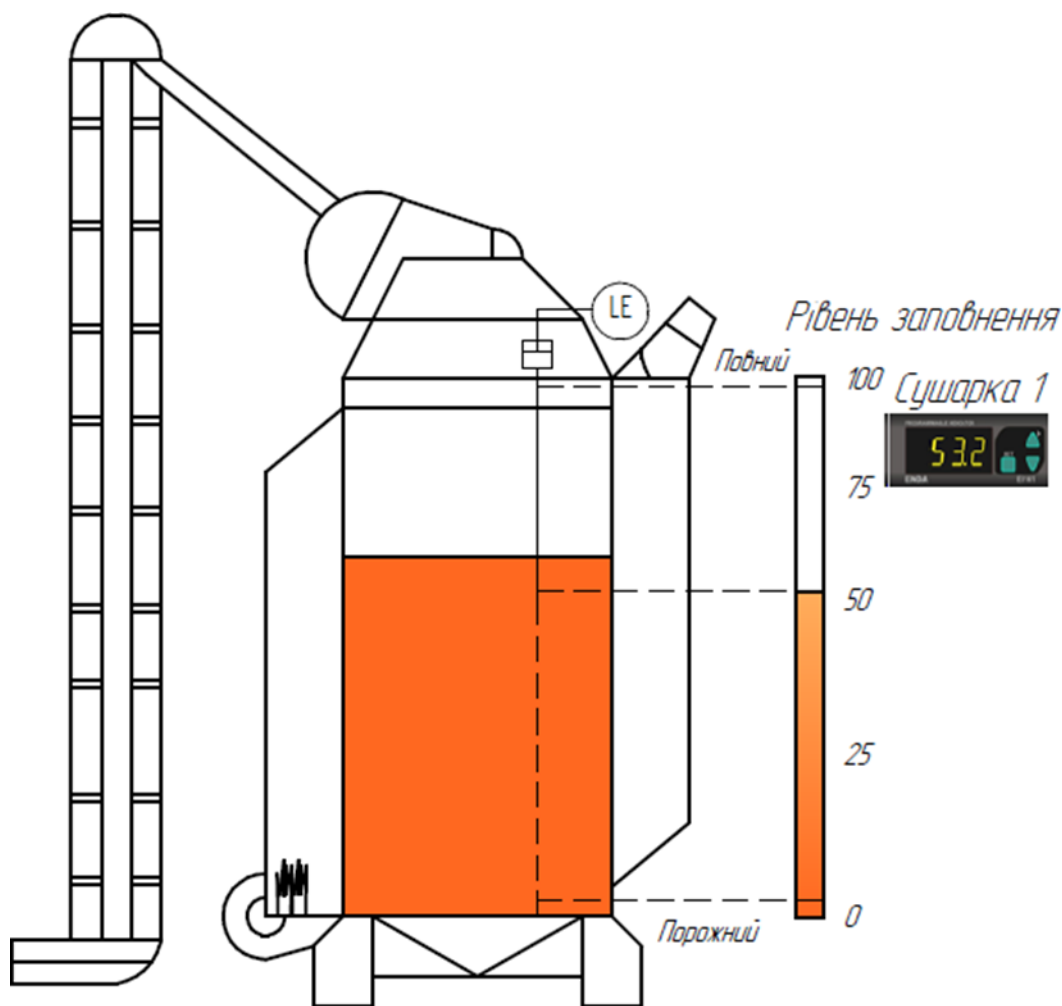


Рис. 4.3. Схема роботи система контролю рівня MOLOSbob LF20

Прилад являє собою конструкцію, що включає металеву стрічку, по якій здійснюється переміщення вантажного елемента. Як тільки грузик торкається поверхні, сила розтягування металеві стрічки зменшується. Ослаблена сила натягу стрічки миттєво визначається електронним блоком MOLOSbob LF20 і подальше занурення грузика припиняється. Після цього на прилад подається сигнал 4-20 мА, пропорційний виміряної дистанції, і грузик повертається у

вихідне положення. Виміряне значення зберігається до наступного циклу виміру. Застосування різноманітних типів важків забезпечує високоточне визначення рівня сипучого матеріалу, незалежно від його щільності та розмірів часток. Даний сигнал можна візуалізувати за допомогою простого дисплея, що монтується, наприклад, в розподільну шафу.

Характеристики продукту:

- Надійний безперервний вимір рівня в силосах висотою до 42м.
- Технологія вимірювання, на результати якої не впливають властивості продукту, такі як пил, волога, електропровідність або розмір часток.
- Можливий вимір рівня при робочій температурі до 150 ° С.
- Конструкції, що знаходяться всередині силосу не впливають на результати вимірювань.
- Висока точність вимірювання в режимі онлайн до ± 2.5 см.
- 4-х рядковий дисплей для простого введення в експлуатацію та управління.
- Можливе використання в зоні з небезпекою вибуху пилу, категорія 1 / 2D.
- Клас захисту IP 67 згідно EN 60529.
- Компактний і одночасно надійний пристрій з невеликою вагою.
- Спеціально розроблена металева стрічка запобігає забрудненню з внутрішньої сторони корпусу.
- Виключається можливість відриву і падіння грузика завдяки повністю електронному режиму аварійного захисту.

Надійний безперервний вимір у ємкостях, бункерах, наповнених будь-яким сипучим матеріалом.

Технічні характеристики приладу:

- Корпус: алюміній пофарбований RAL 7001.
- Розміри: 300 x 260 x 225 [ВxШxГ].
- Підключення до процесу: фланець DN100 PN16 / 4.
- Вимірювальна стрічка: нержавіюча сталь (301, модифікована).
- Діапазон вимірювання: 0-42 м Вага 11,5 кг включаючи грузик.

- Швидкість руху стрічки: 0,16...0,25 м/с.
- Сила натягу: 150 Н.
- Живлення: 90 ... 253 В пер. т., 50/60 Гц 20 ... 28 В.
- Енергоспоживання: макс.150 ВА.
- Діапазон вхідної напруги: 12 ... 24 В.
- Вихідний струм: 4...20 мА (активн.).
- Релейні виходи: макс. 250 В пер. т. / 6А.
- Оптронний вихід: макс. 30 В пост. т./ 10 мА.
- Робоча температура: -20 °С ... +150 °С.
- Сертифікати вибухозахисту: АTEX II 1/2D Ex ta/tb IIIС Т99°С.

4.2. Розробка функціональної схеми автоматизації

У даному дипломному проєкті функціональна схема автоматизації (ФСА) елеватора представлена окремим графічним матеріалом, який демонструє розташування та взаємозв'язок технічних засобів автоматизації (ТЗА).

Функціональні схеми контролю та автоматизації є базовим технічним документом, що формує функціонально-блочну структуру систем автоматичного контролю, керування та регулювання технологічних процесів, визначає оснащення об'єкта керування контрольно-вимірювальними приладами та засобами автоматизації.

Функціональні схеми автоматизації являють собою технічні креслення, на яких за допомогою стандартизованих умовних позначень відтворюються:

- технологічне обладнання;
- комунікаційні мережі;
- пристрої контролю, керування та автоматизації;
- зв'язки між технологічними елементами та автоматизованими системами.

Компоненти контролю та керування можуть бути інтегровані безпосередньо в технологічне обладнання і трубопроводи або розміщені у спеціалізованих

приміщеннях, таких як операторські та диспетчерські центри.

Система автоматизації елеватора призначена для здійснення контролю технологічних процесів та регулювання ключових параметрів з метою підтримання стабільного функціонування технологічного циклу. Усі параметри, відхилення яких може спричинити аварійні ситуації або загрозу безпеці персоналу, підлягають обов'язковій сигналізації.

Для забезпечення надійної роботи автоматизованої системи на елеваторі передбачено захисні механізми, які запобігають перевищенню критичних значень параметрів технологічного процесу.

У окремому графічному документі «Функціональна схема автоматизації» представлено схему підключення основних засобів автоматизації, серед яких ключовим елементом виступає програмований логічний контролер (ПЛК) SIEMENS 6ES7214.

ПЛК SIEMENS 6ES7214 забезпечує керування технологічними процесами елеватора та взаємодію з усіма автоматизованими пристроями системи.



Рис. 4.4. ПЛК SIEMENS 6ES7214

Програмований логічний контролер SIEMENS 6ES7214 (S7-1200) є мікроконтролером універсального призначення, здатним виконувати широкий спектр завдань автоматизації. Завдяки модульній конструкції та підтримці роботи в реальному часі, цей ПЛК може застосовуватися як для створення простих

локальних вузлів автоматики, так і для комплексних систем автоматичного керування з інтенсивним обміном даними через мережі Industrial Ethernet / PROFINET, а також через PtP (Point-to-Point) з'єднання.

