

Міністерство освіти і науки України  
Центральноукраїнський національний технічний університет  
Факультет будівництва, транспорту та енергетики  
Кафедра автоматизації виробничих процесів

«Допущено до захисту»  
Зав. кафедри АВП  
к.т.н., доцент  
\_\_\_\_\_ Дідик О.К.  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**за другим (магістерським) рівнем вищої освіти**

на тему

**«Розробка системи автоматичного керування процесом  
сушіння сої в зерносушарці каскадного типу»**

Виконав здобувач вищої освіти II курсу  
групи АК-24М (1,4)  
174 «Автоматизація, комп'ютерно-  
інтегровані технології та робототехніка»  
\_\_\_\_\_ Андрій СКРИПКА  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

Керівник роботи к.т.н., асистент  
\_\_\_\_\_ Маріанна ФЕДОТОВА  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

Рецензент  
\_\_\_\_\_ Олег КИСЛУН  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

м. Кропивницький

## АНОТАЦІЯ

Соя є однією з найважливіших сільськогосподарських культур сучасності, яка використовується як цінне джерело білка та олії в харчовій, кормовій і промисловій галузях. Після збирання врожаю однією з ключових технологічних операцій є сушіння, від якості та ефективності якого залежить збереження поживних властивостей зерна, його схоронність і економічна вигода виробництва.

Традиційні методи сушіння сої часто пов'язані з великими енергетичними витратами, нерівномірністю висушування, перевитратою теплових ресурсів і значним впливом людського фактора. У зв'язку з цим автоматизація процесу сушіння сої є надзвичайно актуальним напрямом, що дає змогу підвищити точність контролю параметрів процесу (температури, вологості, швидкості повітряного потоку), зменшити енергоспоживання, оптимізувати роботу обладнання та забезпечити стабільну якість готової продукції.

Запровадження автоматизованих систем керування сушильними установками дозволяє не лише знизити трудові витрати, а й реалізувати інтелектуальні алгоритми регулювання, які враховують зміну умов навколишнього середовища та властивостей сировини. Це, своєю чергою, сприяє розвитку енергоефективного, екологічно безпечного й економічно вигідного аграрного виробництва.

Отже, дослідження та вдосконалення автоматизації процесу сушіння сої є актуальним завданням сучасного аграрного машинобудування та агропромислового комплексу України, спрямованим на підвищення конкурентоспроможності вітчизняної продукції на світовому ринку.

*Ключові слова: автоматизація, сушіння у киплячому шарі, дисперсний матеріал, соя, теплоносій, вологість, температура*

## ABSTRACT

Soybeans are one of the most important agricultural crops today, serving as a valuable source of protein and oil for the food, feed, and industrial sectors. After harvesting, one of the key technological operations is drying, the quality and efficiency of which determine the preservation of the grain's nutritional properties, its storability, and the overall economic profitability of production.

Traditional methods of soybean drying are often associated with high energy consumption, uneven moisture removal, excessive use of thermal resources, and a significant influence of the human factor. In this regard, automation of the soybean drying process is an extremely relevant area of research and development, as it allows for more accurate control of process parameters (such as temperature, humidity, and air flow rate), reduces energy consumption, optimizes equipment operation, and ensures stable product quality.

The implementation of automated control systems for drying equipment not only reduces labor costs but also enables the use of intelligent control algorithms that take into account changing environmental conditions and raw material properties. This contributes to the development of energy-efficient, environmentally safe, and economically sustainable agricultural production.

Therefore, the study and improvement of the automation of the soybean drying process represent a highly relevant task for modern agricultural engineering and the agro-industrial complex of Ukraine, aimed at increasing the competitiveness of domestic production in the global market.

*Key words: fluidized bed drying, dispersed material, grain, coolant, humidity, temperature*

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
1. Призначення та область застосування систем автоматизації сушінням сої9	
1.1.Соя як живий біологічний організм .....	9
1.2 Сушіння сої. Режими. ....	10
1.3 Способи сушіння сої .....	131
1.4 Зерносушарка з киплячим шаром як об'єкт автоматизації.....	13
2. Аналіз існуючих засобів автоматизації та обґрунтування обраного.....	16
2.1 Датчик температури теплоносія.....	17
2.2 Проточний вологомір зерна АВП .....	20
2.3 Кільцевий тягонапоромір агента сушки.....	23
2.4 Вторинні прилади для перетворення вихідного сигналу тягинопороміру у електричний сигнал .....	25
2.5 Обґрунтування вибору виконавчого механізму.....	289
2.6 Обґрунтування вибору регулюючого органу .....	30
3. Розроблення автоматизованої системи керування процесом сушіння в киплячому шарі на основі мікропроцесора АТ89С .....	33
3.1 Побудова мікропроцесорної системи управління .....	33
3.1.1 Мікроконтролер АТ89С.....	34
3.1.2 Мікросхема АЦП К1113ПВ1 .....	35
3.1.3 Мікросхема регістру К555ІР22 .....	35
3.1.4 Мікросхема КР580ВВ79 контролер клавіатури і дисплею.....	35
3.1.5 Мікросхема КР590КН3 комутатор аналогового сигналу .....	36
3.1.6 Мікросхема КР537РУ17 ОЗП .....	36
3.1.7 Мікросхема К573РФ4 постійно запам'ятовуючий пристрій.....	37
3.2 Принцип дії мікропроцесорної системи .....	38
3.3 Робота мікроконтролеру АТ89С з об'єктом управління.....	38
3.3.1 Робота АТ89С із зовнішньою пам'яттю даних .....	39

3.3.2 Спряження АТ89С з клавіатурою і лінійним дисплеєм на основі ВІС КР580ВД79.....	40
4 Розрахунки та дослідні матеріали, які підтверджують працездатність системи автоматизації процесу сушіння сої в сушарці каскадного типу.....	43
4.1 Теорія проведення досліджень .....	43
4.1.1 Експериментальний метод дослідження .....	43
4.1.2 Сушарка з киплячим шаром як об'єкт автоматизації.....	435
4.1.3 Опис установки, на якій проводився експеримент.....	48
4.1.4 Вплив вологості на продуктивність зерносушарки.....	50
4.2 Методика визначення динамічних характеристик об'єкту .....	51
4.3 Обробка результатів експерименту (згладжування та нормування кривих, апроксимація передаточної функції) .....	53
5 Розрахункова частина .....	58
5.1 Побудова функціональної схеми САР вологості зерна .....	58
5.2 Побудова структурної схеми САР на основі функціональної.....	58
5.3 Визначення передаточних функцій розімкнутої і замкнутої системи та характеристичного рівняння замкнутої системи .....	60
5.4 Визначення стійкості замкнутої системи. Побудова області стійкості.	61
5.5 Обґрунтування вибору регулятора .....	63
5.6 Визначення стійкості системи з регулятором .....	64
5.7 Визначення запасів стійкості розімкнутої системи автоматичного регулювання.....	65
5.8 Побудова перехідного процесу замкнутої системи.....	66
5.9 Визначення прямих показників якості САР за перехідним процесом .	67
Висновки .....	68
ЛІТЕРАТУРА .....	69
ДОДАТКИ.....	71

## ВСТУП

Зернова маса, як об'єкт зберігання, володіє унікальними властивостями довговічності. Однак ця особливість проявляється лише при умові, що свіже зібрана зернова маса буде правильно підготовлена до зберігання: очищена, просушена, розсортована. Затримка з обробкою або проведенням необхідних технологічних операцій не в повному обсязі, з порушенням режимів обробки неминуче пов'язані з втратами врожаю.

**Актуальність теми.** В умовах війни як ніколи необхідно оперативно зберегти вирощений врожай. І на допомогу цьому приходять мобільні сушарки, перевага яких у швидкодії процесу, можливості сушіння продукту безпосередньо на місці та при необхідності зупинити процес у будь-який час. Для пришвидшення процесу сушіння в таких сушарках застосовується принцип «киплячого шару», суть якого наступна. Через шар щільного матеріалу пропускають теплоносій з такою швидкістю, що шар у певний момент набуває стану «кипіння», матеріал починає бурлити і рухатись. У такому стані кожна зернинка омивається з усіх боків теплоносієм, за рахунок чого і спостерігається інтенсифікація сушіння.

Технологічний процес сушіння зернової маси потребує не лише значних знань технічних засобів, необхідного регулювання режиму роботи, але й біологічних властивостей сої, як живого організму: його термостійкість, закономірності випаровування вологи, природу різниці в температурі нагріву матеріалу і агента сушки.

Найзастосованішим способом інтенсифікації процесу сушіння є висока температура теплоносія і матеріалу. Водночас перевищення встановлених температур нагріву викликає необернене псування сої. Ведення процесу сушки при недостатньо високому нагріві призводить до значного зниження продуктивності використаної техніки. Тому вимоги до контролю за процесом сушки зерна і насіння являється найсуворішим в порівнянні з будь-якою операцією післязбиральної обробки зернової маси.

Впровадження автоматизації у будь-який процес не лише значно зменшує трудомісткість, але й скорочує час обробки, знижує втрати і підвищує якість процесу, завдяки підтриманню потрібних режимів. Тому продукт більш старанно доводиться до продовольчих або посівних кондицій.

**Об'єкт дослідження** – технологічний процес сушіння сої у сушарці каскадного типу з киплячим шаром

**Предмет дослідження** – система автоматичного керування процесом сушіння сої в сушарці з киплячим шаром каскадного типу

**Мета і задачі дослідження** полягає у синтезі системи автоматизації процесом сушіння сої за рахунок «знятих» вхідних та вихідних величин об'єкта в ході експерименту, для цього необхідно постачити та розв'язати наступні задачі:

- вивчити технологічний процес сушіння сої у сушарці з киплячим шаром, враховуючи певні особливості конструкції
- проаналізувати фактори, що впливають на процес сушіння і розділити їх на категорії (вхід-вихід-збурення)
- спланувати та провести експеримент, фіксуючи зміну необхідних параметрів
- обробити «зняті» величини за допомогою наявного програмного забезпечення та отримати математичну модель сушарки
- обрати технічні засоби автоматизації, враховуючи переваги та недоліки існуючих. Визначити їх передаточні функції
- скласти функціональну, принципову та структурну схеми системи автоматизації сушінням в зерносушарці з киплячим шаром
- дослідити синтезовану систему на стійкість та визначити запаси стійкості.

**Методи дослідження:** у даній роботі застосовувався теоретичний метод на етапі вивчення технологічного процесу та планування експерименту, метод порівняння (переваги сушіння у киплячому шарі), метод аналізу (переваги обраних технічних засобів саме для цього випадку),

експериментальний метод із застосування елементів вимірювання (фіксація вх-вих параметрів), метод абстрагування (об'єкт подано у вигляді ідеального, на який не діють зовнішні збурюючі фактори для уникнення багатовимірності), метод моделювання (отримання перехідного процесу в Simulink) та метод синтезу із допомогою отриманих математичних моделей і формування їх у одну спільну структурну схему, яку і потрібно було дослідити на стійкість та якість.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Зерносушарка з киплячим шаром касетного типу, розроблена на кафедрі сільськогосподарського машинобудування при ЦНТУ, є не вивченим об'єктом і потребувала математичного опису, що стало основою для синтезу системи автоматизації процесом сушіння в такій установці.

**Практичне значення отриманих результатів.** Вперше одержана математична модель зерносушарки з киплячим шаром на основі експериментальних даних, вперше теоретично підібрані технічні засоби автоматизації процесом сушіння в такій сушарці, вперше синтезовано систему автоматизації та досліджено її у розрізі стійкості та якості, що може стати базою для подальших наукових досліджень.

Структура та обсяг магістерської роботи. Магістерська робота складається з п'яти розділів, висновків, літератури та додатків загальним обсягом \_\_\_\_ арк. Графічна частина роботи складає \_\_\_\_ арк

## **1. Призначення та область застосування систем автоматизації сушінням сої**

### **1.1. Соя як живий біологічний організм**

Насіння сої, як і будь-якої іншої культури, перебуває у стані біологічного спокою, але при цьому зберігає всі ознаки живого організму — дихає, має обмін речовин на мінімальному рівні та здатне до проростання за сприятливих умов (наявності вологи, тепла й повітря).

Саме тому умови сушіння і зберігання сої повинні бути максимально делікатними: перегрів або надмірне висушування можуть пошкодити клітини зародка, що призведе до втрати схожості й зниження якості насіння.

Під час зберігання сої всередині зернової маси продовжують відбуватися фізіологічні, фізико-хімічні та мікробіологічні процеси, які безпосередньо впливають на якість і схоронність насіння.

**Дихання зерна.** Соя, як живий біологічний організм, навіть у стані спокою продовжує дихати — поглинає кисень і виділяє вуглекислий газ, воду та тепло. Інтенсивність дихання залежить від вологості та температури зерна. Надмірне тепло і підвищена вологість прискорюють процеси обміну речовин, що може призвести до самозігрівання й псування насипу.

**Самозігрівання зернової маси.** Тепло, яке утворюється внаслідок дихання, накопичується у товщі насипу, особливо при недостатній вентиляції. Це викликає підвищення температури, що, у свою чергу, активізує мікрофлору (бактерії, цвілеві гриби), прискорює розкладання білків і жирів, а також призводить до зниження схожості насіння.

**Перерозподіл вологи.** Усередині насипу відбувається міграція вологи — вода переміщується з тепліших шарів до холодніших, що сприяє утворенню вогких зон. У таких місцях створюються сприятливі умови для розвитку мікроорганізмів і грибків.

**Мікробіологічні процеси.** У насипі постійно розвивається мікрофлора: бактерії, дріжджі, плісняві гриби. За несприятливих умов зберігання (висока температура й вологість) вони викликають пліснявіння, гниття, зниження харчової та посівної якості сої.

**Біохімічні зміни.** У процесі тривалого зберігання відбувається поступовий розклад жирів (окиснення), руйнування білків, зменшення кількості вітамінів і ферментів. Це призводить до погіршення харчових властивостей і якості олії, що отримується з сої.

**Зміни фізичних властивостей зерна.** Через коливання вологості та температури може спостерігатися усихання, тріщини, злипання зерен, що ускладнює провітрювання та транспортування сої.

## **1.2 Сушіння сої. Режими.**

Сушіння сої — це один із найвідповідальніших етапів післязбиральної обробки, від правильності якого залежать якість, схожість насіння, харчова цінність і збереження білково-олійної структури зерна.

**1. Загальні вимоги до сушіння.** Соя належить до теплочутливих культур, тому процес сушіння повинен проходити повільно та рівномірно, без перегрівання. Зерно має тонку оболонку, а зародок — високу чутливість до температурних коливань, тож навіть незначне перевищення допустимих параметрів може призвести до зниження схожості насіння і якості олії.

### **2. Оптимальна вологість.**

Початкова вологість: 18–22 % (іноді до 25 %, залежно від умов збирання).

Кінцева вологість:

для насінневої сої — 12–13 %;

для харчових і кормових цілей — 10–12 %;

для тривалого зберігання — не вище 9–10 %.

### **3. Температурні режими сушіння**

Температурний режим визначається типом сушарки, вологістю зерна та його призначенням.

Призначення сої	Температура агента сушіння, °С	Температура зерна на виході, °С
Насіннева	35–45	не вище 40
Харчова	45–55	не вище 45
Технічна (олійна)	55–65	не вище 50–55

Примітка: для збереження схожості насіння не допускається нагрівання вище 42–43 °С.

**4. Рекомендовані режими сушіння.** Сушіння слід проводити в кілька етапів (ступенів) з проміжним охолодженням. Це запобігає утворенню тріщин і забезпечує рівномірне висушування.

Оптимальна швидкість руху агента сушіння — 0,5–1,5 м/с.

Різниця між температурою агента і зерна не повинна перевищувати 15–20 °С.

Після сушіння обов'язкове вирівнювання вологості протягом 4–6 годин (зерно витримують у бункерах або силосах).

**5. Автоматизація процесу сушіння.** Застосування автоматизованих систем керування дозволяє в режимі реального часу контролювати температуру, вологість і швидкість потоку повітря. Це забезпечує енергоефективність, стабільність параметрів і мінімізує людський фактор.

Дотримання оптимальних режимів сушіння є вирішальним для збереження якості сої. Надмірне нагрівання або швидке видалення вологи призводить до розтріскування оболонки, зниження схожості та втрати білкової цінності. Тому сучасні технології сушіння повинні базуватися на автоматизованому контролі параметрів процесу, адаптованому до фізіологічних властивостей сої.

