

Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Система автоматизованого контролю та керування вологістю цукру
з ємнісними сенсорами»

Виконав: студент 2 курсу, гр. ЕПА-24м
спеціальності 141 – Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка)

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Іван ПЛЯЦКО

(ім'я ПРІЗВИЩЕ, підпис)

Керівник: д.т.н., проф., проф. кафедри КЕМСК
Василь КУХАРЧУК

(ім'я ПРІЗВИЩЕ, підпис)

«25» 11

2025 р.

Опонент: к.т.н., доцент кафедри ЕЕЕМ

Войтюк Ю.П.

(прізвище та ініціали)

«14»

12

2025 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри

к.т.н. доц. Микола МОШНОРІЗ

«25» 11 2025 р.

Вінниця ВНТУ – 2025 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет Електроенергетики та електромеханіки
Кафедра комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Галузь знань 14 – Електрична інженерія
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

к.т.н., доц.

Микола МОШНОРІЗ

“14” 10 2025 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Івану Олеговичу Пляцку

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Система автоматизованого контролю та керування вологістю цукру з ємнісними сенсорами

Керівник роботи Кухарчук Василь Васильович, д.т.н., проф. каф. КЕМСК

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від “24” вересня 2025 року № 313

2. Термін подання студентом роботи 25.11.2025 р

3. Вихідні дані до роботи: Діапазон зміни маси ємнісного сенсора маси, 20-75г
Діапазон зміни вологості цукру 0-2% Відносна діелектрична проникність сухого
цукру Площа ємнісного сенсора вологості 0,791 м² Ширина зазора ємнісного
сенсора вологості 0,02 м Планова продуктивність сушки 20 т/год

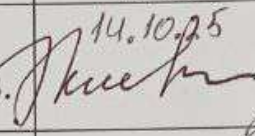
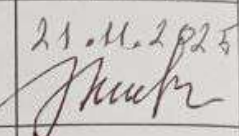
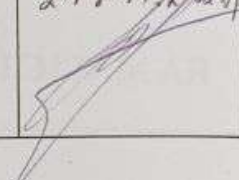
4. Зміст текстової частини: Вступ. 1. Загальна характеристика об'єкта та аналіз відомих методів контролю вологості. 2. Розробка математичних моделей ємнісних сенсорів та вимірювального каналу вологості цукру. 3. Розробка системи автоматизованого керування вологістю цукру. 4. Техніко-економічне обґрунтування впровадження системи автоматизованого контролю та керування вологістю цукру з ємнісними сенсорами. 5. Охорона праці. Висновки. Список використаних джерел.
Додатки

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
Короткі відомості про технологічні процеси цукрової галузі. Порівняльний аналіз
методів вимірювального контролю вологості цукру. Актуальність теми. Мета, об'єкт
та задачі дослідження. Структурна схема ємнісного сенсора маси. Перетворення
ємності в часовий інтервал. Рівняння перетворення ємнісного сенсора маси.
Результати комп'ютерного моделювання вимірювального сенсора ємності. Рівняння

перетворення ємнісного сенсора вологості. Статична характеристика ємнісного сенсора вологості. Залежність часового інтервалу від вологості. Вимірювальний канал часового інтервалу. Статична характеристика та похибка квантування часового інтервалу. Межі вимірювального каналу часового інтервалу. Система автоматизованого керування вологістю цукру. Часові діаграми, що ілюструють роботу системи автоматизованого керування. Техніко економічні показники

Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Спеціальна частина	д. т. н., проф. каф. КЕМСК Кухарчук В.В.	14.10.25р. 	21.11.2025р. 
Економічна частина	Шулле Ю. А. к.т.н., доц. каф. ЕСЕЕМ	14.10.25р. 	21.11.2025р. 

7. Дата видачі завдання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Формування та затвердження теми магістерської кваліфікаційної роботи (МКР)	14.09.25р.	
2	Виконання спеціальної частини МКР. Перший рубіжний контроль виконання МКР	28.10.2025р.	
3	Виконання спеціальної частини МКР. Другий рубіжний контроль виконання МКР	21.11.2025р.	
4	Виконання розділу «Економічна частина»	21.11.2025р.	
5	Виконання розділу «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях»	21.11.2025р.	
6	Попередній захист МКР	24.11.2025р.	
7	Нормоконтроль МКР	25.11.2025р.	
8	Рецензування МКР	14.12.2025р.	
	Захист МКР	14.12.2025р.	

Студент


(підпис)

Мягко І.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

В.С. Сидорук
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Пляцко І. О. Система автоматизованого контролю та керування вологістю цукру з ємнісними сенсорами. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма - електромеханічні системи автоматизації та електропривод. Вінниця: ВНТУ, 2025. 129 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 27 назв; рис.: 28; табл. 17

Робота присвячена розробці системи автоматизованого контролю та керування вологістю цукру. Обґрунтовано переваги ємнісного методу для безперервного контролю вологості та розроблено математичну модель взаємодії сенсора з продуктом для оптимізації його чутливості.

Реалізовано вимірювальний канал із принципом перетворення «ємність – часовий інтервал», що забезпечує високу завадостійкість і пряме перетворення сигналу. Для стабілізації вологості у ході виконання технологічного процесу запропоновано комбінований алгоритм (ПД-регулятор та канал випередження *feed-forward*), що дозволяє нейтралізувати зовнішні збурення (зміни вхідної вологості та витрати продукту) ще до їхнього впливу на вихід.

Моделювання підтвердило підвищення точності регулювання та швидкодії системи. Техніко-економічний аналіз довів доцільність впровадження завдяки енергоощадженню та покращенню якості цукру.

Ключові слова: вологість цукру, ємнісний сенсор, перетворення ємності в часовий інтервал, ПД-регулятор, автоматизація сушіння.

ANNOTATION

Plyatsko I. O. System of automated control and management of sugar humidity with capacitive sensors. Master's qualification work in the specialty 141 – Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics, educational program - electromechanical automation systems and electric drive. Vinnytsia: VNTU, 2025. 129 p.

In Ukrainian. Bibliography: 27 titles; fig.: 28; table. 17

The work is devoted to the development of a system of automated control and management of sugar humidity. The advantages of the capacitive method for continuous humidity control are substantiated and a mathematical model of the interaction of the sensor with the product is developed to optimize its sensitivity.

A measuring channel with the principle of "capacitance - time interval" conversion is implemented, which provides high noise immunity and direct signal conversion. To stabilize the humidity during the technological process, a combined algorithm (PID controller and feed-forward channel) is proposed, which allows to neutralize external disturbances (changes in input humidity and product consumption) before they affect the output.

Modeling confirmed the increase in the accuracy of regulation and speed of the system. Feasibility study proved the feasibility of implementation due to energy saving and improvement of sugar quality.

Keywords: sugar humidity, capacitive sensor, capacity conversion into time interval, PID controller, drying automation.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ТА АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ	9
1.1 Короткий опис технології та особливостей цукрового виробництва	9
1.2 Особливості технологічного процесу сушки цукру	12
1.3 Аналіз відомих методів вимірювального контролю вологості цукру.....	15
1.3.1 Гравіметричні методи вимірювання вологості	16
1.3.2 Мікрохвильові методи контролю вологості	17
1.3.3 Оптичні методи контролю вологості	20
1.3.4 Акустичні методи вимірювання вологості	21
1.3.5 Ємнісні методи контролю вологості	23
1.3.6 Порівняльний аналіз методів контролю вологості	26
1.4 Аналіз систем автоматизованого керування процесом сушки цукру	29
2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЄМНІСНИХ СЕНСОРІВ ТА ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ВОЛОГОСТІ ЦУКРУ.....	36
2.1 Сутність термогравіметричного методу визначення вологості цукру.....	36
2.1.1 Параметричні вимірювальні перетворювачі маси.....	37
2.1.2 Математична модель параметричного ємнісного сенсора маси	38
2.1.3 Вимірювальний перетворювач ємності в часовий інтервал	40
2.2 Математична модель параметричного ємнісного сенсора вологості цукру методом діелектричної проникності	45
2.2.1 Діелектрична проникність	46
2.3 Вимірювальний канал часового інтервалу	53
2.3.1 Структурна схема і принцип дії.....	54
2.3.2 Виведення функції перетворення.....	56
2.3.3 Рівняння похибок квантування.....	58
2.3.4 Оцінювання діапазону вимірювання	59
2.3.5 Обґрунтування вибору розрядності двійкового лічильника.....	61
3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ВОЛОГІСТЮ ЦУКРУ	65
3.1 Математичні моделі процесу сушки цукру	65

3.2 Розробка структурної схеми системи автоматизованого керування вологістю цукру	70
3.3 Розрахунок параметрів регулятора системи керування вологістю цукру	75
4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ ВОЛОГІСТЮ ЦУКРУ З ЄМНІСНИМИ СЕНСОРАМИ	80
4.1 Технічне обґрунтування вибору складових системи автоматизованого контролю та керування вологістю цукру з ємнісними сенсорами	80
4.1.1 Обґрунтування вибору первинного вимірювального перетворювача	80
4.1.2 Вибір параметрів вимірювального каналу вологості на основі ємнісного сенсора	81
4.1.3 Вибір структури системи керування вологістю цукру	82
4.2 Економічне обґрунтування вибору складових системи керування вологістю цукру сушильного відділення цукрового заводу	83
4.2.1 Визначення капітальних вкладень	83
4.2.2 Розрахунок заробітної плати обслуговуючого персоналу	85
4.2.3 Розрахунок витрат на поточний ремонт обладнання	87
4.3 Розрахунок терміну окупності автоматизованої системи керування	89
5 ОХОРОНА ПРАЦІ	91
5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту	91
5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії	96
5.3. Пожежна безпека	100
ВИСНОВКИ	103
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	104
ДОДАТКИ	107

ВСТУП

Актуальність теми У сучасних технологіях виробництва харчових продуктів, зокрема цукру-піску, вимірювальний контроль параметрів вологості на кожному етапі переробки є визначальним чинником забезпечення стабільної якості готової продукції. Недотримання нормативних показників вмісту води (0,03–0,05 %) призводить до незворотних процесів злежування та псування продукту під час зберігання. Саме тому автоматизація процесу сушіння сьогодні неможлива без впровадження високоточних засобів оперативного контролю вологості безпосередньо у поточному режимі.

Основною складністю на шляху до підвищення точності керування є складність адекватного вимірювання вологості сипких середовищ у динамічних умовах виробництва. Традиційні вагові та термогравіметричні методи контролю, попри їхню еталонність, мають суттєву інерційність, що унеможлиблює їх використання в замкнених контурах автоматичного регулювання. У зв'язку з цим виникає гостра науково-технічна потреба в розробці та впровадженні вимірювальних систем, що базуються на непрямих методах контролю.

Серед існуючих підходів ємнісний метод вимірювання вологості вирізняється високою чутливістю до зміни діелектричної проникності середовища, простотою конструкції сенсорів та можливістю безконтактного контролю. Однак ефективність таких систем критично залежить від параметрів вимірювального каналу, стабільності джерел сигналу та алгоритмів компенсації впливу температури й щільності продукту. Таким чином, наукове обґрунтування параметрів ємнісних сенсорів та розробка надійного вимірювального каналу для систем контролю вологості цукру є актуальним завданням сучасної електротехніки та автоматизації.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення точності вимірювального контролю вологості цукру в умовах його виробництва шляхом вдосконалення ємнісних сенсорів час-імпульсного перетворення та автоматизованого алгоритму керування процесом його сушки.

У відповідності із поставленою метою необхідно вирішити наступні завдання:

- Проаналізувати існуючі технології автоматизованого процесу сушки цукру;
- Обґрунтувати вибір сенсорів та виконавчих механізмів для контролю вологості цукру в лабораторних умовах та в режимі реального часу технологічного процесу;
- Розробити математичні моделі вимірювального перетворення вологості цукру в часовий інтервал для термогравіметричного і дієлькометричного методів;
- Розробити структурну та функціональну схеми системи автоматизованого контролю та керування процесом моніторингу вологості цукру та сушки;
- Розробити метрологічні моделі вимірювального каналу вологості цукру в мікропроцесорному виконанні;
- Реалізувати алгоритм роботи мікроконтролера для вимірювального контролю вологості цукру та автоматизації процесу його сушки;
- Провести економічне обґрунтування впровадження системи контролю та керування;
- Розробити заходи з охорони праці при роботі з автоматизованим обладнанням.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є процес вимірювального перетворення вхідної неелектричної величини вологості цукру в електричну величину – часовий інтервал на виході ємнісного параметричного сенсора.

Предметом дослідження. Математичні моделі, алгоритми та апаратні засоби для реалізації автоматизованої системи контролю та керування процесом сушки цукру за значення його вологості.

Методи дослідження. Методи дослідження. Для досягнення поставлених завдань у роботі використано методи вимірювального перетворення, математичного моделювання, цифрової обробки сигналів, системного аналізу, а також принципи побудови мікропроцесорних систем вимірювального контролю та керування.

Наукова новизна.

Отримала подальший розвиток математична модель параметричного ємнісного сенсора, що однозначно пов'язує між собою вихідну електричну величину часовий інтервал з вимірюваною вологістю цукру, яка на відмінну від відомих дозволила одночасно реалізувати на основі такого вимірювального перетворювача термогравіметричний і дієлькометричний методи, перший з яких забезпечує високу точність, а другий швидкодію.

Практичне значення. Отримано рівняння чутливості, швидкості її зміни, номінальну функцію перетворення та аналітичну залежність для оцінювання абсолютної та відносної похибок квантування, які і є основними статичними метрологічними характеристиками сенсора вологості цукру.

Розроблено структурну і функціональну схеми системи автоматизованого контролю і керування процесом сушки цукру в режимі реального часу протікання технологічного процесу. В середовищі програмного забезпечення Micro Cap 9 здійснено комп'ютерне моделювання вимірювального каналу вологості цукру і підтверджено його працездатність.

Оцінено основні статичні метрологічні характеристики мікропроцесорного вимірювального каналу вологості цукру у вигляді рівнянь перетворення і чутливості, похибки квантування, нижньої та верхньої меж вимірювання.

Запропоновано автоматизований алгоритм керування технологічним процесом сушки цукру в реальному режимі шляхом постійного вимірювального контролю вологості цукру.

Результати дослідження можуть бути впроваджені в практику сучасного цукрового виробництва як для високоточних лабораторних досліджень, так і для експрес аналізу вологості цукру в режимі реального часу.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати магістерської кваліфікаційної роботи отримані автором практично самостійно.

Структура і обсяг роботи. Магістерська кваліфікаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел.

Апробація і публікації. Результати роботи доповідалися і опубліковані у вигляді тез доповідей на міжнародній науково-технічній конференції:

Кухарчук В. В., Пляцко І. О. ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КАНАЛ ЧАСОВИХ ІНТЕРВАЛІВ ТА ЙОГО ОСНОВНІ СТАТИЧНІ МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ // The 3rd International scientific and practical conference “Science, technology and global challenges” (November 6-8, 2025) CPN Publishing Group, Tokyo, Japan. 2025. 589 p. –P.256-264.

1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ТА АНАЛІЗ ВІДОМИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ВОЛОГОСТІ

1.1 Короткий опис технології та особливостей цукрового виробництва

Технологічна схема виробництва цукру має складну, безперервну будову з рециркуляційними контурами та зворотними зв'язками між окремими стадіями переробки. Така схема підкреслює інтегрованість технологічного процесу та взаємозалежність усіх етапів переробки сировини, що є критично важливим для забезпечення стабільності виробничого циклу (рисунок 1.1).

Технологічний процес виробництва цукру [1, 2] представляє собою послідовність взаємопов'язаних операцій, що формують інтегровану та безперервну систему. Основні етапи процесу можна охарактеризувати наступним чином:

1. Підготовка сировини. Включає транспортування цукрових буряків на виробництво, очищення від механічних домішок та подрібнення на стружку, що придатна для подальшої екстракції цукру.
2. Екстракція цукру. Вилучення сахарози із бурякової стружки здійснюється методом дифузії у спеціалізованих апаратах, де цукор переходить у рідку фазу — дифузійний сік. Вихід цукру при цьому становить 80–85% від загального вмісту в буряковій стружці. Для підвищення виходу застосовують жомопреси для механічного видавлювання залишкового цукру.

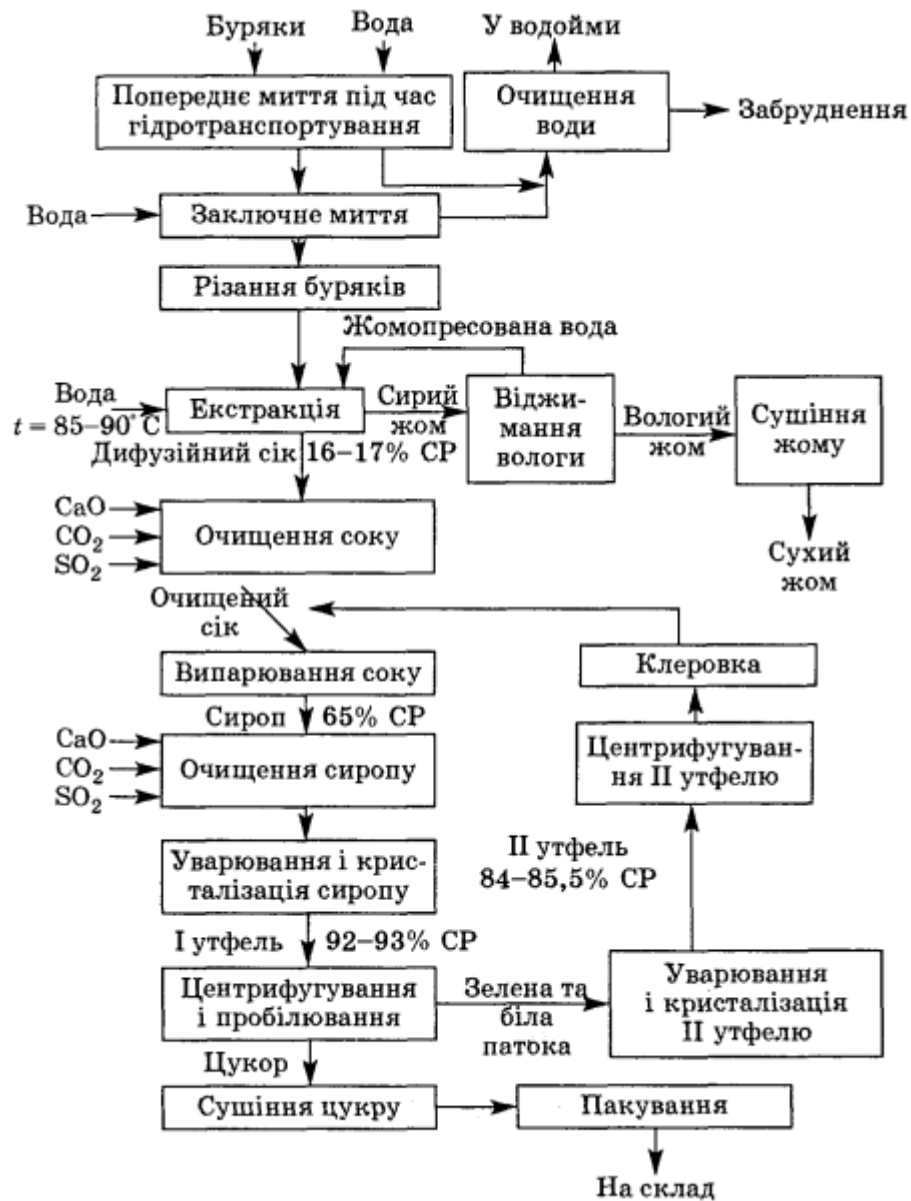


Рисунок 1.1 – Технологічна схема цукрового виробництва

3. Очищення дифузійного соку. На цій стадії видаляються органічні та неорганічні домішки, як розчинні, так і нерозчинні у воді. Процес включає механічне очищення, відстоювання, фільтрацію та хімічну обробку вапняним молоком, діоксидом вуглецю та діоксидом сірки.
4. Концентрування очищеного соку. Вологу видаляють за допомогою багатокорпусних випарних установок до концентрації сахарози 65–70%.
5. Уварювання сиропу та кристалізація. Концентрований сік у вакуумних апаратах піддається уварюванню, що призводить до кристалізації цукру та утворення утфелю — суміші кристалічного цукру (55–60%) і

міжкристалічного маточного розчину з розчиненими залишками сахарози та іншими нецукровими компонентами.

6. Центрифугування. Відділення кристалів цукру від рідкої фази забезпечує отримання товарного продукту та виділення побічних домішок.
7. **Сушіння та пакування.** Завершальний етап включає видалення залишкової вологи та фасування готового продукту для зберігання та реалізації.
8. **Вимірювання та контролю вологості цукру.**

Описана послідовність демонструє високий ступінь інтеграції виробництва, наявність численних зворотних зв'язків і рециркуляційних потоків, як технологічних, так і теплоносіїв. Окрім основних операцій, виробництво передбачає низку допоміжних процесів, таких як генерація пари, виробництво електроенергії, приготування вапнякового молока, отримання сатураційних та сульфітаційних газів.

У сучасному цукровому виробництві спостерігається тенденція до зростання продуктивності заводів, водночас значна частина обладнання залишається незмінною, що призводить до його інтенсифікованої експлуатації. У таких умовах виникає гостра потреба у забезпеченні синхронної роботи всіх етапів безперервного виробництва та стабільності потоку сировини, щоб уникнути коливань у обсягах її переробки.

Автоматизація технологічних процесів, зокрема сушіння цукру, є ключовим чинником підвищення ефективності виробництва. Впровадження сучасних систем автоматичного контролю дозволяє забезпечувати точне регулювання температурних, вологості та інших критичних параметрів процесу сушіння, підтримувати оптимальні режими роботи обладнання та забезпечувати стабільність якості готового продукту. Крім того, автоматизовані системи дозволяють оперативно реагувати на зміни характеристик сировини та варіації продуктивності суміжних ланок, що сприяє зниженню енергетичних витрат, мінімізації технологічних втрат та підвищенню безпеки

виробництва. Для цього постає задача більш детально дослідити технологічні процеси, що відбуваються в ході кінцевої сушки цукру, та обладнання, що використовується при цьому.

1.2 Особливості технологічного процесу сушки цукру

Технологічний процес сушіння цукру є завершальним етапом у виробництві кристалічного цукру-піску та має важливе значення для забезпечення його стабільності, сипучості та тривалого зберігання. Після операції центрифугування цукор залишається із підвищеною вологістю (до 1,5 %) і температурою близько 60–70 °С, що унеможлиблює його подальше фасування та транспортування без попереднього осушення. Основним завданням сушіння є зниження вологості до рівня 0,03–0,05 % та одночасне охолодження продукту до температури не вище 40 °С.

Технологічний процесу складають такі поступові етапи:

- 1. Подача та попереднє розподілення цукру.** Вологий кристалічний цукор надходить із центрифуг на транспортер, який подає його до сушильної установки.
- 2. Сушіння у псевдозрідженому або барабанному апараті,** тобто видалення основної вологи.
- 3. Охолодження висушеного цукру** для запобігання повторної конденсації вологи та злежування.
- 4. Видалення пилу та транспортування**

Сушіння здійснюється у спеціалізованих апаратах, конструкція та принцип роботи яких визначають ефективність процесу тепло- і масообміну. Найбільш поширеними у сучасних виробничих умовах є сушарки з псевдозрідженим шаром та барабані сушарки.

У сушарках із псевдорозрідженим станом гаряче повітря подається знизу вгору через шар кристалів цукру. Завдяки турбулентному перемішуванню забезпечується інтенсивне випаровування вологи з поверхні зерен при

мінімальному ризику їх агломерації. Температура теплоносія на вході зазвичай становить 110–140 °С, а швидкість повітряного потоку підтримується на рівні 1,5–3 м/с, що гарантує стійкий режим псевдозрідження.

Частіше застосовуються барабанні сушарки (ROTARY DRUM DRYER), у яких продукт переміщується вздовж обертового барабана в зустрічному або прямоточному потоці гарячого повітря. Такі установки прості у конструкції, і майже не поступаються псевдозрідженим системам за рівномірністю сушіння та питомими енерговитратами. Технологічна схема сушильного відділення цукрового заводу із барабанною сушаркою подано на рис. 1.2

Після основного сушильного етапу цукор через систему калібрування (CLASSIFICATION), яка видаляє пил надходить у секцію охолодження (FLUIDISED BED COOLER), де через нього пропускається осушене повітря температурою 20–25 °С. Це забезпечує поступове охолодження кристалів і запобігає конденсації залишкової вологи.