Контролери серії S7-1200 мають компактний пластиковий корпус із захистом IP20, можуть встановлюватися на стандартну DIN-рейку 35 мм або на монтажну плату та функціонують у температурному діапазоні 0...+50 °С. Кількість каналів введення-виведення варіюється від 10 до 284 дискретних та від 2 до 51 аналогових, що дозволяє забезпечувати гнучке масштабування системи відповідно до потреб технологічного об'єкта.

Функціональні характеристики програмованого логічного контролера SIEMENS 6ES7214 включають:

- Програмування на мовах LAD (Ladder) та FBD (Function Block) із повним набором логічних та арифметичних команд.
- Високу швидкодію: час виконання однієї логічної операції не перевищує 0,1 мкс.
- Вбудовану завантажувальну пам'ять об'ємом до 2 Мбайт, з можливістю розширення картами пам'яті до 24 Мбайт.
- Робочу пам'ять ємністю до 50 Кбайт для зберігання поточних даних та змінних.
- Інтегровані дискретні входи універсального призначення, що підтримують введення потенційних і імпульсних сигналів.
- Вбудовані швидкісні лічильники, які обробляють сигнали з частотою до 100 кГц.
- Підтримку функцій ПІД-регулювання для автоматичного контролю технологічних процесів.
- Можливість оновлення операційної системи контролера.
- Захист програми користувача за допомогою пароля.
- Програмовані комунікаційні порти для обміну даними з іншими пристроями через модулі CM +1241.

Цей набір функцій забезпечує високий рівень гнучкості та надійності при

побудові локальних та розподілених систем автоматизації.

4.2.1 Особливості побудови функціональних схем

Дана схема зображена на окремому графічному документі «Функціональна схема автоматизації».

Технологічний процес відбувається наступним чином: прийом зерна здійснюється автотранспортом через завальну яму 1. Із завальної ями 1 через норію 16 зерно потрапляє на роздільний клапан 19, де оператор відповідно до завдання направляє зерно на сепаратор ОВС-25 або на транспортер 3 і через клапан 1 на відвантаження. Зерно після ОВС-25 потрапляє на транспортер 3 і через клапан 2 на розподільний клапан 20, звідки зернова культура в залежності від завдання може відправитись у склад, через Буферний бункер 24 або на норію 17 на вторинну чистку через транспортер 8. Зерно, яке потрапило на розподільний клапан 22 може завантажуватися у силоси (1,2,3 або 4) для подальшого зберігання або продовжити рух до розподільного клапану 21, де завантажиться у буферний бункер 2. З буферного бункеру 25 зерно може відправитись на відвантаження у вагони через транспортер 4 на розподільчий транспортер 1.1. З розподільного клапана 5 зерно рухається на норію 17, з якої через транспортер 8 потрапляє на вторинну очистку, де відкалібровуються зернини з дефектами.

Після вторинної чистки зерно відправляється на сушку через клапан 6, транспортер 9 та норію 18 продукт потрапляє у камеру сушіння, де відбувається зниження вологості зерна до прийнятної норми для закладання зерна на довгострокове зберігання. Зі сушки зерно відвантажується через транспортер 15 на розподільчий клапан 2, звідки за вибором оператора зерно направляється на завантаження автотранспорту або у склад. Якщо вологість зерна після сушки не відповідає нормі, то воно знову відправляється на повторну сушку через транспортер 11, буферний бункер 26, транспортер 9 та норію 18.

За вище описаною схемою зерносушильний комплекс успішно функціонує і

виконує основні свої функції, а саме: прийом зерна, очищення зерна, вторинна очистка зернового і насінневого матеріалу, сушка зерна, зберігання зерна.

4.3. Характеристика SCADA-системи Proficy SCADA iFix

SCADA - система iFIX входить до складу пакету FIX Dynamics - повністю інтегрованого програмного забезпечення на основі стандарту OPC, COM/DCOM-технології, VBA. Ядром пакета є підсистема I-CORE, призначена для поєднання всіх додатків. Компонентами I-CORE є:

- Підсистема тривоги (alarm).
- Підсистема захисту (Security).
- Підсистема конфігурування (SCU).
- Підсистема підтримки мережі (Network), OPC-клієнт, VBA та Workspace.

Навколо I-CORE розташовуються інші підсистеми, у тому числі база даних реального часу (БДРВ), яка взаємодіє з іншими програмами протоколу OPC. Ядром пакета є БДРВ, за допомогою якої менеджер БД надає широкі можливості розробки та ведення БД. Сама БД може бути як сервером, так і клієнтом.

Середовище розробки та відображення проектів Intellution Workspace надає широкі графічні можливості і дозволяє розробляти проект в єдиному середовищі із зрозумілим інтерфейсом.

Підтримуються два режими:

- Режим Configuration (розробка проекту).
- Режим Run Time (режим виконання).

Пакет iFIX підтримує використання об'єктів ActiveX, що дозволяє поміщати на мнемосхемах будь-які доступні компоненти. Серед об'єктів ActiveX поставляється «зведення тривоги» контролю аварійних ситуацій з виробництва у реальному масштабі часу.

В iFIX є інструмент Vision X для отримання інформації з реляційних баз даних (SQL Server, Oracle, Sy Base, Informix, DB2). Vision X є набір готових об'єктів, які інтегруються в Intellution Workspace. Для захисту системи від збоїв,

спричинених некоректною роботою об'єктів, використовується технологія Secure Containment IW space, що має великі можливості для анімації об'єктів.

Пакет iFIX підтримує клієнт-серверну архітектуру. Вузол клієнт отримує дані від SCADA-серверів та реалізує функції візуалізації та диспетчерського управління.

4.4. Розробка основного проєкту

Формування бази тегів. Для відображення роботи системи використовуються теги. За джерелом отримання даних теги розділяють на:

- зовнішні теги (I/o - Input/output), пов'язані з віддаленими пристроями;
- внутрішні (Internal або Memory), що не мають такого зв'язку;
- системні (System), які створюються автоматично і є своєрідними словами та пропорціями стану.

У середовищі SCADA-системи відбувається обробка значень системних тегів у відповідь на певні події, що виникають у процесі функціонування системи. Такі теги можуть застосовуватися в усіх контекстах, де використовуються звичайні теги, зокрема в елементах анімації або сценаріях управління. Під час формування бази даних тегів кожному з них необхідно присвоїти тип залежно від його функціонального призначення. Якщо тег призначений для зчитування або передавання даних, що надходять із зовнішніх програмних середовищ Windows чи обмінюються з ними через сервер введення/виведення, він класифікується як зовнішній тег. До цієї категорії належать усі вхідні та вихідні сигнали, внутрішні змінні програмованих логічних контролерів, комп'ютерів керування технологічними процесами, а також інформація, що надходить із вузлів мережевих систем.

На відміну від внутрішніх, зовнішні теги зберігаються безпосередньо у програмному середовищі SCADA-додатка. Їх застосовують для формування постійних значень (констант), реалізації допоміжних модулів або як обчислювані змінні, що використовуються у математичних виразах і розрахункових

алгоритмах системи автоматизації. БДРЧ може містити десятки тисяч змінних, кожна з яких має десятки атрибутів. До конфігурування змінних в спеціальних редакторах треба відноситись особливо ретельно.

У даному проекті використовуються теги дискретного входу (DI) та виходу (DO) для здійснення диспетчерських команд з пульта віддаленого управління. Також застосовуються теги аналогового входу (AI) та аналогового виходу (AO) для керування двигунами з аналоговим вводом даних або створення потрібних значень під час використання тегів у формулах. Обчислення у проекті реалізовані за допомогою блоків обчислень (CA), які у реальному часі з фіксованим значенням опитування проводять обчислення значень потрібних для роботи системи.

Розробка структури проекту, дисплея заставки та титульного вікна. Проект було розроблено для диспетчерського контролю та управління процесом сушіння зерна у зерносушарці шахтного типу. Передбачалося, що буде можливість впливати на процес сушіння зерна у реальному часі та налаштовувати автоматизований процес сушіння у залежності від різних вхідних параметрів.

Для схематичного відображення процесу надходження зерна, сушіння та відвантаження сировини на зберігання спроектовано модель з основними вузлами системи, яка зображена на рисунку 4.5.