### 1.3. Способи сушіння сої

Сушіння сої — це важливий етап післязбиральної обробки, який забезпечує збереження якості насіння, запобігає розвитку мікроорганізмів і втратам під час зберігання. Існує кілька способів сушіння сої, які вибирають залежно від мети (насіннева чи товарна соя), вологості, наявного обладнання та енергетичних ресурсів.

## ◆ 1. Природне (пасивне) сушіння

Суть: зниження вологості сої за рахунок природної вентиляції повітрям.

Способи:

Під навісами або в сараях — зерно розстеляють шаром 10–20 см, періодично перемішують.

У вентильованих сховищах (аерація) — через шар сої пропускають сухе повітря вентилятором.

Переваги:

мінімальні енерговитрати;

збереження схожості насіння.

Недоліки:

тривалий процес (декілька днів або тижнів);

залежність від погодних умов;

ризик псування при високій вологості.

## ◆ 2. Конвективне сушіння (теплове)

Суть: видалення вологи за рахунок подачі нагрітого повітря.

Використовується найчастіше у виробничих умовах.

Типи сушарок:

Шахтні сушарки – зерно рухається зверху вниз через шахту, куди подається гаряче повітря.

Барабанні сушарки – соя обертається в барабані, а через неї проходить гаряче повітря.

Аеродинамічні (пневматичні) – зерно знаходиться в русі у повітряному потоці.

Оптимальні параметри:

температура агента сушіння 35–45 °С для насінневої сої;

до 60 °С — для товарної;

кінцева вологість — 12–13 %.

Переваги: швидкість і ефективність.

Недоліки: можливе перегрівання, зниження схожості, енергозатрати.

### ◆ 3. Інфрачервоне сушіння

Суть: прогрівання зерна інфрачервоними променями, які викликають випаровування вологи зсередини.

Переваги:

швидке й рівномірне сушіння;

менше пошкоджень насіння.

Недоліки:

висока вартість обладнання;

складність регулювання режиму.

### ◆ 4. Мікрохвильове сушіння

Суть: використання електромагнітних хвиль для нагрівання вологи в середині зерна.

Переваги:

дуже швидкий процес;

висока однорідність сушіння.

Недоліки:

дорога технологія;

потребує точного контролю температури.

### ◆ 5. Комбіноване сушіння

Поєднання різних методів — наприклад, попереднє природне сушіння, а потім досушування в шахтній або інфрачервоній сушарці.

Переваги:

економія енергії;

менше термічне навантаження на насіння.

Один з конвективних способів сушіння дисперсного матеріалу, яким і є соя, є сушіння в так званому «киплячому шарі»

## 1.4 Зерносушарка з киплячим шаром як об'єкт автоматизації

З метою підтримання оптимального сушильного режиму в «киплячому шарі» необхідно під час процесу здійснювати контроль і за необхідності вчасно

регулювати основні технологічні параметри процесу, що обумовлюють інтенсивність процесу і досягнення високих показників якості висушеного матеріалу:

- Температуру теплоносія;
- Максимальну температуру нагріву матеріалу;
- Кінцеву вологість висушеного продукту (сої);
- Швидкість теплоносія, яка корелюється з висотою матеріалу на каскадах;
- Експозицію сушіння;

Ці параметри є визначальними для вибору режиму сушіння.

Для обрання оптимального сушильного режиму необхідно, щоб процес сушіння тривав максимально мінімально, а витрати праці і технічні засоби – найекономніші, і щоб водночас поліпшувалися якісні показники висушеного матеріалу (сої) – його біологічні, хімічні та технологічні показники.

Технологічний процес в конвективній сушарці каскадного типу, принцип дії якої базується на «киплячому шарі» зображена на рис 1.

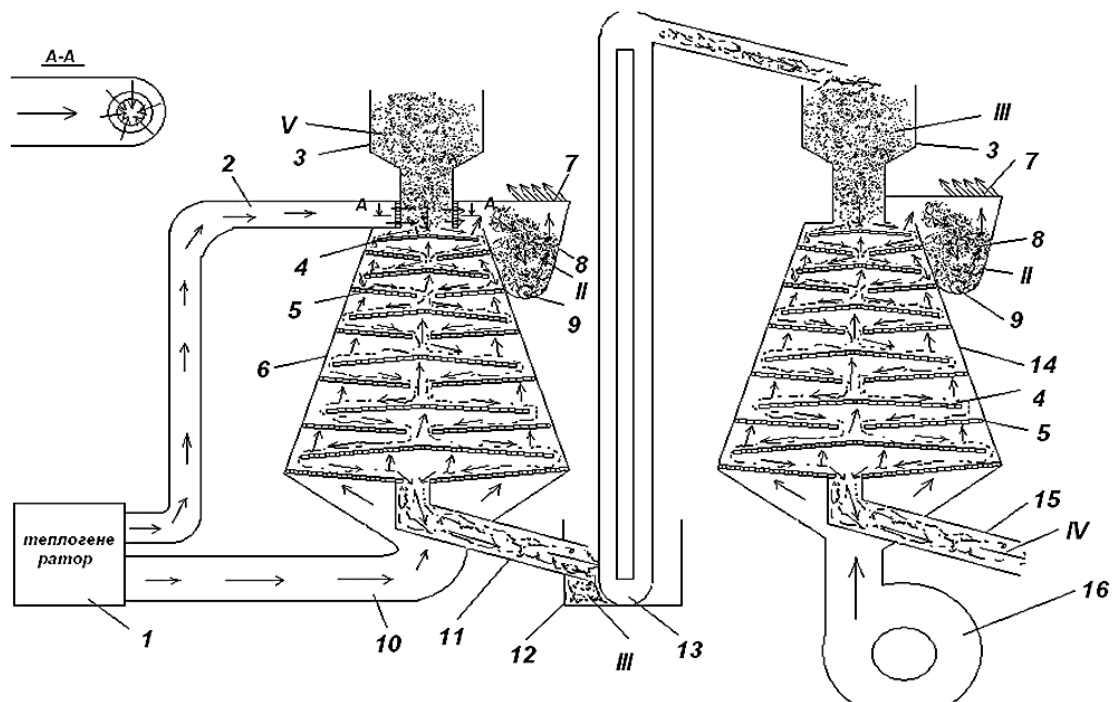


Рисунок 1 – Конструкція сушарки з киплячим шаром каскадного типу

Сам процес відбувається наступним чином: теплогенератор нагріває повітря до 160 °С, яка регулюється через змішування в топці. При необхідності гаряче повітря змішують з холодним, що потрапляє через шибер, для отримання більш м'якого режиму сушки. З потрібними параметрами такий теплоносіє подається іншим насосом і надходить у камеру попереднього прогріву, проходячи повз дисперсний матеріал (сою), він її нагріває і видаляється. В ході такого процесу відбувається контактний теплообмін, при якому повітря поглинає частину вологи від зернового матеріалу. З камери попереднього нагріву зерно, втративши певний відсоток вологи, потрапляє через шибер в установку, де і відбувається безпосередньо сам процес сушіння. Там матеріал розміщується на похилих площинах-решетах (каскадах) з діаметром отвору меншим, ніж розміри сої з кутом нахилу 5-10 градусів. Знизу перфорованих каскадів подається теплоносіє з певною швидкістю, при якій соя на ситах знаходиться у киплячому шарі. В процесі такої «продувки» соя набуває рухливості і починає нагадувати собою «киплячу» рідину. Дисперсний матеріал хаотично перемішується, набуваючи рухливості і дістається з каскаду на каскад подібно в'язкій речовині. Так, соя дістається нижнього каскада-решета, де відбувається контроль кінцевих параметрів висушеного продукту (сої), а саме: вологість та температура, яка не має сягати 42-43 градуса Цельсія, яка також контролюється на кожному каскаді для підбору оптимальних режимів експозиції сушіння. В результаті такого просушування кінцева вологість сої має становити 12-13%. Сушарка каскадного типу, прототип якої зображено на рис. 1, розрахована на одноциклове просушування сої. За потребою цикли можуть повторюватися, але з попереднім виміром вхідних параметрів біологічного продукту. Головними параметрами контролю і регулювання в такій міні-сушарці є:

1. **Температура** теплоносія на вході в камеру сушіння,  $T$  (°C)
2. Кінцева **вологість** пшениці,  $w$  (%)
3. **Швидкість** теплоносія на вході у камеру сушіння,  $V$  (м/с)

## 2. Аналіз існуючих засобів автоматизації та обґрунтування обраного

Щоб автоматизувати процес сушіння в зерносушарці касетного типу з киплячим шаром, як зазначено вище, потрібно контролювати та за потреби регулювати ключові параметри, що формують режим сушіння. До них належать: температура теплоносія на вході до сушильної камери, кінцева вологість пшениці та швидкість потоку теплоносія, за якої забезпечується стан киплячого шару. Аналіз літературних джерел щодо датчиків температури, вологості та швидкості теплоносія показав, що з огляду на діапазон вимірювань, точність, зручність монтажу та конструктивні особливості зерносушарки, оптимальними є засоби автоматизації, наведені в таблиці 2.1.

Під час формування бази автоматичної системи регулювання було враховано такі вимоги: датчик має працювати в необхідному діапазоні контролюваного параметра, мати стабільну статичну характеристику, достатню точність та водночас бути економічно доступним. Тому мною і були визначені наступні елементи автоматики:

1. Датчик температури матеріалу/агента – ТСМ-5071;
2. Датчик вологості матеріалу/агента – АВП;
3. Датчик швидкості теплоносія – кільцевий тягонапоромір.

Таблиця 2.1 – Порівняльна таблиця з обраними датчиками

<i><b>ДАТЧИКИ ТЕМПЕРАТУРИ</b></i>		
<i><b>ЭКТ-1</b></i>	-60...+300 °С	±2,5 %
<i><b>ТСМ</b></i>	-50...+180 °С	±0,5 %
<i><b>ТСП</b></i>	-200...+650 °С	±0,5 %
<i><b>ДКТЭ</b></i>	-30...+50 °С	±2,5 %
<i><b>ДАТЧИКИ ВОЛОГИ</b></i>		
<i><b>АВП</b></i>	10...30 %	±1%
<i><b>УДВ</b></i>	8...18 %	±0,5 %
<i><b>АВЗК</b></i>	10...30 %	±1,5 %
<i><b>ПВЗ-10Д</b></i>	10...30 %	±1,5 %
<i><b>Супер-Конті</b></i>	5...25 %	±0,5 %
<i><b>ДАТЧИКИ ШВИДКОСТІ</b></i>		
<i><b>ТНВ</b></i>	0...1,6 кПа	±1,5 %
<i><b>ТНЖ</b></i>	0...0,4 кПа	±1,5 %
<i><b>ТКЭ</b></i>	0...1,6 кПа	±1,5 %
<i><b>ДКОФМ</b></i>	0...0,2 кПа	±1,5 %
<i><b>НМП-52</b></i>	0...40 кПа	±2,5 %

## 2.1 Датчик температури теплоносія

Щоб контролювати температуру в діапазоні (0 до 180 °С) мною було обрано ТСМ (термометр опору мідний). Він володіє доволі значною точністю (при застосуванні мостової діагональної схеми з похибкою оцінювання показника у межах  $\pm 0,5\%$ ), інерційність до 120 с. Основна перевага таких датчиків – це його лінійність вихідної характеристики, тобто опір залежить від температури навколишнього середовища по лінійному закону.

$$R_t(t) = R_0 \cdot (1 + \alpha_{cu} \cdot t),$$

де  $\alpha_{cu}$  – термічний коефіцієнт (для міді  $4,25\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ );

$R_0$  – початкове значення термоопору при температурі  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (53 Ом);

$R_t$  – опір датчика температури при даній температурі, Ом;

$t$  – варіювання температури,  $^{\circ}\text{C}$ .

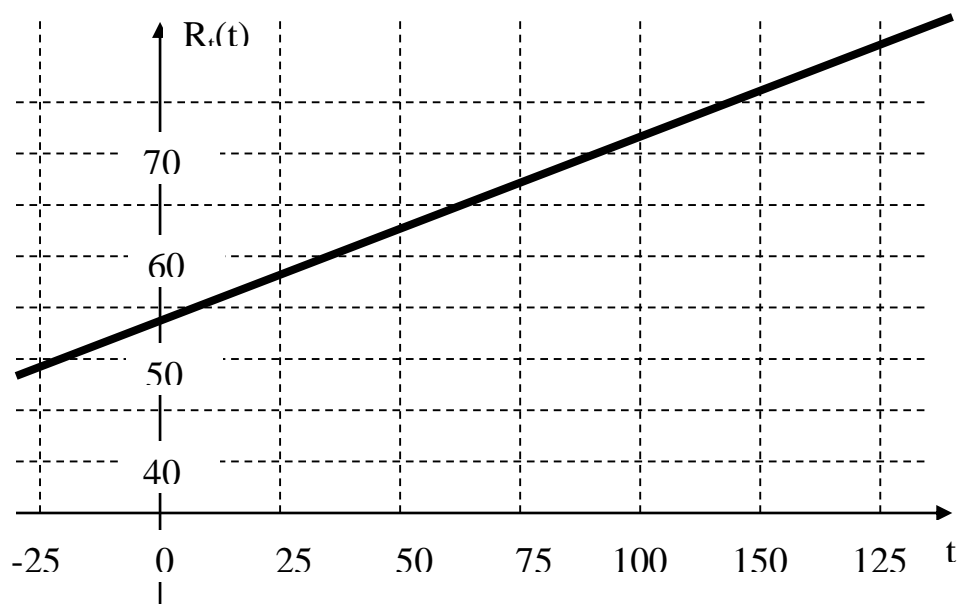


Рисунок 2 – Статична характеристика датчика температури ТСМ

Автоматичні електронні мости урівноваження призначені для вимірювання, реєстрації та регулювання температури й інших фізичних величин, зміна яких супроводжується зміною активного опору.

Принцип роботи моста ґрунтується на автоматичному зрівноваженні (елементи  $R_1, R_2, R_3, R_4$ ). Коли опір терморезистора 1 змінюється, рівновага схеми порушується. Напруга розбалансу підсилюється підсилювачем 2 до рівня, достатнього для запуску реверсивного двигуна 3. Двигун, переміщуючи повзунок реохорда 5, відновлює рівновагу мостової схеми. Показуюча стрілка 4 механічно з'єднана з двигуном 3 і відображає виміряне значення.

Живлення вимірювальної частини моста подається напругою 6,3 В від підсилювача (у мостах змінного струму) або 1,5 В від сухого елемента чи стабілізованого джерела живлення (у мостах постійного струму). Опори  $R_0$  використовують для компенсації опору з'єднувальної лінії.

Підключення термометрів опору до вимірювального кола через з'єднувальні проводи з опором  $R_{л}$  може значно знизити точність вимірювання температури. Щоб мінімізувати цей вплив, застосовують різні методи та схеми під'єднання ТСМ. Опір з'єднувальних проводів повинен відповідати значенню, на яке відкалібровано вторинний прилад; ці калібрувальні величини зазначаються на шкалі приладу.

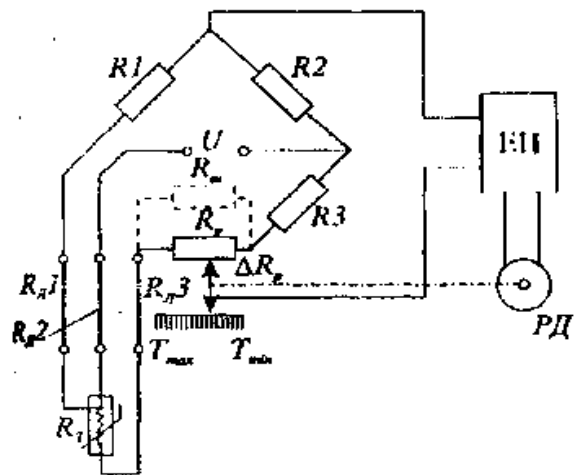


Рисунок 3 – Схема автоматичного мосту для калібрувальні величини зазначаються на шкалі приладу.

Використовують двопровідні, трипровідні та чотирипровідні схеми підключення ТСМ до вимірювального пристрою.

У двопровідній схемі опір термодатчика разом з опором ліній включають в одну з гілок вимірювального кола. У цьому випадку особливо важливим є точне підганяння опору з'єднувальних проводів. Однак навіть після підганяння опір лінії може змінюватися через коливання температури навколишнього середовища.

Для зменшення похибок, що виникають через невідповідність опору з'єднувальних проводів їхньому каліброваному значенню, застосовують термоперетворювачі з трьома або чотирма виводами та відповідні схеми їх підключення до мостового чи компенсаційного кола.