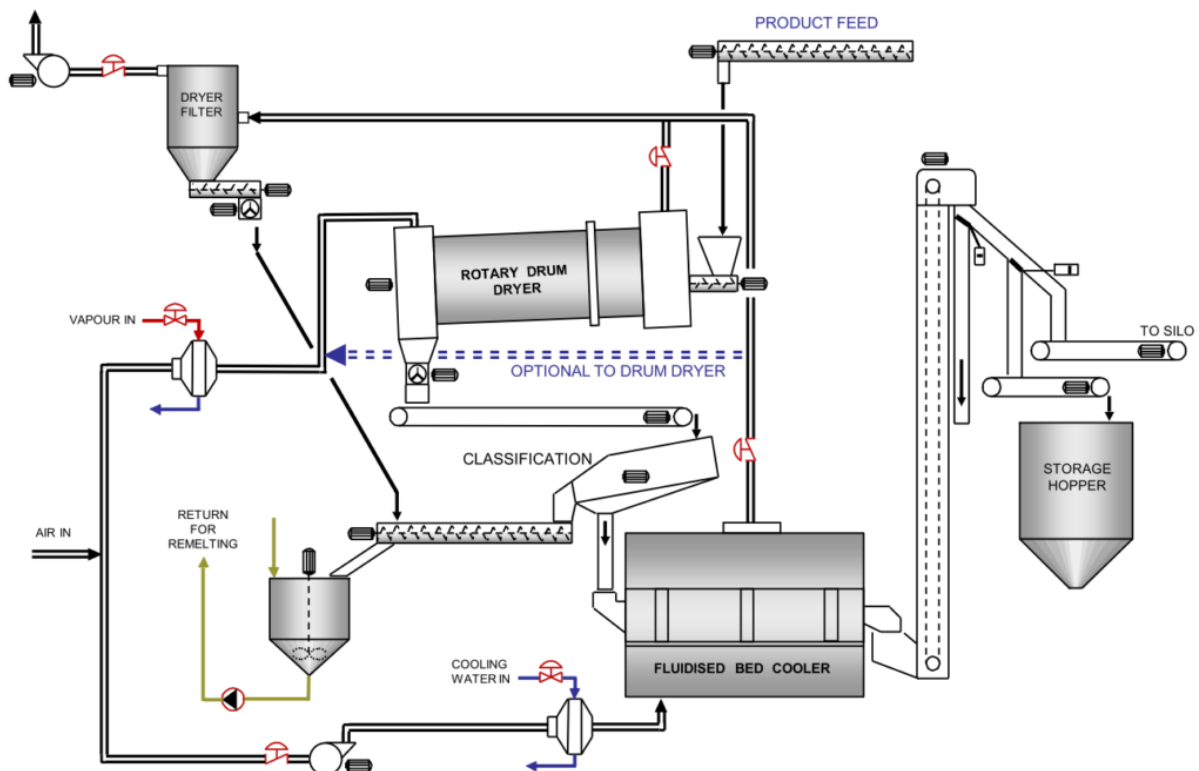


Рисунок 1.2 – Технологічна схема сушильного відділення

Отриманий сухий продукт проходить крізь розсиви для відділення пилоподібної фракції та вирівнювання гранулометричного складу, після чого

транспортується до силосів або бункерів тимчасового зберігання. Пил, що утворюється у процесі сушіння, уловлюється циклонами або рукавними фільтрами, що підвищує санітарну безпеку виробництва і знижує втрати цукру.

Основні технологічні параметри, що визначають процес сушки, та їх вплив на якість продукції зведено до таблиці 1.2

Таблиця 1.2 – Основні технологічні параметри сушки

Параметр	Орієнтовне значення	Вплив на якість
Температура повітря на вході	110–140 °С	Надто висока — можливе плавлення кристалів
Температура цукру на виході	35–40 °С	Визначає стабільність під час зберігання
Вологість цукру на вході сушильного барабана	0,3-1,5 %	Визначає режим сушіння
Вологість готового продукту	0,03–0,05 %	Вища — ризик злежування
Швидкість повітряного потоку	1,5–3 м/с	Забезпечує псевдозрідження шару
Тривалість процесу	15–25 хв	Залежить від типу сушарки та вологості

Автоматизація процесу сушіння відіграє ключову роль у забезпеченні стабільності технологічних параметрів. Сучасні автоматизовані системи дозволяють здійснювати безперервний контроль температури, вологості та тиску повітря, а також регулювати витрату теплоносія і швидкість подачі цукру в сушильну камеру. Використання датчиків вологості та температури на вході й виході сушарки забезпечує можливість оперативного коригування режимів роботи. Це сприяє зниженню енергоспоживання, підвищенню рівня керованості процесу, зменшенню технологічних втрат і забезпеченню стабільної якості готової продукції.

Автоматизоване керування сушінням цукру є важливим напрямом удосконалення виробництва, оскільки воно дозволяє досягати високої точності регулювання параметрів, підвищувати продуктивність сушильних установок, продовжувати ресурс їх експлуатації та зменшувати вплив людського чинника. У результаті реалізації таких систем підвищується енергоефективність,

знижується собівартість готової продукції та забезпечується відповідність сучасним стандартам якості.

1.3 Аналіз відомих методів вимірювального контролю вологості цукру

Контроль вологості сипучих матеріалів є одним із ключових завдань у технологічних процесах харчової, хімічної, будівельної та аграрної промисловості. Вологість безпосередньо впливає на фізико-хімічні властивості продукту, його сипкість, схильність до злежування, стабільність під час зберігання, а також на ефективність тепломасообмінних процесів. Зокрема, у цукровому виробництві точне визначення вологості кристалічного цукру є критичним для забезпечення належної якості продукції та оптимізації енергетичних витрат під час сушіння.

Вимірювання вологості сипучих середовищ є складним завданням через їхню структурну неоднорідність, наявність повітряних пор, варіації гранулометричного складу та здатність до адсорбції вологи з навколишнього середовища. Традиційні лабораторні методи, засновані на висушуванні або хімічному аналізі, забезпечують високу точність, проте не придатні для безперервного моніторингу у виробничих умовах. Тому в промислових системах перевага надається автоматизованим методам, які дозволяють здійснювати оперативний контроль вологості безпосередньо в потоці матеріалу.

На сьогодні відомо широкий спектр методів вимірювання вологості сипучих матеріалів, що базуються на різних фізичних принципах — гравіметричних, електричних, мікрохвильових, оптичних, акустичних та інфрачервоних. Кожен із них має свої переваги, обмеження та сферу ефективного застосування, які визначаються властивостями досліджуваного матеріалу, умовами процесу та вимогами до точності й швидкодії вимірювання.

У цьому розділі розглядаються найбільш поширені методи визначення вологості сипучих матеріалів, їхні принципи дії, особливості реалізації, переваги та недоліки, а також можливості практичного використання у процесах автоматизованого контролю в промислових умовах.

1.3.1 Гравіметричні методи вимірювання вологості

Гравіметричний метод є базовим і найточнішим серед усіх способів визначення вологості твердих та сипучих матеріалів. Його принцип ґрунтується на безпосередньому визначенні масової частки води шляхом порівняння маси зразка до та після висушування. Метод реалізує фундаментальне фізичне визначення вологості як відношення маси води, видаленої під час сушіння, до початкової маси вологого матеріалу.

У типовій реалізації гравіметричного методу зразок матеріалу певної маси m_1 зважується, після чого піддається термічному висушуванню у сушильній шафі при температурі, що забезпечує повне видалення води, але не спричиняє термічного розкладу чи карамелізації продукту. Для цукру температура сушіння зазвичай становить 105–110 °С. Після завершення процесу зразок охолоджують у ексікаторі до кімнатної температури та повторно зважують, визначаючи масу абсолютно сухої речовини m_2 . Масова частка води W виражається у відсотках та обчислюється за формулою:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2} 100\%. \quad (1.1)$$

Перевагою гравіметричного методу є його висока точність і універсальність. Він не залежить від електричних, оптичних чи інших фізичних властивостей матеріалу, а визначає фактичну масу води, що міститься у зразку. Саме тому цей метод використовується як еталонний при калібруванні інших типів вологомірів, зокрема ємнісних, мікрохвильових і оптичних сенсорів.

Разом з тим гравіметричний метод має низку суттєвих обмежень. Його головним недоліком є тривалість виконання вимірювання, яка може становити

від кількох десятків хвилин до кількох годин, залежно від властивостей матеріалу та температурного режиму сушіння. Метод також вимагає відбору проб, що унеможлиблює його використання для безперервного контролю у виробничому потоці. Крім того, похибки можуть виникати через недостатнє висушування (у разі утримання гігроскопічної вологи) або, навпаки, через втрату летких органічних компонентів, які випаровуються разом із водою.

Описані недоліки зумовлюють, що у цукровому виробництві гравіметричний метод застосовується переважно в лабораторних умовах для верифікації показів автоматичних сенсорів вологості або для контролю якості готового продукту. Завдяки високій відтворюваності результатів цей метод є стандартом при розробці калібрувальних характеристик для промислових вимірювальних систем.

Тому гравіметричний метод, попри свою простоту, залишається еталонним способом визначення вологості сипучих матеріалів. Його використання забезпечує фундаментальну метрологічну основу для оцінки точності та достовірності результатів, отриманих іншими, швидкодійними методами контролю вологості у промислових процесах.

1.3.2 Мікрохвильові методи контролю вологості

Мікрохвильові методи, що базуються на взаємодії електромагнітного випромінювання надвисоких частот із середовищем, вважаються одним із найсучасніших напрямів контролю вологості сипучих матеріалів. Їхня привабливість полягає у можливості безконтактного вимірювання, високій чутливості до зміни вмісту води та здатності здійснювати моніторинг у реальному часі. Проте попри низку очевидних переваг, практичне застосування мікрохвильових методів у промислових умовах стикається з істотними технічними та методологічними обмеженнями, що часто знижують їхню ефективність і надійність.

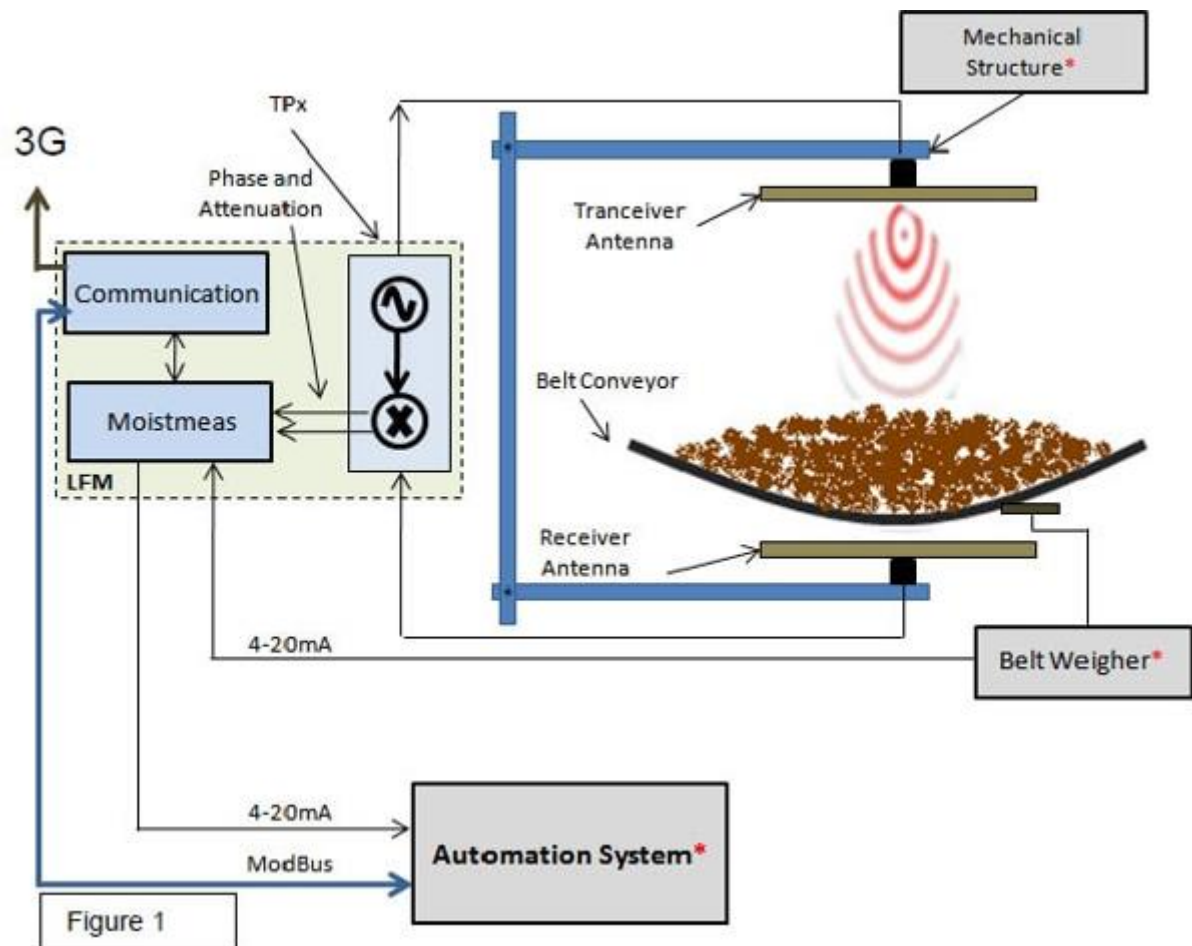


Рисунок 1.3 – Мікрохвильовий метод вимірювання вологості

Фізичний принцип методу ґрунтується на тому, що молекули води, маючи дипольний момент, орієнтуються під дією змінного електромагнітного поля, викликаючи зміну діелектричної проникності та поглинання енергії. У теоретичному плані залежність між діелектричними характеристиками матеріалу і його вологістю є добре визначеною, проте на практиці ця залежність є багатофакторною. Комплексна діелектрична проникність сипких середовищ залежить не лише від вмісту води, а й від температури, насипної щільності, розміру частинок, їхньої форми та навіть способу укладання зразка. Це призводить до суттєвих проблем з метрологічною відтворюваністю і потребує індивідуального калібрування сенсора під кожен конкретний тип матеріалу.

Особливо складною є ситуація у випадку кристалічного цукру, який характеризується високою неоднорідністю діелектричного середовища.

Повітряні проміжки між кристалами створюють ефект “розрідження” середовища, що призводить до різкого зниження ефективної діелектричної проникності. Навіть незначна зміна насипної густини або фракційного складу викликає помітне зміщення калібрувальної характеристики сенсора. Крім того, поверхнева плівка адсорбованої вологи, яка практично не впливає на масову частку води, суттєво спотворює результати через високу поляризаційну здатність водяної пари.

Ще однією серйозною проблемою є температурна залежність діелектричних властивостей води. У діапазоні робочих температур сушіння (60–120 °C) діелектрична проникність і тангенс кута діелектричних втрат змінюються в кілька разів. Це означає, що без ефективної термічної компенсації точність вимірювань може знижуватись на 20–40 %. На практиці реалізація компенсаційних алгоритмів ускладнюється необхідністю одночасного врахування температури, густини та вологості, які взаємопов’язані нелінійно.

Конструктивні аспекти також створюють обмеження. Мікрохвильові вимірювальні комірки або хвилеводи потребують точного узгодження хвильового опору та геометрії, щоб уникнути відбиттів і стоячих хвиль, які викликають інтерференційні спотворення сигналу. У реальних сушильних установках із наявністю металевих корпусів ці ефекти майже неминучі, тому точність визначення вологості суттєво залежить від розміщення сенсора та характеру електромагнітного поля у робочому об’ємі.

Додатковою проблемою є складність калібрування та вартість системи. Для кожного типу матеріалу, температурного режиму і навіть для конкретної технологічної лінії потрібна власна калібрувальна модель, яка формується експериментально. Це робить впровадження мікрохвильових сенсорів економічно доцільним лише на великих підприємствах або у високотехнологічних виробництвах із суворими вимогами до автоматичного контролю.

У результаті, попри високу потенційну точність і швидкодію, мікрохвильові методи залишаються складними у практичній реалізації. Вони потребують стабільних умов процесу, ретельного калібрування та постійного метрологічного супроводу. Без цього вимірювання можуть бути чутливими до другорядних факторів і втрачати достовірність.

Отже, мікрохвильові методи вимірювання вологості слід розглядати не як універсальний засіб контролю, а як високоточний інструмент, ефективність якого реалізується лише за умов стабільного технологічного середовища, добре визначених характеристик продукту та наявності кваліфікованої метрологічної підтримки. У контексті контролю вологості цукру вони можуть забезпечити найвищу точність серед безконтактних методів, однак потребують значних зусиль для забезпечення стабільності, калібрування й адаптації до конкретних технологічних умов.

1.3.3 Оптичні методи контролю вологості

Оптичні методи вимірювання вологості базуються на поглинанні інфрачервоного випромінювання молекулами води, що дозволяє швидко й безконтактно оцінювати вологість поверхні сипких матеріалів.

Основним вимірювальним параметром є коефіцієнт оптичного поглинання, який прямо пропорційний концентрації води в середовищі відповідно до закону Бугера–Ламберта–Бера. У практичних пристроях цей принцип реалізується у вигляді інфрачервоних вологомірів, які випромінюють вузькосмугове ІЧ-випромінювання, спрямоване на поверхню матеріалу. Частина випромінювання поглинається водою, а решта відбивається й реєструється фотодетектором. За різницею між інтенсивністю випромінювання до і після взаємодії зразка визначається оптична щільність, що є мірою вологості.

Їхня ключова перевага полягає у високій швидкодії, що робить такі системи придатними для оперативного контролю процесів сушіння, зокрема у виробництві цукру.

Водночас ці методи мають низку критичних обмежень. По-перше, вимірювання відбувається лише у тонкому поверхневому шарі, тому результати не відображають реальний розподіл вологи в об'ємі матеріалу. По-друге, точність сильно залежить від оптичних властивостей зразка — кольору, шорсткості, гранулометрії та чистоти поверхні. По-третє, температурні коливання та власне теплове випромінювання зразка можуть спотворювати покази сенсора, потребуючи складних алгоритмів компенсації.

Таким чином, попри високу чутливість і швидкодію, оптичні методи не можуть розглядатися як самодостатній інструмент контролю вологості сипких матеріалів. Їх доцільно використовувати лише у поєднанні з більш репрезентативними контактними або гравіметричними методами, які забезпечують об'ємну оцінку вологості та метрологічну достовірність вимірювань.

1.3.4 Акустичні методи вимірювання вологості

Акустичні методи ґрунтуються на залежності акустичних властивостей середовища від його вологості. Зміна кількості вологи в матеріалі впливає на його густину, пружність і внутрішнє тертя, що безпосередньо визначає швидкість поширення та рівень затухання звукових або ультразвукових хвиль. Ця фізична залежність дає змогу оцінювати вологість за характеристиками акустичного сигналу, який проходить крізь зразок або відбивається від нього.

Принцип дії реалізується у двох основних формах: трансмісійній і рефлексійній. У першому випадку вимірюється швидкість або ослаблення акустичної хвилі, що проходить через шар матеріалу. У другому — аналізується відбитий сигнал, який змінює свою амплітуду і фазу залежно від вологості. Для сипких матеріалів частіше використовують ультразвукові частоти (100 кГц – 10 МГц), що забезпечують достатню роздільну здатність і чутливість.

Швидкість поширення ультразвуку v у матеріалі визначається співвідношенням

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1.2)$$

де E — модуль пружності, ρ — густина середовища. Підвищення вологості, як правило, призводить до зростання густини та зменшення ефективного модуля пружності, тому швидкість звуку зменшується. Ця залежність використовується для побудови калібрувальних характеристик вологоміра.

Акустичні методи мають низку переваг. Вони є неруйнівними, придатними для роботи з матеріалами будь-якої електропровідності, не потребують оптичного доступу та можуть реалізовуватися у контактному або безконтактному варіанті.

Однак у реальних умовах вимірювання стикається з низкою труднощів. Основною проблемою є висока неоднорідність сипких середовищ. Зміни щільності укладання, розміру частинок і наявності повітряних пор спричиняють флуктуації акустичних характеристик, що ускладнює інтерпретацію сигналу. Додаткові похибки виникають через залежність швидкості звуку від температури, наявності механічних вібрацій та нестабільний акустичний контакт між перетворювачем і матеріалом. У результаті, навіть за ретельного калібрування, точність визначення вологості часто не перевищує $\pm 0,5$ – $1,0\%$.

Для цукрових матеріалів специфічною проблемою є високий коефіцієнт розсіювання звуку на межах між кристалами, що суттєво зменшує енергію проходження хвилі й ускладнює вимірювання. Крім того, зміна вологості супроводжується агрегацією або злипанням кристалів, що змінює акустичний імпеданс незалежно від реального вмісту води.

Таким чином, акустичні методи мають вагомий науковий потенціал для дослідження взаємозв'язку між фізичними властивостями матеріалу та його вологістю, однак їхня практична реалізація у промисловому контролі залишається обмеженою. Висока чутливість до неоднорідності середовища, необхідність стабільного акустичного контакту й складність інтерпретації

сигналу роблять ці методи переважно дослідницьким інструментом, а не засобом точного технологічного моніторингу.

1.3.5 Ємнісні методи контролю вологості

Ємнісний метод належить до класу електрофізичних методів визначення вологості та ґрунтується на залежності діелектричної проникності матеріалу від кількості води, яку він містить. Оскільки вода характеризується високою діелектричною проникністю (приблизно 80 при температурі 20 °C), навіть незначна зміна її частки у складі сипкої речовини істотно впливає на ефективну діелектричну проникність середовища. Ця властивість є основою для побудови вимірювальних систем, здатних визначати вологість непрямим способом через зміну електричної ємності.

У найпростішому випадку об'єкт вимірювання розглядається як діелектрик, розташований між електродами конденсатора (рис. 1.4).

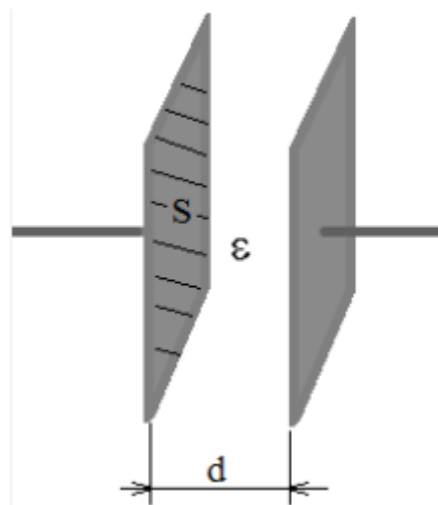


Рисунок 1.4 – Плоский конденсатор

Ємність такого конденсатора визначається співвідношенням:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d} \quad (1.3)$$

де C — електрична ємність, ϵ — відносна діелектрична проникність матеріалу, ϵ_0 — електрична стала, S — площа електродів, d — відстань між ними. У процесі вимірювання конденсатор заповнюється сипким матеріалом, який відіграє роль діелектрика. При зміні вологості змінюється його

діелектрична проникність, що, у свою чергу, спричиняє зміну ємності, яку можна зареєструвати за допомогою електронної вимірювальної схеми.

Для забезпечення стабільності показів вимірювання здійснюється за допомогою змінного електричного поля високої частоти, що дозволяє уникнути впливу поляризаційних процесів, пов'язаних із постійними струмами. У промислових і лабораторних приладах ємність вимірюється за допомогою місткових або резонансних схем, а також сучасних мікропроцесорних перетворювачів, які безпосередньо обчислюють значення вологості на основі градуовальної характеристики.

Для сипких матеріалів вимірювальні системи зазвичай виконуються у формі коаксіального або площинного конденсатора. У коаксіальній конструкції зразок заповнює простір між внутрішнім і зовнішнім циліндричними електродами, що забезпечує однорідність електричного поля і зменшує вплив краєвих ефектів. Площинні системи застосовуються переважно у стаціонарних установках, де матеріал розташовується між двома паралельними пластинами.

Ефективна діелектрична проникність сипкого середовища, що є трифазною системою (тверда речовина, вода, повітря), визначається експериментально і залежить від вмісту вологи, структури частинок, пористості та температури. Для практичних розрахунків часто використовують емпіричне співвідношення

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon_{cux} + k \cdot W, \quad (1.4)$$

де ε_{ef} — ефективна проникність зразка, ε_{cux} — проникність сухого матеріалу, W — вологість у відсотках, k — експериментальний коефіцієнт, що враховує фізико-хімічні властивості речовини. Залежність між виміряною ємністю і фактичною вологістю встановлюється шляхом калібрування для кожного конкретного виду матеріалу.

Сипкі матеріали відзначаються неоднорідною структурою та варіацією щільності, що спричиняє певні похибки під час визначення вологості. На точність вимірювань впливають також температура зразка, розмір і форма частинок, наявність розчинних домішок, які можуть змінювати поляризаційні

властивості середовища. З метою підвищення достовірності результатів у сучасних приладах застосовують автоматичну температурну компенсацію та алгоритмічну корекцію за щільністю насипання.

Метод характеризується коротким часом вимірювання (порядку кількох секунд), можливістю безперервного контролю вологості у потоці та задовільною точністю (похибка зазвичай не перевищує 1 %). Його використовують у зернопереробній, комбікормовій, будівельній та хімічній промисловості для контролю вологості порошкових і гранульованих матеріалів, а також у процесах сушіння, транспортування і зберігання продукції.

Застосування ємнісного сенсора для вимірювання вологості цукру в процесі його сушки ґрунтується на контролі діелектричних властивостей кристалічного продукту, які змінюються зі зменшенням вмісту води під час термічного оброблення.