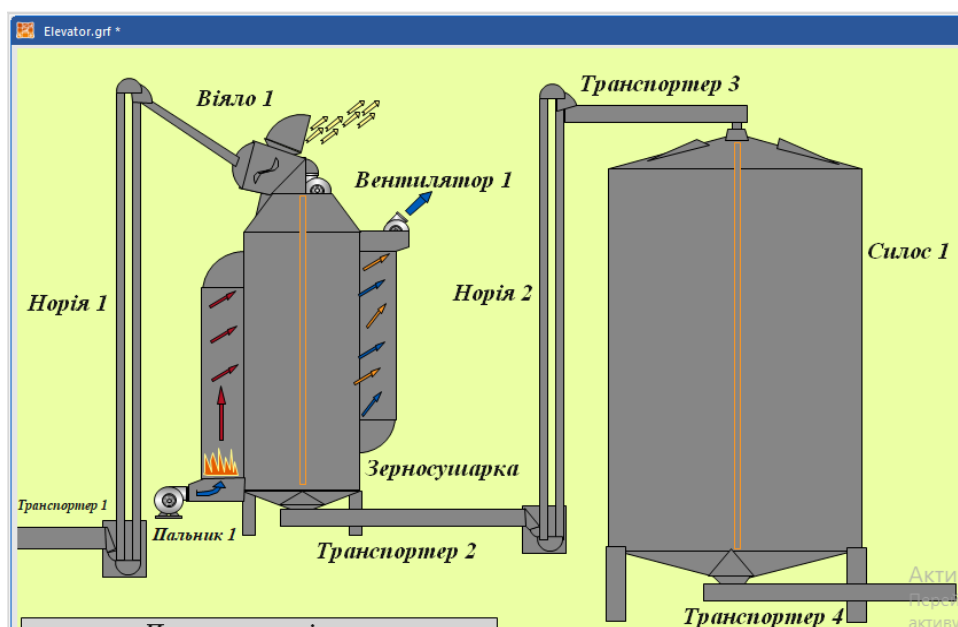


Рис. 4.5. Модель зерносушильного комплексу

Для диспетчерського управління передбачена спеціальна панель управління (рис 4.6), на якій можна здійснювати контроль технологічного процесу.



Рис. 4.6. Панель управління

Для відображення стану процесу, а також інформування про можливі аварії розроблена інформаційна панель, яка зображена на рисунку 4.7.

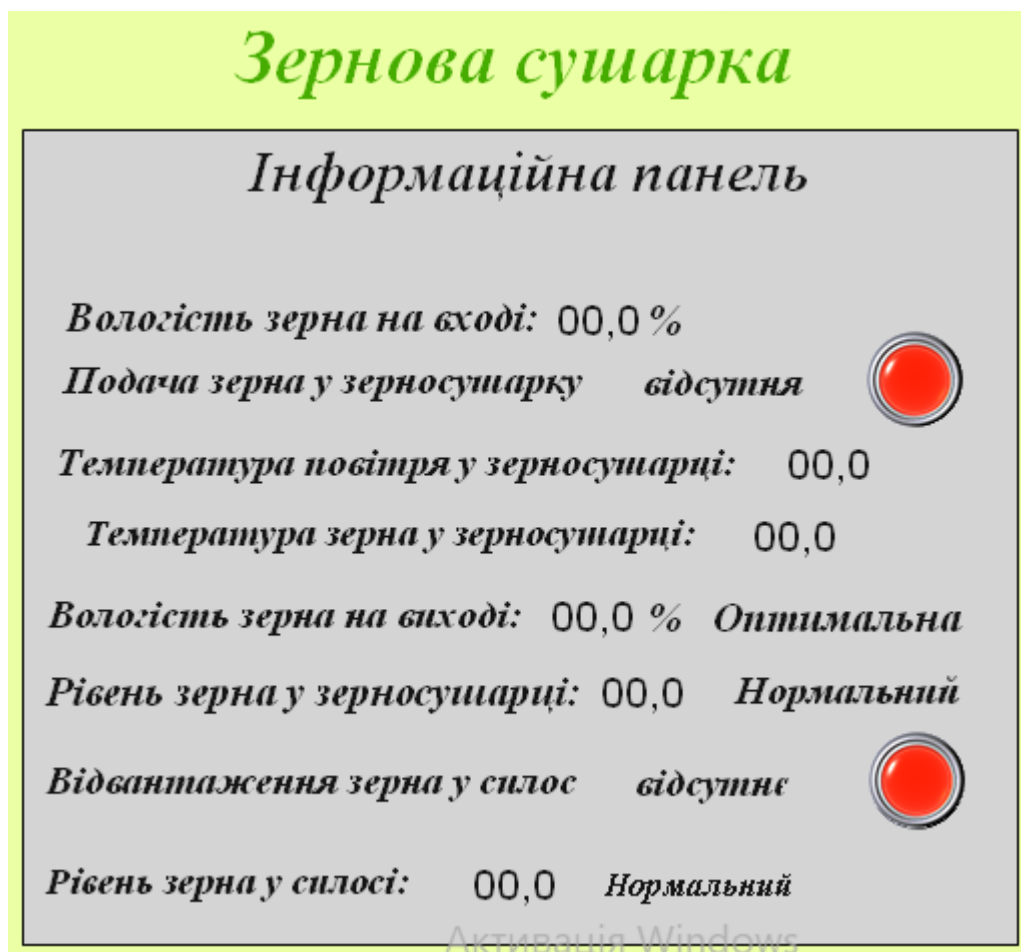


Рис. 4.7. Інформаційна панель

Написи, які відповідають за зміну параметри є анімованими і змінюються відповідно до ситуації на виробництві. За допомогою даної панель можна детально побачити основні змінні під час роботи та переконатися, що процес протікає правильно, без відхилень від норми.

Для узагальненого розуміння якості сушіння спроектовано вікно графіка «Фактична вологість зерна» (рис 4.8), який показує як проходить процес у реальному часі.

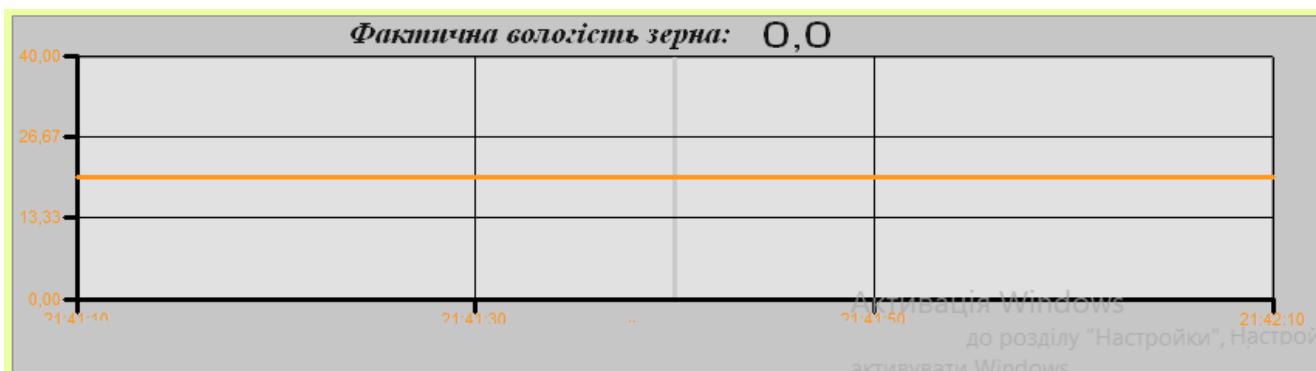


Рис. 4.8. Вікно «Фактична вологість зерна»

Оскільки SCADA-система розроблялася для моніторингу і диспетчерського контролю зерносушильного комплексу, то даний процес є головним показником виконання роботи і повинен дублюватися на окремому інформаційному вікні у зручній для сприйняття формі, щоб забезпечувати оперативне розуміння ситуації у конкретний момент часу.

4.5. Запуск та опис роботи проекту

Основна задача даної SCADA-системи – це моніторинг та диспетчерське управління зерносушаркою на елеваторі. Очевидно, що це мала частина усієї автоматизації, як можна організувати на великому елеваторі, де знаходиться велика кількість транспортів, норій, силосів для зберігання зерна та іншого обладнання агропромислового комплексу.

На реальному об'єкті для вирішення задачі транспортування застосовують простий, але ефективний прийом – пуск із випередженням у часі. Це необхідно

для запобігання пересипання зерна із транспортера у випадку, коли подача уже відбувається, а наступний транспортер ще не увімкнувся. У нашому проекті вважається, що зерно рухається послідовно, та усі аварійні системи працюють правильно, тобто пуск/стоп налаштований з випередженням часу.

Перейдемо у режим «Виконання» у програмному середовищі, рисунок 4.9.