Під час вимірювання температури за допомогою терморезистивних перетворювачів слід також враховувати можливість появи додаткових похибок, спричинених нагріванням датчика вимірювальним струмом. Щоб ці похибки були практично непомітними, сила вимірювального струму має бути такою, щоб викликана ним зміна опору  $R_0$  не перевищувала 0,1 %.

Для визначення температури за допомогою термоопору ТСМ найчастіше застосовують зрівноважені мости. Термодатчик підключають у плече моста, що прилягає до реохорда. За такого підключення рівняння рівноваги для початкового та проміжного значення вимірюваної температури, без урахування опорів ліній і без шунтувального опору  $R_{ш}$  (який використовують для розширення діапазону вимірювання), матиме відповідну форму.

$$\begin{aligned}(Rt_0 + R_p)R_2 &= R_1 \cdot R_3 \\ [Rt_0 + \Delta Rt + (R_p - \Delta R_p)] &= R_1 \cdot (R_3 + \Delta R_p) \\ \Delta R_p &= \Delta Rt \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}\end{aligned}$$

Отже, у такій вимірювальній схемі зміна опору реохорда прямо пропорційна зміні опору термоперетворювача, що виникає через зміну вимірюваної температури.

Щоб зменшити вплив опорів з'єднувальних проводів, застосовують трипровідне підключення термоопору: опори окремих проводів включають у сусідні плечі моста та діагональ живлення. При цьому для певного значення  $R_{ТС}$ , коли міст перебуває у симетричному стані, вплив однакових опорів ліній  $R_{л1} = R_{л3} = R_{л}$  і їхніх змін повністю нейтралізується.

Фактично, у симетричному мості, коли  $R_3 + \Delta R_p = R_2$ , умова рівноваги моста гарантує, що вплив цих опорів не проявляється.

$$\begin{aligned} [(R_{TC} + R_p - \Delta R_p) + R_l] \cdot R_2 &= (R_3 + \Delta R_p) \cdot (R_1 + R_l) \\ \frac{R_{TC} + R_p - \Delta R_p + R_l}{R_1 + R_l} &= \frac{R_3 + \Delta R_p}{R_2} = 1, \end{aligned}$$

Отже, у чисельнику та знаменнику лівої частини останнього рівняння опори  $R_l$  додаються до опорів  $(R_{TC} + R_p - \Delta R_p)$ , що за величиною дорівнюють  $R_1$ , і тому умова рівноваги моста не порушується. Проте при інших значеннях  $R_{TC}$  компенсація впливу  $R_l$  буде лише частковою.

## 2.2 Проточний вологомір зерна АВП

Цей вологомір є ємнісним перетворювачем (конденсатором), ємність якого змінюється залежно від фізичних властивостей речовини (зерна), що знаходиться між його електродами. Зокрема, при різній вологості матеріалу змінюється його діелектрична проникність.

Вологомір АВП виконаний у вигляді циліндричного конденсатора, конструкція якого представлена на графічній частині. Ємність конденсатора визначається діелектричною проникністю  $\varepsilon$  за такою залежністю:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon\varepsilon_0 l}{\ln\left(1 + \frac{d}{R}\right)}, \quad (3.4)$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникливість речовини в даний час,

$\varepsilon_0$  – стала діелектрична проникливість ( $8,85 \times 10^{-12}$ );

$d$  – відстань між обкладинками конденсатора, м;

$R$  – внутрішній радіус обкладинки циліндричного конденсатора, м

У сухому стані зерно має дуже низьку діелектричну проникність і незначні діелектричні втрати. Присутність вологи значно впливає на поляризацію неоднорідних діелектриків складного складу, якими є вологі матеріали.

У дількометричному методі вимірювання вологості використовують залежність питомих електричних параметрів матеріалу від його вологості, фізичних властивостей і стану, а також від умов проведення вимірювань:

- Вологісні характеристики електричних параметрів матеріалу  $-\epsilon$  та  $tg\delta$  при постійній частоті поля, температурі матеріала залежать від вологовмісту;
- Частотні характеристики  $\epsilon(t)$  та  $tg\delta(t)$  при постійній вологі і температурі характеризують стан матеріалу;

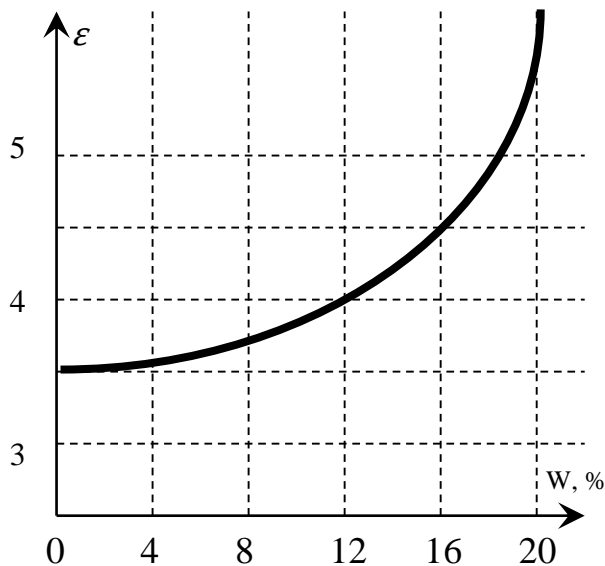


Рисунок 4 – Залежність діелектричної проникливості від зміни вологості зерна

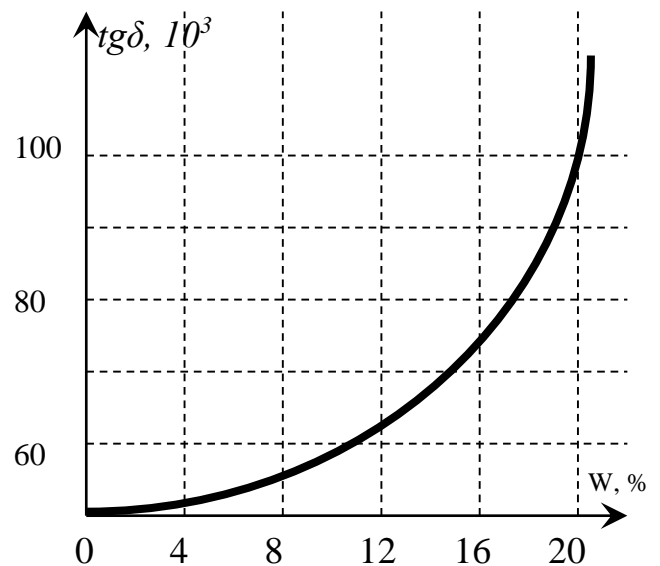


Рисунок 5 – Залежність діелектричних втрат від зміни вологості зерна

З графіків видно, що діелектрична проникність і діелектричні втрати при зміні вологості зерна зростають значно швидше, причому їхні залежності мають яскраво виражений нелінійний характер. При цьому графік діелектричних втрат більш крутий, ніж графік діелектричної проникності.

Оскільки ємність циліндричного конденсатора визначається діелектричною проникністю, яка залежить від вологості матеріалу, важливо встановити, як саме ємність первинного перетворювача змінюється зі зміною вологості. Для цього застосовується наступний вираз:

$$(1 - V_{зер}) \left( \frac{\epsilon_{сум}}{\epsilon_{нов}} \right)^{\frac{1}{3} 2\beta \frac{2}{3} (1-\beta)} \left[ \frac{(2-\beta)\epsilon_{сум} + (1+\beta)\epsilon_{зер}}{(2-\beta)\epsilon_{нов} + (1+\beta)\epsilon_{зер}} \right]^{-2\beta^2 (1+\beta)(2-\beta)} = \frac{\epsilon_{зер} - \epsilon_{сум}}{\epsilon_{зер} - \epsilon_{нов}}$$

де  $V_{зер}$  – об'ємна частка зерна в суміші повітря-зерно;

$\epsilon_{сум}$  – діелектрична проникливість суміші;

$\epsilon_{\text{пов}}$  – діелектрична проникливість повітря;

$\epsilon_{\text{зер}}$  – діелектрична проникливість зернової маси

$\beta$  – параметри, що залежить від розміру основних осей еліпсоїду.

Зерно можна розглядати як об'єкт у формі кола або еліпсоїда, тому формула (3.5) використовується для визначення, як змінюється діелектрична проникність вологої зернової маси з невисокою щільністю залежно від діелектричної проникності матеріалу в межах 2–10 Ф/м. Усі розрахунки, спрощення та побудову графіків проведено в MathCad, а результати наведені в додатку А. На рисунку 6 показано графік залежності ємності від діелектричної проникності суміші вологе зерно–повітря.



Рисунок 6 – Залежність ємності циліндричного конденсатора від діелектричної проникливості матеріалу

Статична характеристика датчика вологості показує, що він працює як пропорційна ланка: напруга на виході вторинного перетворювача змінюється прямо пропорційно зміні діелектричної проникності суміші. При цьому на виході датчика напруга може досягати 20 В, а на вході відносна вологість складає 10–30%. Відповідно, передаточна функція матиме такий вигляд:

$$W(p) = \frac{\bar{U}}{\bar{w}} = \frac{15}{20} = 0.75 \text{ В} / \%$$

### 2.3 Кільцевий тягонапоромір агента сушки

Кільцеві диференціальні манометри застосовуються для вимірювання витрати (за методом змінного перепаду тиску), розрідження (тяги), тиску та різниці тисків неагресивних газів.

Принципова схема роботи кільцевого диференціального манометра наведена на рисунку 7. Порожнисте кільце 1, встановлене на призматичних опорах 9, заповнене робочою рідиною лише частково: для перепадів тиску до  $100 \text{ кгс/м}^2$  зазвичай використовується трансформаторне масло, для більших перепадів — вода. У верхній частині кільце обладнане перегородкою 7, яка ділить незаповнену рідиною порожнину на два відсіки, з'єднані гнучкими трубками 2 та сполучними трубками 3 з вимірювальним середовищем. В нижній частині кільця закріплений вантаж 11.

При перевищенні тиску в одному з відсіків над іншим кільце 1 під дією перепаду тиску на перегородку 7 відхиляється від початкового положення на кут, при якому момент від тиску урівноважується моментом, створюваним вантажем 11. Таким чином, кут повороту кільця є мірою різниці тиску. Через нерухомо закріплене лекало 5 та стрілочну систему 13 цей кут передається на стрілку 10, яка рухається уздовж шкали 12 приладу. Передавальний механізм перетворює кутове переміщення кільця в прямолінійний рух стрілки або пера у самописних приладах.

У тягомірах та напоромірах переміщення стрілки пропорційне перепаду тиску, а у витратомірах — пропорційне квадратному кореню з перепаду тиску (тобто витраті). У диференціальних манометрах типу ДК-Ф поворот кільця за допомогою лекала 6, важеля 5 та шестерної передачі перетворюється на поворот рамок феродинамічних перетворювачів 4, що забезпечують дистанційну передачу показань.

Кільцеві механічні дифманометри типу ДК випускаються як показуючі, так і самописні, з годинним або електричним приводом діаграмної стрічки. Вони застосовуються при відстані від місця вимірювання до приладу до 50 м

(по довжині імпульсних ліній). Показуючі дифманометри з феродинамічними перетворювачами типу ДК-Ф призначені для дистанційної передачі даних на вторинний прилад ВФСМ або для роботи в системах диспетчеризації. Прилади ДК-Ф можуть мати один або два вихідних феродинамічних перетворювачі будь-якої модифікації.

Тягоміри, напороміри та витратоміри всіх модифікацій розраховані на граничні перепади тиску 63, 100 та 160 кгс/м<sup>2</sup>. Основна допустима похибка приладів становить  $\pm 1,5\%$  від верхньої межі вимірювань для односторонньої шкали або від суми меж вимірювань для двосторонньої шкали.

Живлення приладів з електроприводом здійснюється від мережі 12, 127 або 220 В, 50 Гц (точне значення обумовлюється при замовленні).

Живлення феродинамічних перетворювачів у дифманометрах типу ДК-Ф здійснюється від вторинних приладів.

Прилади можуть монтуватися як на стіну, так і на щитову панель.

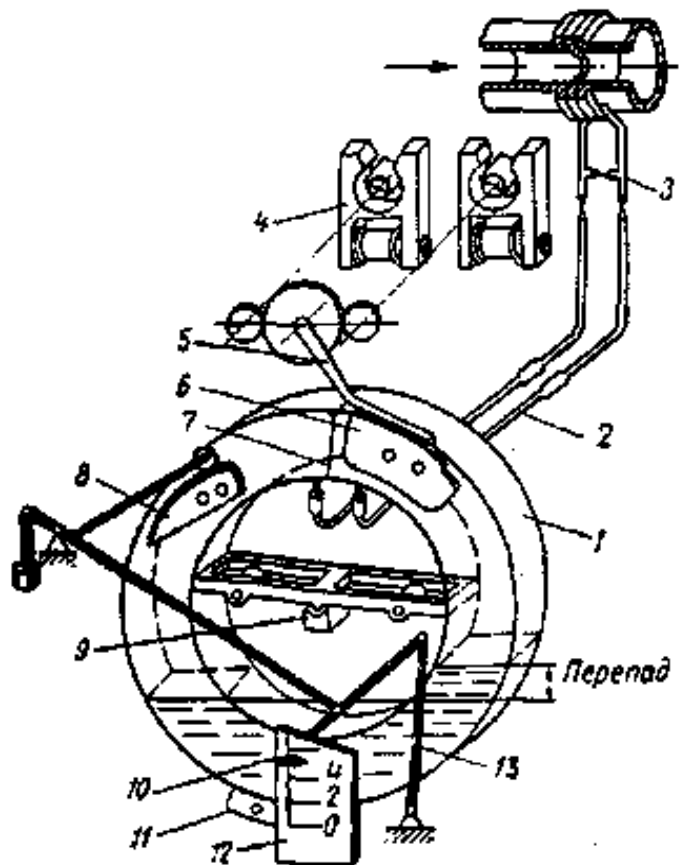


Рисунок 7 – Принципова схема кільцевого тягонапороміру

## 2.4 Вторинні прилади для перетворення вихідного сигналу тягонапороміру у електричний сигнал

У якості вторинних приладів для роботи з електричними індукційними диференціально-трансформаторними датчиками використовуються:

1. автоматичні електронні показуючі прилади з обертовим циліндричним циферблатом типу ЭИВ2;
2. одноточкові показуючі електронні прилади з записом на барабані типу АСД;
3. одноточкові електронні показуючі та самописні прилади з дисковою діаграмою типу ЕПД;
4. автоматичні показуючі та самописні електронні прилади типу ДС1 і ДСР1;
5. мініатюрні автоматичні показуючі та самописні прилади типу ДСМ2 і ДСМР2;
6. мініатюрні електронні автоматичні показуючі прилади типу ДП4, ДП1, ДПР4 і ДПР1.

Усі ці прилади спільно з датчиками застосовуються для вимірювання витрати, тиску, різниці тисків, розрідження, рівня та інших фізичних величин. Вони випускаються у стандартному та тропічному виконанні (температура повітря 0–55 °С, відносна вологість 92–95%); тропічне виконання у позначенні має літеру «Т», за винятком ЕПД.

Прилади типів ДС1 (ДСР1), ДСМ2 (ДСМР2) і ДП (ДПР) можуть бути замінені на КСД2, КСД1 і КПД1 відповідно. Нові прилади побудовані на диференціально-трансформаторній схемі та мають блоково-модульну конструкцію, що спрощує їх обслуговування.

Для інтеграції з регулюючими та сигнальними пристроями або машинами централізованого контролю прилади можуть оснащуватися вихідними перетворювачами, які формують уніфіковані вихідні сигнали.

Межі вимірювань визначені за ГОСТ 3720–66. Основна похибка: самописні прилади  $\pm 1\%$ , показуючі  $\pm 0,5\%$  або  $\pm 1\%$ . Живлення здійснюється від мережі 220 В, 50 Гц, споживана потужність малогабаритних приладів — 30 ВА, мініатюрних — 12 ВА.

### **Електронні диференціально-трансформаторні прилади типу ЕПД**

На рисунку 8 наведена принципова схема приладу ЕПД. Пристрій функціонує разом із датчиком, обладнаним трансформаторною індукційною котушкою 17 з рухомим сердечником 12. Переміщення сердечника у датчику здійснюється чутливим елементом первинного приладу і пропорційне величині вимірюваного параметра. Аналогічна котушка 8 розташована в приладі, а переміщення її сердечника виконується через профільований диск 13, обертання якого забезпечується реверсивним електродвигуном 16. Котушки датчика та приладу інтегровані у диференціально-трансформаторну схему і мають первинну обмотку 9 та вторинну обмотку, поділену на дві секції 10 і 11, підключені назустріч одна одній.