У процесі сушіння цукор являє собою сипкий діелектричний матеріал, в якому волога розподіляється між кристалами у вигляді тонких плівок. Зі зменшенням кількості води знижується ефективна діелектрична проникність середовища. Ємнісний сенсор, розташований безпосередньо у потоці продукту, реєструє ці зміни як варіації електричної ємності. Сигнал сенсора надходить до вимірювального перетворювача, де перетворюється у пропорційний аналоговий або цифровий вихід, що відображає поточну вологість цукру.

Такі сенсори зазвичай монтуються у стінках сушильного барабана або у транспортних каналах, через які проходить висушуваний матеріал. Вимірювання здійснюється у реальному часі, що дає змогу реалізувати автоматичне регулювання температурного режиму сушіння. При досягненні заданої вологості система керування може знижувати подачу гарячого повітря або змінювати швидкість обертання сушильного апарата.

Завдяки безконтактному принципу дії сенсор не вимагає відбору проб і не впливає на якість продукту. Водночас його робота не ускладнює потік матеріалу, що є суттєвою перевагою при контролі дрібнокристалічного цукру. Для забезпечення стабільності показів застосовується температурна

компенсація та попереднє калібрування сенсора за еталонними зразками цукру з відомим вмістом вологи.

Ємнісний контроль у процесі сушіння дозволяє підтримувати оптимальну залишкову вологість (звичайно 0,02–0,05 %), зменшити енерговитрати на підігрів, запобігти злежуванню продукту та підвищити стабільність його фізико-хімічних характеристик. Таким чином, використання ємнісного сенсора забезпечує безперервний, надійний і високоточний моніторинг вологості цукру у режимі реального часу в межах технологічного процесу.

1.3.6 Порівняльний аналіз методів контролю вологості

Вимірювання вологості кристалічного цукру у ході виконання технологічного процесу сушки є складним завданням через специфічну структуру матеріалу, його гігроскопічність, крихкість і здатність утворювати поверхневі плівки води. Різні методи контролю вологості, як було описано вище, мають свої фізичні принципи, переваги й обмеження, що визначають їхню придатність для використання в лабораторних або промислових умовах. На основі викладеного можна здійснити порівняльний аналіз основних методів.

Гравіметричний метод є еталонним, оскільки базується на безпосередньому визначенні маси води, що міститься у зразку. Він забезпечує високу точність (до $\pm 0,1\%$) і метрологічну достовірність, незалежну від фізичних властивостей матеріалу. Завдяки основним своїм недолікам (тривалість вимірювання, необхідність відбору проб і відсутність можливості безперервного контролю) для цукрового виробництва гравіметричний метод використовується переважно в лабораторіях як засіб калібрування автоматичних сенсорів.

Таблиця 1.2 – Порівняльний аналіз методів контролю вологості цукру

Параметр	Ємнісний метод	Гравіметричний метод
Принцип вимірювання	Визначення зміни електричної ємності сенсора, що зумовлена зміною ді-електричної проникності вологого цукру	Вимірювання втрати маси зразка після висушування до постійної ваги
Контактність	Контактний або поверхневий	Контактний, лабораторний
Точність вимірювання	Оптимальна для технологічного контролю ($\pm 2-3\%$)	Дуже висока (до $\pm 0,1\%$)
Швидкодія / Реальний час	Дуже висока; забезпечує стабільний сигнал у реальному часі	Низька; потребує тривалого циклу сушіння
Залежність від властивостей продукту	Помірна; стабільна робота при незначних змінах фракції та структури	незалежний від оптичних або електричних властивостей зразка
Необхідність калібрування	Мінімальна; коригування параметрів виконується один раз для певного типу продукту	Не потребує складного калібрування
Вплив температури	Помірний; ефективно усувається за допомогою термічної компенсації	Визначальний; контрольований під час лабораторного сушіння
Вартість впровадження	Низька; економічно найбільш доцільний варіант	Низька для лабораторії, але непридатна для промислової автоматизації
Підходить для автоматизації	Так; легко інтегрується з ПЛК і системами регулювання сушіння	Обмежено; застосовується переважно як еталонний метод
Основні переваги	Простота конструкції, низька вартість, надійність, стабільність роботи у промислових умовах	Висока точність і достовірність результатів, еталонна методика

Оптичні і акустичні методи через свої недоліки відіграють допоміжну або дослідницьку роль через свою поверхневу або нестабільну природу.

Основні переваги та недоліки для зручності порівняльного аналізу мікрохвильового, ємнісного та гравіметричного методів зведено до табл. 1.1.

Порівняльний аналіз показав, що різні методи вимірювання вологості цукру мають відмінні технічні характеристики, ступінь придатності до автоматизації та економічну ефективність. Гравіметричний метод забезпечує найвищу точність визначення вологості, однак його застосування обмежується лабораторними умовами через тривалість процесу та неможливість безперервного контролю. Мікрохвильовий метод характеризується високою точністю та безконтактністю, проте потребує складного калібрування, є

чутливим до неоднорідності шару цукру та має значну вартість реалізації, що обмежує його використання у промислових системах з великою кількістю вимірювальних точок.

Ємнісний метод вимірювання вологості вирізняється оптимальним поєднанням технічної простоти, надійності та економічної доцільності. Він забезпечує достатню точність для технологічних потреб, високу швидкодію, стабільність результатів у робочому діапазоні температур і можливість легкої інтеграції в системи автоматизованого керування сушінням цукру. Застосування термічної компенсації та періодичної калібровки забезпечує довготривалу стабільність показників без суттєвого зниження точності.

Отже, з урахуванням технічних, експлуатаційних та економічних критеріїв, **ємнісний метод** слід розглядати як **найбільш доцільний для використання в автоматизованих системах контролю вологості цукру під час процесу сушіння**, тоді як мікрохвильовий і гравіметричний методи можуть виконувати роль допоміжних або еталонних при перевірці точності системи контролю.

1.4 Аналіз систем автоматизованого керування процесом сушки цукру

У сучасних умовах підвищення продуктивності та енергоефективності цукрових заводів особливої важливості набуває якісне автоматизоване керування процесом сушіння кристалічного цукру. Саме на цьому етапі завершується формування товарних властивостей продукту, а стабільність кінцевої вологості визначає його сипкість, стійкість до злежування, придатність до транспортування та тривалого зберігання. Незначні відхилення вологості на виході сушильного відділення здатні спричинити значні технологічні та економічні втрати, зокрема зростання енерговитрат, повторну переробку або погіршення фізико-хімічних характеристик цукру.

Процес сушіння цукру характеризується високою динамічністю, нелінійністю та значною залежністю від якості вхідної сировини, що надходить із центрифуг. Вологість сирого цукру може коливатися в досить широкому діапазоні, а теплофізичні властивості продукту змінюються залежно від умов кристалізації та гранулометричного складу. За таких умов забезпечення стабільної вологості вихідного продукту потребує застосування систем автоматизованого керування, здатних оперативно реагувати на зміну параметрів технологічного середовища та здійснювати точне регулювання тепломасообмінних процесів у сушарці та охолоджувачі.

Особливу роль у функціонуванні САК відіграють контури контролю вологості, оскільки саме їхня точність визначає ефективність ключових регуляторів температури теплоносія, подачі повітря, частоти обертання барабана чи інтенсивності псевдозрідження. Впровадження сучасних швидкодіючих вологомірів та інтелектуальних алгоритмів оброблення сигналів дозволяє суттєво знизити інерційність системи, мінімізувати відхилення від заданого режиму та забезпечити високу якість кінцевого продукту. Тому аналіз існуючих методів контролю та керування процесом сушіння цукру є необхідною передумовою для подальшого удосконалення систем автоматизації сушильного відділення.

Таким чином основною задачею системи автоматизованого керування технологічним процесом сушки цукру є забезпечення нормативного значення вологи у цукрі-піску на нормативному рівні (0,1% вологи за температури 20-25⁰) та охолодження його до вказаної температури з мінімальним використанням ресурсів. Основні вимоги до САК технологічним процесом сушки цукру подані у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 Основні вимоги до систем автоматизованого керування технологічним процесом сушки

Група вимог	Зміст вимог
Технологічна стабільність	Підтримання кінцевої вологості цукру в межах 0,05–0,1 %; запобігання перегріванню продукту; стабілізація температури теплоносія та режиму повітряних потоків.
Точність вимірювань	Використання високоточних датчиків вологості, температури, витрати повітря та частоти обертання; безперервний контроль вхідної та вихідної вологості цукру.
Адаптивність керування	Автоматичне коригування режимів сушіння залежно від зміни вологості сирого цукру, продуктивності лінії та параметрів теплоносія.
Енергоефективність	Оптимізація витрат повітря й тепла; використання рециркуляції теплоносія; мінімізація втрат тепла в сушарці та охолоджувачі.
Безпека та надійність	Контроль тиску й температури у повітряному контурі; запобігання перевантаженню вентиляційної системи; діагностика аварійних ситуацій (перегрів, надмірна запиленість, засмічення фільтрів).
Інтеграція в технологічну лінію	Синхронізація подачі цукру з центрифуг; керування транспортерами, елеваторами та бункерами; координація роботи сушарки, класифікатора та охолоджувача.
Інформаційна підтримка	Ведення архівів даних, реєстрація відхилень і аварій; наявність SCADA-інтерфейсу; можливість дистанційного моніторингу й керування.
Швидкодія системи	Оперативна реакція на зміни вологості та температури; застосування швидкодіючих регуляторів і фільтрів обробки сигналів.
Гнучкість конфігурації	Можливість налаштування режимів сушіння під різні типи сушарок (барабанні, киплячий шар); підтримка різних джерел теплоносія (газ, пара, гаряче повітря).
Підтримка якості продукту	Забезпечення однорідності гранулометричного складу, мінімізація злипання та збереження сипкості під час додаткових операцій транспортування та зберігання.

Автоматизовані системи керування сушильним відділенням мають забезпечувати стабільне підтримання параметрів, що визначають ефективність

теплотообміну та кінцеву якість цукру. Оскільки процес сушіння є багатофакторним і чутливим до незначних змін у вологості, подачі повітря та динаміці руху продукту, вибір інформативних параметрів та відповідних засобів вимірювальної техніки має принципове значення. Таблиця нижче структурує ключові параметри, необхідні сенсори та основні виконавчі механізми для забезпечення стабільного та енергоефективного функціонування сушарки.

Таблиця 1.4 Інформативні параметри, сенсори та виконавчі механізми у процесі сушіння цукру

Параметр	Сенсори	Можливі виконавчі механізми
Вологість цукру (вхід/вихід)	Сенсори вологості	Регулятори температури теплоносія, заслінки повітря, частотні приводи вентиляторів
Температура теплоносія	Сенсори температури	Пальники/калорифери, заслінки змішування повітря
Температура цукру	Сенсори температури	Регуляція інтенсивності сушіння та охолодження
Тиск у повітряному контурі	Сенсори тиску (манометричні, диференціальні)	Керування вентиляторними системами, очищення фільтрів
Швидкість обертання барабана / інтенсивність псевдозрідження	Енкодери, тахометри	Частотні приводи барабана, регулятори подачі повітря
Витрата (масова подача) цукру	Стрічкові ваги, вагові дозатори, сенсори рівня бункера	Частотні приводи транспортерів, дозувальні заслінки
Енергоспоживання	Системи обліку енергоспоживання	Оптимізаційні алгоритми керування приводами та вентиляторами

Як видно система автоматизованого керування технологічним процесом сушки цукру є складною та багатоконтурною системою із великою кількістю взаємозв'язків між інформативними параметрами. Її аналіз є складною науково-технічною задачею, що виходить за межі теми даної кваліфікаційної роботи. Тому зосередимось більш детально на контролі та керуванні лише одним інформаційним параметром, а саме вологістю цукру на вході та виході сушильного барабана.

Контроль вологості цукру є ключовим елементом технологічного процесу сушіння, що безпосередньо впливає на якість кінцевого продукту та ефективність виробництва. Нестабільна вологість може призводити до порушення фізико-хімічних властивостей цукру, збільшення втрат матеріалу та підвищення енергетичних витрат. Саме тому впровадження систем вимірювання та регулювання вологості є важливим завданням при модернізації технологічних ліній та підвищенні рівня автоматизації виробництва.

Системи контролю вологості можуть відрізнятися за рівнем автоматизації, місцем розташування вимірювальних приладів та частотою контролю. Від простих лабораторних методів, що використовуються лише для періодичної перевірки вологості кінцевого продукту, до комплексних автоматизованих систем, які забезпечують безперервний моніторинг вхідної та вихідної вологості в режимі реального часу, ефективність та точність контролю суттєво змінюється.

Порівняльний аналіз існуючих систем контролю та керування дозволяє оцінити їхню придатність для практичного використання, визначити переваги та обмеження кожного підходу, а також обґрунтувати вибір оптимальної конфігурації для підвищення стабільності технологічного процесу сушіння та якості продукції. Такий аналіз є необхідною основою для прийняття рішення щодо модернізації або впровадження автоматизованих систем контролю вологості у промислових умовах.

У сучасних сушильних барабанах виділяють чотири основні підходи до організації контролю та керування вологістю цукру. Перший підхід передбачає **лише лабораторний контроль вихідної вологості**, що дозволяє оцінити кінцевий результат, але не забезпечує можливості оперативного регулювання процесу. Другий підхід передбачає **лабораторний контроль вхідної та вихідної вологості**, що дає змогу враховувати початковий стан продукту та зменшувати варіативність вологості, проте регулювання залишається реактивним і здійснюється після отримання лабораторних даних.

Третій підхід передбачає **автоматизований контроль вхідної вологості з лабораторним контролем вихідної**, що дозволяє адаптивно регулювати режими сушіння у залежності від початкової вологості цукру, забезпечуючи підвищену стабільність кінцевого продукту при економічно обґрунтованому впровадженні системи. Четвертий підхід передбачає **автоматизований контроль вхідної та вихідної вологості**, що забезпечує безперервний моніторинг і регулювання параметрів сушіння в реальному часі, мінімізує варіативність вологості та гарантує максимальну стабільність кінцевого продукту.

Таким чином, проведення порівняльного аналізу цих чотирьох систем дозволяє визначити їхні технічні та експлуатаційні переваги і обмеження, а також обґрунтувати вибір оптимальної конфігурації системи контролю вологості для конкретних умов промислового сушіння цукру (Таблиця 1.5).

Таким чином із порівняльного аналізу видно, що найкращим чином себе показують системи де на вході існує автоматизований контроль вологості цукру. Тоді як застосування автоматизованого контролю вихідної вологості дає кращі динамічні характеристики, однак ускладнюють систему керування. Використання лабораторного аналізу для вихідної вологості цукру може бути використано в сучасних системах автоматизованого керування технологічним процесом сушки цукру, оскільки описані процеси є тривалими у часі, а тому швидке регулювання значення його вихідної вологості є недоступним. Водночас автоматизований контроль вхідної вологості є обов'язковим, оскільки дозволяє оперативно реагувати на можливі зміни параметрів сировини.

Таблиця 1.5 Порівняльний аналіз систем керування вологістю цукру

Параметр	Система 1: Лабораторний контроль вихідної вологості	Система 2: Лабораторний контроль вхідної та вихідної вологості	Система 3: Автоматизований контроль вхідної + лабораторний контроль вихідної	Система 4: Автоматизований контроль вхідної та вихідної вологості
Принцип роботи	Вимірювання вологості зразків після сушіння	Вимірювання вологості зразків до та після сушіння	Онлайн-вимірювання на вході, лабораторне вимірювання на виході	Онлайн-вимірювання на вході та виході, безперервний контроль
Можливість оперативного регулювання	Відсутня	Обмежена; корекція процесу після отримання результатів	Часткова; регулювання параметрів сушіння за вхідною вологістю	Повна; безперервне регулювання режимів сушіння
Точність стабілізації кінцевої вологості	Низька	Середня; враховується початкова вологість продукту	Висока; адаптивна реакція на коливання вхідної вологості	Дуже висока; стабільна якість кінцевого продукту
Складність впровадження	Низька	Середня	Середня – висока	Висока; потребує комплексної автоматизації
Основні переваги	Простота, низькі експлуатаційні витрати	Покращена точність кінцевого продукту, контроль початкового стану	Економічно доцільне впровадження, стабілізація процесу	Максимальна стабільність продукту, оперативне регулювання
Основні обмеження	Нестабільна якість продукту, відсутність оперативного контролю	Реактивне регулювання, затримка у прийнятті рішень	Вихідна вологість контролюється не безперервно	Висока капітальна вартість, складність обслуговування

1.5 Висновки до розділу

На підставі проведеного аналізу загальної характеристики об'єкта та існуючих методів контролю вологості кристалічного цукру було сформульовано такі висновки:

- Технологічний процес сушіння цукру є критичним завершальним етапом виробництва, метою якого є стабілізація вологості продукту на рівні 0,03–0,05 % для забезпечення його якості, сипучості та тривалого зберігання.

- Контроль вологості визнано пріоритетним інформативним параметром для ефективного керування цим процесом, а його автоматизація є необхідною умовою для зниження енерговитрат та стабілізації якості кінцевого продукту.

- Гравіметричний (лабораторний) метод є зразковим за точністю ($\pm 0,1\%$), але через свою тривалість непридатний для оперативного контролю в промислових умовах; він може використовуватися виключно для калібрування автоматичних сенсорів.

- Мікрохвильовий метод забезпечує високу швидкість, проте його практичне впровадження є складним через високу вартість, необхідність складного калібрування та значну чутливість до зміни насипної щільності та температури цукру.

- Ємнісний метод вимірювання вологості визнано найбільш доцільним для автоматизованого промислового контролю вологості цукру, оскільки він поєднує достатню технологічну точність ($\pm 2-3\%$), високу швидкість, технічну простоту реалізації та економічну ефективність.

- Аналіз структурних схем автоматизованого керування показав, що найкращі динамічні характеристики забезпечують системи з автоматизованим контролем вологості на вході до сушильного барабана, що дозволяє оперативно адаптувати режим сушіння до початкового стану сировини та стабілізувати процес.

- Подальша робота буде зосереджена на розробці та вдосконаленні системи автоматизованого контролю вологості цукру з використанням ємнісних сенсорів, як основи для створення ефективної та економічно доцільної системи керування процесом сушіння.

2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЄМНІСНИХ СЕНСОРІВ ТА ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ВОЛОГОСТІ ЦУКРУ

2.1 Сутність термогравіметричного методу визначення вологості цукру

Сутність методу полягає у визначенні зміни маси контрольної наважки цукру до та після процесу висушування, що дає можливість оцінити втрату маси, яку інтерпретують як вологість W . Процедура методу реалізується поетапно [5].

Сушильну шафу попередньо нагрівають до $105\text{ }^{\circ}\text{C}$, після чого в неї поміщають порожні бюкси з відкритими кришками щонайменше на 30 хв. Далі бюкси виймають, закривають кришками та встановлюють контактний термометр на один із них. Коли температура бюксів знизиться до значення, що перевищує кімнатну на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, їх оперативно зважують з точністю $\pm 1\text{ мг}$.

Потім у кожен бюкс вносять 20–30 г зразка (за умови, що товщина шару цукру не перевищує 1 см), після чого бюкси знову закривають і здійснюють повторне зважування з точністю $\pm 0,1\text{ мг}$.

Сушіння триває рівно 3 год. Після завершення процесу кришки закривають, бюкси виймають із шафи та охолоджують до моменту, коли температура, зафіксована термометром, буде на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ вищою за температуру навколишнього середовища. Після охолодження проводять чергове зважування з похибкою $\pm 1\text{ мг}$.

Втрату маси, яка відповідає вологості цукру W , виражають у відсотках від початкової маси проби відповідно до наведеної формули [5]:

$$W = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} 100\%, \quad (2.1)$$

де m_1 — маса бюкси, г;

m_2 — маса бюкси + маса цукру до висушування, г;

m_3 — маса бюкси + маса цукру після висушування, г.

2.1.1 Параметричні вимірювальні перетворювачі маси

Найбільш елементарним і водночас широко застосовуваним методом визначення маси є тензометричний метод, у якому в ролі первинних перетворювачів маси сипких матеріалів використовують тензорезистори. Інформативним вихідним параметром таких елементів є зміна електричного опору, тому найчастіше вимірювання реалізують у складі мостових схем (цифрових мостів) [5].

Попри відносно невисоку точність, коли сумарна похибка вимірювання маси становить близько (2...3) %, мостові системи залишаються поширеними, оскільки забезпечують надійні вимірювання великих навантажень у діапазоні ($10^5 \dots 10^6$ Н).

Основу п'єзоелектричних засобів вимірювання становлять перетворювачі, що трансформують механічне зусилля в електричний заряд [4]. Складність конструювання таких сенсорів пов'язана з електростатичною природою заряду п'єзоелектричних елементів, зокрема з його малою величиною, схильністю до швидкого розсіювання через опори ізоляції та залежністю від вхідного опору підсилювальних пристроїв. До переваг п'єзоелектричних сенсорів відносять високу чутливість та значну швидкодію, при цьому їхня зведена похибка зазвичай не перевищує ± 1 %.

У ємнісних перетворювачах маси чутливим елементом, що реагує на прикладене навантаження механічним переміщенням, є мембрана, яка одночасно може виконувати функцію рухомого електрода. Робота таких сенсорів ґрунтується на залежності електричної ємності конденсатора від геометрії та взаємного розташування його обкладинок, а також від діелектричної проникності проміжного середовища.

В ідеальному випадку ємність плоского конденсатора визначають, як було описано в розділі 1:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{h}, \quad (2.2)$$

де $\varepsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична стала;

ε - відносна діелектрична проникність середовища між електродами;

S – площа електрода;

h - відстань між електродами.

З наведеної формули випливає, що ємність C плоского конденсатора зростає зі збільшенням діелектричної проникності середовища ε та площі його обкладинок S , і зменшується при збільшенні відстані між пластинами h . Таким чином, будь-які фізичні величини, які прямо або опосередковано впливають на параметри ε , S чи h , можуть бути виміряні за допомогою ємнісних сенсорів.

Зміна відстані h між пластинами, тобто зазору, є одним із найпоширеніших принципів роботи таких перетворювачів. Ємність сенсора змінюється обернено пропорційно цій відстані, унаслідок чого залежність $C=f(h)$ є нелінійною.

На відміну від лінійних розмірів, зазор h не може бути надто великим через появу полів розсіювання, проте його значення можуть бути дуже малими — на рівні десятих або сотих часток міліметра.

Завдяки здатності таких сенсорів реєструвати надзвичайно малі переміщення (мікропереміщення) з високою чутливістю та роздільною здатністю, їх доцільно застосовувати для високоточного визначення вологості в термогравіметричному методі.

2.1.2 Математична модель параметричного ємнісного сенсора маси

Як первинний вимірювальний перетворювач маси m наважки цукру в електричну величину C_m розглянемо ємнісний сенсор (рис. 2.1).

Крайовими ефектами, що можуть виникати в плоских конденсаторах, можна знехтувати, оскільки пропоновані сенсори мають незначні зазори h у порівнянні із площею S . У такому разі ємність конденсатора визначена за формулою (2.2) буде справедливою.

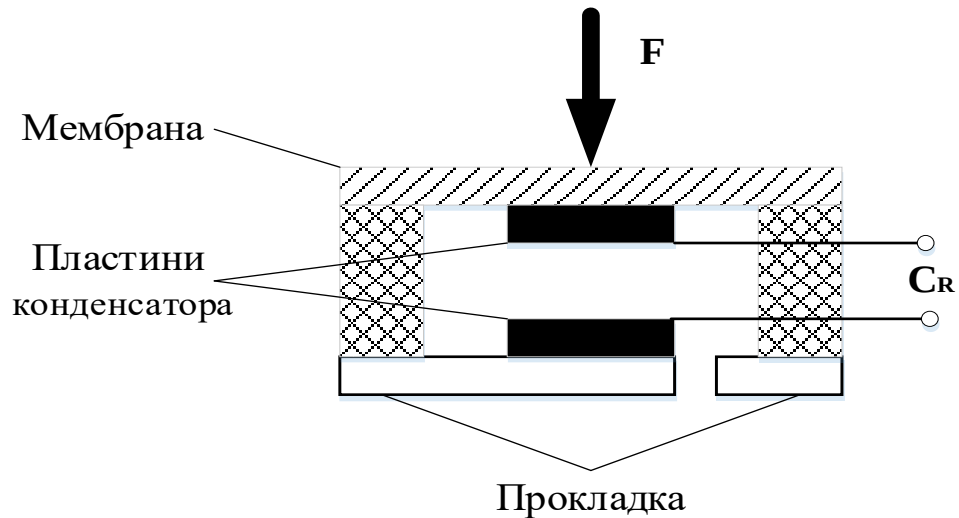


Рисунок 2.1 – Схема плоского конденсатора

Нижній електрод сенсора жорстко закріплено на корпусі сенсора, а верхній закріплюється на мембрані, зверху якої відбувається навантаження дослідного зразку, масу якого необхідно визначити.

Під дією маси наважки m мембрана прогинається і відстань h між пластинами конденсатора змінюється

$$h = w \cdot m, \quad (2.3)$$

де w – протидійне зусилля пружних властивостей мембрани.