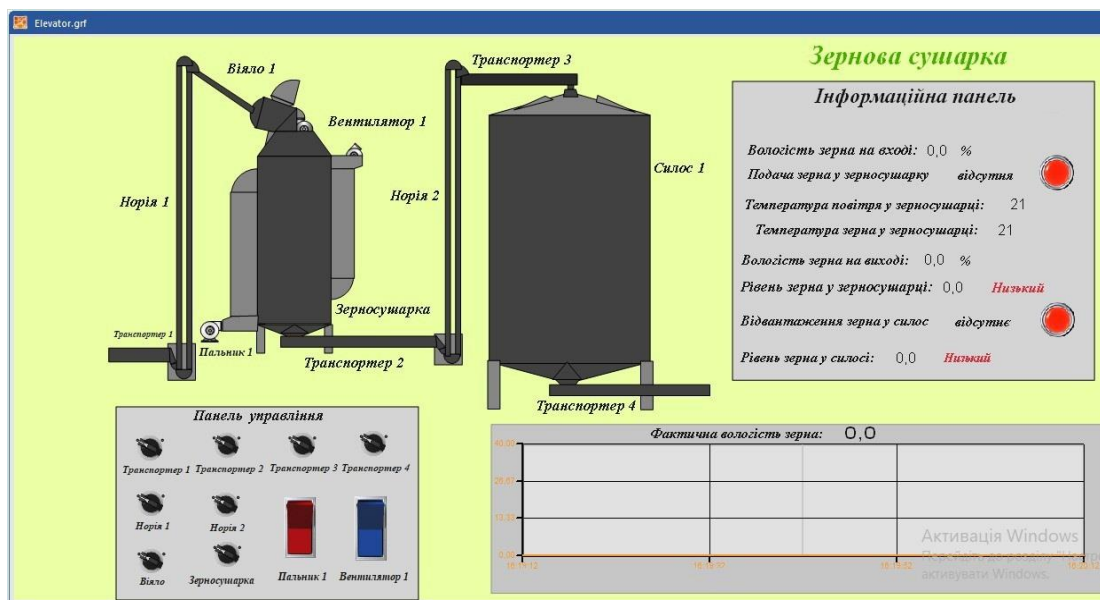


Рис. 4.9. Проект у режимі виконання

Коли установка сушіння зерна вимкнута, то показники знаходяться у нульових значеннях. Почнемо роботу, та переконаємося у справності проекту.

Запустимо транспортер 1 і одразу побачимо графічне відображення на основному вікні моніторингу (рис. 4.10).

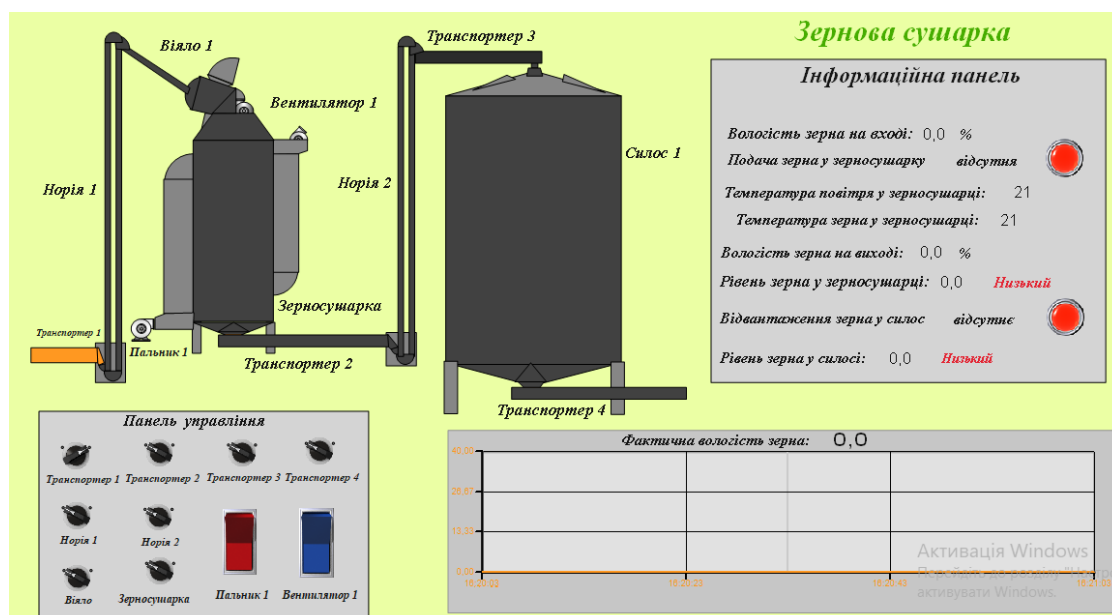


Рис. 4.10. Запуск транспортера 1

Спрацював скрипт, який вмикається після активації дискретного тегу:

```
Private Sub SwitchSelector2StateLg_Edit ()
|   frmSwitchAnim.InitializeDynamo SwitchSelector2StateLg, SWITCH_ROTARY2
   frmSwitchAnim.Show
End Sub
```

Візуальне відображення роботи елементів елеватора реалізовано зафарбуванням об'єктів оранжевим кольором. Такий варіант візуалізації сильно наближений до реальних систем, котрі застосовуються на практиці. Даний метод позначення працюючих елементів комплексу є інтуїтивно зрозумілий персоналу та не потребує додаткових навчань.

Запустимо норію 1 для продовження транспортування зерна (рис 4.11). Варто зауважити, що на об'єктах завжди працює система випередження, котра убезпечує комплекс від аварійних ситуацій методом блокування приладів, які вмикаються не послідовно відповідно до завдання.

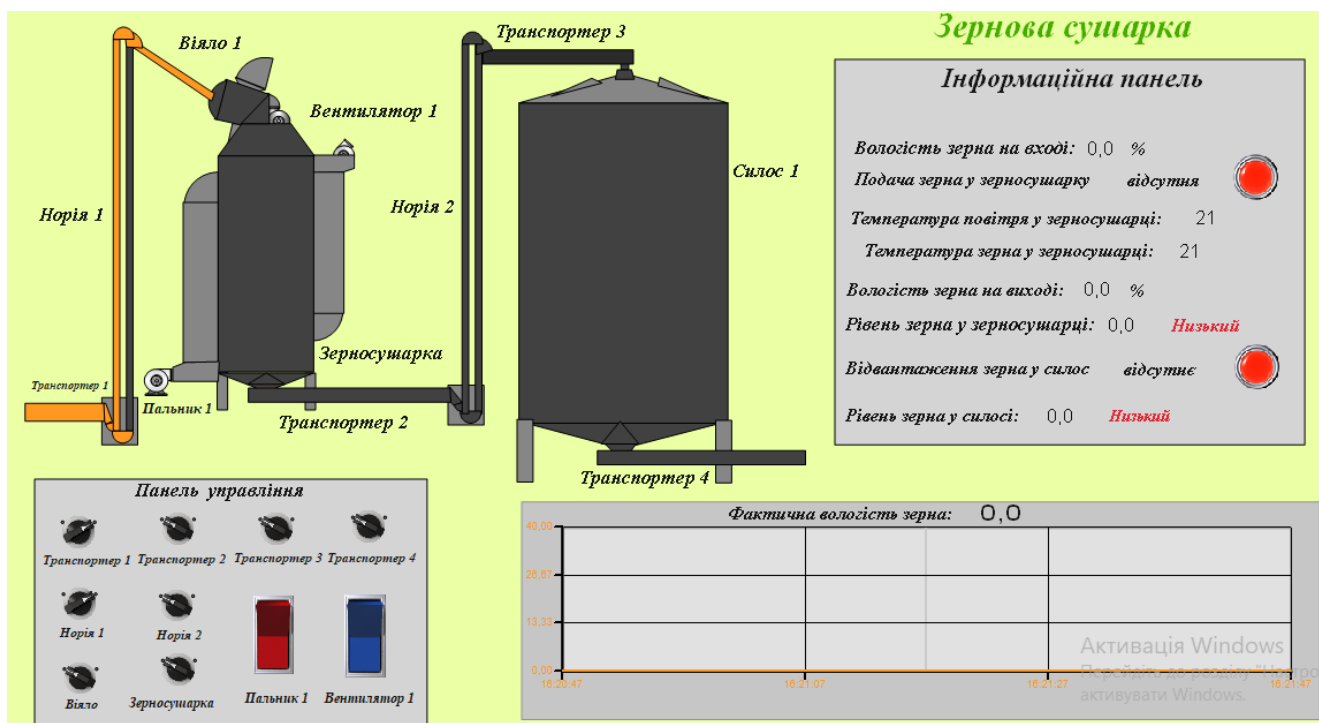


Рис. 4.11. Запуск норії 1

Скрипт для вмикання норії виглядає наступним чином:

```
Private Sub SwitchSelector2StateLg6_Edit ()
   frmSwitchAnim.InitializeDynamo SwitchSelector2StateLg6, SWITCH_ROTARY2
   frmSwitchAnim.Show
End Sub
```

Наступним кроком потрібно запустити агрегат «Віяло» (рис 4.12).