При живленні первинних обмоток змінним струмом від силового трансформатора підсилювача 14 у вторинних обмотках індукується змінна напруга, величина і фаза якої залежать від положення сердечника. У разі розбалансу напруги вторинних обмоток надходять на підсилювач як різниця, яка приводить у дію реверсивний двигун. Через диск двигун переміщує сердечник котушки приладу до відновлення рівності напруг, забезпечуючи відповідність положення сердечника датчика і вторинного приладу, а також положення показуючої стрілки. Для спрощення налаштування використовується диференціальний трансформатор 15, обмотки якого послідовно включені з обмотками датчика і приладу, а підсилення сигналу розбалансу проводиться по напрузі і потужності.

Для інтегрального визначення сумарної витрати застосовується інтегратор. Рахунковий пристрій 1 отримує імпульси, тривалість яких



Живлення приладів ЕПД здійснюється від мережі 127/220 В, 50 Гц, споживана потужність — до 75 ВА. Основна похибка показань та запису не перевищує  $\pm 1\%$  від граничного ходу сердечника при  $20 \pm 5$  °С. Час проходження робочої частини шкали стрілкою не більше 15 с. Похибка інтегратора не перевищує  $\pm 0,5\%$  від розрахункової різниці показань, відповідної верхній межі шкали.

Верхні межі вимірювань для приладів, що працюють в комплекті витратоміра, вибираються з ряду  $A = a \cdot 10^p$  де  $a$  — одне з чисел: 1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,2; 4; 5; 6,3; 8,  $p$  — ціле (позитивне або негативне) число або нуль; одиниці вимірювань — кг/год, т/год, м<sup>3</sup>/год, нм<sup>3</sup>/год, л/год.

## 2.5 Обґрунтування вибору виконавчого механізму

В електричних автоматичних системах регулювання виконавчі механізми повинні задовольняти такі вимоги:

1. Забезпечувати достатнє перестановочне зусилля для подолання опору робочих частин регулюючого органу у всьому діапазоні їх переміщення, навіть за максимально важких умов експлуатації.
2. Передавати дію від регулюючого органу на об'єкт регулювання, тобто мати детектуючі властивості.
3. Основні статичні та динамічні характеристики (порог чутливості, гістерезис, люфт, швидкість переміщення вихідної ланки при максимальному навантаженні, добіг) повинні відповідати або максимально наближатися до показників інших елементів системи.
4. Мати додаткові функції для зручності керування: ручний привід для місцевого управління, локальний покажчик положення вихідної ланки та механізм ручного встановлення початкового і кінцевого положень робочих частин регулюючого органу.

## Виконавчий механізм ПР-1М

Електричні виконавчі механізми є електроприводами, що забезпечують переміщення регулюючих органів у системах дистанційного та автоматичного регулювання і керування. Основними складовими електричного виконавчого механізму є:

- електродвигун;
- редуктор для зменшення частоти обертів;
- вихідний пристрій для механічного з'єднання з регулюючим органом;
- допоміжні пристрої, що забезпечують зупинку механізму у крайніх положеннях, самогальмування при вимкненні електродвигуна та можливість ручного керування у разі виходу системи з ладу.

Електричні виконавчі механізми ПР-М та ПР-1М (рисунок 9) застосовуються для переміщення регулюючого органу в системах пропорційного регулювання у комплекті з балансним реле БР-3. У цих механізмах використано двофазний реверсивний конденсаторний електродвигун, зміна напрямку обертання якого здійснюється перемиканням конденсатора між обмотками. Механізм дозволяє з'єднуватися з регулюючим органом як через диск, так і через шток, забезпечуючи поступовий рух. Необхідна швидкість обертання досягається за допомогою редукторних шестерень.

Реверсивний асинхронний двофазний двигун можна розглядати як поєднання двох послідовно з'єднаних ланок — інтегруючої та аперіодичної, якщо вихідною величиною є кут повороту ротора. З урахуванням редуктора рівняння руху реверсивного двигуна записується у відповідній формі:

$$T_1 \frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{d\alpha}{dt} = kU$$
$$W(p) = \frac{\alpha}{U} = \frac{k}{p(T_1 p + 1)}$$

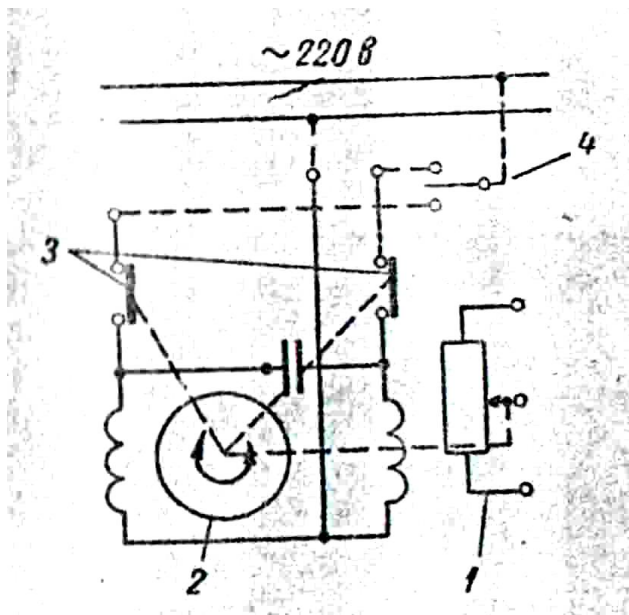


Рисунок 9 – Електричний виконавчий механізм ПР-1М

де  $T_1$  – стала часу виконавчого механізму ПР-1М;

$k$  – коефіцієнт підсилення (коефіцієнт передачі редуктора);

$\alpha$  – кут повороту рухомого контакту автотрансформатора.

Технічна характеристика електричного

### виконавчого механізму ПР-1М

Напруга живлення, В при частоті мережі 50 Гц.....	220
Час одного обороту вихідного валу, сек.....	10; 30; 60; 90; 120
Споживна потужність, ВА.....	50
Габаритні розміри, мм.....	280 x 122 x 180
Вид управління.....	контактне
Номінальний момент на вихідному валу, кгс·м.....	1

## 2.6 Обґрунтування вибору регулюючого органу

У електричних автоматичних системах регулювання в якості регулюючих органів використовуються різноманітні пристрої, такі як клапани, заслінки, форсунки, пальники та реостати. Підбір відповідного регулюючого органу здійснюється з урахуванням його конструктивних особливостей, пропускної здатності та статичної характеристики, що визначають здатність органу забезпечувати задану точність і стабільність регулювання. Вибір регулюючого елемента проводиться виходячи з технічних вимог конкретної системи автоматичного керування, режимів її роботи та характеру регульованого процесу, що забезпечує ефективне та надійне функціонування системи.

## Поворотні регулюючі заслінки

Для регулювання швидкості подачі теплоносія сушки, подачі зерна в камеру сушіння, направлення підігрітого теплоносія в камеру попереднього прогріву мною обрано поворотні регулюючі заслінки такого типу:

1. Для подачі зерна в камеру сушіння – діаметр патрубку 600 мм, тиск зерна на  $3500 \text{ кг·с/м}^2$ , температура зерна не більше  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , – регулююча заслінка з кутом повороту  $90^\circ$  ПРЗ-600;
2. Для подачі гарячого агенту сушки з температурою не більше  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , з діаметром патрубку 200 мм, та натиском повітря не більше 2,5 атм, – регулююча заслінка з кутом повороту  $90^\circ$  ПРЗ-200;
3. Для підсосу атмосферного повітря з температурою не більше  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , діаметром патрубку 200 мм та тиском на заслінку не більше 1 атм, – ПРЗ-200.

Так як змінювали положення регулюючого органу на 10%, при цьому зміна подачі зернової маси відповідала 16 г, то передаточна функція регулюючого органу буде мати таке значення:

$$m = k\alpha$$
$$W(p) = \frac{m}{\alpha} = \frac{16}{90^\circ \cdot 10\%} = 1.6 \text{ г / град}$$

Саме виконавчий механізм ПР-1М виконує поворот регулюючої заслінки на потрібний кут для виконання потрібного виду технологічної операції.

Для надання агенту сушки потрібної швидкості, тобто забезпечити наявність „киплячого шару” зернової маси, потрібно не лише контролювати , а й регулювати саму швидкість повітря. Як було вказано вище, для контролю напору агенту мною обрано кільцевий тягонапоромір з електричним вихідним сигналом. А для регулювання швидкості обертання вентиляторів, що нагнітають гарячий агент сушки в камеру сушіння, подають в топку теплогенератора повітря, збагачене киснем, підсмоктують атмосферне повітря, я застосувала двофазний двигун змінного струму, оберти якого регулюються регулятором напруги, що показаний на рис. 10.

## Технічна характеристика двофазного двигуна змінного струму АОЛБ 31-2

400	2920	6,55	3,8	2,15	66	0,72	9,0	1,0	2,2	23	21	100
Р <sub>н</sub> , Вт	N <sub>н</sub> , об/хв	При 127 В	При 220 В	При 380 В	η, %	Cosφ	$\frac{I_{II}}{I_H}$	$\frac{M_{II}}{M_H}$	$\frac{M_M}{M_H}$	Щ2/Ф3	Ф3	Маховий момент ротору, кг·см <sup>2</sup>

Номінальні дані, I<sub>н</sub>, А при U<sub>н</sub>:

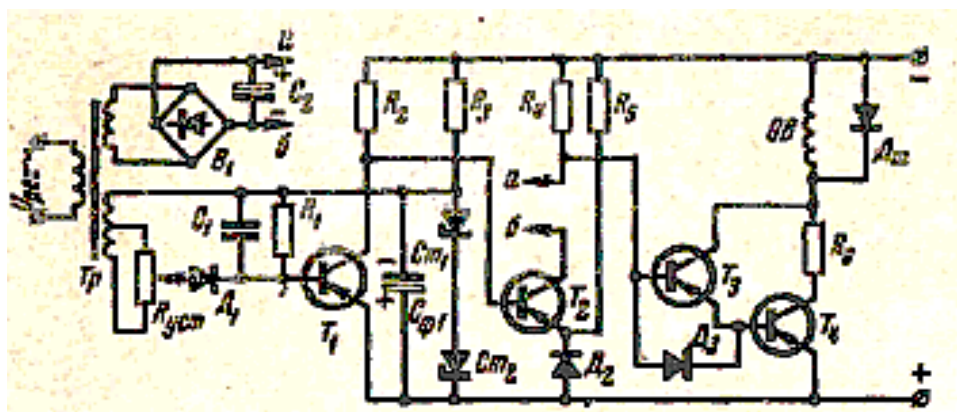


Рисунок 10 – Регулятор напруги двигуна на транзисторах

### **3. Розроблення автоматизованої системи керування процесом сушіння в киплячому шарі на основі мікропроцесора AT89C**

Структурна схема мікропроцесорної системи ґрунтується на мікроконтролері AT89C, який виступає центральним елементом та виконує функції цифрового регулятора. Оскільки мікроконтролер працює виключно з цифровими даними — тобто з інформацією, попередньо перетвореною у двійковий код — для зчитування сигналів від датчиків використовується комутатор аналогових сигналів (КАС). Він по чергово опитує кожен датчик відповідно до програми, що записана в пам'яті МК.

Аналогові сигнали, які формуються на виході датчиків об'єкта (температури — 4, тиску повітря — 2, вологості — 2, а також датчиків зворотного зв'язку виконавчих механізмів — 8), проходять через вимірювальну схему та підсилювач, після чого надходять до аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Саме АЦП переводить їх у цифрову форму, придатну для подальшої обробки мікроконтролером. Закодована інформація тимчасово зберігається в двох регістрах-защіпках по 8 біт кожен, після чого передається до МК для оброблення та подальшого збереження у блоці пам'яті.

Для відображення та введення даних застосовуються дисплей і клавіатура, роботою яких керує окремий контролер. Обмін інформацією мікроконтролера з системами вищого рівня здійснюється через інтерфейс MAX232. Керування виконавчими механізмами забезпечується системою імпульсно-фазового управління, оптоелектронною розв'язкою та підсилювачем потужності.

#### **3.1 Побудова мікропроцесорної системи управління**

Використання мікропроцесорів і мікроЕОМ у створенні автоматизованих технологічних процесів дає змогу суттєво зменшити вартість таких систем у порівнянні з аналогами, побудованими на елементах малої чи середньої інтеграції, які виконують ті ж самі функції.

При цьому помітно зменшуються маса, габаритні розміри та енергоспоживання обладнання. Перехід на сучасну елементну базу також підвищує технологічність і спрощує відтворення систем промислової автоматики, значно розширюючи можливості їх економічно вигідного застосування.

Сьогодні промисловість уже серійно випускає понад 15 видів мікропроцесорних компонентів ВІС із різними архітектурами. Автоматизовану систему керування процесом сушіння зерна в касетній сушарці розроблено на основі мікроконтролера АТ89С, який за архітектурою подібний до Intel (КР 1816ВЕ51), а його входи та виходи є взаємно сумісними.

### **3.1.1 Мікроконтролер АТ89С**

Має наступні характеристики:

- Внутрішня ОЗП 128 байт і може бути розширена до 64 Кб;
- Чотири двонаправлені побітно настроювані порти вводу-виводу;
- Два 16-розрядні таймери лічильники;
- Вбудований генератор тактових імпульсів;
- Пам'ять програм ПЗП – 4Кб;
- Послідовний інтерфейс;
- Система переривань з двома рівнями.

#### Опис виводів мікросхеми АТ89С

P0.0...P0.7 – восьми розрядний порт вводу-виводу (порт №1)

P0.1...P1.7 – восьми розрядний порт вводу-виводу (порт №2);

P0.2...P2.7 – восьми розрядний порт вводу-виводу (порт №3);

RST – сигнал скиду;

RxD – прийом інформації з вищого рівня;

TxD – передача інформації на вищий рівень;

INT0 – переривання для запису чи зчитування інформації

INT1 – за допомогою таймера-лічильника;

XTAL1 – виходи для підключення кварцового резонатору;

XTAL2 – для завдання частоти роботи мікро контролеру (12 МГц);

VSS – напруга живлення, та загальний вивід;

PSEN – сигнал дозволу програмної зовнішньої пам'яті (ПЗП зовнішня);

ALE – вихідний сигнал дозволу фіксації адреси регістра;

DEMA – блокування роботи з внутрішньою пам'яттю

### **3.1.2 Мікросхема АЦП К1113ПВ1**

Пристрій виконує аналого-цифрове перетворення однополярного або біполярного сигналу в 10-бітний двійковий код. Мікросхема К1113ПВ1 працює за принципом послідовного наближення з частотою 300...400 кГц. Її вихідні каскади з трьома станами дають змогу передавати дані безпосередньо на шину даних мікропроцесора.

Для корекції нульового зсуву в межах діапазону рекомендується під'єднувати схему регулювання необхідної шкали вхідної напруги 10–24 В. У коло аналогового входу (13) вмикається змінний резистор номіналом 100...200 Ом.

### **3.1.3 Мікросхема регістру К555ІР22**

8-розрядний буферний регістр, використовується для прийому, збереження, простих перетворень і передачі двійкових чисел. Основне функціональне призначення регістрів – оперативна пам'ять для багато розрядних двійкових чисел (використовується як регістр-защівка перед уведенням інформації у МП).

### **3.1.4 Мікросхема КР580ВВ79 контролер клавіатури і дисплею**

Програмуємий пристрій інтерфейсу, призначений для вводу-виводу інформації в системах 8-, 16-розрядних МП системах. Крім того, мікросхема може застосовуватись як самостійний пристрій при виконанні потрібних вимог.

Мікросхема складається з двох частин:

1. Клавіатурної (24 кнопки)
2. Дисплейної (ЛС108).

Клавіатурна частина забезпечує ввід інформації в мікросхему через лінії „повертання” RET0...RET7 з клавіатури (клавішна матриця 3слова по 8 розрядів). Для збереження інформації в мікросхемі передбачений зворотній магазин – оперативно-запам’ятовуючий пристрій ємністю 8 байт (8 x 8 бітів), спрацьовує по принципу „перший зайшов – перший вийшов”. В клавіатурній частині мікросхеми передбачений спеціальний режим знаходження помилки (сканування) при замиканні двох і більше клавіш, а також введена схема ліквідації дребезгу при замиканні-розмиканні клавіші.