Це приводить і до відповідної зміни ємності C_m конденсатора:

$$C_m(m) = \frac{\xi_0 \varepsilon S}{w \cdot m}. \quad (2.4)$$

Побудуємо статичну характеристику ємнісного сенсора маси з наступними параметрами:

$$S = 0,791 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2;$$

$$W = 10^{-4} \text{ м/кг}.$$

Статична характеристика такого сенсора нелінійна (рис. 2.2). За графічними залежностями визначаємо, що в діапазоні зміни маси (від 20 до 75 Г) ємність конденсатора відповідно змінюється від $1 \cdot 10^{-8}$ до $3.5 \cdot 10^{-8}$ Ф.

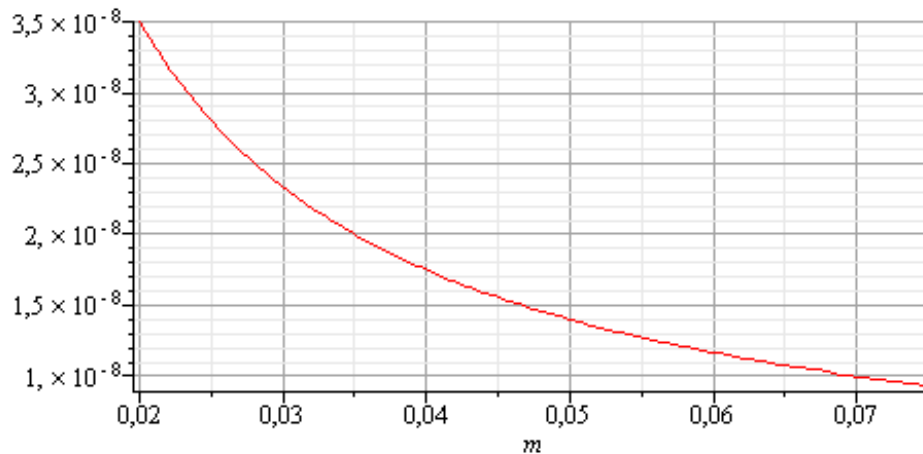


Рисунок 2.2 – Статична характеристика ємнісного сенсора маси

2.1.3 Вимірювальний перетворювач ємності в часовий інтервал

Основною особливістю вимірювання неелектричних величин є їхнє перетворення в електричну: струм, напругу, частоту, часовий інтервал, опір, ємність відповідно генераторними або параметричними сенсорами.

На рис. 2.3 наведено послідовність вимірювальних перетворень маси m ємнісним сенсором в напругу U . Дана схема є доволі розповсюдженою.

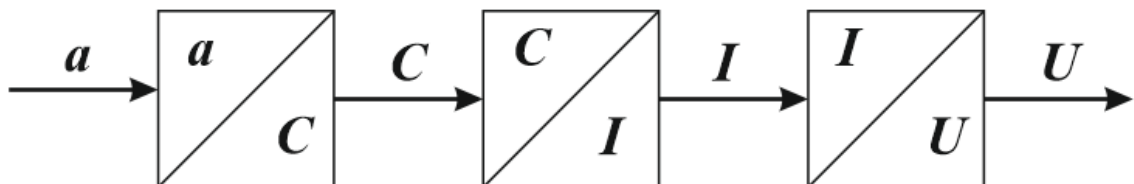


Рисунок 2.3 - Послідовність вимірювальних перетворень маси

Як видно з викладеного, неелектрична величина — маса m — спочатку перетворюється на зміну ємності, потім ємність трансформується у струм, а вже струм — у напругу.

Недоліком такого підходу є значна протяжність ланцюга перетворення, що зумовлює накопичення похибок на кожному етапі та знижує загальну точність вимірювань.

З метою підвищення точності [8] пропонується реалізувати пряме перетворення ємності сенсора у часовий інтервал, уникаючи проміжного

перетворення в електричну напругу. Такий підхід дозволяє спростити структуру вимірювального каналу та зменшити сумарну похибку.

Метою цього дослідження є побудова математичної моделі перетворення мікропереміщень у часовий інтервал для параметричного ємнісного сенсора, яка забезпечує більш адекватний опис процесу конвертації неелектричної величини у електричну порівняно з відомими методами.

Структурну схему вимірювального перетворювача та відповідні часові діаграми подано на рис. 2.4 і рис. 2.5.

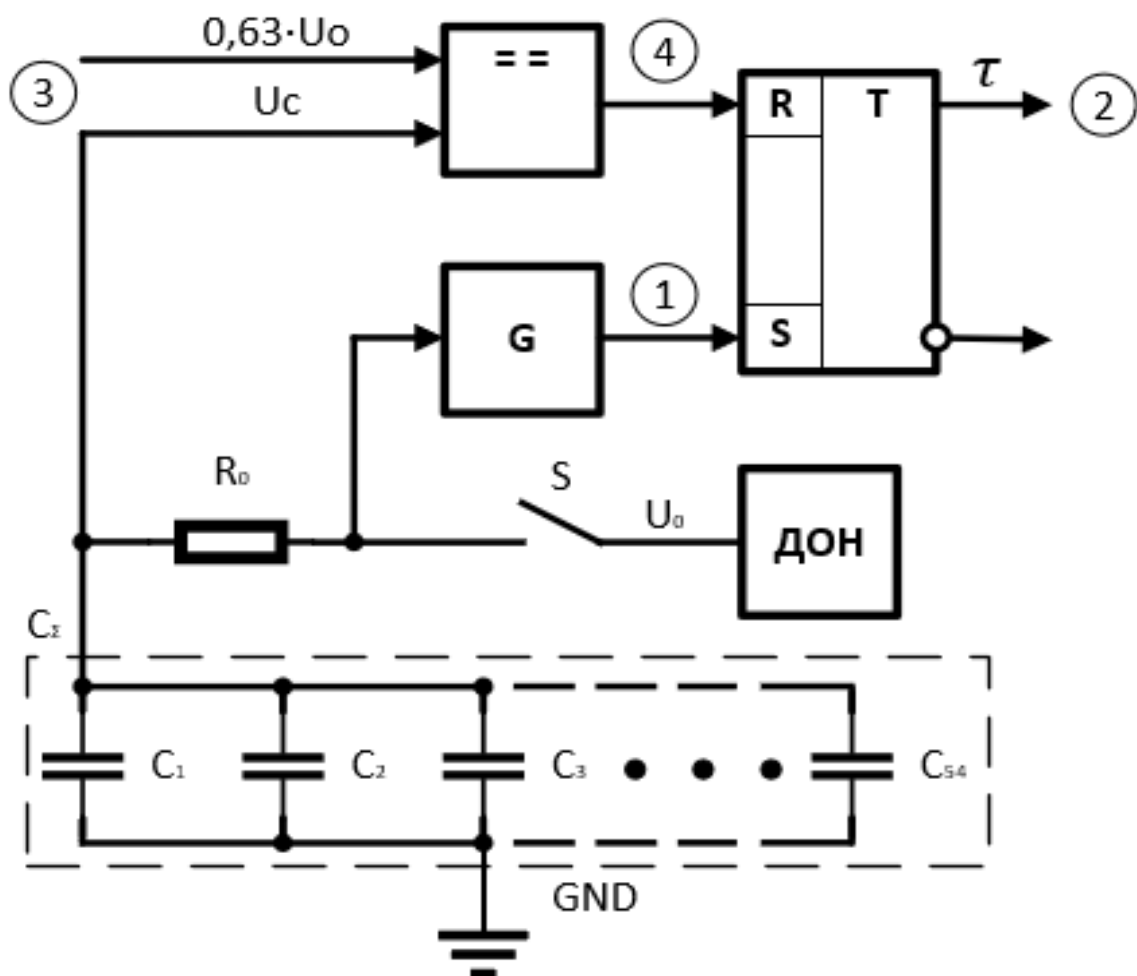


Рисунок 2.4 – До питання перетворення ємності в часовий інтервал

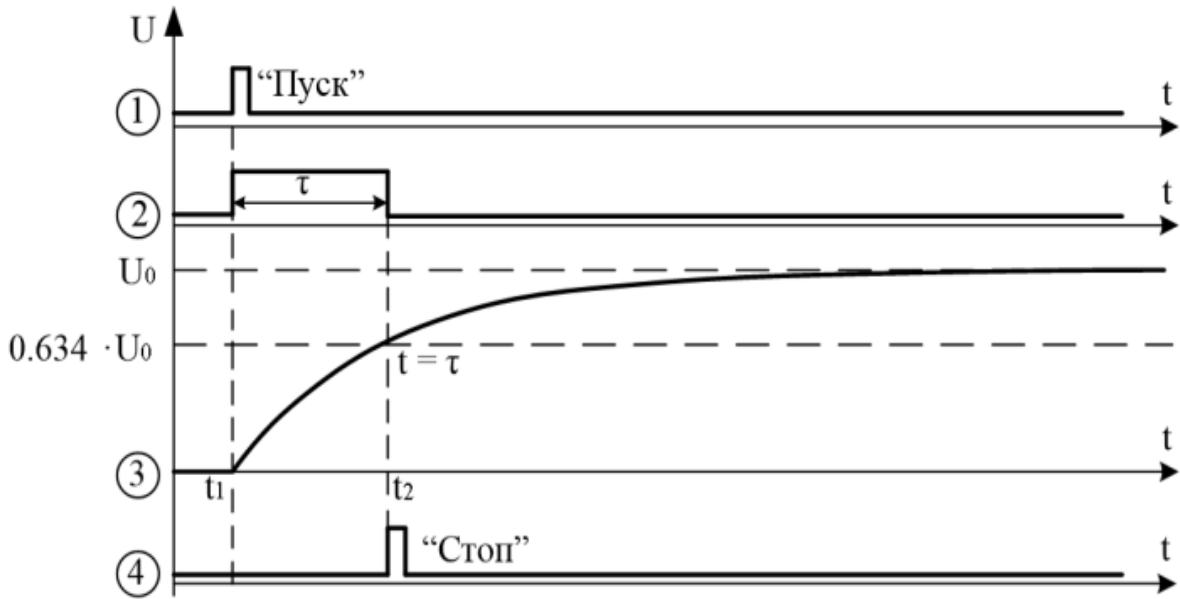


Рисунок 2.5 – Часові діаграми перетворення ємності в часовий інтервал

Принцип дії такого ємнісного сенсора наступний. У вихідному положенні конденсатор розряджений і напруга на його обкладинках ($U_C = 0$ В) і на виході джерела опорної напруги ДОН $U_0 = 0$ В.

В момент часу t_1 (рис. 2.4) до конденсатора прикладається опорна напруга U_0 . Конденсатор C_m починає заряджатися і напруга U_C на його обкладинках зростає (рис.2.5) за експоненціальним законом

$$U_C = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (2.5)$$

де t – поточний час,

τ - постійна часу $R \cdot C_m$ кола.

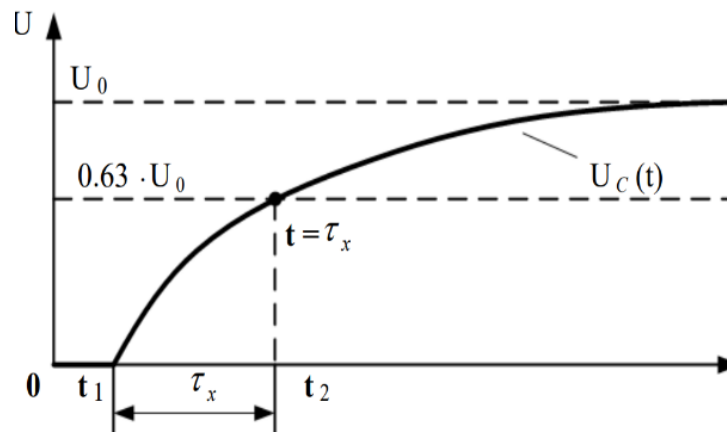


Рисунок 2.6 – До питання виділення постійної часу

Врахувавши те, що в момент часу t_1 (рис.2.6) $t = 0$, то з аналізу рівняння (2.5) отримаємо таке значення напруги на обкладинках конденсатора в цей момент часу:

$$U_C = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = U_0 \left(1 - e^{-\frac{0}{\tau}}\right) = U_0 (1 - e^0) = U_0 (1 - 1) = 0 \text{ В} | t = 0 \quad (2.6)$$

В момент часу t_2 (рис. 2.6), коли координата часу t стає рівною $t = \tau$, напруга U_C на конденсаторі C_Σ досягає наступного значення:

$$U_C = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = U_0 (1 - e^{-1}) = 0.63 \cdot U_0 | t = \tau. \quad (2.7)$$

Відповідно до (рис. 2.6) часовий інтервал $(t_2 - t_1)$ є сталою τ електричного кола $R \cdot C_\Sigma$ кола:

$$\tau = t_2 - t_1. \quad (2.8)$$

Виходячи з цього, виникає схемотехнічна задача виділення початку цього часового інтервалу (момент часу t_1) і його закінчення (момент часу t_2).

Виділення сталої часу τ часового інтервалу $t_2 - t_1$ реалізує вимірювальний перетворювач, схема якого наведена на рис.2.4. Початок (t_1) цього часового інтервалу (рис.2.4) виділяється одновібратором G в момент часу ($t = 0$) після замикання перемикача S (сигнал «Пуск» - точка 1), а кінець в момент часу ($t = \tau$) – (сигнал «Стоп» на виході компаратора).

На один із входів компаратора подається напруга $U_C(t)$, що зростає конденсаторі C_C . На другому вході компаратора подільником напруги формується 0.63 від значення опорної напруги U_0 . В момент часу t_2 , коли $t = \tau$ напруга $U_C(t)$ на конденсаторі досягає значення $0.63 \cdot U_0$. На обох входах компаратора сформовані однакові значення напруг і він на своєму виході формує сигнал «Стоп» – кінець часового інтервалу точка 4. Короткі прямокутні імпульси «Пуск» і «Стоп» по S і R – входах відповідно встановлюють тригер T в стан логічної «1» або логічного «0». Тривалість імпульсу τ , що дорівнює проміжку часу $(t_2 - t_1)_1$, відповідає рівню логічної «1».

Отже, рівняння перетворення ємності в часовий інтервал має наступний вигляд:

$$\tau(C_m) = R_0 \cdot C_m. \quad (2.9)$$

Підставимо в (2.9) рівняння (2.4), що однозначно пов'язує ємність конденсатора C із значенням маси m наважки, отримаємо остаточну функцію перетворення:

$$\tau(m) = R_0 \cdot C_m = R_0 \cdot \frac{\xi_0 \varepsilon S}{w \cdot m}. \quad (2.10)$$

Графічна залежність тривалості постійної часу τ від значення маси m в діапазоні від $m = 20 \cdot 10^{-3}$ до $75 \cdot 10^{-3}$ [кГ] наведена на рис. 2.7.

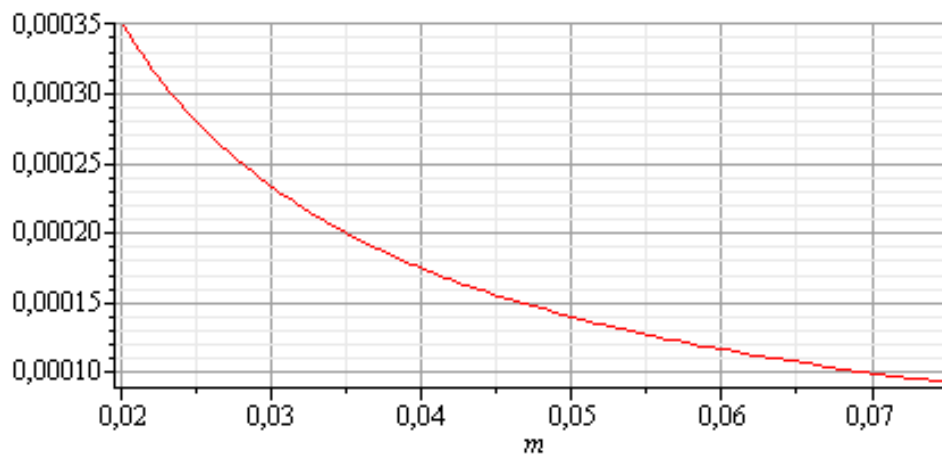


Рисунок 2.7 – Графічна залежність тривалості постійної часу від маси

З наведеної статичної характеристики видно, що запропонований ємнісний сенсор маси у заданому діапазоні її зміни перетворює інформативний параметр в часовий інтервал τ відповідно від 100 до 350 мкс. Якщо проквантувати даний часовий інтервал τ періодами T_0 зразкової частоти $f_0 = 10 \cdot 10^7$ Гц з виходу кварцового резонатора, то в такому діапазоні зміни τ максимальне значення похибки квантування не перевищує 0.01% на нижній межі вимірювання.

Тому реалізація вимірювального каналу маси m наважки цукру на основі запропонованого параметричного ємнісного сенсора створює потенціальні можливості визначення вологості W цукру з більш високою точністю. Крім того вихідний сигнал даного сенсора є частотним, що і забезпечує підвищену завадостійкість порівняно з ємнісними сенсорами з вихідним сигналом у вигляді струму або напруги.

Адекватність розробленої математичної моделі вимірювального перетворення маси m наважки цукру ємнісним сенсором в часовий інтервал підтверджено комп'ютерним моделюванням даного сенсора в програмному середовищі MicroCap, результати якого показані на рис. 2.8.

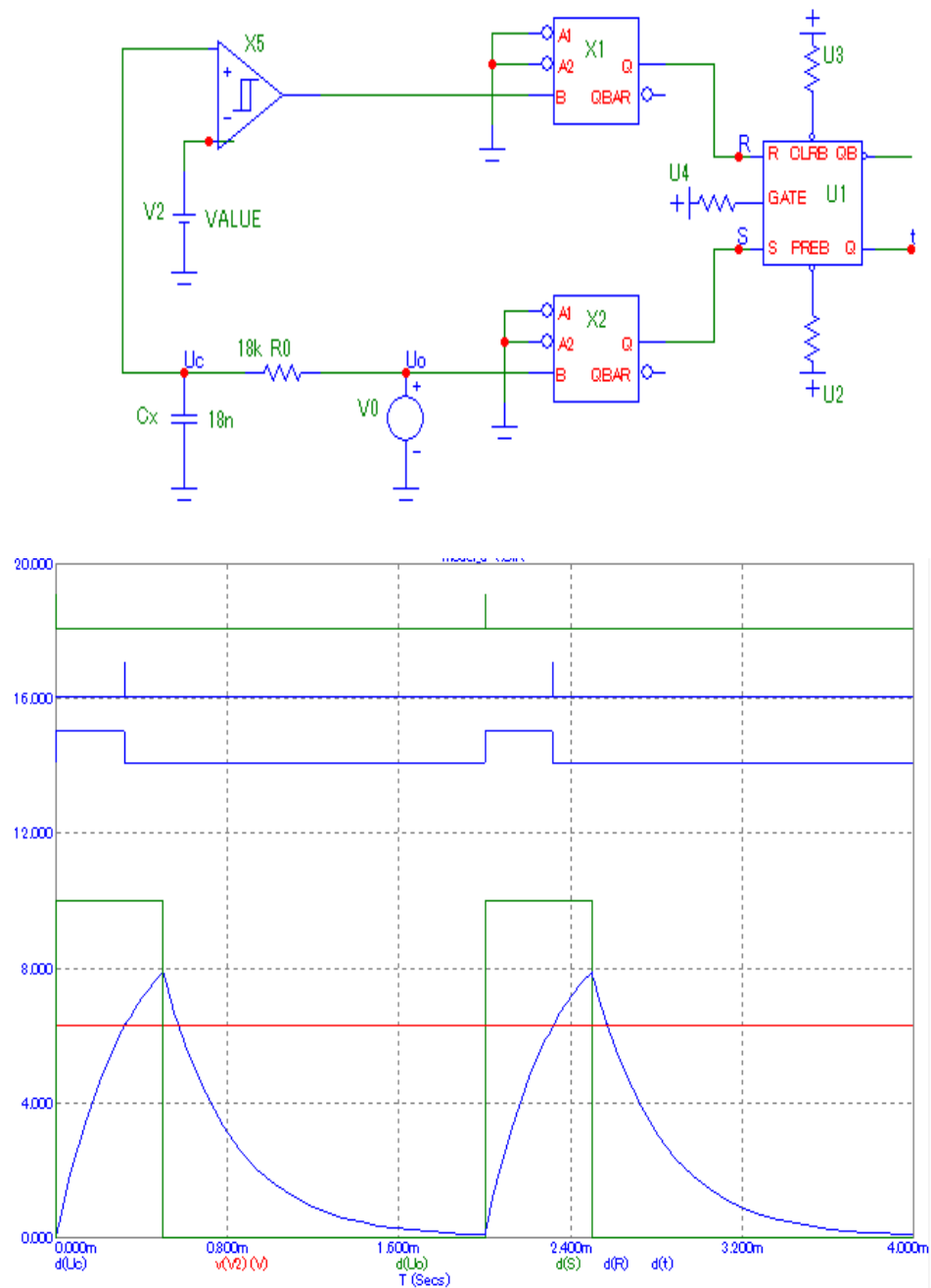


Рисунок 2.8 – Результати комп'ютерного моделювання вимірювального перетворювача ємність часовий інтервал

2.2 Математична модель параметричного ємнісного сенсора вологості цукру методом діелектричної проникності

Принцип дії ємнісних вимірювальних перетворювачів ґрунтується на зміні ємності конденсатора під впливом неелектричної входної величини.

З наведеного раніше співвідношення (2.2) видно, що на ємність конденсаторів можна впливати зміною площі перекриття пластин S , відстані між ними h , діелектричної проникності ε речовини, що знаходиться в зазорі між обкладинками конденсатора.

В п.2.1 запропоновано сенсор вологості для термогравіаметричного методу, в якому під дією маси m наважки цукру змінюється відстань h між пластинами конденсатора і, як наслідок змінюється ємність C конденсатора.

2.2.1 Діелектрична проникність

Метод діелектричної проникності або ємнісний метод базується на суттєвій різниці між значеннями діелектричної проникності води ($\varepsilon=81$) та сухих речовин.

Як було з'ясовано в розділі 1, перетворювачі, у яких змінюється діелектрична проникність ε середовища між електродами, застосовують для контролю рівня рідких і сипучих матеріалів, визначення складу та концентрації речовин у хімічній, нафтопереробній та суміжних галузях промисловості, а також у системах рахування виробів і охоронних пристроях. Такі перетворювачі характеризуються лінійною статичною характеристикою.

Розглянемо можливість застосування параметричних ємнісних сенсорів для вимірювання вологості цукру, принцип роботи яких базується на зміні діелектричної проникності ε . Вологість w цукру визначає його здатність формувати ємність і за фізичною сутністю відповідає його діелектричній проникності ε . Цей параметр показує, у скільки разів зростає ємність конденсатора під час внесення між його пластини даного матеріалу за незмінних геометричних розмірів, порівняно з випадком, коли простір між пластинами заповнений вакуумом.

Необхідно враховувати, що ємність конденсатора визначається його геометричними параметрами та властивостями матеріалу, який заповнює проміжок між електродами. Зі співвідношення 2.2:

$$C = \varepsilon \cdot \xi_0 \cdot L, \quad (2.11)$$

де ε – діелектрична проникність об'єкту вимірювання;

$$\xi_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м};$$

L - приведена довжина конденсатора в метрах, що визначається за виразом:

$$L = \frac{S}{h}, \quad (2.12)$$

де h – відстань між пластинами, м;

S – площа обкладинок конденсатора, м².

Добуток $\varepsilon \cdot \xi_0$ називається абсолютною діелектричною проникністю або питомою ємністю конденсатора.

Враховавши вище наведене, ємність *плоского конденсатора* визначається може бути записана як функція:

$$C(\varepsilon) = \frac{\xi_0 \cdot S}{h} \cdot \varepsilon. \quad (2.13)$$

Оскільки чутливість $Se = (\xi_0 \cdot S)/h$ є величиною сталою, то функціональна залежність $C = f(\varepsilon)$ лінійна (рис.2.9).

Відносна діелектрична проникність ε для твердого кристалічного цукру становить 3.5...3.7, оскільки взаємодія між зарядами в ньому в 3.5...3.7 рази менша, ніж у вакуумі. Діелектрична проникність розчину цукру буде близькою до діелектричної проникності води, яка є високою (наближено ~ 80).

Залежність діелектричної проникності ε цукру від його вологості W за формулою (1.3) є практично лінійною в діапазоні зміни ε від 3.0 до 10:

$$\varepsilon(W) = \varepsilon_{\text{сух}} + k \cdot W \quad (2.14)$$

де $\varepsilon_{\text{сух}} = 3,5...3,7$ – діелектрична проникність сухого цукру;

k - сталий коефіцієнт, числове значення якого залежить від властивостей сипучого матеріалу (цукру).