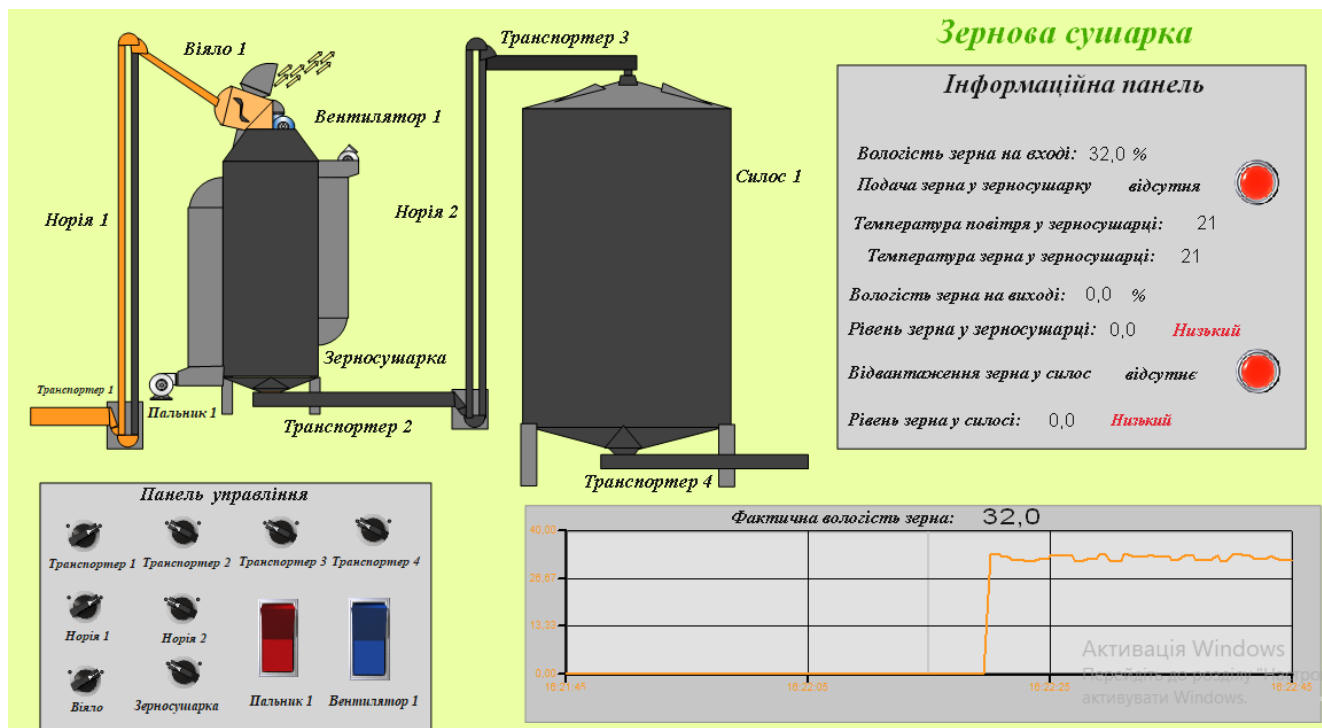


Рис. 4.12. Запуск віяла

Для даного агрегату теж є, уже типовий, скрипт:

```
Private Sub SwitchSelector2StateLg7_Edit ()
    frmSwitchAnim.InitializeDynamo SwitchSelector2StateLg7, SWITCH_ROTARY2
    frmSwitchAnim.Show
End Sub
```

Після запуску віяла ми бачимо, що на графіку «Фактична вологість зерна» та на інформаційній панелі відображається вхідна вологість зерна. Варто зазначити, що усі дії ми виконуємо за допомогою перемикачів на панелі управління, які зв'язані з елементами на схемі за допомогою тегів.

Наступним кроком потрібно почати заповнення зерносушарки (рис 4.13). Для цього вмикаємо відповідний вмикач. Скрипт для зерносушарки запуститься автоматично:

```
Private Sub SwitchSelector2StateLg8_Edit ()
    frmSwitchAnim.InitializeDynamo SwitchSelector2StateLg8, SWITCH_ROTARY2
    frmSwitchAnim.Show
End Sub
```

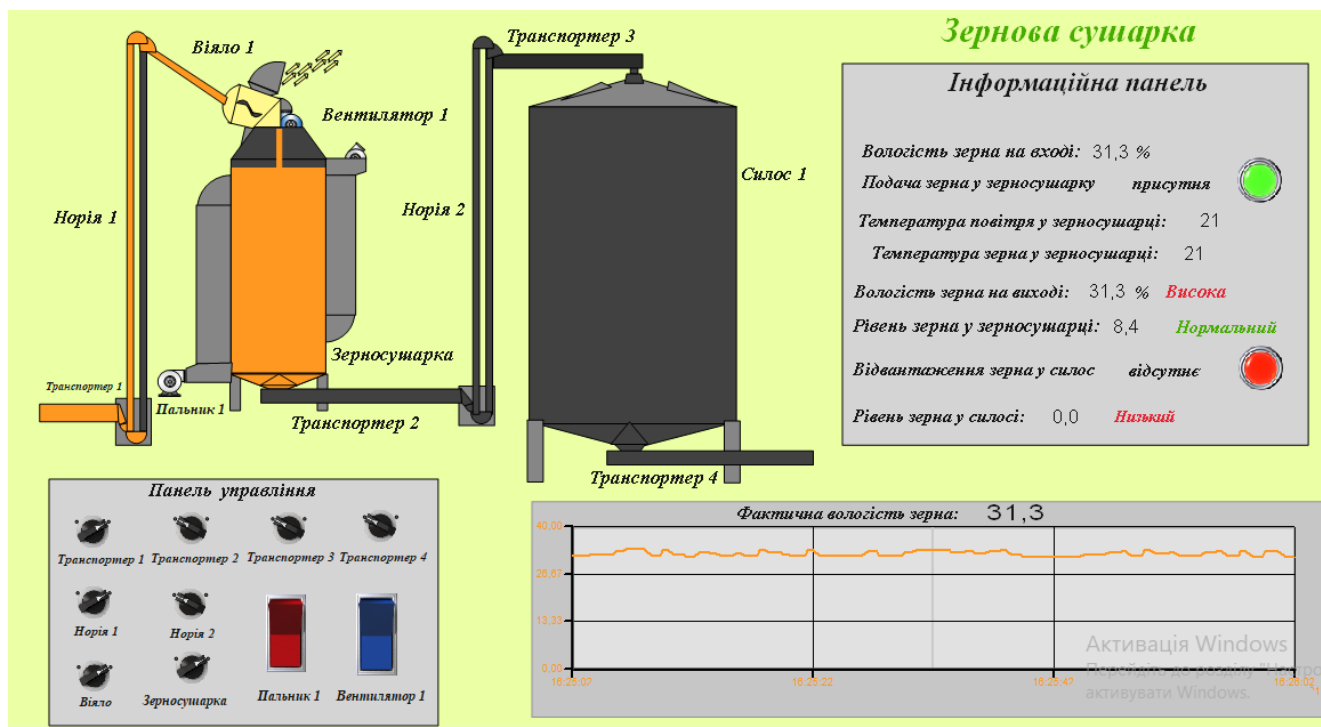


Рис. 4.13. Заповнення зерносушарки

Після заповнення установки до нормального рівня потрібно ввімкнути пальник 1 для подачі теплого повітря у камеру сушіння зерна (рис 4.10). Скрипт для пальника 1 виглядає наступним чином:

```
Private Sub SwitchToggleLgRed_Edit ()
    frmSwitchAnim.InitializeDynamo SwitchToggleLgRed, SWITCH_TOGGLE
    frmSwitchAnim.Show
End Sub
```

Звісно ж процес сушіння не почнеться після подачі теплого повітря, оскільки нагріте зерно під час висихання виділяє пару, це і є вологість яка міститься у зерні. Для ефективного протікання процесу необхідно ввімкнути вентилятор 1 (рис 4.11) щоб забрати пару (вологу) з камери сушіння. Скрипт для вентилятора 1 має типовий вигляд:

```
Private Sub SwitchToggleLgBlue_Edit ()
    frmSwitchAnim.InitializeDynamo SwitchToggleLgBlue, SWITCH_TOGGLE
    frmSwitchAnim.Show
End Sub
```

Тільки при правильному налаштуванні усіх агрегатів у комплексі зерносушарки можна розраховувати на ефективний процес сушіння з мінімальними витратами та оптимальною швидкістю сушіння. Процес

розрахунку, налаштування регуляторів, проектування системи сигналізації та інші критично важливі дії необхідно виконати для запуску комплексу.

Запустимо виконавчий механізм для нагрівання сушильного агента.

Відповідний процес зображений на рис. 4.14.