Дисплейна частина мікросхеми забезпечує вивід інформації по двом 4-розрядним каналам DSPA0...DSPA3, DSPB0...DSPB...3 у вигляді війкового коду у 8 чи 16-розрядний цифровий (ЛС-108 8-розрядний індикатор) цифровий чи алфавітно-цифровий дисплей.

Для збереження інформації, що буде відображена на схемі (ЛС108), є ОЗУ (16 слів по 8 розрядів). Інформація на дисплей може виводитись двома способами: зліва на право (без здвигу), або ж справа наліво (зі здвигом).

### **3.1.5 Мікросхема КР590КНЗ комутатор аналогового сигналу**

16 канальний комутатор з дешифратором на МОП-транзисторах для комутації напруги в діапазоні [-5...+5В]. за допомогою цієї мікросхеми відбувається послідовне опитування кожного з каналу, тобто кожного з датчиків, що є чутливими елементами і знаходяться безпосередньо на об’єкті, який задіяний безпосередньо в самому технологічному процесі.

### **3.1.6 Мікросхема КР537РУ17 ОЗП**

Оперативно запам’ятовуючий пристрій, що володіє наступними характеристиками:

- Інформаційна ємність – 65536 біт;
- Організація – 8192 слова по 8 розрядів;
- Напруга живлення – 5 В  $\pm$ 10 %.

Призначення виводів:

- 2, 3...10, 21, 23, 24, 25 – адресні входи (A0...A7, A12, A10, A11, A8, A9);  
11, 12, 13, 15...19 – входи даних (DIO0...DIO7);  
20, 26 – вибір мікросхеми (CS1, CS2);  
22 – дозвіл по виходу (CEO);  
27 – сигнал запису – зчитування (WR/RD);  
28 – напруга живлення ( U<sub>cc</sub> );  
14 – загальний вивід (земля 0 В);  
1 – вільний.

**3.1.7 Мікросхема К573РФ4 постійно запам'ятовуючий пристрій**

Мікросхема пам'яті програм, з якої можна лише зчитувати інформацію в процесі виконання програми, володіє наступними характеристиками:

- Інформаційна ємність – 65536 біт;
- Організація – 8192 слова по 8 розрядів;
- Напруга живлення – 5 В ±10 %.

Призначення виводів:

- 2, 3...10, 21, 23, 24, 25, – адресні входи (A12, A0...A7, A10, A11, A9, A8);  
11...13, 15...19 – вхід-вихід даних ( DIO0...DIO7 );  
20 – вибір мікросхеми ( CS1, CS2 );  
22 – дозвіл по виходу (CEO);  
27 – дозвіл програмування ( PR );  
28 – напруга живлення (U<sub>cc</sub>);  
1 – напруга програмування ( U<sub>PR</sub> );  
14 – загальний вивід (земля 0 В );  
26 – вільний вивід.

### **3.2 Принцип дії мікропроцесорної системи**

Після натискання кнопки запуску SB мікроконтролер AT89C починає виконувати зчитування даних із пам'яті за адресою 000 у відповідності до програми, записаної в ПЗП.

Вибір потрібних мікросхем здійснюється за допомогою дешифратора K555ИД4 (3×8). Спершу він активує аналоговий ключ K590КН93, який по черзі опитує аналогові датчики згідно з програмою. Отриманий аналоговий сигнал у АЦП перетворюється в двійковий код і надходить у два 8-бітні регістри.

Мікроконтролер формує на шині адрес відповідний номер комірки ОЗП, у яку записується значення сигналу конкретного датчика. Вибір мікросхеми знову здійснюється тим самим дешифратором K555ИД4, на входи якого подаються комбінації сигналів (A13, A14, A15). Далі керуючий імпульс згідно з програмою надходить у перетворювач коду, що керує станами тригерів, а через них — і роботою виконавчих механізмів. Залежно від коду на вході та відповідного сигналу на виході, виконавчі механізми можуть рухатися в потрібному напрямку, зупинятися або виконувати реверс.

Програму, записану в ОЗП чи ПЗП, можна змінювати за допомогою кнопок, а вся введена інформація відображається на дисплеї. Так само на індикатор може виводитися значення, отримане з будь-якого датчика. Опитування кнопок і роботу клавіатурно-дисплейного контролера забезпечує дешифратор КР1333ИД7.

### **3.3 Організація взаємодії мікроконтролеру AT89C з об'єктом управління**

Технологічні параметри, які потрібно контролювати, регулювати, управляти ними, сприймаються датчиками – чутливими елементами автоматики, що розміщені безпосередньо на об'єкті керування. Найбільшого розповсюдження отримали датчики, вихідний сигнал яких 1 – максимальне значення, 0 – мінімальне значення вимірюваної величини.

Типова процедура чекання (WAIT) приймає наступний алгоритм дій:

1. Ввод сигналу від датчика;
2. Аналіз значення сигналу;
3. Передача управління в залежності від стану датчика.

Засіб вимірювання будь-якої величини буде підключений до однієї з лінії входів AT89C або до тестуємих спеціальних входів (так як ми використали зовнішню пам'ять, то будуть використовуватись порти P0.0 та P1.0, INT0, INT1).

### 3.3.1 Робота AT89C із зовнішньою пам'яттю даних

Мікроконтролер може працювати із зовнішньою пам'яттю даних, яка складається з однієї або кількох окремих мікросхем. Такі мікросхеми зазвичай мають 11 або 13 адресних входів ( $A0\dots A10$  або  $A0\dots A12$ ), комбінація сигналів на яких визначає адресу комірки, до якої здійснюється звернення.

Сигнал на вході WE задає режим роботи:

WE = 0 — запис даних у комірку пам'яті;

WE = 1 — зчитування інформації з комірки.

Вхід CE вмикає або вимикає мікросхему пам'яті:

CE = 0 — мікросхема вимкнена;

CE = 1 — мікросхема активна, доступні операції запису та читання.

Нульовий сигнал на вході OE дозволяє передавати інформацію через вихідний буфер мікросхеми на лінії даних  $D0\dots D7$ . Якщо OE = 1, виходи мікросхеми від'єднуються від шини даних.

Щоб робота з пам'яттю виконувалась коректно, треба дотримуватись такого порядку:

Наприклад, потрібно записати число  $145_{10}$  ( $10010001_2$ ) у комірку пам'яті з адресою  $84_{10}$  ( $54_{16} = 1010100_2$ ). Для цього мікроконтролер подає це число на лінії даних  $D0\dots D7$  ( $D0 = D4 = D7 = 1$ ), а адресу — на адресні входи ( $A2 = A4 = A6 = 1$ ;  $A0 = A1 = A3 = A5 = 0$ ;  $A7 = A8 = 0$ ). Після встановлення адреси й даних МК подає сигнали:

WE = 0 — дозвіл запису,

$CE = 1$  — активна мікросхема.

Як тільки на вході OE з'являється «0», число 145 буде записане у комірку з адресою 84.

Для зчитування даних із цієї ж комірки МК так само встановлює адресу на лініях A0...A12, а потім задає:

$WE = 1$  — читання;

$CE = 0$  — вибір мікросхеми.

Після появи сигналу «0» на OE, дані з комірки з'являються на виводах D0...D7.

У контролері AT89C цей процес реалізовано таким чином: він має три основні шини — адресну (A0...A15), даних (D0...D7) та керуючу. Адресні виводи МК під'єднують до відповідних входів мікросхем пам'яті, а лінії даних — до виходів пам'яті.

З керуючих сигналів використовуються лише RD (читання) та WR (запис), через які здійснюється керування процесами доступу до пам'яті.

Під час звертання до пам'яті мікроконтролер формує адресу потрібної комірки на адресній шині. Комбінація сигналів на A13–A15 надходить на дешифратор, який формує нульовий сигнал на вході CE вибраної мікросхеми пам'яті. Якщо виконується запис, МК виставляє на D0...D7 байт даних, а потім подає «0» на сигнал WR (при  $RD = 1$ ). Таким чином AT89C створює необхідну комбінацію керуючих сигналів для виконання операцій із зовнішньою пам'яттю.

### **3.3.2 З'єднання AT89C з клавіатурою і лінійним дисплеєм на основі ВІС КР580ВД79**

Застосування контролера клавіатури й дисплея (ККД) дозволяє значно зменшити навантаження на мікроконтролер, оскільки він бере на себе функції опитування клавіатури та підтримання індикації на лінійному дисплеї.

Після підключення ККД стає частиною адресного простору внутрішньої пам'яті даних. Лінія P0.0 під'єднується до входу A0 контролера та повинна

встановлюватися або скидатися залежно від того, який тип операції виконує МК (керуюча команда чи передавання даних). Вхід вибірки контролера під'єднується до загального проводу, тому ККД постійно активний і готовий до взаємодії з АТ89С. Сигнал запиту переривання (INT) від контролера подається на лінію P0.1 мікроконтролера й може використовуватися для фіксації факту натискання клавіші.

Шина даних, а також лінії читання і запису контролера безпосередньо під'єднані до відповідних виводів АТ89С. На вхід CLK подається тактовий сигнал частотою 2 МГц. ККД забезпечує введення коду натиснутої клавіші в МК і підтримує відображення на однорядковому 8-символьному дисплеї. Для сканування клавіатури та дисплея додатково використовується інвертуючий дешифратор 3×8. Діоди на його виходах необхідні для захисту від коротких замикань, які можуть виникнути при одночасному натисканні кількох клавіш. Дисплей (АЛС108) на схемі зображений умовно і має власні буферні каскади для забезпечення необхідного струмового навантаження. Сигнал «0» на вході R вимикає всі символи одночасно.

Матриця клавіш організована так, щоб SCAN-код натиснутої клавіші відповідав двійковому значенню 16-річного символу, нанесеного на клавішу. Входи SHIFT і CONTROL під'єднані до загального проводу.

Щоб налаштувати ККД на потрібний режим роботи, основна програма мікроконтролера повинна завантажити в нього слова ініціалізації, а також у потрібний момент — керуюче слово операції. Наведена нижче програма ініціалізації встановлює роботу контролера з 8-позиційним дисплеєм, розпізнавання разових натискань клавіш та сканування дисплею за допомогою лічильника:

SET B P0.0	– встановити A0
MOV A, #00H	– завантажити керуюче слово
MOV X @R0, A	– передати слово ініціалізації до контролера
MOV A, (#20H+20)	– задати коефіцієнт ділення
MOV @R0, A	

Коефіцієнт ділення тактового сигналу CLK вибирається так, щоб внутрішня опорна частота контролера становила 100 кГц. Оскільки частота ALE дорівнює 2 МГц, коефіцієнт ділення дорівнює 20. Значення регістра R0 ролі не відіграє, оскільки контролер займає весь адресний простір внутрішньої пам'яті даних. Після завершення ініціалізації ККД працює паралельно з АТ89С, позбавляючи мікроконтролер необхідності виконувати програми опитування клавіатури та обслуговування відображення.

Для зчитування коду натиснутої клавіші з контролера необхідно:

WAIT: INB P0.1, WAIT – очікування натискання клавіші

SET B P0.1 – встановлення A0

MOV A, #40H – підготовка читання нульової комірки

MOV X @R0, A – передача керуючого слова

CLR P0.1 – скидання A0 та читання коду

MOV X A, @R0

Як тільки контролер визначає факт натискання клавіші та її SCAN-код (який збігається з двійковим значенням символу), він подає запит переривання на МК. Отримавши сигнал «1» на вході P0.1, мікроконтролер має прочитати код клавіші з ККД. Для цього він спершу надсилає керуюче слово (режим читання), вказуючи джерело даних — буфер кодів клавіш — та адресу комірки. Після цього при A0 = 0 мікроконтролер може зчитати значення з буфера і використати код натиснутої клавіші у програмі.

## **4 Розрахунки та дослідні матеріали, які підтверджують працездатність системи автоматизації процесу сушіння сої в сушарці каскадного типу**

### **4.1 Теорія проведення досліджень**

Керований об'єкт є центральною ланкою системи автоматичного управління, у якій за допомогою засобів автоматизації має забезпечуватися необхідний режим роботи. До його складу може належати й навколишнє середовище, якщо воно помітно впливає на функціонування системи. Основною особливістю такого об'єкта є здатність перетворювати, передавати або накопичувати енергію чи матеріальні ресурси, що й обумовлює потребу у наявності органів керування або регулювання.

Об'єктом мого дослідження виступає сушарка каскадного типу з «киплячим шаром», призначена для сушіння дисперсного матеріалу, такого як насіння соняшника, кукурудзи, зернових, сої та інших видів сільськогосподарської продукції.

Характеристики об'єкта керування найповніше описують його статичні та динамічні властивості, на основі яких проводиться розрахунок регуляторів. Іншими словами, для обґрунтування вибору відповідного регулятора необхідно володіти математичною моделлю об'єкта. Таку модель отримують або аналітичним шляхом, або експериментально. Кожен з цих підходів має свої плюси й мінуси: аналітичний метод менш витратний, але відзначається нижчою точністю, тоді як експериментальний забезпечує високий рівень достовірності, проте потребує значних ресурсів.

#### **4.1.1 Експериментальний метод дослідження**

Експериментальні дослідження об'єкта можуть проводитися активним або пасивним способами.

Активні методи доцільно використовувати для об'єктів, що не перебувають у робочому стані та не чутливі до перевантажень, тобто під час експерименту

допустимі відхилення вихідної величини за межі норми, що не вплине на технологічний процес.

Суть активного експерименту полягає в тому, що об'єкту подається стандартне вхідне впливання одного з трьох типів:

1. **Стрибокподібне (ступінчасте) впливання**, що викликає перехідний процес вихідної величини, який відображається кривою розгону (перехідною характеристикою);
2. **Однократне імпульсне впливання**, яке формує на виході об'єкта імпульсну характеристику;
3. **Періодичне впливання** (синусоїдальне, прямокутне, пилкоподібне або трапецеїдальне), що спричиняє періодичні коливання вихідної величини. На основі кривих зміни вхідної та вихідної величин визначають частотні характеристики об'єкта.

Експериментальне визначення динамічних характеристик здійснюється у три етапи:

**1. Підготовка та планування експерименту.** На цьому етапі проводять аналіз об'єкта, обирають вхідні та вихідні змінні, готують необхідну апаратуру та визначають параметри впливу. Як вхідну величину зазвичай беруть положення регулюючого органу, а вихідною — параметр, що підлягає контролю. Експеримент бажано проводити в умовах мінімальних зовнішніх збурень.

Підготовка апаратури передбачає вибір датчика вихідної величини та приладу для її реєстрації. Вибір типу впливу залежить від властивостей об'єкта. Для об'єкта з самовирівнюванням доцільно застосувати одиничне ступінчасте впливання, що дозволяє отримати зміну вихідної величини в часі, тобто криві розгону. Амплітуда ступінчастого впливу зазвичай становить 10–15 % від максимального ходу регулюючого органу. Експеримент рекомендується повторювати 3–4 рази, а за наявності зовнішніх збурень — до 8 разів.

**2. Проведення експерименту.** Динамічні характеристики визначають шляхом подачі на вхід об'єкта одиничного ступінчастого впливу та реєстрації зміни вихідної величини в часі.

**3. Обробка результатів.** Під час активного експерименту отримують графічні залежності динамічних характеристик, що використовуються для визначення передаточних функцій об'єкта. Обробка включає згладжування експериментальних даних та визначення параметрів (коефіцієнтів) апроксимуючої передаточної функції.

#### **4.1.2 Сушарка з киплячим шаром каскадного типу як об'єкт автоматизації**

На сучасних фермерських лініях післязбиральної обробки зерна найпоширенішими є барабанні та шахтні сушарки. Сушарка з «киплячим шаром» базується на конструкції шахтної сушарки, але відрізняється більш ефективним теплообміном через збільшену площу випаровування вологи, що забезпечується більшою геометричною поверхнею зерна. Через це її можна розглядати як модифікацію шахтної сушарки [13]. Касетна сушарка з «киплячим шаром» складається з теплогенератора I (рисунок 11), що використовує рідке паливо, змішувача II для об'єднання повітря та гарячого теплоносія, надсушильного бункера (камери попереднього підігріву) III і сушильної камери IV.

Сушарка з „киплячим шаром” характеризується великим числом величин (параметрів), які показані на рисунку 12. Ці параметри умовно поділені на три групи.