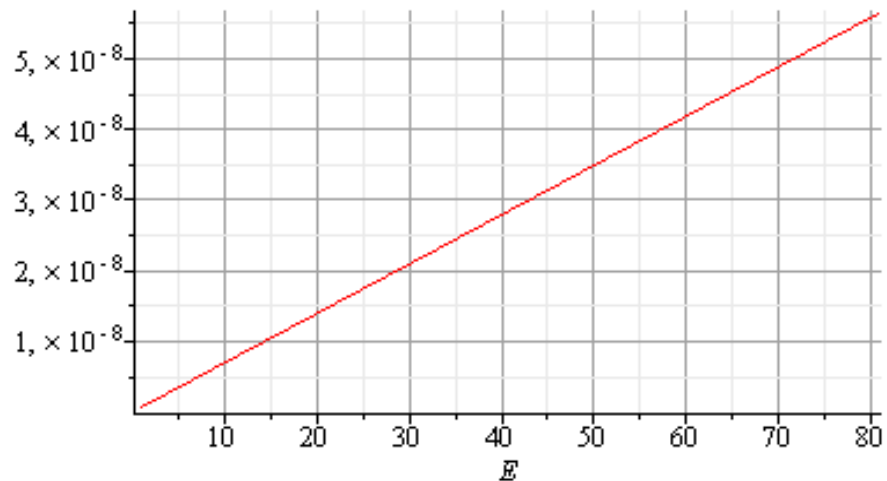


Рисунок 2.9 – Залежність ємності конденсатора від діелектричної проникності

Підставивши (2.14) в (2.13) отримаємо функцію перетворення плоского конденсатора, яка однозначно пов'язує вологість W цукру з діелектричною проникністю ε :

$$C_w(W) = \frac{\varepsilon_{\text{сyx}} \varepsilon_0 S}{h} + \frac{\varepsilon_0 S k}{h} \cdot W = C_{\text{сyx}} + \frac{\varepsilon_0 S k}{h} \cdot W, \quad (2.15)$$

де $C_{\text{сyx}} = \frac{\varepsilon_{\text{сyx}} \varepsilon_0 S}{h}$ – ємність конденсатора завантаженого абсолютно

сухим цукром.

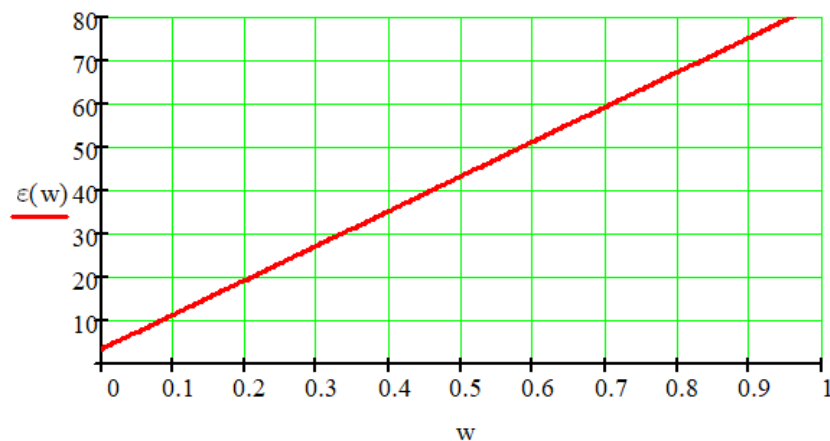


Рисунок 2.10 – Залежність діелектричної проникності від вологості цукру

На залежність відносної діелектричної проникності цукру від його вологості має вплив низка факторів, зокрема геометричні розміри кристалів цукру, температура тощо. Тому на практиці залежність $C_w(W)$ визначається

експериментально та в ході функціонуванні системи автоматизованого контролю та керування вологістю постійно підправляється.

Побудуємо статичну характеристику параметричного ємнісного вимірювального перетворювача, прийнявши наступні його параметри:

площа конденсатора $S = 0,791 \text{ м}^2$, зазор $h = 0,01 \text{ м}$, відносна діелектрична проникність сухого цукру $\varepsilon_{\text{сх}} = 3,5$, коефіцієнт $k = 80$.

В такому разі ємність конденсатора завантаженого цукром із сухим (вологість 0%) цукром:

$$C_{\text{сх}} = \frac{3,5 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 0,791}{0,01} = 2,451 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} = 2,451 \text{ нФ}.$$

Рівняння перетворення у числах матиме вигляд:

$$C_w(W) = 2,451 \cdot 10^{-9} + \frac{8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 0,791 \cdot 80}{0,01} \cdot W = 2,451 \cdot 10^{-9} + 56,03 \cdot 10^{-9} \cdot W$$

Статична характеристика такого параметричного ємнісного вимірювального перетворювача неелектричної величини вологості W в електричну величину ємність конденсатора C наведена на рис.2.11.

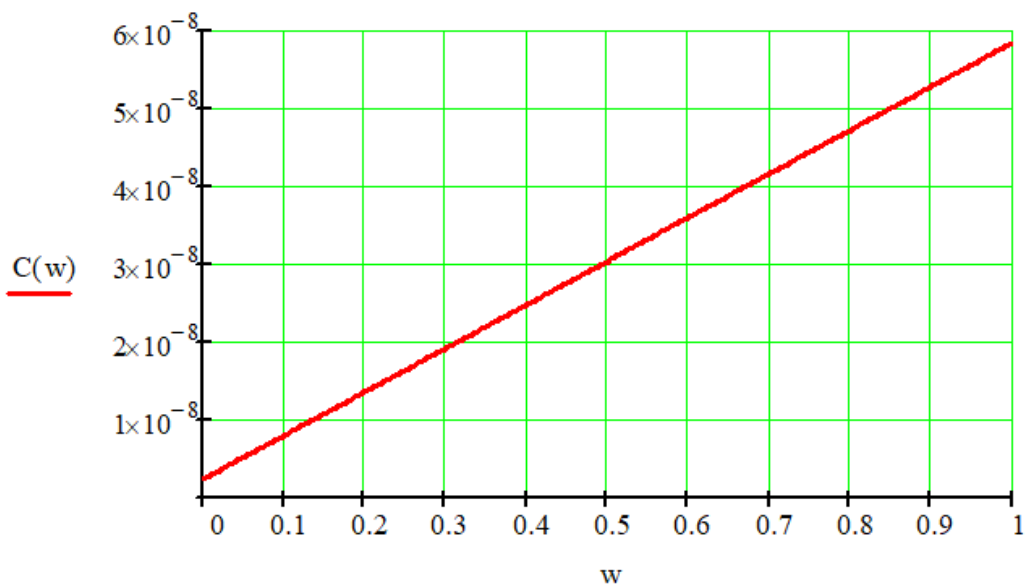


Рисунок 2.11 – Залежність ємності конденсатора від вологості цукру

Дана залежність показує, як вимірювана величина вологості, що змінюється в теоретично можливому діапазоні від 0 до 1.0, пов'язана з відповідними змінами ємності конденсатора.

Визначимо теоретично можливий діапазон зміни ємності конденсатора:

$$C_w(W=0) = 2,451 \cdot 10^{-9} \Phi = 2,451 \text{ нФ},$$

$$C_w(W=1) = 2,451 \cdot 10^{-9} + 56,03 \cdot 10^{-9} \cdot 1 = 58,48 \cdot 10^{-9} \Phi = 58,48 \text{ нФ}.$$

Таким чином теоретично можливий діапазон зміни ємності ємнісного вимірювального перетворювача вологості складатиме від 2,451 до 58,48 нФ.

Відповідно до вимог Держстандарту України ДСТУ 4623:2006 масова частка води у білому цукрі не повинна перевищувати [10]:

- Цукор I категорії < 0.10%;
- Цукор II категорії < 0.10%;
- Цукор III категорії < 0.14%;
- Цукор IV категорії < 0.15%.

На вході технологічного процесу сушки цукру, де як було встановлено у розділі 1 постає необхідність автоматизованого безперервного контролю вологості цукру, вона може досягати 20%.

Тому враховуючи вище викладене та нормативні вимоги можливий діапазон зміни вологості цукру, контроль якого необхідно здійснювати складає від 0 до 20 %, або від 0 до 0,2 у відносних одиницях. У такому разі статична характеристика ємнісного вимірювального перетворювача вологості прийме вигляд, що подано на рис.2.12.

Таким чином реально можливе значення ємності може змінюватись в діапазоні:

$$C_w(W=0) = 2,451 \cdot 10^{-9} \Phi = 2,451 \text{ нФ},$$

$$C_w(W=0,2) = 2,451 \cdot 10^{-9} + 56,03 \cdot 10^{-9} \cdot 0,2 = 13,66 \cdot 10^{-9} \Phi = 13,66 \text{ нФ}.$$

Постійна часу електричного кола, що складається з зразкового резистора R_0 і ємності конденсатора C , визначається визначається аналогічно до (2.9):

$$\tau_w(W) = C_w(W) \cdot R_0. \quad (2.16)$$

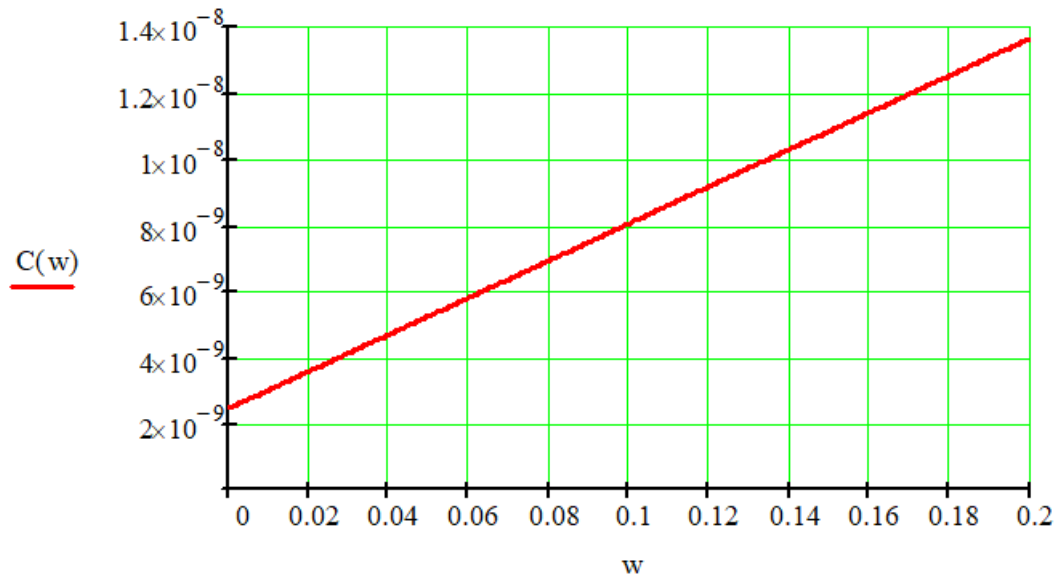


Рисунок 2.12 – Статична характеристика ємнісного сенсора вологості цукру

Або враховуючи (2.15) можемо визначити:

$$\tau_w(W) = C_{cix} R_0 + \frac{\varepsilon_0 S k R_0}{h} \cdot W \quad (2.17)$$

Прийmemo $R_0 = 100$ Ом. Тоді:

$$\tau_w(W) = 24,5 \cdot 10^{-6} + 560,3 \cdot 10^{-6} \cdot W$$

Графічна залежність $\tau_w = f(W)$ наведена на рис.2.13.

Визначимо діапазон зміни часового інтервалу:

$$\tau_w(W = 0) = 24,5 \cdot 10^{-6} \text{ c} = 24,5 \text{ мкс};$$

$$\tau_w(W = 0,2) = 24,5 \cdot 10^{-6} + 560,3 \cdot 10^{-6} \cdot 0,2 = 136,6 \cdot 10^{-6} \text{ c} = 136,6 \text{ мкс}.$$

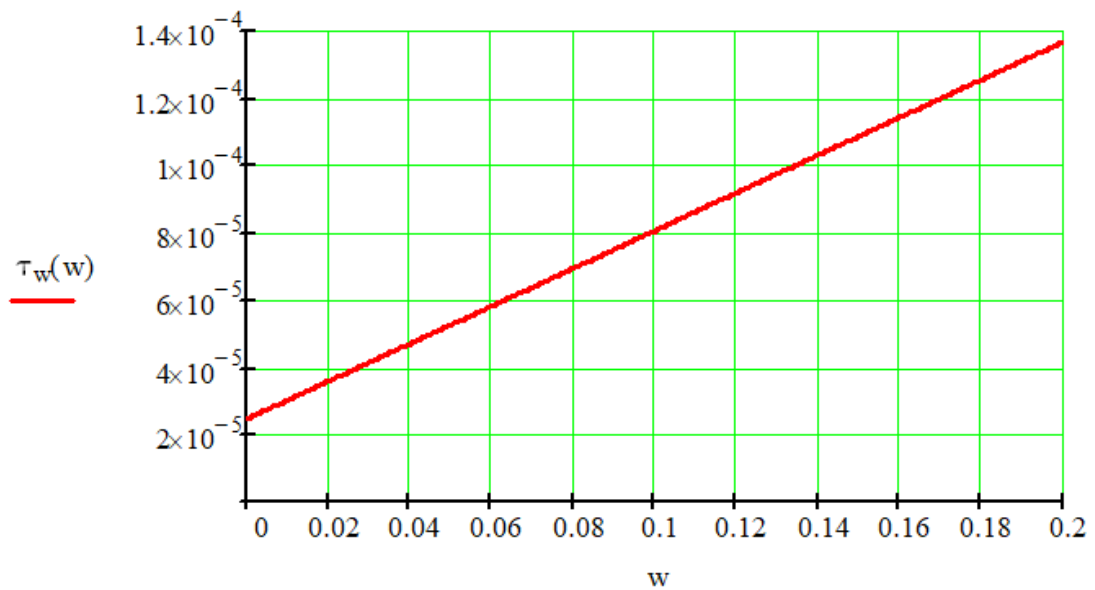


Рисунок 2.13 – Функціональна залежність $\tau_w = f(W)$

Аналіз наведених результатів моделювання показує, в діапазоні зміни вологості цукру від 0 до 0.2 постійна часу лінійно зростає від $24,5 \cdot 10^{-6}$ до $136,6 \cdot 10^{-6}$ с. Якщо такий часовий інтервал проквантувати імпульсами зразкової частоти $f_0 = 10^8$ Гц, що для сучасних мікроконтролерів не є проблемою, то максимальне значення відносної похибки квантування на початку діапазону (рис.2.13) не перевищить 0.16%, а в робочому діапазоні зміни вологості цукру (від 0.1 до 0.2) $\delta_K \leq 0.02\%$.

Висновки:

На основі параметричного ємнісного вимірювального перетворювача розроблено функцію перетворення, що однозначно пов'язує вихідну електричну величину ємність C плоского конденсатора з вхідною неелектричною величиною вологістю цукру W , яка опосередковано впливає на зміни діелектричної проникності ϵ цукру.

Доведено, що у вузькому діапазоні зміни вологості цукру (від 0.02 до 0.2) постійна часу $R_0 \cdot C_w$ електричного кола лінійно зростає в межах від 24,5 до 136,6 мкс, що в подальшому вимірювальному перетворенні часового інтервалу у двійковий код забезпечить максимальне значення відносної похибки

квантування, яке на нижній межі вимірювання вологості не перевищує $\delta_K \leq 0.02\%$.

Швидкодія (140 мкс) пропонованого ємнісного сенсора, що реалізує діелькометричний метод, дозволяє реалізовувати на його основі мікропроцесорні пристрої вимірювального контролю вологості цукру в режимі реального часу.

2.3 Вимірювальний канал часового інтервалу

Основною особливістю [5] вимірювання неелектричних величин є їхнє перетворення в електричну з наступним її квантування для заміни аналогової величини, що має нескінченну кількість значень, перервною величиною з обмеженою кількістю значень. Такі перетворення здійснюють вимірювальні перетворювачі – параметричні або генераторні. В системах автоматизованого контролю технологічних процесів досить розповсюдженими є параметричні сенсори, що перетворюють неелектричну величину в параметри електричного кола. В таких вимірювальних каналах виникає необхідність наступного перетворення опору R або ємності C в електричну величину. Як правило ці вихідні параметри сенсорів перетворюються в струм, а струм в свою чергу в напругу. Недоліки таких вимірювальних каналів є довге коло вимірювального перетворення неелектричної величини в електричну, що призводить до значної похибки. Для прикладу похибки [6] інтегральних акселерометрів компанії Analog Devices, які досить широко застосовується в системах вібромоніторингу, можуть сягати 2 %. Тому для підвищення точності вимірювального перетворення неелектричної величини в електричну величину пропонується ємність сенсора безпосередньо перетворювати в часовий інтервал [7].

Актуальним завданням є підвищення точності вимірювання неелектричних величин параметричними резистивними або ємнісними сенсорами з подальшим їхнім перетворенням в часовий інтервал, квантування

якого реалізується з наперед заданим нормованим значенням похибки квантування в теоретично обґрунтованому діапазоні вимірювання.

2.3.1 Структурна схема і принцип дії

Принцип дії засновано на квантуванні вимірюваного часового інтервалу t_x періодами T_0 зразкової частоти f_0 , що формується на виході генератора G .

Структурна схема, що реалізує сформульований вище принцип дії, наведена на рис.2.14.

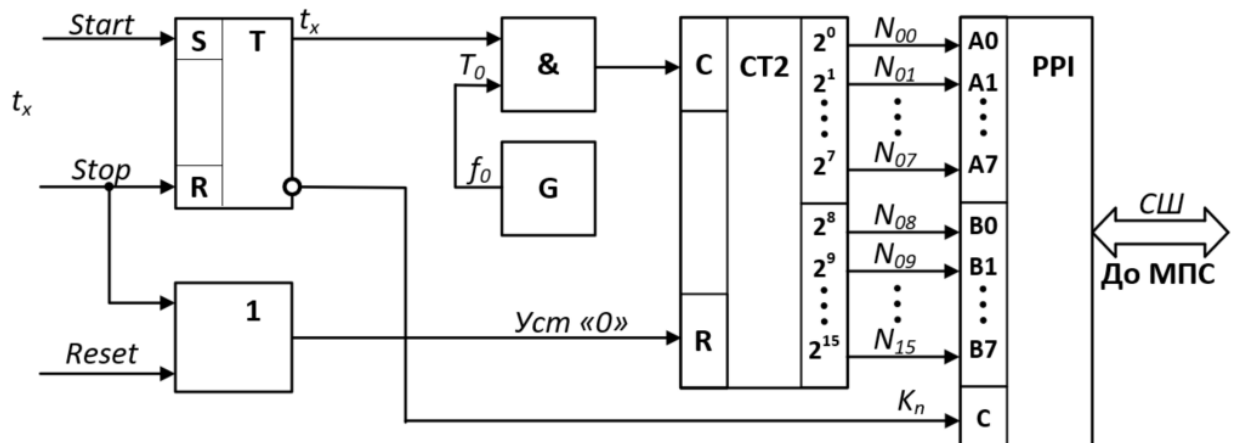


Рисунок 2.14 – Структурна схема вимірювального каналу часового інтервалу

Основними складовими цієї схеми є такі: T – RS тригер; $\&$ – логічна схема 2-І; логічна схема 2-АБО; G – генератор зразкової частоти f_0 , в основу побудови якого покладено кварцовий резонатор; $CT2$ – двійковий 16-ти розрядний лічильник, який призначений для підрахунку кількості періодів T_0 зразкової частоти f_0 протягом вимірюваного часового інтервалу t_x ; PPI – паралельний порт (інтерфейс) для проміжного запам'ятовування двійкового коду $N[00-15]$, що поступає на його паралельні входи $[A0-7]$ і $[B0-7]$ з відповідних виходів двійкового лічильника $[2^0...2^{15}]$. Далі результат вимірювання у вигляді паралельного двійкового коду $N[00-15]$ через системну шину $CШ$ передається в акумулятор мікропроцесорної системи $МПС$.

Часові діаграми роботи вимірювального каналу часового інтервалу наведені на рис.2.15.

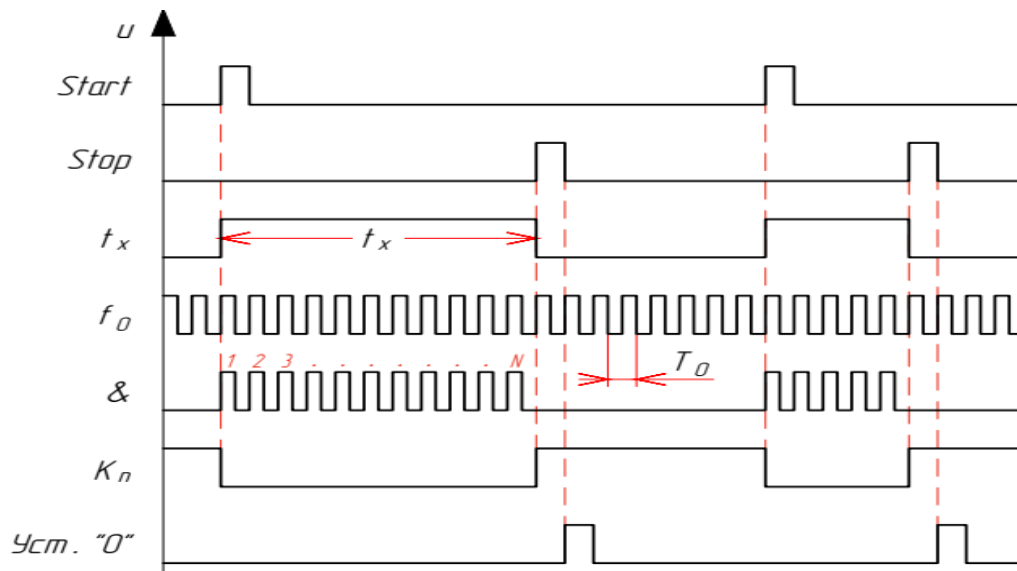


Рисунок 2.15 – Часові діаграми роботи вимірювального каналу

На часовій діаграмі прийнято такі умовні позначення: Start – сигнал початку часового інтервалу t_x ; Stop – сигнал завершення часового інтервалу t_x ; t_x – тривалість вимірюваного часового інтервалу; f_0 – сигнали зразкової частоти з періодом T_0 ; N – кількість імпульсів, що підрахував двійковий лічильник СТ2 за час вимірювання; K_n – сигнал кінець перетворення (завершення квантування часового інтервалу t_x періодами T_0 зразкової частоти f_0); Уст «0» - установка усіх тригерів (для наведеного прикладу їхня кількість $n=16$) двійкового лічильника СТ2 в стан логічного «0»; Reset – зовнішній сигнал обнуління усіх тригерів лічильника СТ2.

Розглянемо принцип дії схеми вимірювального каналу.

Вихідне положення. Після заживлення логічних елементів і елементів пам'яті з блока живлення (на схемі не показано) поступає сигнал Reset, який обнуляє всі тригери. На прямому виході RS-тригера формується рівень логічного нуля, який закриває логічну схему 2-І. З цієї причини імпульси зразкової частоти f_0 не поступають на тактовий С-вхід двійкового лічильника СТ2. Тому на всіх його виходах $2^0 \dots 2^{15}$ сформовані рівні логічного нуля. На інверсному виході цього RS-тригера – рівень логічної «1». Схема знаходиться в режимі очікування.

Вимірювання. В момент приходу одиничного сигналу на S-вхід тригер Т з нульового стану встановлюється в одиничний: на прямому виході логічна «1», а на інверсному – логічний «0». Сформований на інверсному виході тригера Т задній фронт (перепад з логічної «1» в логічний «0») не є інформативний для паралельного інтерфейсу РРІ. Рівень логічної «1», сформований на прямому виході тригера Т, відкриває логічну схему 2-І для проходження через неї імпульсів зразкової частоти f_0 на тактовий С-вхід двійкового лічильника. В СТ2 здійснюється процес лічби: з приходом кожного імпульсу на С-вхід його стан збільшується на одиницю (+1 – режим інкременту).

2.3.2 Виведення функції перетворення

В логічній схемі 2-І здійснюється квантування – метрологічна операція заміни аналогової (неперервної) фізичної величини часового інтервалу t_x квантованими (перервними) значеннями у вигляді двійкового коду на виходах N[00-15] двійкового лічильника СТ2. Квантування виконується шляхом [5-6] порівняння вимірюваної величини X і зразкової $[x]$

$$N = \frac{X}{[x]}. \quad (2.18)$$

Для пропонованого в роботі вимірювального перетворення введемо такі позначення:

$$X \xrightarrow{\text{вимірювана}} t_x \quad [x] \xrightarrow{\text{зразкова}} T_0.$$

Врахувавши введені позначення операцію порівняння подамо так

$$N = \frac{t_x}{[T_0]}. \quad (2.19)$$

Внаслідок цього порівняння неперервний аналоговий часовий інтервал t_x замінюють обмеженою кількістю N зразкових часових інтервалів T_0 . Тому таку дію називають аналого-цифровим перетворенням, результат якого – аналогова величина t_x перетворюється в дискретизовану.

Оскільки період T_0 пов'язаний з частотою f_0 оберненою залежністю

$$T_0 = \frac{1}{f_0}, \quad (2.20)$$

то остаточне рівняння перетворення для вимірювального каналу часового інтервалу матиме вигляд

$$N = t_x \cdot f_0 \quad (2.21)$$

Отже, протягом часового інтервалу t_x двійковий лічильник СТ2 підрахує N періодів T_0 зразкової частоти f_0 .