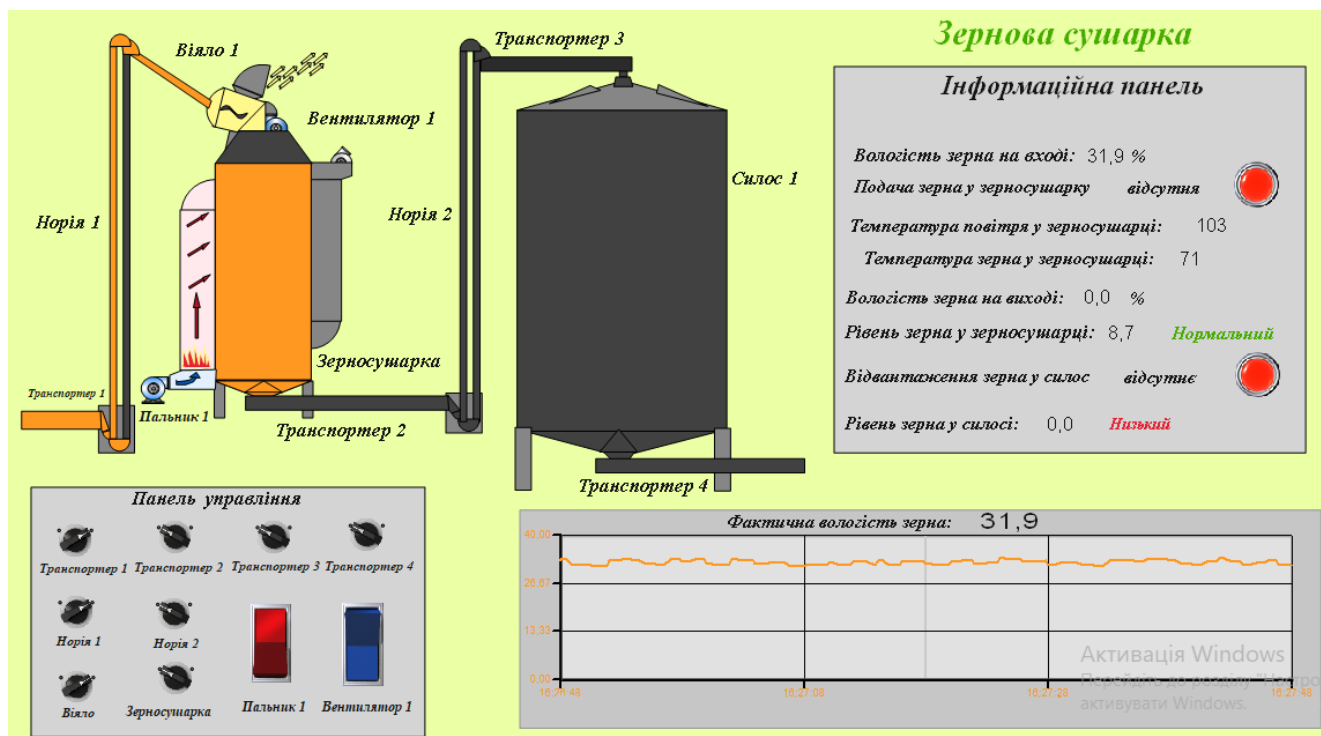


Рис. 4.14. Запуск пальника 1

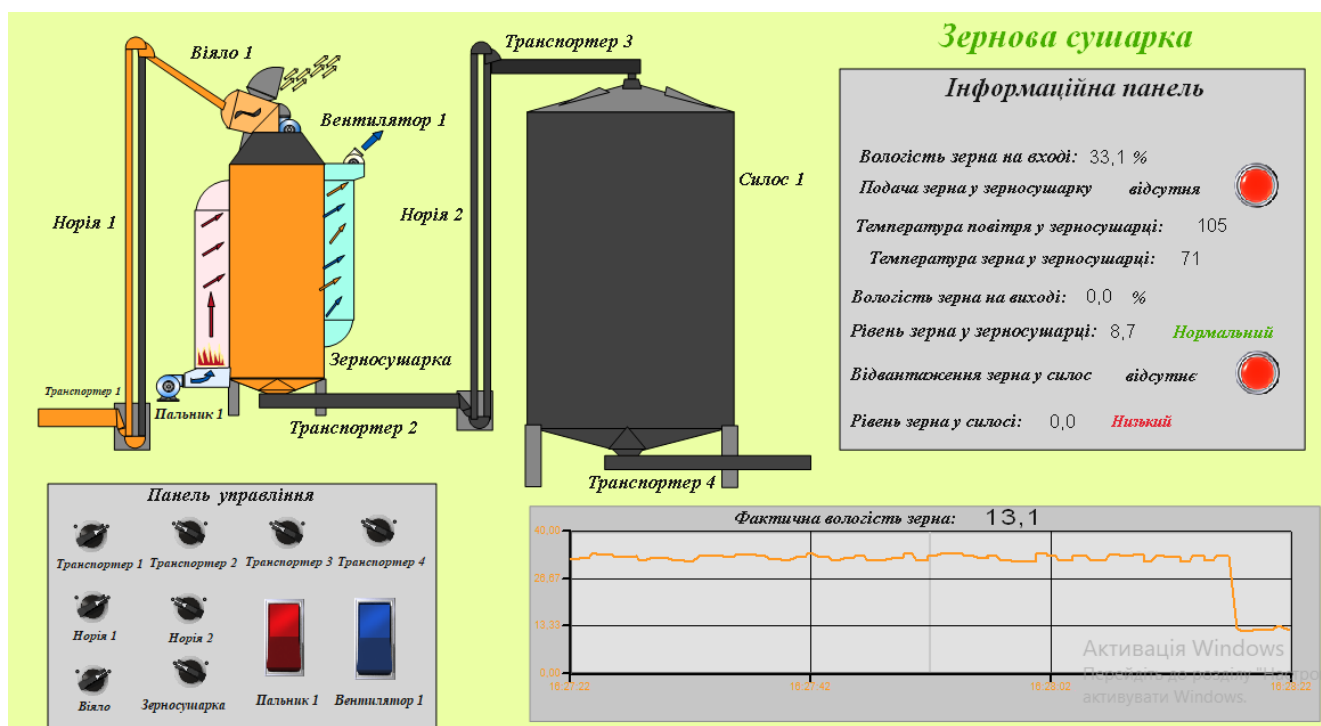


Рис. 4.15. Запуск вентилятора 1

Після запуску необхідних елементів через панель управління на інформаційній панелі та на графік відображається стан процесу у реальному часі.

Наступним кроком потрібно почати відвантаження зерна, щоб процес відбувався безперервно. Запустимо транспортер 2, норію 2 та транспортер 3 щоб відвантажувати сухе зерно у силос 1 на зберігання (рис 4.16). Скрипти для відповідних елементів виглядають наступним чином:

Транспортер 2

```
Private Sub SwitchSelector2StateLg1_Edit()
|   frmSwitchAnim.InitializeDynamo SwitchSelector2StateLg1, SWITCH_ROTARY2
|   frmSwitchAnim.Show
End Sub
```

Норія 2

```
Private Sub SwitchSelector2StateLg4_Edit()
|   frmSwitchAnim.InitializeDynamo SwitchSelector2StateLg4, SWITCH_ROTARY2
|   frmSwitchAnim.Show
End Sub
```

Транспортер 3

```
Private Sub SwitchSelector2StateLg2_Edit()
|   frmSwitchAnim.InitializeDynamo SwitchSelector2StateLg2, SWITCH_ROTARY2
|   frmSwitchAnim.Show
End Sub
```