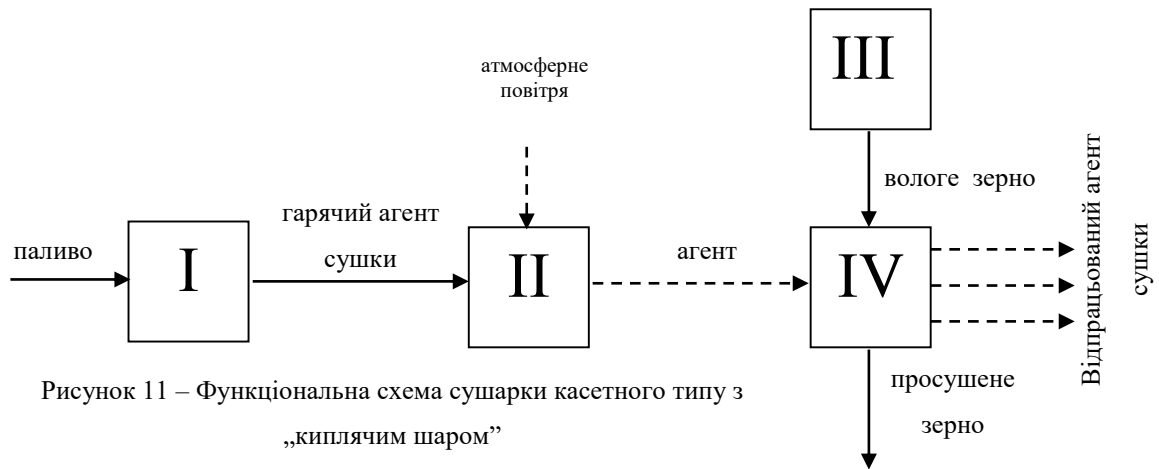


Рисунок 11 – Функціональна схема сушарки касетного типу з „киплячим шаром”

До параметрів першої групи (контролю і регулювання), що кількісно і якісно характеризують роботу сушарки, відносяться:

- Кінцева вологість зерна  $\omega_{зк}$ ;
- Всхожість та енергія проростання насіння  $e_{зк}$ ;
- Продуктивність сушарки  $Q_{зк}$ ;
- Температура нагріву зерна в сушильній камері  $t_{зс}$ ;
- Температура подаваемого в сушарку теплоносія  $t_{нн}$ ;
- Температура відпрацьованого теплоносія  $t_{нк}$ ;
- Швидкість теплоносія  $v_n$ ;
- Вологовміст відпрацьованого теплоносія  $d_{нк}$ ;
- Витрата палива  $Q_{пал}$ ;
- Рівень зерна в камері попереднього підігріву  $H$ ;
- Наявність факелу в топці  $\Phi$ ;
- Коефіцієнт теплообміну  $\alpha_{нз}$ ;
- Коефіцієнт масообміну  $M$ ;
- Коефіцієнт дифузії тепла і вологи  $K_{диф}$ ;
- Термоградієнтний коефіцієнт  $T$ ;
- Порозність шару  $\delta$ ;

Вхідні параметри об'єкту підрозділяються на дві групи: зовнішні збурення і управляючі діяння.

До зовнішніх збурень відносять;

- Вологість поступаючого зерна  $\omega_{зн}$ ;
- Температуру поступаючого зерна  $t_{зн}$ ;
- Чистота і об'ємна маса поступаючого зерна  $\mathcal{C}$ ;

- Всхожість і енергія проростання зерна до сушки  $e_{zn}$ ;
- Початковий вологовміст теплоносія  $d_{нт}$ ;
- Витрата подаваемого в сушарку теплоносія  $Q_{нос}$ ;

Управляючими діями об'єкту є:

- Переміщення регулюючого органу випускного апарату (кут нахилу сит), що змінює продуктивність сушарки  $X_{вип}$ ;
- Переміщення органу, що регулює завантаження сушарки і приводить до зміни  $X_{зав}$ , (а також до зміни  $H$ ).

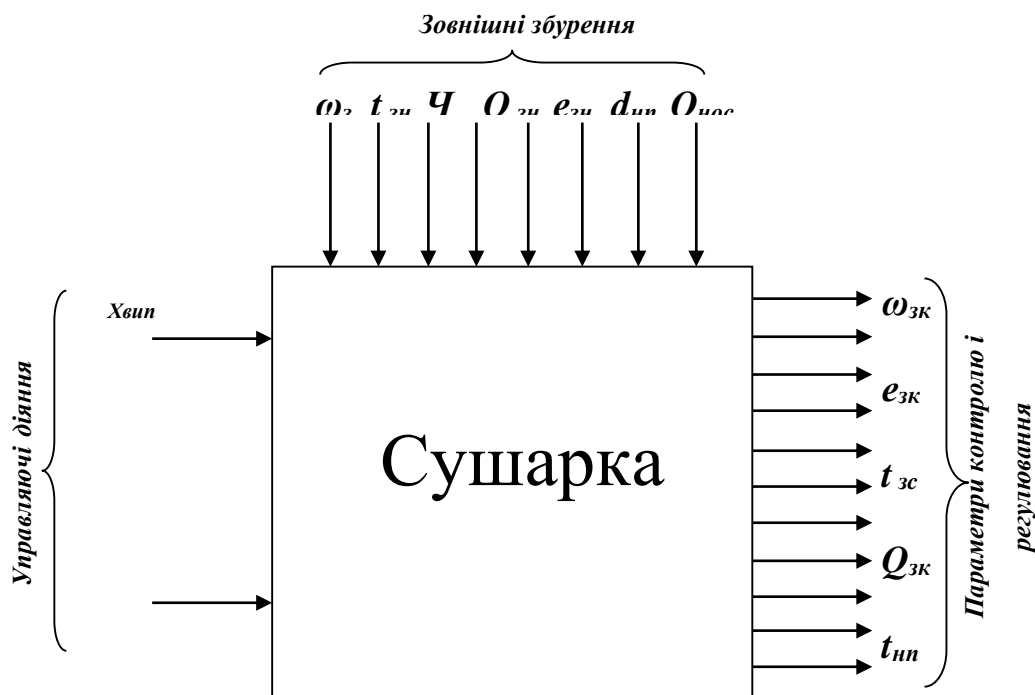


Рисунок 12 –схема в параметрах зерносушарки каскадного типу з

„киплячим шаром” для сушіння сої

Більшість параметрів першої групи в результаті обробки сої в сушарці задовольняють агротехнічним вимогам, а також відповідають певним якісним показникам, що пов'язані з умовами зберігання продукту або його послідуною обробкою. Дія ж збурень призводить до коливань всіх вихідних параметрів, що викликає необхідність управління ними.

### 4.1.3 Опис установки, на якій проводився експеримент

Загальний вигляд сушарки для сої зображений на рис. 13.

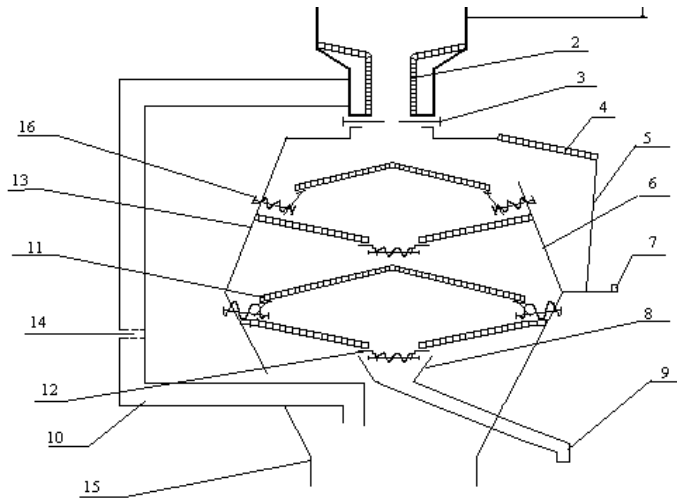


Рисунок 13 – Схема експериментальної установки

1-бункер для вологого зерна; 2-касета для попереднього підігріву зерна; 3-шибер для вивантаження сирого зерна з бункера попереднього підігріву в конфузори зерносушильної установки на каскади; 4-сітка для виходу відпрацьованого агента сушки; 5-осадова камера для легких домішок(фракцій); 6-бокова регулююча стінка конфузора; 7-шибер осадкової камери; 8-короб для сухого зерна; 9-труба для виходу сухого зерна; 10-труба для попереднього підігріву; 11-регулюючі касети(каскади) з решетами для сушіння зерна; 12-регулюючі пелюстки для проходження зерна з верхнього каскаду на нижній; 13-конфузори(камери) для сушіння зерна; 14-регулююча заслінка для подачі агента сушки на попередній підігрів зерна; 15-дифузор для подачі агента сушки в конфузори; 16-допоміжні решета.

Для вивчення впливу окремих факторів на цільові функції та визначення їх оптимальних значень була створена експериментальна установка, що складається з нагнітаючої та робочої частин.

**Нагнітаюча частина** включає дифузор, який кріпиться своєю нижньою основою та підключається до трубопроводу, по якому від теплогенератора подається гарячий агент сушки. З нижньої частини дифузора виходить труба попереднього прогріву зерна, один кінець якої входить у дифузор, а інший під'єднується до бункера для завантаження зерна. Основна функція цієї труби — запобігати конденсації пари на поверхні зерна.

**Робоча частина** (конфузори) приєднується до нагнітаючої частини знизу, а зверху до конфузора прикріплений бункер для сирого зерна. Усередині робочої частини розташовані касети з решетами (каскади) на шарнірних

кріпленнях, що дозволяють регулювати кут нахилу касет. Бокові стінки робочої частини також закріплені на шарнірах, що дає змогу регулювати верхній кут конфузора.

По краях касет встановлені бокові регулюючі лопатки, за допомогою яких регулюється подача зерна з одного каскаду на інший. Лопатки кріпляться до бокових стінок конфузора або між собою на нижніх каскадах за допомогою болтового з'єднання та пружин. Завдяки цим лопаткам формується напрямок руху агента сушки крізь касети з решетами.

Агент сушки подається в нагнітаючу частину через трубопровід від стаціонарного теплогенератора. У повітряних каналах, до та після касет, встановлені вимірювальні прилади для визначення повного та статичного тиску, термометри для контролю температури, а також прилади для вимірювання вологості зерна.

Таблиця 4.1 – Фактори, котрі впливають на час сушіння зерна.

№ п/п	Фактори	
	Найменування	Позначення
1	вологість матеріалу напочатку сушіння $W_n$ , %	$X_1$
2	вологість висушеного матеріалу $W_k$ , %	$X_2$
3	Тиск в конфузори $P_1$ , кПа	$X_3$
4	Тиск в трубопроводі попереднього прогріву. $P_2$ , кПа	$X_4$
5	Температура агента сушки в конфузори $t_1$ , $C^0$	$X_5$
6	Температура агента сушки в трубопроводі попереднього прогріву $t_2$ , $C^0$	$X_6$
7	Швидкість теплоносія в конфузори $v_1$ , м/с	$X_7$
8	Швидкість теплоносія в трубопроводі попереднього прогріву $v_2$ , м/с	$X_8$
9	Висота матеріалу на каскаді $H$ , мм	$X_9$
10	Кут нахилу перфорованих касет (каскадів) $\alpha$ , град	$X_{10}$
11	Кут нахилу бокових стінок конфузора $\beta$ , град	$X_{11}$
12	Експозиція сушіння сої $T$ , сек	$X_{12}$

Для впливу на фактори, що несуть вирішальне значення на цільову функцію, установка оснащена такими елементами для проведення експерименту:

1. **Регулювання тиску вентилятора РРР** у нагнітаючій частині та трубі попереднього прогріву здійснюється за допомогою заслінок, що дозволяють встановлювати потрібні значення тиску.
2. **Зміна висоти шару зерна ННН** на каскадах досягається через шибери у бункері для сирого зерна та регулюючі лопатки на каскадах, які дозволяють змінювати товщину шару зерна.
3. **Контроль максимальної швидкості агента сушки та температури** здійснюється за допомогою шарнірів у верхній частині конфузора, що дають змогу зменшувати кут до  $16^\circ$  у верхній зоні конфузора.
4. **Регулювання швидкості руху зерна по каскадах** забезпечується шарнірами, за допомогою яких каскади встановлюють під необхідним кутом нахилу.
5. **Зміна ширини робочої частини касет** здійснюється шляхом встановлення додаткових решіток на бокових стінках конфузора.
6. **Регулювання аеродинамічного опору** виконується заміною решіток з певним діаметром отворів  $d_{от}$  на решета з іншими параметрами.

#### **4.1.4 Значення зміни вологості на ККД зерносушарки**

Методи визначення вологості твердих тіл, рідин та газів базуються на перетворенні вологості в інші фізичні величини з використанням сучасної вимірювальної техніки. Вимірювання вологості різних матеріалів відіграє провідну роль як у народному господарстві, так і в наукових дослідженнях, ставши важливою складовою сучасної аналітичної техніки. Дані про вологість широко застосовуються в автоматичних та інформаційних системах.

Волога є обов'язковим компонентом усіх живих організмів, навколишнього середовища, а також більшості матеріалів, що використовуються людиною. Вміст вологи у середовищі впливає на характер і інтенсивність біологічних та фізико-хімічних процесів. Від вологості залежать фізичні, хімічні, механічні

та технологічні властивості багатьох матеріалів. У різних галузях промисловості необхідно контролювати або регулювати вологість матеріалів із заданою точністю.

Зокрема, вологість зерна та інших сільськогосподарських продуктів є одним із ключових факторів, що визначають можливість їх тривалого зберігання без втрат якості. Всхожість насіння значною мірою залежить від його вологості під час зберігання. При переробці зерна вологість впливає на опір подрібненню, а отже, на питому витрату енергії та продуктивність млинового обладнання. Крім того, величина вологості враховується при здачі та прийманні зерна, оскільки вона безпосередньо впливає на чисту масу продукції та її вартість.

#### **4.2 Методика визначення динамічних характеристик об'єкту**

- Для отримання розгінних характеристик (зміни вологості в часі) на кожному з чотирьох каскадів застосовували одиничне ступінчасте впливання — змінювали положення заслінки, що регулює подачу зернової маси в камеру сушіння, на 10%. Це відповідало приблизно 17 г/сек і призводило до збільшення надходження матеріалу, що, у свою чергу, зумовлювало зростання вологості кінцевого продукту.

□ Для визначення вологості зерна під час технологічного процесу одночасно на всіх каскадах через кожні 10 секунд відбирали проби приблизно по 50 г. Вологість визначали в лабораторних умовах: зерно подрібнювали, після чого по 5 г висівок відважували на навіски. Бюкси з відкритими кришками розташовували в один ряд у нагрітій сушильній шафі. Тривалість сушіння та температура залежали від виду зернових культур.

Зернові (пшениця, ячмінь, соя).....130<sup>0</sup>С ..... 40 хв.

Олійні..... 100-105<sup>0</sup>С .....5 год.

Час	Вологість_1	Вологість_2	Вологість_3	Середня вологість
0	20	20	20	20
10	19,8	20	20,15	19,983
20	19,62	19,82	19,87	19,77
30	19,483	19,6	19,75	19,611
40	19	19,2	19,35	19,183
50	18,6	18,8	18,776	18,725
60	18,2	18,4	18,427	18,342
70	17,885	18	18,15	18,012
80	17,8	17,914	18,07	17,928

Перед висушуванням шафу сушильну доводили до температури на 10-20<sup>0</sup>С вище необхідної. Температура в шафі регулюється за рахунок ручки терморегулятора.

Після закінчення встановленого часу сушіння бюкси виймали з шафи, закривали кришками та негайно поміщали в ексикатори з сірчаною кислотою або хлористим кальцієм. Після охолодження бюкси зважували, і на основі різниці між початковою та кінцевою масою визначали втрату вологи зерна. Всі зважування виконували з точністю до 0,01 г. Визначення вважали завершеними, якщо різниця між результатами двох паралельних навісок не перевищувала 0,4 %. У разі більшої розбіжності експеримент повторювали.

Вологість зерна обчислювали за формулою:

$$W = \frac{m_1}{m_2} \cdot 100\%$$

де  $m_1$  – маса бюксів до висушування, г;

$m_2$  – маса бюксів після висушування, г.