Процес лічби (вимірювання) продовжується до моменту подання на R-вхід RS-тригера Т керуючого сигналу Stop, який сигналізує про завершення часового інтервалу і відповідно процесу вимірювання. Даним сигналом на прямому виході тригера Т формується рівень логічного «0», що закриває логічну схему 2-І, а на його інверсному виході перепад сигналу з рівня логічного «0» до рівня логічної «1». Сформований таким чином передній фронт є сигналом Кп кінець перетворення, по якому двійковий код $N[00-15]$ запам'ятовується в портах (регістрах) паралельного інтерфейсу РРІ. Після того, як вимірювальна інформація записана в портах РРІ, по задньому фронту сигналу Stop формується сигнал Уст «0». Даним сигналом всі тригери двійкового лічильника СТ2 обнуляються. СТ2 готовий для виконання наступного циклу вимірювання.

Для отримання з функції перетворення (2.21) рівняння чутливості необхідно взяти з неї похідну:

$$S = \frac{dN}{dt_x} = f_0 = Const. \quad (2.22)$$

Рівняння перетворення можна подати і через чутливість:

$$N = S \cdot t_x \quad (2.23)$$

Прийmemo частоту квантування $f_0 = 32$ МГц. Здійснимо побудову статичної характеристики для вказаної частоти. Оскільки чутливість є сталою величиною, то статична характеристика (графічне подання функції перетворення) є лінійною (рис.2.16). Відповідно і крок квантування у таких вимірювальних каналів є також сталою величиною

$$h = T_0 = \frac{1}{f_0} = \text{const} \quad (2.24)$$

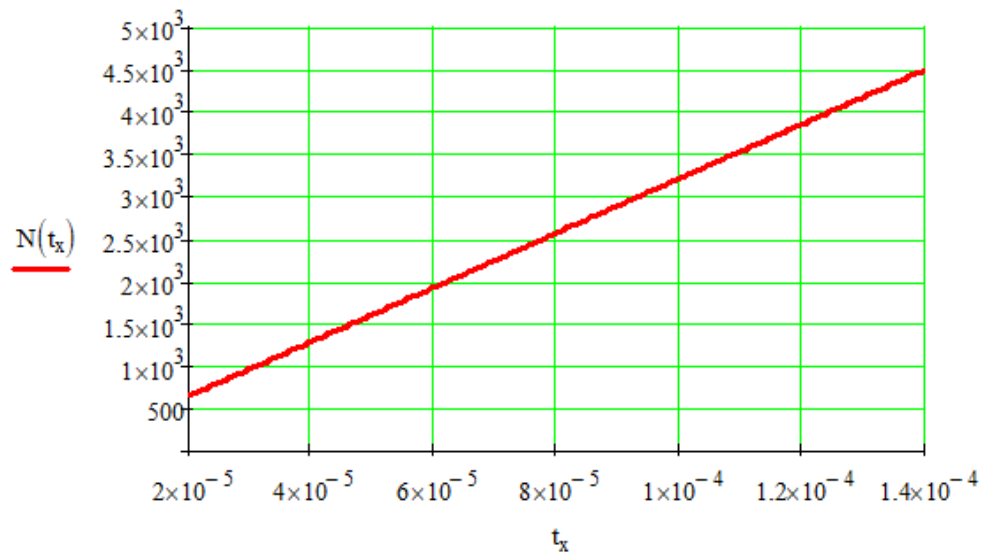


Рисунок 2.16 – Статична характеристика вимірювального каналу t_x

2.3.3 Рівняння похибок квантування

В результаті квантування аналогову фізичну величину часовий інтервал t_x , що має нескінчену кількість значень, замінено перервною квантованою величиною з обмеженою кількістю значень, що і є причиною похибки квантування.

Абсолютну похибку квантування оцінюють [5-6] як половину кроку квантування (5)

$$\Delta_k = \frac{1}{2} h = \frac{1}{2} T_0 = \text{const} \quad (2.25).$$

З (2.25) видно, що абсолютна похибка квантування є методичною систематичною похибкою і має розмірність кроку квантування (в нашому випадку розмірність може бути секунда, мілісекунда, мікросекунда, наносекунда, пікосекунда і т.д.).

Відносну похибку квантування є величиною оберненою до кількості імпульсів N двійкового лічильника СТ2 і подають її у відсотках

$$\delta_k = \frac{1}{N} \cdot 100\% = \frac{100\%}{t_x \cdot f_0} \quad (2.26).$$

Графік зміни відносної похибки в діапазоні зміни вимірюваної величини t_x наведено на рис.2.17.

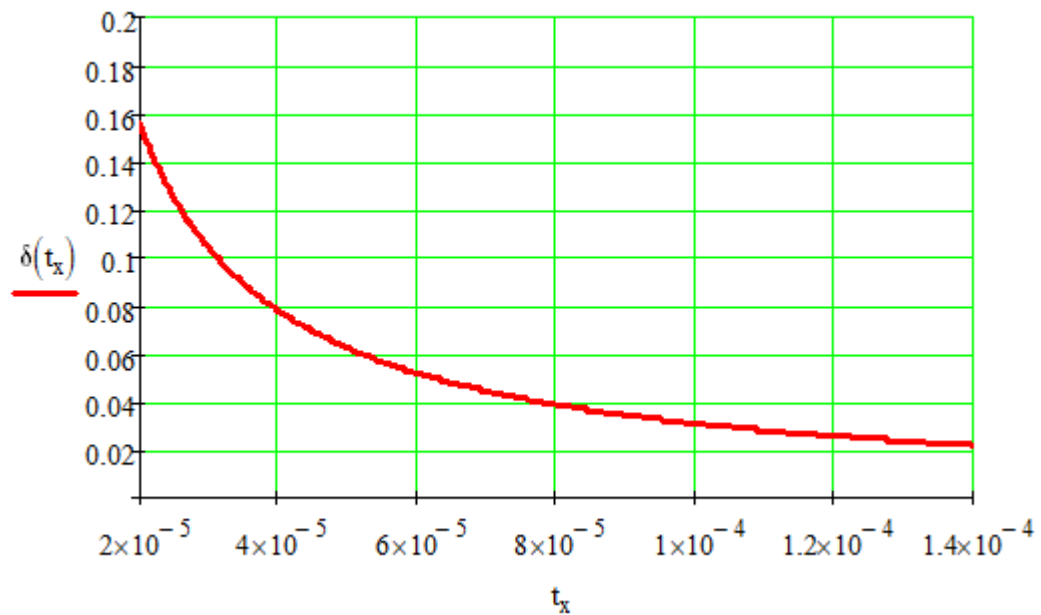


Рисунок 2.17 – Функціональна залежність $\delta_k = f(t_x)$

2.3.4 Оцінювання діапазону вимірювання

Аналіз результатів наведених на рис.2.17 показує, що при вимірюванні малих значень часового інтервалу ($t_x = 20$ мкс) значення похибки квантування велике і дорівнює 0.16%. З ростом часового інтервалу ($t_x = 140$ мкс) значення похибки на порядок зменшується (до 0.02%). Отже, нижня межа вимірювання обмежена [5] нормованим значенням похибки квантування $\delta_{кн}$.

Визначимо нижню межу вимірювання $t_{x \min}$. Для цього задамося нормованим значенням похибки квантування:

$$\delta_{кн} = \frac{100\%}{t_{x \min} \cdot f_0} \quad (2.27)$$

З (9) нижня межа вимірювання часового інтервалу визначається

$$t_{x \min} = \frac{100\%}{\delta_{кн} \cdot f_0}. \quad (2.28)$$

Залежність нижньої межі вимірювання $t_{x \min}$ від нормованого значення похибки квантування для обраного значення частоти квантування наведено на рис.2.18.

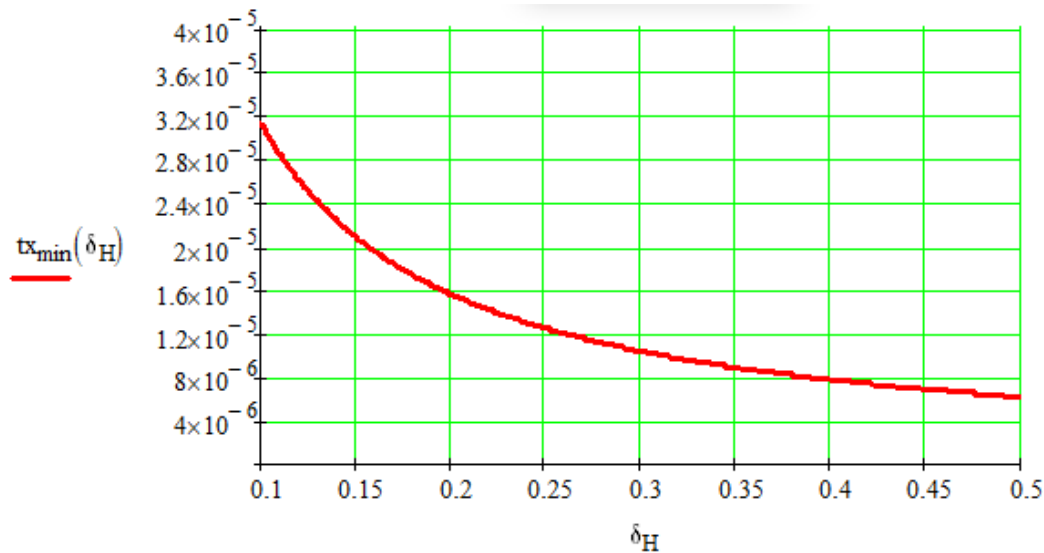


Рисунок 2.18 – Функціональна залежність $t_{x \min} = f(\delta_{\text{кн}})$

Наприклад, для значень частоти квантування $f_0 = 32$ МГц в діапазоні зміни нормативного параметру похибки квантування від значень 0.1 до 0.5 % нижня межа вимірювання змінюється від 32 до 6 мкс відповідно. За необхідного мінімального значення сталої часу ємнісного вимірювального перетворювача, що складає 24 мкс може бути забезпечений нормативне значення похибки квантування на рівні 0.15%.

Окрім нижньої межі діапазон вимірювання обмежується ще і верхньою межею, яка визначається максимальною ємністю двійкового лічильника

$$N_{\max} = 2^n, \quad (2.29)$$

де n – розрядність двійкового лічильника СТ2.

З урахуванням (10) рівняння перетворення (3) запишемо так

$$N_{\max} = 2^n = t_{x \max} \cdot f_0. \quad (2.30)$$

З (11) нижня межа вимірювання часового інтервалу визначається

$$t_{x \max} = \frac{2^n}{f_0}. \quad (2.31)$$

Параметрами вимірювального каналу, які обмежують верхню межу вимірювання є частота квантування f_0 і розрядність n двійкового лічильника СТ2. Тому для її оцінювання необхідно спочатку встановити, якою розрядністю має володіти двійковий лічильник СТ2.

2.3.5 Обґрунтування вибору розрядності двійкового лічильника

Інформацію, що отримують під час вимірювань часового інтервалу, кількісно оцінюють [8-9] зменшенням ентропії $H(t)$, що характеризує невизначеність фізичної величини перед вимірюваннями, до значення $H(t/\Delta)$, яке залишається невизначеною після отримання результату вимірювання

$$I = H(t) - H(t/\Delta).$$

Ці оцінки невизначеності у вигляді ентропії до і після вимірювань оцінюють на підставі 16-ої теореми К. Шеннона, яка описується функціоналом

$$H(t) = - \int_{-\infty}^{\infty} P(t) \log_2 P(t) dt.$$

Апріорна ентропія. Для вимірювання часового інтервалу t_x використано вимірювальний канал (рис.2.14), в якого діапазон вимірювання характеризується нижньою $t_{x \min}$ і верхньою $t_{x \max}$ межами вимірювання.

Тоді ймовірності отримати результат вимірювання в області зміни a від $-\infty$ до $t_{x \min}$ і від $t_{x \max}$ до $+\infty$ дорівнюють нулю.

Отже, результат вимірювання фізичної величини a необхідно очікувати в діапазоні вимірювання від $t_{x \min}$ і до $t_{x \max}$.

Припустимо, що результат вимірювання з рівною ймовірністю може попасти в будь-яку частину цього діапазону. Тому

$$P(t_x) = \frac{1}{t_{x \max} - t_{x \min}} \quad \text{при } t_{x \min} \leq t_x \leq t_{x \max};$$

$$P(t_x) = 0 \quad \text{при } t_{x \min} > t_x > t_{x \max}.$$

З врахуванням останнього, апріорна ентропія до вимірювання визначається так

$$H(t_x) = - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{t_{x \max} - t_{x \min}} \log_2 \frac{1}{t_{x \max} - t_{x \min}} dt_x.$$

Апостеріорна ентропія. Після виконання вимірювання ентропія не може бути зменшена до нуля, тому що завжди залишається невизначеність, що вносить похибка.

Визначимо диференційну залишкову ентропію для випадку, коли похибка вимірювання розподілена за нормальним законом а її середнє квадратичне відхилення дорівнює σ

$$P(t_x/\Delta) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\left(\frac{\Delta}{2\sigma}\right)^2\right).$$

Тоді апостеріорна ентропія (після) вимірювань, визначається

$$\begin{aligned} H(t_x/\Delta) &= - \int_{-\infty}^{\infty} P(t_x/\Delta) \log_2 P(t_x/\Delta) dt_x = \\ &= - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\left(\frac{\Delta}{2\sigma}\right)^2\right) \cdot \log_2 \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\left(\frac{\Delta}{2\sigma}\right)^2\right) dt_x. \end{aligned}$$

Розв'язок останнього рівняння отримано К. Шенноном і має такий остаточний вигляд

$$H(t_x/\Delta) = -\log_2 (\sigma \sqrt{2\pi \cdot e}).$$

Тоді кількість інформації, що отримує МПС в процесі вимірювання фізичної величини a , визначається різницею апіорної і апостеріорної ентропії

$$\begin{aligned} I &= H(t_x) - H\left(\frac{t_x}{\Delta}\right) = \\ &= - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{t_{x\max} - t_{x\min}} \log_2 \frac{1}{t_{x\max} - t_{x\min}} dt_x - \log_2 (\sigma \sqrt{2\pi \cdot e}). \end{aligned}$$

Визначимо, яку кількість інформації отримує МПС під час перетворення часового інтервалу t_x а в двійковий код N цифровим вимірювальним каналом (рис.1) з такими метрологічними характеристиками:

- нижня межа вимірювання $t_{x\min} = 24$ мкс;
- верхня межа вимірювання $t_{x\max} = 140$ мкс;
- середнє квадратичне відхилення похибки $\sigma \in 0.01 \dots 0.02$ мкс.

$$\begin{aligned} I &= H(t_x) - H(t_x/\Delta) = -\frac{1}{140-24} \cdot \log_2 \left(\frac{1}{140-24}\right) \cdot (140 - 24) - \log_2 (\sigma \cdot \\ &\sqrt{2\pi \cdot 2.73}) = 14 \text{ біт} \end{aligned}$$

Залежність нижньої межі вимірювання від розрядності n двійкового лічильника СТ2 і відповідно розрядності портів паралельного інтерфейсу PPI наведена на рис.2.19.

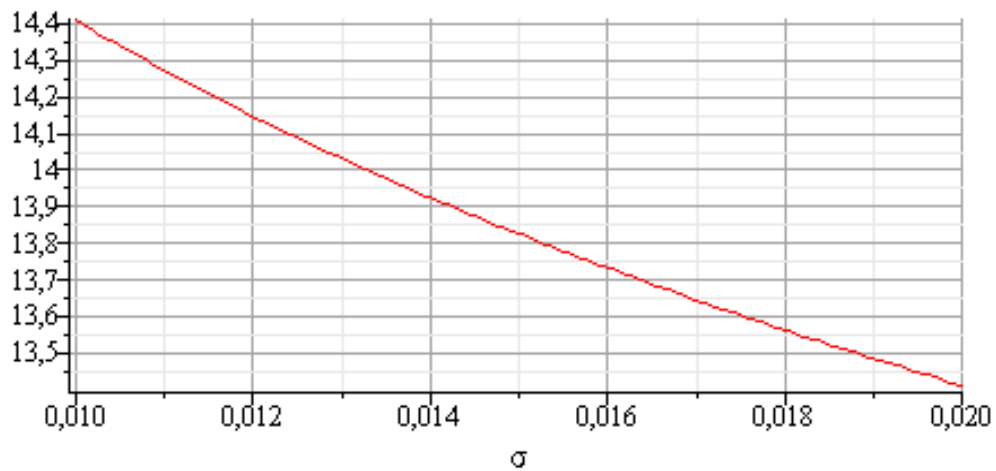


Рисунок 2.19 – До питання визначення розрядності СТ2

Враховавши отримані результати, що наведені на рис.6, після підстановки в (2.31), отримаємо залежність верхньої межі вимірювання від розрядності n двійкового лічильника СТ2 (рис.2.20).

З отриманих залежностей видно, що для забезпечення вимірювання часового інтервалу, що відповідає верхній межі ємнісного вимірювального перетворювача визначеної у розділі 2.2 достатньо розрядності лічильника $n = 13$, що дозволить очікувати результати вимірювання із середньо квадратичним відхиленням 0.02.

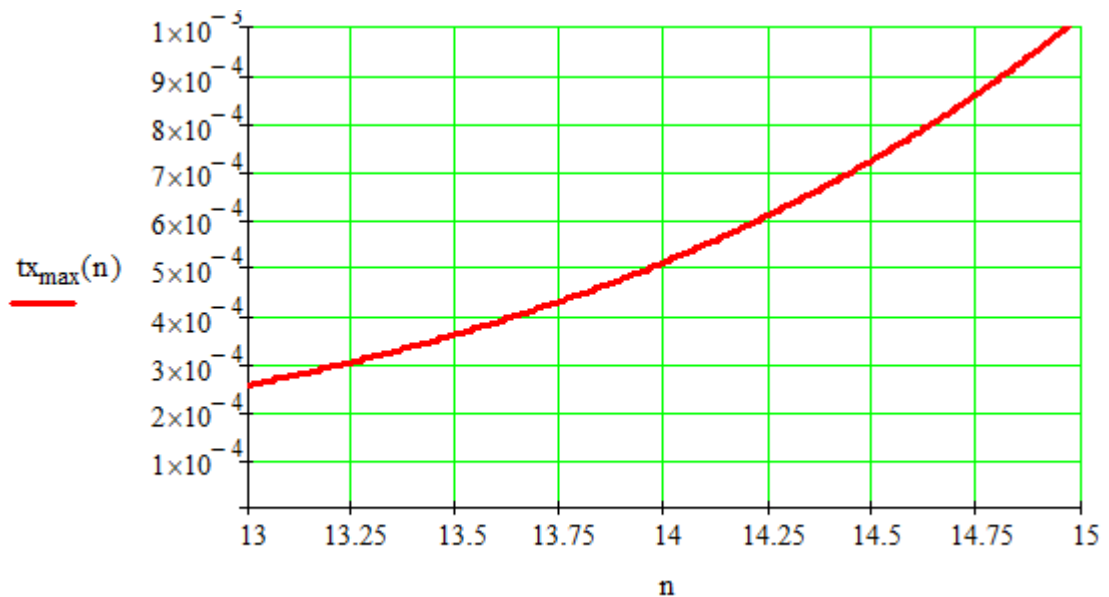


Рисунок 2.20 – Функціональна залежність $t_{x \max} = f(n)$

Висновки до розділу

1. На основі сформульованого принципу запропоновано структурну схему та часові діаграми роботи вимірювального каналу часових інтервалів для сумісної роботи з параметричними резистивними і ємнісними сенсорами.
2. На підставі проведеного аналізу послідовності вимірювальних перетворень вимірювального каналу отримано функцію перетворення та подано її у вигляді рівняння перетворення і статичної характеристики. Встановлено, що його статична характеристика є лінійною, а отже чутливість є сталою величиною в повному діапазоні вимірювання.
3. Отримано математичну модель похибки квантування та показано шляхи її зменшення. Встановлено параметри, що обмежують діапазон вимірювання та отримано аналітичні залежності для оцінювання нижньої та верхньої меж вимірювання.

3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ВОЛОГІСТЮ ЦУКРУ

3.1 Математичні моделі процесу сушки цукру

Процес сушіння кристалічного цукру є ключовою стадією технологічного циклу цукрового виробництва, оскільки саме на цьому етапі забезпечується досягнення цільового вмісту вологи, стабільність фізико-хімічних властивостей продукту та його придатність до зберігання і транспортування. Сушильні апарати, що застосовуються у промисловості, характеризуються складною тепло- та масообмінною динамікою, значною інерційністю й істотною залежністю вихідних параметрів від коливань режимів роботи та властивостей вхідної сировини. Це обумовлює необхідність побудови адекватних математичних моделей, здатних відтворювати основні закономірності процесу та забезпечувати підґрунтя для подальшого аналізу, оптимізації та синтезу систем автоматизованого керування.

Математичні моделі сушіння цукру можуть ґрунтуються на описі фізико-хімічних процесів, що використовують рівняння масової та енергетичної рівноваги з використанням динамічних моделей, придатних для інженерних розрахунків і проектування систем керування. Повні моделі враховують кінетику масопереносу, зміну температурних полів, властивості сушильного агента, структуру зернистого матеріалу та гідродинаміку апарата; при цьому вони часто містять нелінійні залежності та значну кількість параметрів. У свою чергу, спрощені моделі, побудовані на основі лінеаризації та редукції порядку, дозволяють отримати компактні динамічні представлення, які точно описують поведінку процесу у робочому діапазоні та відповідають вимогам сучасних систем автоматизації.

Розроблені моделі мають лягти в основу для подальшого синтезу регуляторів, оцінювання параметрів, оптимізації режимів та побудови ефективних систем контролю вологості кінцевого продукту.

Ключове завдання сушки видалення зайвої вологи з цукру. Оскільки процеси сушки цукру, як було встановлено у розділі 1, є безперервним процесом, то вигідно представляти у часових витратах маси, тепла тощо.

Нехай потік продукту має масову витрату m_0 (кг/с) і вхідну масову вологість W_{in} (доля від маси, кг води/кг сухої речовини). На виході сушки під дією різних чинників (масова витрата та температура цукру, що поступає на сушку, швидкість обертання барабана, швидкість та температура нагнітаючого повітря тощо) на виході отримується цукор із певним значенням вологості W_{out} , що може дещо відрізнятися від певного встановленого (заданого) значення вологості $W_{уст}$.

Метою системи автоматизованого керування звести похибку вологості $e(t) = W_{уст} - W_{out}(t)$ до нуля за прийнятний час, мінімізувати переробки і енерговитрати, забезпечити роботу у допустимих межах температури та уникнути перегріву.

Таким чином масовий баланс полягає у тому, що в процесі сушки волога, яка повинна бути видалена в одиницю часу, може бути задана:

$$m_{0_{вин}} = m_0 (W_{in} - W_{out}). \quad (3.1)$$

Енергетичний баланс полягає у тому, що кількість теплоти, що надходить із повітрям в барабан $Q(t)$ витрачаються на нагрівання агента сушіння на випаровування вологи $Q_{вин}(t)$ та розсіюються у вигляді втрат $\Delta Q_{emp}(t)$:

$$Q(t) = Q_{вин}(t) + Q_{нагр}(t) + \Delta Q_{emp}(t) \quad (3.2)$$

або ввівши параметр енергоефективності сушіння η :

$$Q_{вин}(t) = \eta Q(t) \quad (3.3)$$

Усі величини у співвідношенні (3.2) виражені у вигляді питомої витрати теплоти або потужності (Дж/с=Вт). Енергія витрачена на випаровування можна подати у вигляді:

$$Q_{вин}(t) = m_{0_{вин}} \cdot \lambda, \quad (3.4)$$

де λ - питома теплота випаровування води (близько 2,26 МДж/кг при 100 °С, залежить від температури та тиску).

Об'єднавши співвідношення (3.1), (3.3) та (3.4) після певних математичних перетворень:

$$W_{out}(t) = W_{out}(t) - \frac{\eta Q(t)}{m_{0\text{вун}} \cdot \lambda} \quad (3.5)$$

Аналіз виразу (3.5) показує, що збільшення витрат теплоти призводить до зменшення вологості на виході сушки, однак воно не враховує динамічних процесів, що виникають внаслідок інерційних процесів, пов'язаних із тепловою інерцією (теплообмін між повітрям, продуктом та механізмами сушарки потребує часу) та транспортними затримками при переміщення продукту вздовж барабану). Їх можна описати рівнянням, що доповнивши (3.5) складе математичну модель термодинамічних процесів сушки цукру:

$$\begin{cases} C_{np} \frac{dT_{np}}{dt} = Q(t) - m_{0\text{вун}}(t) \lambda \\ W_{out}(t) = W_{out}(t) - \frac{\eta Q(t)}{m_{0\text{вун}}(t) \cdot \lambda} \end{cases}, \quad (3.6)$$

де C_{np} - теплоємність продукту, T_{np} - температура продукту.

Система (3.6) є нелінійною системою диференціальних рівнянь, оскільки швидкість випаровування води з продукту $m_{0\text{вун}}(t)$ є залежною від багатьох чинників, таких як поточна вологість та температура продукту, масова витрата тощо. Тобто:

$$m_{0\text{вун}}(t) = f(T_{np}(t), m_0(t), W(t) \dots). \quad (3.7)$$

Для здійснення керування за обраною стратегією синтезу системи автоматизованого керування із контролем вхідною та вихідної вологості цукру надлишкової точності складного нелінійного аналізу часто буває не потрібно, тому здійснюють лінеаризацію процесу в певній області значень вологості.