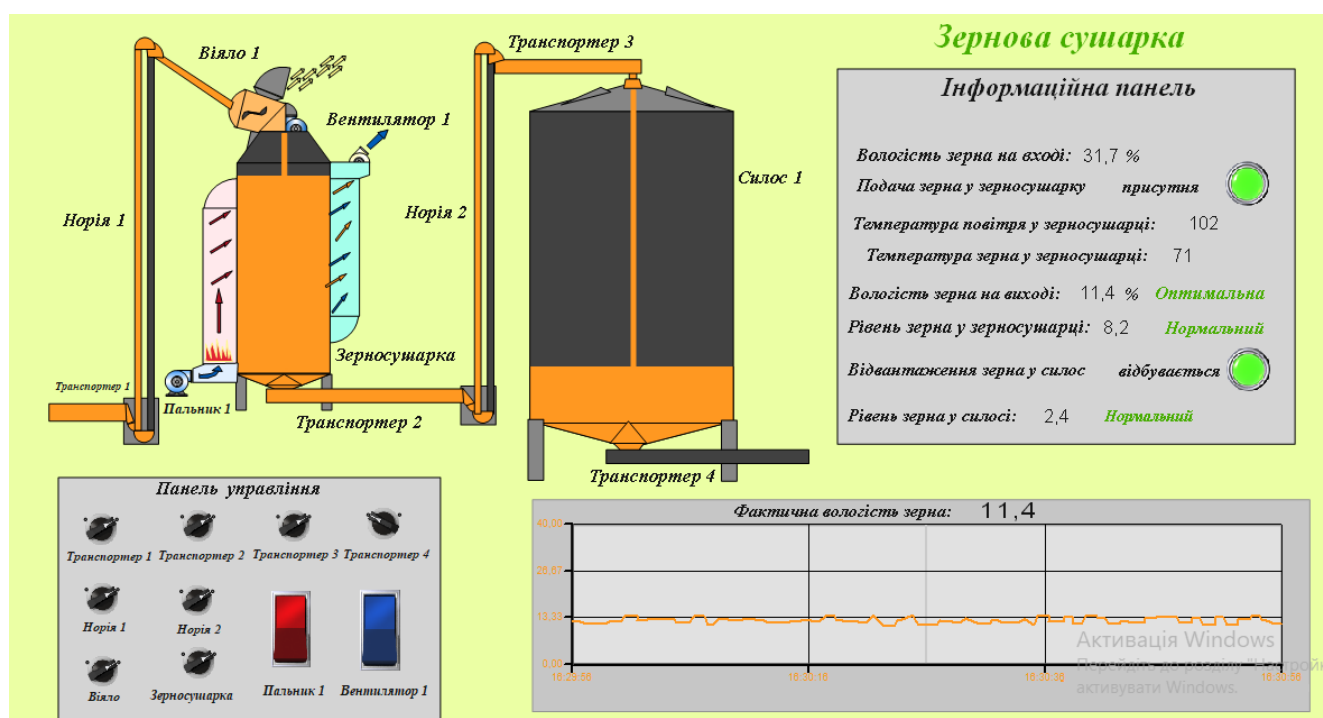


Рис. 4.16. Процес у безперервному режимі

Користуючись інформаційною панеллю та графіком фактичної вологості зерна можна переконаватися у тому, що система працює правильно. Спостерігаючи за рівнем у ємностях можна зробити висновки, що система налаштована на безперервну роботу і працює стабільно.

Значення температури та вологості можна спостерігати на інформаційній панелі. Говорячи про температуру, варто враховувати, що вона буде відрізнятися у камері подачі теплого повітря, біля пальника 1 і у камері сушіння зерна. Це відбувається у зв'язку з тим, що тепло передається від агента сушіння до вологого зерна. Волога у вигляді пари поглинається агентом сушіння і виводиться. Даний параметр налаштовується автоматично і є важливим, оскільки пересушене або недосушене зерно не підходить для подальшої реалізації.

У випадку коли силос 1 заповниться можна почати відвантаження у інші силоси для зберігання зерна. Для цього потрібно ввімкнути транспортер 4 (рис 4.17). Скрипт транспортера 4:

```
Private Sub SwitchSelector2StateLg3_Edit ()
    frmSwitchAnim.InitializeDynamo SwitchSelector2StateLg3, SWITCH_ROTARY2
    frmSwitchAnim.Show
End Sub
```

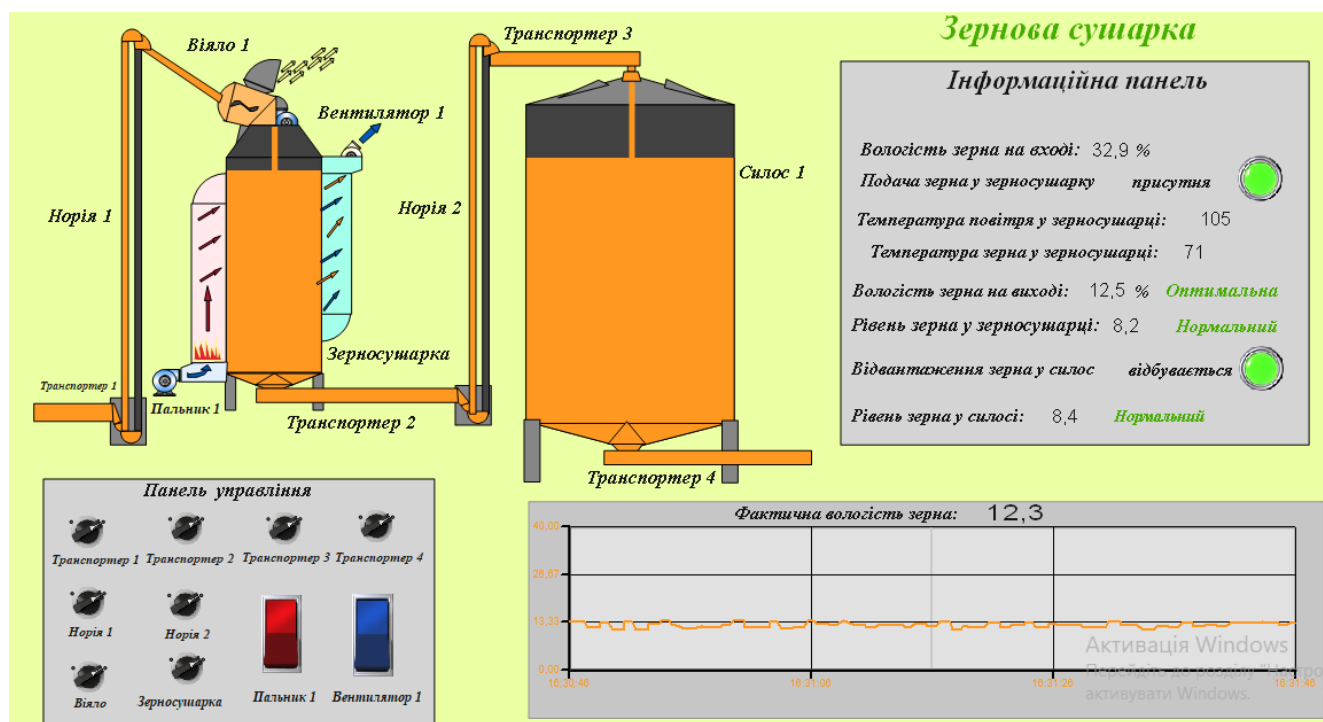


Рис. 4.17. Запуск транспортера 4

Виконавши усі дії, можна сказати, що процес автоматизований та стабільний, але у випадку, коли будь-який параметр виходить за межі норми вмикається автоматична сигналізація. Побачити приклад спрацювання сигналізації можна на рисунку 4.18. Загоряються індикатори червоним кольором та текст зафарбовується у відповідник колір.

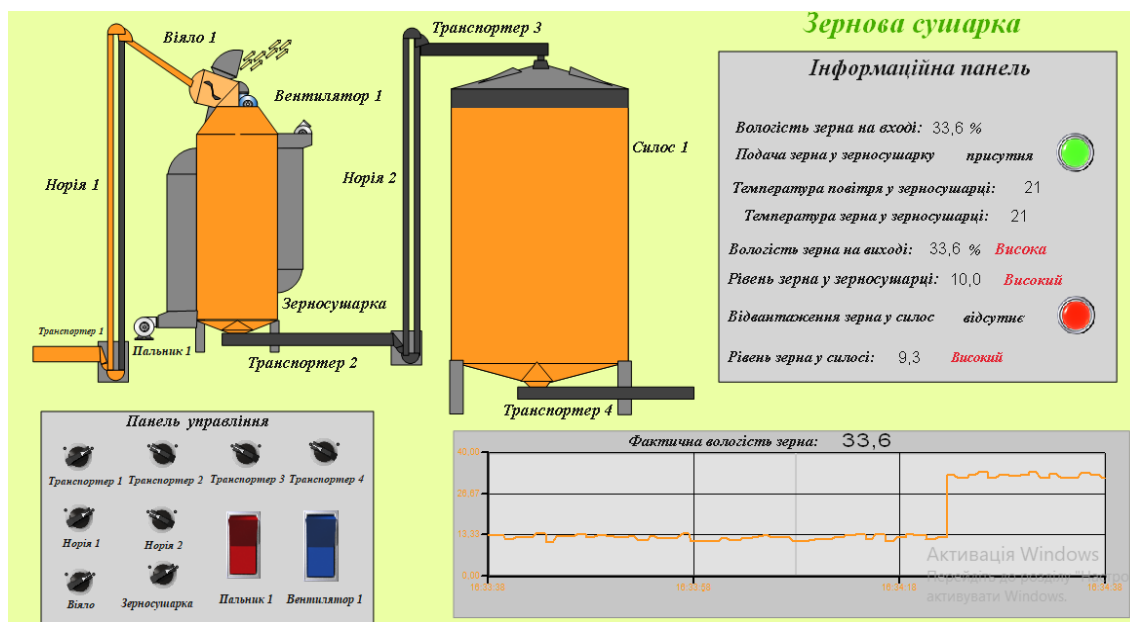


Рис. 4.18. Спрацювання сигналізації

Отже, виконавши проектування SCADA-системи та перевіривши її працездатність, можна сказати, що система виконана вірно. Якісні показники продукту є контрольованими. Дані передаються на головний екран програми, звідки й здійснюється управління процесом.