Експеримент проводили тричі, в процесі чого була отримана наступна таблиця даних:

Таблиця 4.2 – Дані проведення експерименту по першому каскаду

Час	Вологість_1	Вологість_2	Вологість_3	Середня вологість
0	16,27	16,5	16,71	16,493
10	16,21	16,4	16,66	16,423
20	16	16,15	16,53	16,227
30	15,59	15,76	16,21	15,853
40	15,08	15,39	15,66	15,377
50	14,9	15,23	15,45	15,193
60	14,95	15	15,33	15,093

Таблиця 4.5 – Дані проведення експерименту по четвертому каскаду

Час	Вологість_1	Вологість_2	Вологість_3	Середня вологість
0	17,72	18	18,31	18,01
10	17,65	17,95	18,24	17,947
20	17,28	17,9	18,16	17,78
30	17,2	17,4	17,78	17,46
40	16,71	17,13	17,3	17,047
50	16,19	16,62	17,03	16,613
60	16,07	16,41	16,9	16,46
70	16,07	16,5	16,86	16,477

Час	Вологість_1	Вологість_2	Вологість_3	Середня вологість
0	14,94	15,00	15,15	15,03
10	14,58	14,90	14,99	14,82
20	13,49	13,75	14,02	13,75
30	13,18	13,50	13,68	13,45
40	13,11	13,63	13,68	13,47

### 4.3 Обробка результатів експерименту (згладжування та нормування кривих, апроксимація передаточної функції)

На основі експериментальних даних були побудовані криві розгону для кожного каскаду, які оброблялися за допомогою програми Excel і представлені в додатку Б.

Оскільки на об'єкт впливають неконтрольовані фактори, виміряні результати містять певну похибку, що має випадковий характер. Через це на координатному полі значення вимірювань можуть мати розсіяння. Тому експериментальні дані потребують згладжування, щоб наблизити їх до достовірних значень. Для цього рекомендується використовувати метод четвертих різниць. Його суть полягає в апроксимації п'яти сусідніх точок кривої розгону параболою другого порядку, при цьому середня точка приймається як значення згладженої характеристики. Коефіцієнти параболи визначаються методом найменших квадратів (МНК).

Значення згладженої перехідної характеристики в  $i$ -й точці обчислюють за відповідною формулою:

$$\tilde{y}(i) = y(i) - \frac{1}{12} A(i) \quad i=3, 4, \dots, n-2,$$

де  $\tilde{y}(i)$  – згладжене значення кривої розгону в  $i$ -тій точці;

$y(i)$  – значення кривої розгону в  $i$ -тій точці по результатам експерименту;

$A(i)$  – коефіцієнт;

$$A(i) = y(i-2) + 6y(i) + y(i+2) - 4[y(i-1) + y(i+1)]$$

Дві перші точки кривої розгону визначаються з виразів:

$$\tilde{y}(1) = y(1) - \frac{1}{5} B(4) + \frac{1}{12} A(3) :$$

$$\tilde{y}(2) = y(2) + \frac{2}{5} B(4) - \frac{1}{7} A(3),$$

а дві останні – за формулами:

$$\tilde{y}(n-1) = y(n-1) - \frac{2}{5} B(n) - \frac{1}{7} A(n-2) :$$

$$\tilde{y}(n) = y(n) + \frac{1}{5} B(n) + \frac{1}{12} A(n-2),$$

Коефіцієнт  $B(n)$  знаходиться за формулою:

$$B(i) = y(i-3) + 3y(i-1) - 3y(i-2) - y(i)$$

Усі необхідні розрахунки виконані в програмі Excel і наведені в додатку С. Згладжені криві розгону для кожного ситу представлені в додатку В. Для визначення передаточних функцій об'єкта по кожному каскаду необхідно виконати нормування кожної згладженої кривої, яке здійснюється за наступною формулою:

$$y'_n = \frac{\tilde{y}(i) - \tilde{y}(0)}{\tilde{y}(\infty) - \tilde{y}(0)}$$

де  $y'_n$  – нормоване значення вологості розгонної кривої;

$\tilde{y}(i)$  – згладжене значення вологості розгонної кривої в даний момент часу;

$\tilde{y}(0)$  – згладжене значення вологості розгонної кривої в початковий момент часу;

$\tilde{y}(\infty)$  – згладжене значення вологості розгонної кривої в кінцевий момент часу;

На основі даних, отриманих у процесі розрахунків, були побудовані графіки нормованих кривих розгону для кожного ситу окремо (див. додаток Д).

Існує кілька методів обробки кривої розгону об'єкта для визначення його передаточної функції. Один із них — графічний метод апроксимації. Цей спосіб є досить простим, проте його головний недолік полягає у відносно низькій точності. При обробці нормованих кривих розгону для статичних об'єктів передаточна функція, отримана за допомогою цієї кривої, має такий вигляд:

$$W(p) = \frac{k}{(Tp + 1)} \cdot e^{-p\tau}$$

де  $k$  – коефіцієнт передачі об'єкту;

$\tau$  – час чистого запізнювання;

$T$  – постійна часу об'єкту.

Коефіцієнт передачі об'єкту це дріб між приростом вихідної величини та приростом вхідної:

$$k = \frac{\Delta X_{\text{вх}}}{\Delta X_{\text{вих}}}$$

Постійну часу  $T$  і час  $\tau$  чистого запізнювання шукають через дотичну, що проводять в точці, яка відповідає екстремуму зміні вимірювальної величини на виході об'єкта.

Час запізнювання визначають як залишок при відсікання дотичної від вісі  $Ox$ .

По нормованим графікам динамічних характеристик були знайдені такі коефіцієнти:

Для першого каскаду:

$$T1=52 \text{ сек}, \tau=25 \text{ сек.}$$

Для другого каскаду:

$$T2=44 \text{ сек}, \tau=20 \text{ сек.}$$

Для третього каскаду:

$$T3=33 \text{ сек}, \tau=15 \text{ сек.}$$

Для четвертого каскаду:

$$T4=18 \text{ сек}, \tau=10 \text{ сек.}$$

(4.8)

Коефіцієнт передачі сушарки знайдемо як дріб приросту кінцевої вологості (0,5 %) при зміні масової витрати сої на 10 %, що складає 17 г/сек:

$$k = \frac{0.5\%}{17 \text{ г/сек}} = 0,03\% \cdot \text{с} / \text{г}$$

Оскільки зернова маса переміщується по каскадах послідовно, переходячи з одного каскаду на інший, можна вважати, що сушарка як об'єкт автоматизації описується загальним рівнянням, складовими якого є передаточні функції кожного каскаду, з'єднані послідовно, тобто:

$$W_0(p) = \frac{k}{(T1p + 1)(T2p + 1)(T3p + 1)(T4p + 1)} e^{-p(\tau1 + \tau2 + \tau3 + \tau4)}$$

При підстановці у попередню формулу можна отримати передаточну функцію сушарки у наступному вигляді:

$$W_0(p) = \frac{0.03}{(52p+1)(44p+1)(33p+1)(18p+1)} e^{-p60} \quad (4.11)$$

Дослідження виконували по всім чотирьом каскадах окремо, але передаточна функція об'єкту – це залежність між вихідною і вхідною величиною, яка і описується рівнянням, що характеризує четвертий каскад, тому передаточною функцією сушарки будемо вважати:

$$W_0(p) = \frac{0.03}{(18p+1)} e^{-p10} \quad (4.12)$$

Тоді рівняння диференціальне сушарки для сої буде мати наступний вигляд:

$$\begin{aligned} T_{об} \cdot \frac{d\omega}{dt} + \omega &= K_{об} \cdot m \\ T_{об} \cdot p\bar{\omega} + \bar{\omega} &= K_{об} \cdot \bar{m} \\ \bar{\omega}(T_{об} \cdot p + 1) &= K_{об} \cdot \bar{m} \\ W_{об}(p) &= \frac{\bar{\omega}}{\bar{m}} = \frac{K_{об}}{(T_{об} \cdot p + 1)} \\ W_{об}(p) &= \frac{\bar{\omega}}{\bar{m}} = \frac{K_{об}}{(T_{об} \cdot p + 1)} \cdot e^{-p\tau} \end{aligned} \quad (4.13)$$

## 5 Розрахункова частина

Оскільки частота опитування датчиків об'єкта досить висока (10 кГц), а стала часу об'єкта значно перевищує цю частоту (20 с), розроблену систему автоматичного регулювання можна вважати неперервною. Тому всі розрахунки проводяться з позицій теорії автоматичного регулювання, тобто як для неперервної системи.

### 5.1 Побудова функціональної схеми САР вологості зерна

При створенні функціональних схем спрощено відображається технологічна схема процесу, на якій зазначені всі прилади та технічні засоби, що встановлюються на щитах, пультах або безпосередньо на технологічному обладнанні чи поруч із ним.

Функціональна схема системи автоматичного регулювання вологості зерна у касетній сушарці наведена у графічній частині.

### 5.2 Побудова структурної схеми САР на основі функціональної

Передаточна функція виходить із відомої формули Лапласа, відповідно якій функція часу  $f(t)$  – оригінал – може бути перетворена в функцію комплексної величини « $S/p$ », яка є зображенням відповідного оригіналу. Формула прямого перетворення Лапласа:

$$L[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-s \cdot t} dt$$

Передаточні функції при використанні перетворень Лапласа представляють собою як дріб зображень  $X_{вих}$  до  $X_{вх}$ .

При н.п.у. передаточну функцію  $W(p)$  можна подати на основі подачі згаданих вище величин в операторній формі. Тому в теорії автоматичного керування передаточну функцію часто записують так:

$$W(p) = \frac{\overline{X}_{вих}}{X_{вх}} = \frac{X_{вих}}{X_{вх}}$$

1. Датчик вологості зерна:

$$W_d(p) = K_d a t$$

2. Об'єкт керування:

$$W_{OK}(p) = \frac{K_{об}}{(T_{OK}p + 1)} \cdot e^{-p\tau_{об}}$$

3. Виконавчий механізм:

$$W_{BM}(p) = \frac{K_{BM}}{p(T_{BM}p + 1)}$$

3 Регулюючий орган:

$$W_{PO}(p) = K_{po}$$

Параметром стану, а також об'єктом контролю та регулювання, є вологість сої, тоді як управляючим (регулюючим) впливом виступає подача матеріалу (сої). Збурюючими факторами є температура сої, його початкова вологість, температура та вологість агента сушки тощо. Задаючим впливом системи виступає встановлене значення вологості (13-14%), яке необхідно підтримувати на заданому рівні.

У процесі регулювання вологості система автоматичного регулювання повинна виконувати такі функції:

- Хфактичне;
- порівняння Хвих вологості з Хзад;
- підсилення сигналу розбалансу;
- формування з-ну регулювання та видача управляючого сигналу на виконавчий механізм та зв'язаний з ним регулюючий орган для подачі в об'єкт такої кількості енергії, при якій температура буде з заданою точністю підтримуватися стабільною.

Структурна схема САР винесена до графічної частини

### 5.3 Визначення передаточних функцій розімкнутої і замкнутої системи та характеристичного рівняння замкнутої системи

В САР розрізняють декілька видів систем, серед них:

1. розімкнута система автоматичного регулювання;
2. замкнута система автоматичного регулювання:

#### Передаточна функція розімкнутої системи:

Розімкнута САР – це система, що функціонує без зворотнього зв'язку.

За структурною схемою складаємо передаточну функцію розімкнутої системи.

Так як елементи в головному контурі з'єднані послідовно, то загальна передаточна функція визначається за формулою:

$$W_{\delta i_c}(\delta) = \prod_{i=1}^i W_i(p)$$

Тепер підставимо значення передаточних функцій відповідних елементів:

$$W_{роз}(p) = \frac{K_{об}}{(T_{ок}p + 1)} e^{-p\tau_{об}} K_{дат} \cdot \frac{K}{p(T_{вм}p + 1)} \cdot K_{ро}$$

Підставимо чисельні значення параметрів:

$$W_{роз}(p) = \frac{0,03}{(20p + 1)} e^{-p10} 0,7 \cdot \frac{1}{60} \cdot \frac{0,5}{(90p + 1)} \cdot 3$$

Тоді передаточна функція розімкнутої системи автоматичного регулювання вологості буде виглядати так:

$$W_{роз}(p) = \frac{1,57}{p(90p + 1) \cdot (20p + 1)} e^{-p10}$$

#### Передаточна функція замкнутої системи:

Замкнута система — це система, охоплена зворотним зв'язком, коли величина, виміряна на виході, певним чином подається на вхід системи. Оскільки система має від'ємний зворотний зв'язок із передаточною функцією, що дорівнює одиниці, загальна передаточна функція замкнутої системи визначається за такою формулою:

$$W_{зам}(p) = \frac{W_{роз}(p)}{1 + W_{роз}(p) \cdot W_{зз}(p)}$$

$$W_{зз}(p) = 1$$

Підставимо отримане значення передаточної функції  $W_{роз}(p)$  в формулу для  $W_{зам}(p)$ , отримаємо передаточну функцію замкнутої системи автоматичного регулювання:

$$W_{зам}(p) = \frac{1.57}{(90p + 1)(20p + 1) + 1.57}$$

Тоді характеристичне рівняння  $W_{зам}(p)$  (тобто знаменник попереднього виразу) буде вже ось такий:

$$(90p + 1)(20p + 1) + 1.57 = 0$$

#### **5.4 Визначення стійкості замкнутої системи. Побудова області стійкості**

Стійкість — це властивість системи повертатися до початкового стану після припинення дії зовнішніх факторів або збурень, що вивели її з рівноваги. Для оцінки стійкості системи застосовується критерій Найквіста, який дозволяє визначити стійкість системи при заданому коефіцієнті  $k=1,57$ . За цим критерієм стійкість замкнутої системи автоматичного регулювання визначають на основі амплітудно-фазової частотної характеристики (АФЧХ) стійкої розімкнутої системи. Розімкнута система автоматичного регулювання вважається стійкою, якщо вона складається лише зі стійких динамічних ланок і містить не більше однієї інтегруючої ланки.

Оскільки дана САР має лише одну інтегруючу ланку, розімкнута система автоматичного регулювання вважається стійкою.

Далі побудуємо АФЧХ розімкнутої САР і визначимо за нею стійкість замкнутої системи. Для розрахунків і побудови графіків використовувалась програма MathCad.

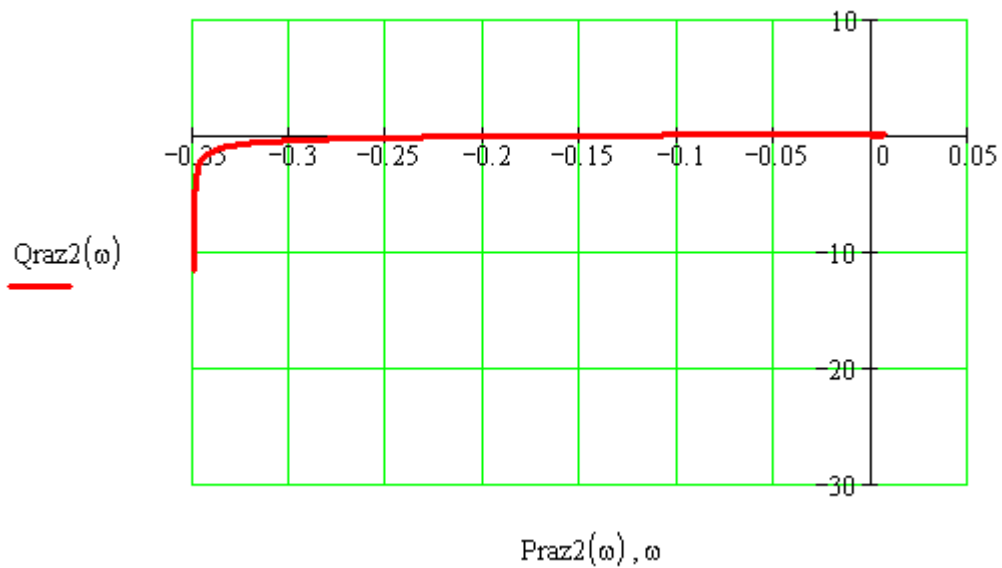


Рисунок 14 – Побудова АФЧХ розімкнутої САР

Як видно, при такому коефіцієнті АФХ розімкнутої системи не охоплює точку з координатами  $(-1;0j)$ , тому замкнута система буде стійкою.

Тепер визначимо область стійкості замкнutoї системи, тобто побудуємо D-розбиття. Вихідним для цього є характеристичне рівняння замкнutoї системи. Перенісши змінну  $k$  у ліву частину рівняння, отримаємо такий вираз:

$$\begin{aligned}
 p(T_{OK}p + 1)(T_{BM}p + 1) + k &= 0 \\
 k(w) &= -p(T_{OK}p + 1)(T_{BM}p + 1)
 \end{aligned}
 \tag{5.14}$$

з якого потрібно буде витягнути знову ж таки дійсну і уявну частину та побудувати графік їх залежності.