Систему рівнянь (3.6) у такому разі можна замінити лінійною моделлю першого порядку, що цілком адекватна у певному діапазоні:

$$\frac{d(\Delta W)}{dt} + \frac{1}{\tau} \Delta W = K \Delta Q, \quad (3.8)$$

де τ - стала часу процесу, K - коефіцієнт передачі.

Або врахувавши запізнення, що виникає через втрату часу на транспорт продукту, проходження та нагрівання повітря в теплообміннику та інші можливі затримки часу, що в сумі на практиці можуть сягати $\theta = 20 - 60$ с модель переписується:

$$\frac{d(\Delta W)}{dt} + \frac{1}{\tau} \Delta W = K \Delta Q(t - \theta). \quad (3.9)$$

При аналізі динамічних систем здебільшого використовують операторну форму. Тому після перетворення Лапласа:

$$sW(s) + \frac{1}{\tau} W(s) = K e^{-\theta s} Q(s)$$

або у вигляді передатної функції:

$$G_{суш}(s) = \frac{W(s)}{Q(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s}. \quad (3.10)$$

Таким чином після лінеаризації система рівнянь набуває вигляду лінійної динамічної системи з вхідною дією у вигляді питомої витрати теплоти. Спрощення до системи першого порядку ґрунтується на емпірично підтвердженому факті, що у більшості сушильних апаратів динаміка зміни вологості є значно повільнішою, ніж зміна температури та витрати теплоносія. Це дозволяє вважати внутрішню теплову підсистему швидко встановлюваною відносно кінетики масопереносу. У такому разі модель може бути подана у вигляді передаточної функції з одним домінуючим полюсом.

Сутність спрощення полягає у заміні багатовимірної моделі еквівалентною першорядною динамічною ланкою з запізненням. Запізнення відображає транспортні та інерційні ефекти переміщення маси цукру у сушарці та розповсюдження температурного фронту. Часова стала відповідає узагальненій інерційності процесу масопереносу та теплообміну після лінеаризації. Передавальний коефіцієнт визначається чутливістю вологості на

виході до зміни вибраного керуючого впливу. Побудова моделі здійснюється методом підбору параметрів за результатами реакції об'єкта на ступінчасту зміну вхідного сигналу чи апроксимації за найменшими квадратами.

На рисунку 3.1 подано результати моделювання процесу сушки цукру за (3.10), виконані з такими параметрами системи: $K = -0.0008 \text{ \%}/\text{Вт}$; $\tau = 600 \text{ с}$, $\theta = 120 \text{ с}$. На графіку зображено процес зміни вихідної вологості у процентах при стрибкоподібному збільшенні витрат тепла на 10%. При цьому масова витрата продукту 20 т/год,

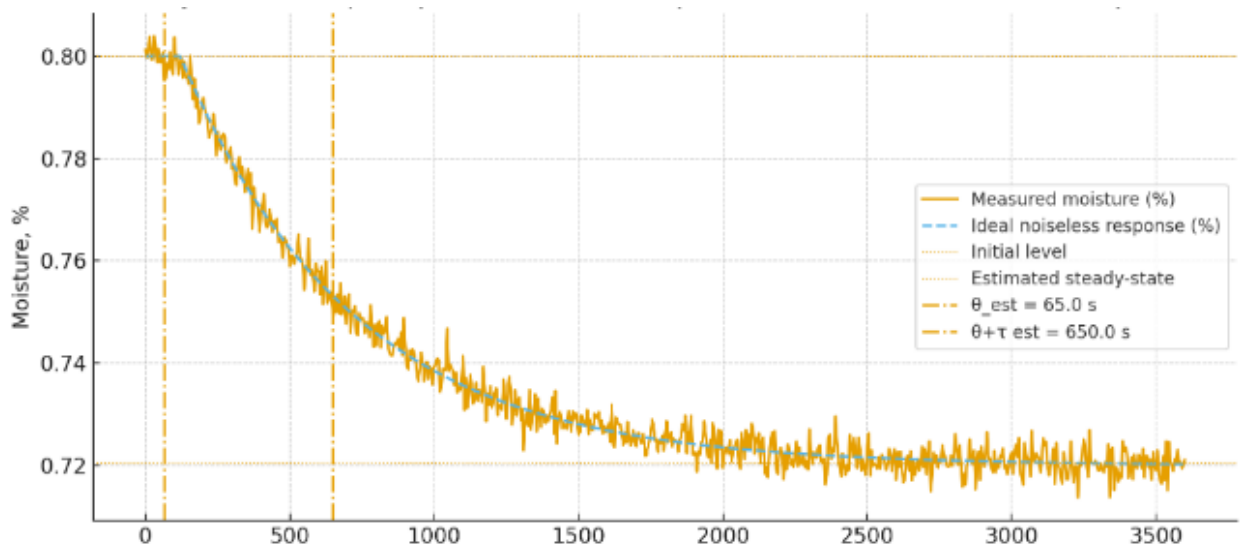


Рисунок 3.1 – Результати ідентифікації моделі процесу сушки

Отже, повна система балансових рівнянь перетворюється на компактну модель, придатну для синтезу регуляторів у системах автоматизованого керування сушінням цукру. Математичне моделювання підтверджує адекватність отриманих математичних моделей. Таке представлення узгоджується з типовою практикою промислової автоматизації, оскільки забезпечує достатню точність у робочому діапазоні та дає змогу застосовувати PID-регулятори, прогностичні стратегії на основі вхідного контролю вологості або комбіновані алгоритми керування вологою на виході сушильного апарата.

3.2 Розробка структурної схеми системи автоматизованого керування вологістю цукру

Основною метою розробки системи автоматизації є забезпечення мінімальної похибки регулювання за збурень, які виникають внаслідок коливань температури теплоносія, зміни вологості та витрати сирого цукру, нестабільності роботи барабанної сушарки. Досягнення цієї мети потребує застосування сучасних методів вимірювання вологості, ефективних алгоритмів керування – зокрема комбінованого регулювання PID + feed-forward (формування керуючої дії на основі контролю вологості на вході та виході сушильного барабану), а також інтеграції систем моніторингу енергетичних і технологічних показників.

Розробка системи автоматизованого керування включає формалізацію вимог до функціонування, побудову структурної та функціональної схем, обґрунтування вибору сенсорів та виконавчих механізмів, а також розроблення алгоритмів контролю та компенсації збурень. Важливою складовою є також використання математичної моделі сушильного процесу, що дає змогу визначити оптимальні параметри регулятора та забезпечити необхідну швидкодію, точність і стійкість системи.

Алгоритм комбінованого керування вологою цукру, що базується на поєднанні ПІД-регулятора та каналу випереджального (feed-forward) впливу, спрямований на підвищення точності підтримання кінцевої вологості за умов наявності зовнішніх збурень. Основними збурюючими факторами у процесі сушіння є зміни вологості цукру на вході в сушарку, коливання масової витрати продукту, варіації температури та витрати теплоносія. ПІД-регулятор компенсує відхилення вихідної вологості від заданого значення на основі зворотного зв'язку, тоді як канал feed-forward формує коригувальний сигнал у випереджальному режимі, зменшуючи вплив збурень ще до їх прояву на виході сушильного агрегата.

Виконавчим органом є нагнітаючий вентилятор, що продуває повітря крізь теплообмінник. Збільшення швидкості обертання вентилятора

призводить до збільшення кількості теплоти, що подається до сушильного барабану разом із повітрям, температура якого тримається сталою окремим регулятором температури повітря, що не входить до системи, що розробляється.

Таким чином завданням системи автоматизованого керування сформувати вхідну дію на частотно-регульований електропривод нагнітаючого вентилятора, яка складається із двох складових: (3.11)

$$u(t) = u_{ff}(t) + u_{fb}(t),$$

де $u_{ff}(t)$ - випереджувальна дія, що заснована на вхідному контролі вологості;

$u_{fb}(t)$ - корегувальна дія, яка формується ПД регулятором на основі контролю вологості на виході сушильного барабана.

Канал feed-forward функціонує паралельно основному контуру зворотного зв'язку та формує керуючу дію безпосередньо за виміряним значенням збурень. Основним збуренням у процесі сушіння цукру є вхідна вологість $w_{in}(t)$ та масова витрата сирого продукту $m_0(t)$. Випереджальний сигнал визначається на основі статичної чи динамічної моделі сушарки. Для статичної моделі застосовується співвідношення:

$$u_{ff}(t) = K_{ff} \cdot (W_{in}(t) - W_{ycm}), \quad (3.12)$$

де W_{ycm} - задане значення вологості цукру;

K_{ff} - коефіцієнт випереджувального каналу.

Статична модель, що здійснює керування за пропорційним законом є чутливою до різного роду шумів, тому для забезпечення стабільності системи доцільно використовувати фільтруючу ланку з передаточною функцією з деякою сталою часу T_{ff} :

$$G_{ff}(s) = \frac{K_{ff}}{T_{ff}s + 1}. \quad (3.13)$$

Також одним із найважливіших збурюючих чинників у процесі сушіння є масова витрата сирого цукру. Збільшення подачі продукту зменшує час перебування частинок у зоні сушіння та збільшує теплове навантаження на сушильний апарат, що призводить до зростання вихідної вологості. Навпаки, зменшення витрати сприяє пересушуванню продукту. Тому система керування повинна реагувати на зміну витрати не тільки через зворотний зв'язок, але й у випереджальному режимі.

Тому вихідний сигнал випереджувального каналу $u_{ff}(t)$ мусить містити також складову, що залежить від поточної масової витрати:

$$u_{ff\,m}(t) = K_{ff\,m} \cdot (m_0(t) - m_{0\,yct}), \quad (3.14)$$

де $m_{0\,yct}$ - номінальна витрата продукту, на яку налаштовано сушильний режим;

$m_0(t)$ - фактична миттєва масова витрата продукту;

$K_{ff\,m}$ - коефіцієнт випереджувальної компенсації каналу.

В динамічному режимі складова сигналу, що реагує на масову витрату продукту, формується на основі сигналу витратоміра шляхом проходження передаточної функції:

$$G_{ff\,m}(s) = \frac{K_{ff\,m}}{T_{ff\,m}s + 1}, \quad (3.15)$$

де $T_{ff\,m}$ - стала часу масової складової випереджувального регулятора.

Робота ПІД-регулятора ґрунтується на зворотному зв'язку на основі вихідного контролю вологості. У такому регуляторі за поточною різницею між заданою та фактичною вологістю цукру

$$e(t) = W_{out}(t) - W_{yct}$$

безперервно обчислюються три складових: пропорційна, інтегральна та диференціальна. Пропорційна складова забезпечує миттєву реакцію на відхилення вологості, інтегральна накопичує похибку й усуває статичне відхилення, а диференціальна компенсує швидкі зміни та запобігає

перевищенню заданого рівня. Сумарний сигнал ПІД-регулятора $u_{fb}(t)$ розраховується відповідно до виразу:

$$u_{fb}(t) = K_{fbP} \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) \cdot d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (3.16)$$

Отримані співвідношення (3.11-3.16), що характеризують роботу регулятора вологості, дозволяють розробити структурну схему системи автоматизованого керування вологістю цукру, яку подано на рис. 3.2.

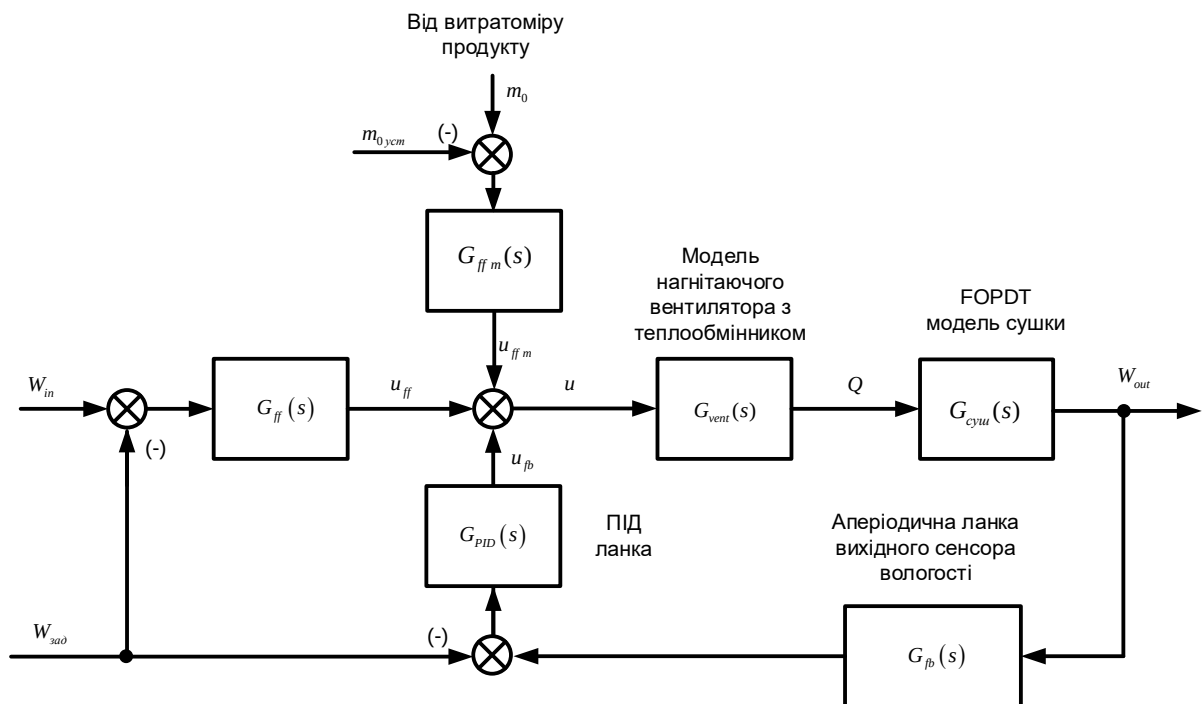


Рисунок 3.2 – Структурна схема системи автоматизованого керування процесом сушки

Розроблена структурна схема системи автоматизованого керування вологістю цукру реалізує комбіновану архітектуру PID-регулювання із зворотним зв'язком та feed-forward регулюванням за вхідною вологістю із компенсацією впливу витрати продукту. Метою системи є стабілізація вихідної вологості цукру за умов змінної подачі сировини та коливань теплової потужності сушильного обладнання.

У канал попереджувального керування (feed-forward) значення вологості вхідного продукту порівнюється з уставкою. Різниця між ними проходить

через динамічну ланку $G_{ff}(s)$, яка оцінює зміну необхідної теплової потужності для забезпечення сталого рівня сушіння за фактичним значенням вологості цукру на вході, а також враховує фактичну масову витрату продукту m_0 , виміряне витратоміром, що порівнюється з номінальною витратою $m_{0\text{ уст}}$.

Паралельно із цим працює зворотній зв'язок за вихідною вологістю на основі ПІД-регулятора. Бажане значення вологості $W_{\text{зад}}$ порівнюється з виміряною вихідною вологістю W_{out} після проходження через аперіодичну ланку сенсора. Результат порівняння надходить до ПІД-регулятора, який формує керуючий сигнал u_{fb} відповідно до відхилення вологості від заданої траєкторії.

Сумарний керуючий вплив u надходить до моделі виконавчої частини $G_{\text{vent}}(s)$, що визначає фактичну теплову потужність Q , яка подається на сушильну установку. Цей блок імітує динаміку реального приводу вентилятора і теплової інерційності теплообмінника. У загальному вигляді його можна описати аперіодичною ланкою з певними коефіцієнтом передачі та сталою часу. Динаміка сушарки описується FOPDT-моделлю $G_{\text{суш}}(s)$, що враховує інерційність тепломасообмінних процесів і запізнення у реакції на зміну теплового навантаження.

Таким чином, система поєднує швидке реагування на збурення у вигляді зміни подачі сировини за рахунок feed-forward каналу та точне коригування вихідної вологості завдяки ПІД-регулюванню. Така структура забезпечує підвищену стабільність процесу сушіння та мінімізує коливання вологості готового цукру при широкому діапазоні режимів роботи установки.

3.3 Розрахунок параметрів регулятора системи керування вологістю цукру

Для розрахунку параметрів регулятора системи керування обрано метод Internal Model Control (IMC), що є однією з найбільш усталених та теоретично обґрунтованих методологій налаштування регуляторів у системах автоматичного керування та опирається на використання внутрішньої математичної моделі об'єкта. Ключова ідея полягає у тому, що регулятор формують як певну апроксимацію оберненої моделі технологічного процесу, що дозволяє досягти передбачуваної динаміки замкненого контуру. Зважаючи на те, що пряма інверсія реальних промислових процесів часто є неможливою через нестійкість, наявність запізнень або незворотності елементів, IMC включає стабілізуючий фільтр низьких частот. Саме завдяки цій комбінації метод забезпечує високу робастність до невизначеностей моделей і чутливість до збурень.

Метод IMC передбачає наявність математичного опису об'єкта, зазвичай у вигляді моделі першого порядку з запізненням (FOPDT), що є типовим для апаратів, у яких переважають тепло-масообмінні процеси. Перехід до структури, еквівалентної класичному PID-регулятору, здійснюється через алгебраїчне перетворення IMC-регулятора шляхом виділення пропорційної, інтегральної та диференціальної складових. У результаті отримуються вирази для коефіцієнтів регулятора, які залежать від статичного коефіцієнта підсилення об'єкта, його часової сталої та тривалості мертвого часу. Єдиним настроювальним параметром методу є величина λ , що визначає бажану «повільність» або «агресивність» сприйняття системою змін завдання і збурень. Чим меншим є цей параметр, тим швидше реагує система, однак за рахунок потенційного зниження запасів стійкості; збільшення λ сприяє більш згладженим, але повільнішим перехідним процесам.

Особливе значення IMC має для процесів сушіння цукру, оскільки вони характеризуються високою інерційністю, суттєвими часовими запізненнями та зовнішніми впливами, зокрема коливаннями вхідної вологості або змінами

масової витрати продукту. Врахування внутрішньої моделі забезпечує здатність системи компенсувати ці фактори та мінімізувати відхилення від заданої вологості продукції. Таким чином, ІМС виступає ефективним інструментом побудови надійних систем керування, здатних працювати в умовах технологічної невизначеності та параметричних змін, що є важливою вимогою для стабільного функціонування сушильних агрегатів у цукровому виробництві.

Для ІМС-підходу потрібно задатись параметром «жорсткості» λ (фільтра ІМС). Вибираємо помірно агресивний режим:

$$\lambda=0.2 \quad \tau=0.2 \cdot 585=117 \text{ с.}$$

Формули ІМС для розрахунку пропорційної складової K_c та сталої часу інтегральної складових T_i регулятора PI (стандартний варіант для FOPDT):

$$K_c = \frac{\tau}{K(\lambda + \theta)}, \quad T_i = \tau. \quad (3.17)$$

З урахуванням даних моделі розрахованої у 3.1:

$$K_c = \frac{585}{-0.007966(117 + 65)} = -403.8$$

$$T_i = 585 \text{ с.}$$

Диференційну складову не застосовуємо, оскільки шуми у вимірюванні вологості можуть призводити до надмірних збурень та виникненні небажаних коливальних режимів.

Для розрахунку статичного коефіцієнту Feed-forward по вхідній вологості початковий підхід базується на лінійній статичній апроксимації:

$$W_{out} \approx W_{in} + K u$$

Тому статична чутливість виходу по вхідній вологості $\frac{dW_{out}}{dW_{in}} \approx 1$. Щоб компенсувати зміну W_{in} feed-forward-ом, необхідно вибрати коефіцієнт:

$$K_{ffw} = \frac{1}{K} = 125,55. \quad (3.18)$$

Оцінити статичну чутливість вихідної вологості до зміни витрати продукту $G_d(0) = \frac{\partial W}{\partial m}$ на робочій точці і обчислити feed-forward коефіцієнт як:

$$K_{ff\ m_0} = \frac{G_d(0)}{G(0)} = \frac{\partial W / \partial m_0}{K}. \quad (3.19)$$

Оцінити $\frac{\partial W}{\partial m}$ можна з певних енергетичних співвідношень, що характеризують процес сушки, та підібрати емпіричним способом. Припустімо, що збільшення витрати продукту на 20% за сталого тепломасобміну, зменшить вологість на 0,02%. У такому разі:

$$\frac{\partial W}{\partial m} = \frac{0.02\%}{0.2 \cdot 20\ \text{т} / \text{год}} = \frac{0.02\%}{0.2 \cdot 5,556\ \text{кг} / \text{с}} \approx 0,018\% / \text{кг} / \text{с}.$$

Тоді за 3.19:

$$K_{ff\ m_0} = \frac{0,018\% / \text{кг} / \text{с}}{-0,007966} = 2,26\% / \text{кг} / \text{с}.$$

Сталі часу попередніх регуляторів обираються із співвідношення:

$$T_{ff} = 0,2..0,7\tau \quad (3.20)$$

та налаштовуються дослідним шляхом.

На рисунку 3.4 подано результати моделювання замкнутої системи керування вологістю цукру за наступних вхідних даних:

- задане значення вологості 0,05%;
- значення вологості цукру на вході сушки знаходиться у діапазоні 0,8..1.0%;
- значення вихідної вологості на початку моделювання 0,09 %;
- масова витрата продукту на початку моделювання складає 20 т/год;
- через 20 хв від початку моделювання витрата цукру зросло на 10 % (третя система координат)

Вихідна дія регулятора у вигляді сигналу на виконавчий механізм подана у другій системі координат у вигляді трьох кривих: вихід ПД- регулятора, вихід попереднього регулятора за вхідною вологістю та сумарну вихідну дію.

Отримані часові залежності демонструють ефективність поєднання PID-регулятора та feed-forward компенсації в задачі стабілізації вихідної вологості цукру за умов інерційної FOPDT-динаміки сушарки та наявності суттєвих збурень. Після початкового переходу система швидко зменшує вологість продукту до заданого рівня 0.05% і забезпечує практично аперіодичний характер перехідного процесу без коливань та перерегулювання. Це свідчить про коректно підібрані параметри регулятора та достатні запаси стійкості.

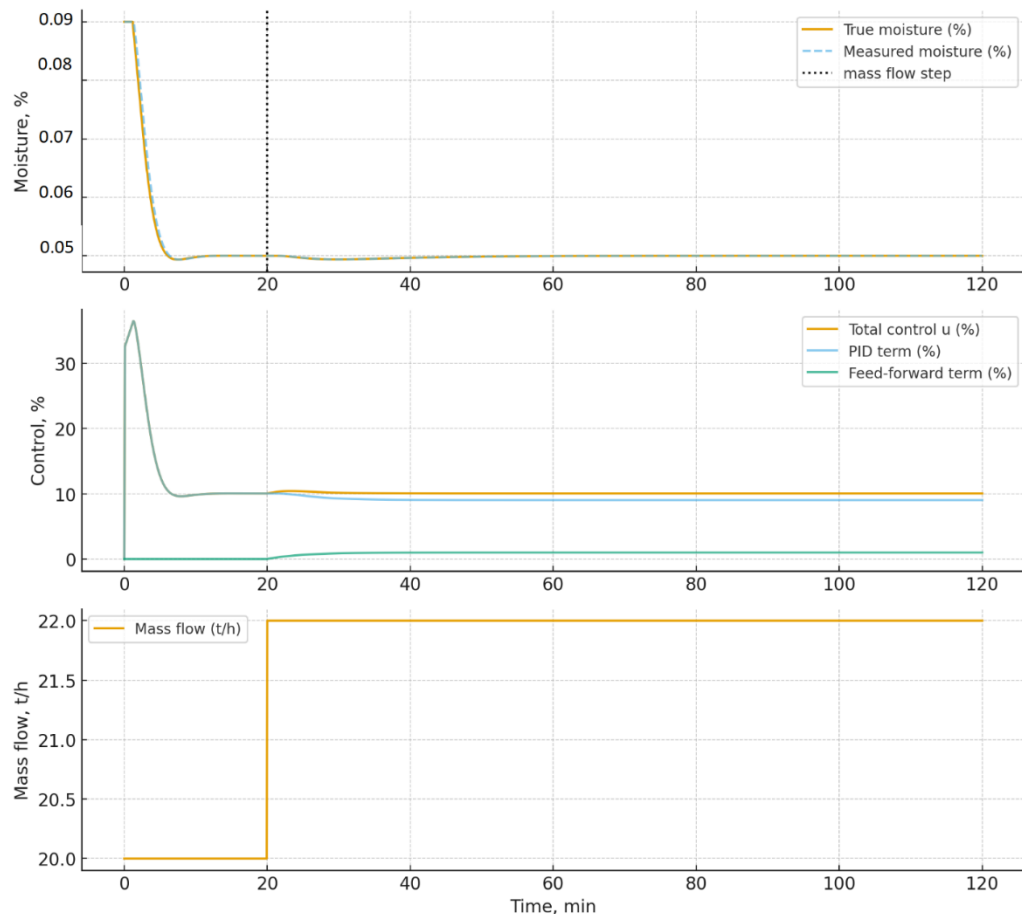


Рисунок 3.4 – Результати моделювання замкнутої системи керування вологістю цукру

На етапі зміни масової витрати з 20 до 22 т/год (на 20-й хвилині) характер реакції показує, що вихідна вологість практично не змінюється, що відповідає очікуваному поведінковій системи із правильно реалізованою feed-forward гілкою. Компенсаційний сигнал, обчислений на основі моделі впливу масової витрати на теплообмін у сушарці, забезпечує миттєве коригування керуючої дії ще до того, як збурення починає впливати на саму вологість. Це добре видно з поділу сигналів керування: feed-forward компонент реагує на зміну масової

витрати, тоді як PID-компонент залишається малим, компенсуючи лише залишкову похибку, що підтверджує низьке навантаження на контур зворотного зв'язку.