Висновки до розділу 4

Спроектовано функціональну схему автоматизації зерносушильного комплексу. Здійснено вибір технічних засобів автоматизації відповідно до поставлених завдань. Синтезовано SCADA-систему зерносушильного комплексу, у програмі для візуалізації та віддаленого контролю – Proficsys iFix. Наведено скрипти за яким працює система. Зазначено основні показники, які відповідають за якість процесу сушіння. Показано роботу аварійної сигналізації на екрані моніторингу системи.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконаних у магістерській роботі досліджень сформульовано такі висновки:

1. На основі проведеного аналізу технологічного процесу сушіння зерна та узагальнення даних наукових і технічних джерел встановлено, що вирішальним чинником забезпечення високої якості готової продукції є раціональний вибір температурного режиму, який визначається початковою вологістю зерна, а також дотримання оптимального температурного градієнта в об'ємі сушильної камери. З огляду на це, для подальшого моделювання та автоматизації процесу було обґрунтовано вибір центрального теплогенератора зерносушильного комплексу як основного об'єкта дослідження.

2. Для забезпечення можливості подальшого синтезу систем автоматичного регулювання було розроблено математичну модель зерносушильної установки, розглянутої як кібернетична система з урахуванням взаємодії основних технологічних параметрів. Проведено активний експеримент, за результатами якого здійснено апроксимацію експериментальних даних. У середовищі Matlab визначено передавальні функції імітаційної моделі за каналами регулювання температури та вологості.

3. Розроблено імітаційну модель багатоконтурної системи автоматичного регулювання, яка враховує як прямі, так і перехресні зв'язки між каналами. Виконано параметричне налаштування регуляторів температурного та вологісного контурів із використанням методів оптимізації, що дало змогу здійснити моделювання та всебічний аналіз функціонування спроектованих систем автоматичного керування. Проведено оцінку показників якості роботи кожного з контурів.

4. У ході виконання роботи розроблено повний комплект проєктної документації для системи автоматизації зерносушильного комплексу. Проведено обґрунтований вибір технічних засобів автоматизації та створено програмне забезпечення, що забезпечує роботу регуляторів сушарки в автоматичному

режимі. Спроектовано та реалізовано SCADA-систему моніторингу та керування технологічними процесами комплексу. Представлено показники зміни параметрів продукту в процесі сушіння. Виконано аналіз і оцінку надійності вимірювальних каналів, результати якого підтверджують доцільність і працездатність обраних технічних рішень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

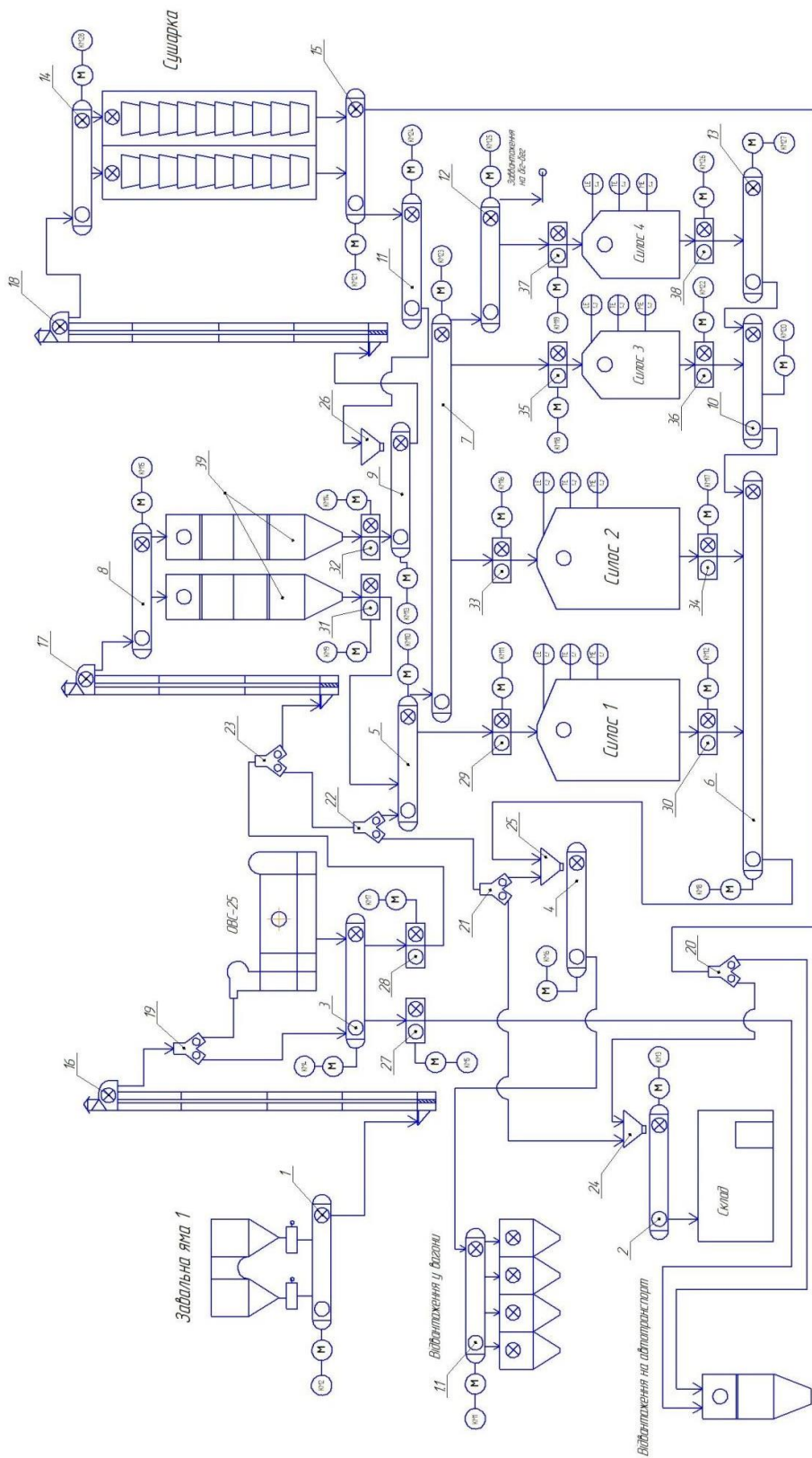
1. Теплонасосна зерносушарка для насіннєвого зерна / Снежкін Ю.Ф., Пазюк В.М., Петрова Ж.О., Чалаєв Д.М. Київ: ТОВ «Поліграф-Сервіс», 2012. - 154 с.
2. Мерко, І. Т., Моргун О. В. Наукові основи і технологія переробки зерна: підручник. Одеса, 2001. – 348 с.
3. Кирпа М. Я. Інноваційна система управління якістю посівного матеріалу кукурудзи. навч. посіб. Інститут зернових культур. Дніпро: НААН , 2018. 9 с.
4. Сучасні технології сушіння зерна. веб-сайт. URL: <https://agronomy.com.ua/statti/515-suchasni-tekhnologii-sushinnia-zerna.html>.
5. Повний спектр послуг з автоматизації елеваторів. веб-сайт. URL: https://kmzindustries.ua/wp-content/uploads/2022/05/avtomatizacija_kmz-industries_ukr_update_2022.pdf.
6. Захарченко Р.В. Аналіз режимів сушки на основі математичної моделі // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. – 2015. – Випуск 3(35). – С. 83 – 84.
7. Семенцов Г. Н. Теорія автоматичного керування: навч. посібник. Івано-Франківськ, 1999. 611 с.
8. Семенцов Г. Н., Чигур І. І. Фазі-логіка в системах контролю: навч. посібник. Івано-Франківськ: Факел, 2002. 70 с.
9. Дранчук М. М. Проектування систем автоматизації технологічних процесів в нафтовій та газовій промисловості.: навч. посіб. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2005. 448 с.
10. Семенцов Г. Н., Чигур І. І. Фазі-логіка в системах керування: навч. Посібник. Івано-Франківськ: Факел, 2002. 85 с.
11. Горбійчук, М. І. Сучасна теорія керування та методи оптимізації технологічних об'єктів нафтогазового комплексу [Текст]: конспект лекцій / М. І. Горбійчук. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2023. – 149 с.

12. Горбійчук, М. І. Теорія автоматичного керування. Лінійні системи.
[Текст]: конспект лекцій / М. І. Горбійчук. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2024. –
159 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Функціональна схема автоматизації



Відмітка на схемі	Найменування	Кількість
11, 1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15	Линейна структура слабкої проєкції	46
8, 17, 18	Корпус	3
19, 20, 21, 22, 23	Коловий клапан	5
24, 25, 26	Буровий гірничий	3
27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38	Клапан металочугунний	42
39	Ступінь	1