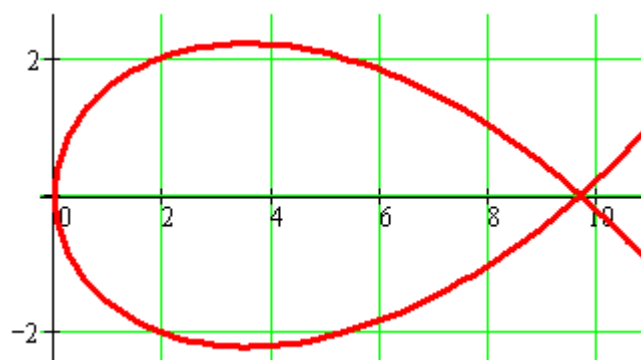


Рисунок 15 – Побудова області стійкості замкнutoї САР

У стійкій системі всі корені розташовані ліворуч від уявної осі, тому при обході осі від  $-\infty$  до  $+\infty$  ділянка стійкості також знаходиться ліворуч від

побудованої кривої. Для зручності визначення цієї області нанесемо на криву штрихування зліва при русі від осі від  $-\infty$  до  $+\infty$  саме заштрихована ділянка відповідає області стійкості замкнутої системи.

З графіку видно, що для забезпечення стійкості системи коефіцієнт потрібно обирати лише з цієї заштрихованої області, тобто загальний коефіцієнт системи має бути меншим за 9,6.

## 5.5 Обґрунтування вибору регулятора

Будь-яка система автоматичного регулювання складається з регулятора і об'єкта управління. Саме динамічні властивості об'єкта і визначають вирішальну роль при виборі найбільш ефективного закону регулювання. Встановлено, що критерієм для правильного вибору закону регулювання може бути використане відношення часу чистого запізнювання до його сталої часу, тобто:

$$G = \frac{\tau_{об}}{T_{об}}$$

якщо  $G < 0.2$ , то обирають регулятор позиційного регулювання;

$G > 1$ , обирають імпульсний регулятор;

$0,2 \leq G \leq 1$ , потрібно обрати регулятор неперервного типу.

Для вибору потрібного регулятора скористаємось такою методикою:

1. Визначимо динамічний коефіцієнт  $R_d$  регулювання за формулою. Для статичного об'єкту вона буде виглядати так:

$$R_d = \frac{y_1}{K_{об} \cdot u_v}$$

$y_1$  – максимальне динамічне відхилення (20%=0,2);

$u_v$  – максимально можливе збурення по навантаженню (10%)

$$R_d = \frac{0.20}{0.03 \cdot 10\%} = 0.66$$

2. Для визначення закону регулювання скористаємось однією з графічних залежностей [5, 129]. Точка з координатами

$$P[\tau_{об}/T_{об}; R_d]$$

Знаходиться на графіку, що відповідає 20% перерегулюванню, тип регулятора – пропорційний.

3. Для статичного об'єкту з 20% пере регулюванням коефіцієнт передачі П-регулятора повинний відповідати виразу:

$$K_{рег} = \frac{0,7}{K_{об} \cdot \frac{\tau_{об}}{T_{об}}}$$

Підставивши чисельні дані, отримаємо коефіцієнт передачі пропорційного регулятора

$$K_{рег} = \frac{0,7}{0,03 \cdot \frac{10}{20}} = 46,6$$

Основні переваги П-регулятора – швидкодія та висока стійкість процесу регулювання. Завдяки цим якостям регулятор можна використовувати в тих випадках, коли в об'єкті відсутнє самовирівнювання і спостерігається часті і різкі збурюючі діяння. В той же час П-регулятор володіє остаточним відхиленням (статичною похибкою), що знижує точність регулювання. Даний регулятор використовується як підсилювач.

## 5.6 Визначення стійкості системи з регулятором

Так як П-регулятор представляє собою пропорційну ланку, яку вводиму в систему послідовно, то передаточна функція розімкнутої САР буде виглядати вже по-іншому:

$$W_{роз}(p) = \frac{K_{об}}{(T_{ок}p + 1)} e^{-p\tau_{об}} K_{дат} \cdot \frac{K_{вм}}{p(T_{вм}p + 1)} \cdot K_{ро}$$

Підставимо чисельні значення і впевнимся, що загальний коефіцієнт передачі системи не буде перевищувати гранично-допустимого, тобто 9,6

$$W_{роз}(p) = \frac{0,03}{(20p + 1)} e^{-p10} 0,75 \cdot \frac{0,5}{(90p + 1)p} \cdot 3 \cdot 46,6$$

$$W_{роз}(p) = \frac{1,57}{p \cdot (20p + 1)(90p + 1)} e^{-p10}$$

## 5.7 Визначення запасів стійкості розімкненої системи автоматичного регулювання

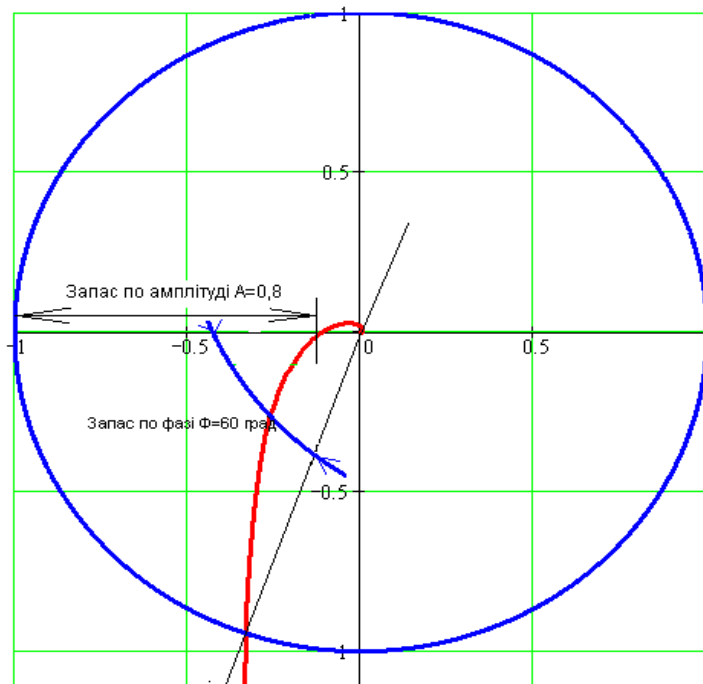
Основною частотною характеристикою є амплітудно-фазова характеристика (АФХ). Її можна дістати двома способами: графоаналітичним та експериментальним. Для побудови АФХ графоаналітичним методом у вираз відповідної передаточної функції роблять відповідну підстановку

$p = j \cdot \omega$ , де  $j = \sqrt{-1}$ ;  $\omega$  – частота, що може змінюватись від 0 до  $\infty$  або в деяких випадках  $(-\infty; +\infty)$ .

У загальному випадку АФХ системи має вигляд:

$$W(j\omega) = \frac{Q(j\omega)}{P(j\omega)}$$

Для визначення запасів стійкості системи за амплітудою та фазою, проводять одиничне коло і по відстані між точкою перетинання АФХ розімкненої системи до кола, визначають запас по амплітуді. Запас по фазі знаходять за кутом, що створює пряма, проведена через початок координат  $(0;0)$  та відповідною точкою перетину одиничного кола з АФХ.



Рисунк 16 – Визначення запасів стійкості

## 5.8 Побудова перехідного процесу замкнутої системи

Стійкість є обов'язковою, але недостатньою умовою нормальної роботи САР. Під стійкістю системи регулювання розуміють лише здатність системи до затухання перехідного процесу під дією керуючого або зовнішнього збурюючого впливу. При цьому час затухання, максимальне відхилення регульованої величини та кількість коливань системи не визначаються, хоча ці показники відіграють важливу роль у оцінці якості регульовального процесу. Показники якості регульовальних процесів можна оцінювати різними методами. Серед них, перш за все, слід виділити побудову перехідних процесів за заданими передаточними функціями замкнутих систем. Відповіддю системи на зовнішні впливи є перехідний процес. Якісні показники зазвичай визначають при ступінчастих впливах, оскільки вони є найбільш складними для системи. Найчастіше застосовують одиничну ступінчасту функцію:

$$f(t) = 0, \text{ при } t \leq 0,$$

$$f(t) = 1, \text{ при } t > 0,$$

в результаті цього реакція системи буде як перехідний процес, де регульована величина описується залежністю при впливі на систему одиничного ступінчастого діяння.

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{P_s(\omega)}{\omega} \sin(\omega t) d\omega$$

де  $P_s(\omega)$  – дійсна частотна характеристика замкнутої системи.

Якість САР визначається показниками, серед яких основними є: характер (вигляд) перехідного процесу, тривалість перехідного процесу, перерегулювання, точність (похибка) системи та інші.

## 5.9 Визначення прямих показників якості САР за перехідним процесом

За графіком перехідного процесу визначають прямі показники якості САР процесом сушіння сої та час регулювання.

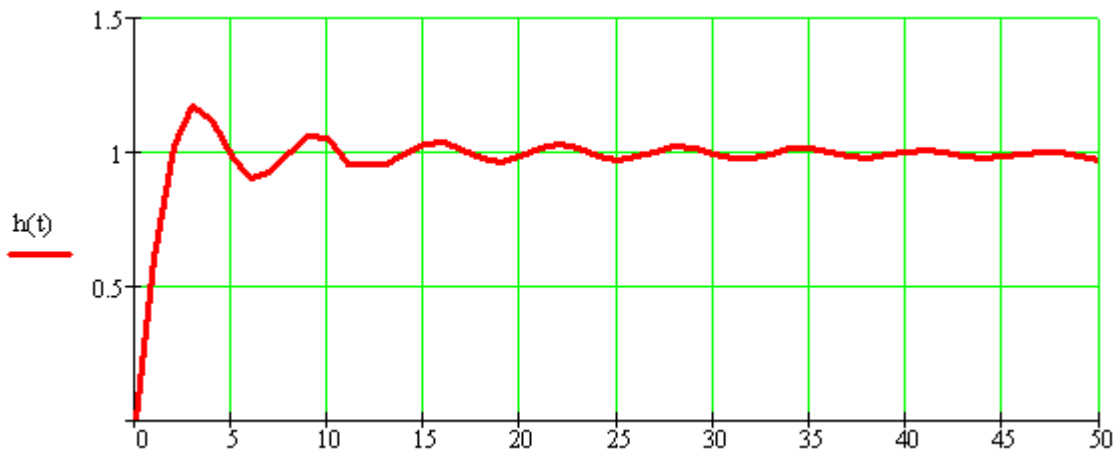


Рисунок 17 – Побудова перехідного процесу замкнутої САР

Таблиця 5.1 – Визначення основних показників якості замкнутої САР

№ п/п	Основні показники якості замкнутої САР	Чисельне значення
1	Перерегулювання	$\delta = \frac{1.17 - 1}{1} \cdot 100\% = 17\%$
2	Час регулювання	$t_{рег} = 21c$
3	Ступінь затухання	$\psi = \left(1 - \frac{1.09}{1.17}\right) 100\% = 6,83\%$
4	Кількість коливань	$N = 3кол$
5	Час управління	$t_{упр} = 2c$
6	Час досягнення першого максимуму	$t_{max} = 3c$

## Висновки

1. Проведені експерименти дозволили визначити характер і рівень автоматизації, підтвердивши необхідність не лише контролювати, а й регулювати ключові параметри технологічного процесу. На основі дослідів обґрунтовано математичну модель об'єкта автоматизації.
2. Нова АСУ ТП забезпечує не тільки контроль основних технологічних параметрів (температури та вологості), а й їх регулювання з високою точністю.
3. Базова система не передбачає економії теплової енергії, що виділяється при згорянні палива.
4. Система реалізована на мікроконтролері, який програмно регулює технологічний процес із заданою швидкістю.
5. У сушарці цього типу технологічний процес відбувається більш інтенсивно, що скорочує час сушки і зменшує економічні витрати.
6. Використання нової АСУ ТП забезпечує більш м'який режим сушки, що позитивно впливає на якість продукції.
7. Регулювання основних параметрів у процесі експлуатації АСУ ТП покращило умови праці: всі вимірювальні прилади винесено на щит автоматики, що скоротило чисельність обслуговуючого персоналу.
8. Модернізована система передбачає підключення до комп'ютера, який у разі потреби може автономно керувати технологічним процесом.
9. Для відновлення роботи системи достатньо замінити окремий блок мікропроцесорної частини, що скорочує час усунення неполадок та забезпечує надійність і стабільність роботи.
10. Проведені економічні розрахунки підтверджують доцільність використання запропонованої системи.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Сушіння зерна: лабораторний практикум, навчальний посібник – К.: Либідь, 1997
2. Кобевник В.Ф. Охрана труда.– К.: Вища школа, 1990
3. Мартиненко І.І. Автоматизація установок по очищенню зерна і сушінню зерна – К.: Урожай, 1971
4. Кондратець В.О. Автоматика та автоматизація виробництва сільськогосподарських машин – К.: Вища школа, 1993
5. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Идентификация и оптимальное управление. [под ред д.т.н. В.И. Салыги].– Харьков.: В.школа, 1976.– 178 с.
6. Ажогин В.В. Методы фильтрации и управления стохастическими процессами с распределёнными параметрами/ К.: В.школа, 1988.– 446 с.
7. Азарсков В.Н. Методология конструирования оптимальных систем стохастической стабилизации / В.Н. Азарсков, Л.Н. Блохин, Л.С. Житецкий, – монография. К.: НАУ, 2006.– 438 с.
8. Основи сучасної теорії управління: Навч посібник / А.А. Тунік, О.О. Абрамович . – К.: НАУ, 2010. – 260 с.
9. Скриннік І.О. Обґрунтування параметрів зерносушарки каскадного типу для обробки насіння у киплячому шарі: дисертація на здобуття ступеня канд..техн.наук /Скриннік Іван Олександрович : Кіровоградський національний технічний університет. – Кіровоград, 2010.– 148 с.
- 10.Станкевич Г.М. Сушіння зерна: Підручник / Г.М. Станкевич, Т. Страхова, В.І. Атаназевич – К.: Либідь, 1997. – 352 с.
- 11.Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник / В. Ц. Жидецький. — 5-те вид., доповн. — К. : Знання, 2014.
- 12.Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. 3-є вид., перероб і доп. Львів : УАД, 2006. 336 с.
- 13.Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 352 с.

14. Босов Є. П., Жесан Р. В., Каліч В. М., Голик О. П., Зубенко В. О. Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва : навч. посіб. 2-е вид., перероб. і доп. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 208 с.
15. Конституція України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/254%D0%BA/96-%D0%B2%D1%80> (дата звернення: 25.10.2025).
16. Про охорону праці : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2694-12#Text> (дата звернення: 20.10.2025).
17. Основи законодавства України про охорону здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2801-12#Text> (дата звернення 17.11.2025).
18. Про систему громадського здоров'я : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20#n840> (дата звернення 07.11.2025).
19. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80> (дата звернення 09.11.2025).
20. Про загальнообов'язкове державне соціальне страхування : Закон України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1105-14> (дата звернення 05.10.2025).
21. Кодекс цивільного захисту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/5403-17#Text> (дата звернення: 20.10.2023).
22. Кодекс законів про працю України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/322-08#Text> (дата звернення: 20.10.2025).
23. ДСТУ 12.1.005 88 Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=6264](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=6264) (дата звернення: 01.01.2025).

# ДОДАТКИ

Міністерство освіти і науки України  
Центральноукраїнський національний технічний університет  
Факультет будівництва, транспорту та енергетики  
Кафедра автоматизації виробничих процесів

«Допущено до захисту»  
Зав. кафедри АВП  
к.т.н., доцент  
\_\_\_\_\_ Дідик О.К.  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

ГРАФІЧНИЙ МАТЕРІАЛ  
до  
**ВИПУСКНОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**  
**за другим (магістерським) рівнем вищої освіти**

на тему  
**«Розробка системи автоматичного керування процесом  
сушіння сої в зерносушарці каскадного типу»**

Виконав здобувач вищої освіти ІІ курсу  
групи АК-24М (1,4)  
174 «Автоматизація, комп'ютерно-  
інтегровані технології та робототехніка»  
\_\_\_\_\_ Андрій СКРИПКА  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Керівник роботи к.т.н., асистент  
\_\_\_\_\_ Маріанна ФЕДОТОВА  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

м. Кропивницький