Ступінь відхилення вологості після збурення є мінімальним, а повернення до заданого значення — плавним і без сплесків, що свідчить про достатній запас системи. Час виходу на усталений режим залишається таким же, як і до збурення, що додатково підкреслює правильність обраного значення внутрішнього параметра налаштування λ у методі IMC-tuning.

Загалом результати моделювання демонструють, що запропонована структура керування є придатною для реальних умов сушіння цукру. Вона забезпечує стабілізацію вологості на рівні технологічної норми, ефективно компенсує зміни масової витрати та зменшує коливання в об'єкті з великою інерційністю та запізненням. Таке керування здатне суттєво покращити сталість якості готового продукту та зменшити енергетичні втрати завдяки мінімізації надлишкового нагріву й потреби в частому перерегулюванні.

Висновки:

1. Розроблено математичні моделі процеси сушки цукру та проведено їх лінеаризацію в околі робочої точки. Встановлено, що процес сушки досить адекватно описується аперіодичною ланкою із запізненням.
2. Розроблено систему автоматизованого керування вологістю цукру на основі математичної моделі процесу сушіння та ємнісного вимірювального каналу.
3. Синтез і розрахунок параметрів регулятора показали, що система забезпечує стабілізацію вихідної вологості цукру в межах 0,03–0,05 % за зміни вхідної вологості сирого цукру в діапазоні 0,3–1,5 %.
4. Отримані динамічні характеристики підтверджують зменшення коливань керованої величини та підвищення стійкості процесу сушіння, що створює умови для зниження енерговитрат і забезпечення стабільної якості готового продукту.

4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ТА КЕРУВАННЯ ВОЛОГІСТЮ ЦУКРУ З ЄМНІСНИМИ СЕНСОРАМИ

Техніко-економічне обґрунтування є ключовим етапом оцінки доцільності впровадження системи автоматизованого контролю та керування вологістю цукру з ємнісними сенсорами. Воно дозволяє визначити економічні переваги, технологічні вигоди та очікуваний ефект від модернізації систем керування технологічними процесами сушки цукру. Запропонована система автоматизації спрямована на підвищення енергоефективності, забезпечення стабільного функціонування ланки безперервного виробництва підприємства цукрової галузі, оптимізацію режимів роботи сушильного відділення, а також мінімізацію втрат електроенергії та експлуатаційних витрат. Виконання техніко-економічних розрахунків дає змогу обґрунтувати економічну доцільність впровадження та визначити очікуваний фінансовий результат для підприємства.

4.1 Технічне обґрунтування вибору складових системи автоматизованого контролю та керування вологістю цукру з ємнісними сенсорами

Вибір апаратних і програмних засобів для розробки системи автоматизованого контролю та керування (САКК) вологістю цукру є критичним етапом, що вимагає ретельного технічного й економічного обґрунтування. Цей процес базується на досягненні оптимального балансу між необхідною точністю, швидкодією, надійністю та економічною доцільністю в умовах промислової експлуатації.

4.1.1 Обґрунтування вибору первинного вимірювального перетворювача

Основний вибір було зроблено на користь ємнісного сенсора як первинного вимірювального перетворювача. Таке рішення пояснюється тим,

що вологість сипких діелектричних матеріалів, зокрема цукру, безпосередньо корелює зі зміною відносної діелектричної проникності середовища. Порівняно з кондуктометричними або інфрачервоними методами, ємнісний метод демонструє **високу чутливість** до малих змін вмісту води та є менш чутливим до кольору продукту чи його дисперсного складу. Конструктивне рішення сенсора орієнтоване на інтеграцію у технологічне обладнання (бункери або трубопроводи) і передбачає використання стійких до корозії та харчової безпеки матеріалів, як-от нержавіюча сталь, для робочих електродів. Це забезпечує надійність вимірювань та мінімізацію впливу технологічних чинників, таких як механічні навантаження.

Параметричний ємнісний вимірювальний перетворювач, для якого розроблено функцію перетворення, що однозначно пов'язує вихідну електричну величину ємність C плоского конденсатора з вхідною неелектричною величиною вологістю цукру W , яка опосередковано впливає на зміни діелектричної проникності ϵ цукру.

Швидкодія (140 мкс) пропонованого ємнісного сенсора, що реалізує діелькометричний метод, дозволяє реалізовувати на його основі мікропроцесорні пристрої вимірювального контролю вологості цукру в режимі реального часу.

4.1.2 Вибір параметрів вимірювального каналу вологості на основі ємнісного сенсора

Вибір архітектури вимірювального каналу, заснованого на перетворенні ємності у часовий інтервал, що забезпечує високу точність та стійкість до завад. Цей підхід ефективно перетворює малу зміну ємності ємнісного сенсора, яка корелює з вологістю цукру, у тривалість імпульсу або період частоти, що легко вимірюється цифровими засобами.

Співвідношення між ємністю сенсора та часом описується виразом, де часовий інтервал є прямо пропорційний вимірювальній ємності ємнісного сенсора, що забезпечує високу лінійність вимірювального каналу. Крім того,

такий підхід значно підвищує завадостійкість, оскільки часові інтервали вимірюються лічильниками, які є менш чутливими до амплітудних шумів та коливань напруги живлення порівняно з аналоговими схемами.

Важливим параметром є роздільна здатність часового інтервалу та відповідна йому тривалість вимірювання. Межі вимірювання такого вимірювального каналу обмежуються необхідною точністю та розрядністю двійкового лічильника.

Цифрова частина каналу реалізована на базі високошвидкісного мікроконтролера, повинна мати вбудовані лічильники з високою розрядністю. Після вимірювання часового інтервалу, застосовується алгоритмічна корекція, зокрема, температурна компенсація, оскільки цукру та параметри електронної схеми є чутливими до температури. Використання цифрових алгоритмів фільтрації згладжує випадкові помилки лічби та підвищує надійність кінцевого значення вологості.

4.1.3 Вибір структури системи керування вологістю цукру

Процес розробки ефективної системи автоматизованого керування (САК) вологістю цукру вимагає систематичного підходу, починаючи з формалізації функціональних та технічних вимог. Цей етап включає не лише визначення архітектурних рішень (побудова структурної та функціональної схем), а й ретельне технічне обґрунтування вибору ключових елементів: високочутливих сенсорів вологості (зокрема, ємнісних) та виконавчих механізмів.

Для досягнення високої точності підтримання кінцевої вологості в умовах динамічних змін технологічних параметрів застосовується комбінований алгоритм керування. Цей підхід інтегрує традиційний ПІД-регулятор (на основі зворотного зв'язку) з каналом випереджального керування (feed-forward).

Основною метою є ефективна компенсація ключових збурюючих факторів сушильного процесу, до яких належать:

- Коливання вхідної вологості цукру.
- Зміни масової витрати продукту.
- Варіації параметрів теплоносія (температура, витрата).

У цій схемі ПД-регулятор виконує функцію корекції за відхиленням, усуваючи помилки, що виникають на виході. Натомість, канал feed-forward відстежує збурення на вході (наприклад, зміну вхідної вологості) і генерує коригувальний вплив випереджально, що дозволяє мінімізувати або повністю запобігти прояву цих збурень на кінцевому продукті.

Роль виконавчого органу в системі покладено на нагнітаючий вентилятор, що забезпечує подачу повітря крізь теплообмінник до сушильного барабана. Використання частотно регульованого електричного приводу дозволяє регулювати швидкість обертання вентилятора, а отже, і кількість теплової енергії, що надходить до сушильного агрегата. Важливо зазначити, що температура цього повітря підтримується на сталому рівні за допомогою окремого, незалежного регулятора, який не входить до складу розроблюваної системи керування вологістю. Таким чином, швидкість вентилятора є єдиним керуючим впливом, що визначає інтенсивність процесу сушіння.

4.2 Економічне обґрунтування вибору складових системи керування вологістю цукру сушильного відділення цукрового заводу

4.2.1 Визначення капітальних вкладень

Вартість кожного із елементів системи керування вологістю цукру сушильного відділення цукрового заводу представлені в таблиці 4.1.

Для визначення капітальних вкладень потрібно до загальної вартості обладнання додати також і вартість його доставки, монтаж цього обладнання та витрати на будівництво. А також потрібно розрахувати амортизаційні відрахування.

Вартість доставки обладнання розраховуються в залежності від відстані, маси вантажу та тарифу залізничного перевезення на відстань одного кілометра тони вантажу. Монтажні роботи розраховуються відповідно до

нормативів вартості монтажних робіт. Спрощуючи розрахунок, вартість доставки та монтажних робіт, можна прийняти рівними 13% від загальної вартості обладнання:

$$C_{\text{дм}} = C_{\Sigma} \cdot 0,13 \text{ (грн.)}, \quad (4.1)$$

$$C_{\text{дм}} = 152550 \cdot 0,13 = 19\,831,5 \text{ (грн.)}.$$

Таблиця 4.1 – Кошторис капіталовкладень

Елементи системи контролю та керування вологістю цукру	Ціна, грн.
Первинний ємнісний вимірювальний перетворювач маси	16000
Вимірювальний перетворювач ємності в часовий інтервал для реалізації гравірометричного методу	6000
Первинний ємнісний вимірювальний перетворювач вологості	37000
Вимірювальний перетворювач ємності в часовий інтервал для реалізації перетворення вологості/діелектрична проникність	6000
Вимірювальний канал часового інтервалу (2 шт)	10000
Щитові електричні апарати (автоматичні вимикачі, проміжні реле)	16800
Блоки гальванічної розв'язки аналогових сигналів (2 шт)	13200
Мережеве обладнання	24500
Блок живлення 24 В	4350
Кабельно-провідникова продукція	14500
Корпуси для комутації кіл керування (2 шт)	400
Шафа металева 400×500×200 — 1 шт.	3800
Загальна вартість	152550
Транспортні витрати та монтажні витрати (13%)	1831,5
Витрати на будівельні роботи (10%)	15255
Капітальні витрати (інвестиції)	187636,5

Витрати на будівельні роботи (влаштування фундаментів) розраховують виходячи із нормативів витрат на будівництво. Даний норматив для укрупнення розрахунку приймається рівним 10% від вартості обладнання:

$$C_B = C_\Sigma \cdot 0,1 \text{ (грн.)}, \quad (4.2)$$

$$C_B = 152550 \cdot 0,1 = 15\,255 \text{ (грн.)}.$$

Амортизаційні відрахування знаходяться із добутку норми амортизації на первісну вартість об'єкту основних фондів:

$$A_p = \frac{C_\Sigma \cdot H_A}{100\%}, \quad (4.3)$$

де H_A – норма амортизації (при умові, що термін експлуатації системи автоматизованого контролю та керування прийmemo за 10 років норма амортизації буде рівною 10%)

$$A_p = \frac{152550 \cdot 10\%}{100\%} = 15\,255 \text{ (грн.)}.$$

4.2.2 Розрахунок заробітної плати обслуговуючого персоналу

Відповідно до штатного розкладу підприємств цукрової галузі ситему керування технологічним процесом, частиною якого є пропонована розробка, має обслуговувати працівник, у якого розряд не нижче четвертого а група допуску по електробезпеці не нижче третьої.

Розрахунок витрат на заробітну плату обслуговуючого персоналу виконується за наступною формулою:

$$C_3 = C_{30} + C_{3д}, \quad (4.4)$$

де C_{30} – основна заробітна плата по тарифу;

$C_{3д}$ – додаткова заробітна плата.

$$C_{30} = N \cdot T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{ef}} \cdot K_C \cdot \beta, \quad (4.5)$$

де N – кількість робітників які обслуговують автоматизовану систему контролю та керування вологістю цукру ($N = 1$ чол.);

T_1 – годинна тарифна ставка робітника першого розряду ($T_1 = 60$ грн.);

K – тарифний коефіцієнт (для робітника четвертого розряду: $K = 2,03$. Із таблиці 4.2);

K_C – коефіцієнт співвідношень, що встановлений Генеральною угодою між профспілками і урядом ($K_C = 1$);

β – відношення часу, затраченого робітником, на обслуговування установки відносно загального часу своєї роботи ($\beta = 1$);

$\Phi_{\text{еф}}$ – ефективний фонд часу обслуговування автоматизованої системи керування процесом сушки:

$$\Phi_{\text{еф}} = \varepsilon \cdot Z_{\text{РД}} \cdot Z_{\text{РЗ}} \cdot t_{\text{РЗ}}, \quad (4.6)$$

де ε – відносна тривалість увімкнення ($\varepsilon = 0,5$);

$Z_{\text{РД}}$ – кількість робочих днів за рік ($Z_{\text{РД}} = 250$ днів/рік);

$Z_{\text{РЗ}}$ – кількість робочих змін ($Z_{\text{РЗ}} = 1$);

$t_{\text{РЗ}}$ – тривалість робочої зміни ($t_{\text{РЗ}} = 1$).

Таблиця 4.2– Тарифна сітка працівників погодинної оплати праці

Тарифні розряди	I	II	III	IV	V	VI
Тарифні коефіцієнти	1	1,5	1,8	2,03	2,33	2,7

Розраховуємо ефективний фонд часу обслуговування системи автоматизованого контролю та керування вологістю цукру та основну заробітну плату по тарифу:

$$\Phi_{\text{еф}} = 0,5 \cdot 250 \cdot 1 \cdot 1 = 125 \text{ (год./рік)}.$$

$$C_{\text{зо}} = 1 \cdot 60 \cdot 2,03 \cdot 125 \cdot 1 \cdot 1 = 15225 \text{ (грн.)}.$$

Додаткова заробітна плата (премія) становить 10% від розміру основної заробітної плати і відповідно становить:

$$C_{\text{зд}} = 15225 \cdot 0,1 = 1522,5 \text{ (грн.)}.$$

В цілому загальні витрати на заробітну плату обслуговуючого персоналу автоматизованої системи контролю та керування вологістю цукру:

$$C_3 = 5583 + 558 = 16750,5 \text{ (грн.)}.$$

Виконання даних ремонтних робіт, будемо вважати, проводитиметься електромонтером шостого розряду. Відповідно до того, що є відомими кількість годин виділених на проведення ремонтних робіт основна заробітна плата працівника знаходитиметься із наступної формули:

$$C_{\text{ЗОР}} = T_1 \cdot K \cdot \Phi_{\text{ефр}} \text{ (грн.)}, \quad (4.7)$$

$$C_{\text{ЗОР}} = 60 \cdot 2,7 \cdot 216 = 34992 \text{ (грн.)}.$$

Величина додаткової заробітної плати ремонтного персоналу становить 20%, визначається високим рівнем кваліфікації працівника, який має в разі потреби ремонтувати декілька самодостатніх електромеханічних пристроїв,:

$$C_{\text{ЗДР}} = C_{\text{ЗОР}} \cdot 0,2 \text{ (грн.)}, \quad (4.8)$$

$$C_{\text{ЗДР}} = 34992 \cdot 0,2 = 6998,4 \text{ (грн.)}.$$

Відповідно витрати на оплату праці ремонтного персоналу складатимуть:

$$C_{\text{ЗР}} = C_{\text{ЗОР}} + C_{\text{ЗДР}} \text{ (грн.)}, \quad (4.9)$$

$$C_{\text{ЗР}} = 34992 + 6998,4 = 41990,4 \text{ (грн.)}.$$

Витрати на комплектуючі, запасні частини та інші елементи розраховуються відносно основної заробітної плати ремонтного персоналу, і становлять 15 % від її величини.

$$C_{\text{К}} = C_{\text{ЗОР}} \cdot 0,15 \text{ (грн.)}, \quad (4.10)$$

$$C_{\text{К}} = 34992 \cdot 0,15 = 5238 \text{ (грн.)}.$$

Величина загальних річних експлуатаційних витрат розраховується наступним чином:

$$C_{\text{В}} = A_{\text{Р}} + C_{\text{З}} + C_{\text{ЗР}} + C_{\text{К}} \text{ (грн.)}, \quad (4.11)$$

$$C_{\text{В}} = 15255 + 16750 + 41990 + 5238 = 79233 \text{ (грн.)}$$

4.3 Розрахунок терміну окупності автоматизованої системи керування

Основний економічний ефект від впровадження системи контролю та керування вологістю цукру в технологічному процесі сушки полягає у зменшенні споживання електричної енергії та пару внаслідок використання частотно-регульованого електропривода нагнітаючого вентилятора, що точно визначає необхідну кількість тепла для сушки за розробленими в попередніх розділах алгоритмах. Крім того економічний ефект полягає в збільшенні надійності роботи однієї ланки безперервного виробництва цукру, що призводить до зменшення часу простоїв обладнання сушильного відділення та й усього технологічного процесу виробництва цукру. Основні фінансові вигоди від застосування запропонованої системи зведено до таблиці 4.4

Таблиця 4.4 – Фінансові показники системи контролю та керування вологістю

Очікуване зменшення споживання електричної енергії за сезон виробництва, кВт*год	6000
Середня собівартість виробництва електричної енергії ТЕЦ цукрового заводу, грн	4,68
Очікуване зменшення витрат на електроенергію за виробничий сезон, грн	$6000 \cdot 4.68 = 28080$
Очікуване зменшення витрати пару за сезон виробництва, т	25
Середня собівартість виробництва пару на ТЕЦ цукрового заводу, грн	2060
Очікуване зменшення витрати пару за виробничий сезон, грн	$25 \cdot 2060 = 51500$
Очікуване зменшення витрат через простої, грн	50 000
Сукупне зменшення витрат на виконання технологічного процесу, грн	129 580

Таким чином, в результаті проведеного розрахунку, було отримано фінансову вигоду від впровадження запропонованої системи, що полягає в зекономлених коштах, що можна розцінювати як прибуток, який складає:

$$Ц_{\Sigma} = 129\ 580 (\text{грн.}).$$

Термін окупності впровадження системи керування вологістю цукру сушильного відділення цукрового заводу розраховуємо за виразом:

$$T_{\text{OK}} = \frac{C_{\Sigma} + C_{\text{ДМ}} + C_{\text{Б}}}{Ц_{\Sigma} - C_{\text{В}}} \quad (4.12)$$

$$T_{\text{OK}} = \frac{152\,550 + 719\,831,5 + 15\,255}{129\,580 - 79\,233} = \frac{187\,636,5}{50\,347} = 3,7 \text{ (роки)}.$$

Висновки: Підсумовуючи результати розрахунків, можна зробити висновок, що розроблена система контролю та керування вологістю цукру з ємнісними сенсорами сушильного відділення цукрового заводу, з урахуванням усіх витрат на її впровадження, монтаж та налаштування, забезпечує повну окупність інвестицій протягом приблизно 3,7 року.

Такий показник досягається завдяки ефективному використанню електричної енергії виконавчих механізмів та теплової енергії пару, а також зниженню втрат внаслідок зменшення простоїв при збільшенні надійності системи.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

В цьому розділі розроблені заходи з охорони праці під час експлуатації системи автоматизованого контролю та керування вологість цукру. Шкідливі виробничі фактори, що впливають на електротехнічний оперативно-ремонтний персонал підприємства, який обслуговує систему автоматизованого керування технологічним процесом сушки цукру [19, 20]:

фізичні фактори: мікроклімат (температура, вологість, швидкість руху повітря, інфрачервоне випромінювання); виробничий шум, ультразвук, інфразвук; вібрація (локальна, загальна); освітлення: природне (недостатність), штучне (недостатня освітленість, прямий і відбитий сліпучий відблиск тощо);

хімічні фактори: речовини хімічного походження, аерозолі фіброгенної дії (пил);

фактори трудового процесу: важкість (тяжкість) праці; напруженість праці. Важкість праці характеризується рівнем загальних енергозатрат організму або фізичним динамічним навантаженням, масою вантажу, що піднімається і переміщується, загальною кількістю стереотипних робочих рухів, величиною статичного навантаження, робочою позою, переміщенням у просторі. Напруженість праці характеризують: інтелектуальні, сенсорні, емоційні навантаження, ступінь монотонності навантажень, режим роботи.

5.1 Технічні рішення з безпечної експлуатації об'єкту

Технічні рішення з безпечної організації робочих місць

Під час монтажу та обслуговування електричного обладнання цукрового заводу, зокрема системи автоматизованого контролю та керування вологість цукру потрібно вживати заходів із запобігання впливу на працівників визначених вище небезпечних і шкідливих виробничих факторів. За наявності цих факторів, безпека праці під час монтажу та обслуговування електричного

обладнання підприємства повинна відповідати вимогам та заходам безпеки, що зазначені в нормативно-правовій документації з охорони праці, зокрема під час виконання робіт: в діючих електроустановках; на висоті; з застосуванням електроінструменту; зварюванні тощо.

Особливу увагу потрібно приділяти убезпеченню працівників під час виконання робіт в діючих електроустановках, якою є система автоматизованого контролю та керування вологістю цукру. Найбільш ефективним засобом захисту працівників є встановлення заземлень. Встановлювати заземлення на струмопровідні частини необхідно безпосередньо після перевірки відсутності напруги.

Переносні заземлення спочатку треба приєднати до заземлювального пристрою, а потім, після перевірки відсутності напруги, встановити на струмопровідні частини. Знімати переносне заземлення необхідно в зворотній послідовності: спочатку зняти його зі струмопровідних частин, а потім від заземлювального пристрою.

Встановлення та зняття переносних заземлень слід виконувати в діелектричних рукавичках із застосуванням в електроустановках понад 1000 В ізолювальної штанги. Закріплювати затискачі переносних заземлень слід цією ж штангою або безпосередньо руками в діелектричних рукавичках. Забороняється користуватися для заземлення провідниками, не призначеними для цього, а також приєднувати заземлення за допомогою скручування.

В електроустановках понад 1000 В (підстанції 10/0,4 кВ) заземлювати слід струмопровідні частини всіх фаз (полюсів) відключеної для робіт ділянки з усіх боків, з яких може бути подана напруга, за винятком відключених для робіт збірних шин, на які достатньо встановити одне заземлення. Під час робіт на відключеному лінійному роз'єднувачі на проводи спусків з боку ПЛ, незалежно від наявності заземлювальних ножів, має бути встановлене таке додаткове заземлення, яке не порушується під час виконання операцій з роз'єднувачем.

Заземлені струмопровідні частини мають бути відокремлені від

струмопровідних частин, що перебувають під напругою, видимим розривом (вимкненими вимикачами, роз'єднувачами, відокремлювачами або вимикачами навантаження, знятими запобіжниками, демонтованими шинами або проводами). Безпосередньо на робочому місці заземлення додатково встановлюється в тих випадках, коли ці частини можуть опинитися під наведеною напругою (потенціалом), яка може викликати ураження струмом, або коли на них може бути подана напруга понад 42 В змінного і 110 В постійного струму від стороннього джерела.

В електроустановках, конструкція яких така, що встановлення заземлень небезпечне (наприклад, в деяких розподільчих шафах, КРУ окремих типів, збірках з вертикальним розташуванням фаз), під час підготовки робочого місця слід вжити додаткових заходів безпеки, що перешкоджають помилковому поданню напруги до місця роботи: приводи і вимкнені апарати замикаються на замок; на ножі або верхні контакти роз'єднувачів рубильників, автоматів тощо встановлюються гумові ковпаки або спеціальні накладки з ізоляційних матеріалів; запобіжники, ввімкнені послідовно з комутаційними апаратами, знімаються. Ці технічні заходи мають бути вказані в місцевій інструкції з експлуатації. В разі неможливості вжиття зазначених додаткових заходів мають бути від'єднані кінці лінії живлення – в РУ, на щиті, збірці або безпосередньо на місці роботи. Список таких електроустановок визначається і затверджується особою, відповідальною за електрогосподарство.

Встановлення заземлення не потрібне під час роботи на електроустаткуванні, якщо від нього з усіх боків від'єднані шини, проводи та кабелі, якими може бути подана напруга; якщо на нього не може бути подана напруга зворотною трансформацією або від стороннього джерела і за умови, що на цьому устаткуванні не наводиться напруга. Кінці від'єднаних кабелів в цьому разі мають бути замкнені накоротко і заземлені.

Під час робіт в РУ встановлювати заземлення на протилежних кінцях ліній, що живлять це РУ, не потрібно, крім випадків, коли під час проведення робіт необхідно знімати заземлення з виводів ліній.

В електроустановках до 1000 В під час робіт на збірних шинах РУ, щитів, збірок напруга з шин має бути знята і шини (за винятком шин, що виконані ізолюваним проводом) мають бути заземленими. Необхідність і можливість встановлення заземлення на приєднання цих РУ, щитів, збірок і підключеного до них устаткування визначає особа, яка видає наряд (розпорядження). В електроустановках напругою до 1000 В всі операції зі встановлення і зняття заземлень дозволяється виконувати одній особі з групою III з числа оперативних чи оперативно-ремонтних працівників. Встановлення переносних заземлень у цьому випадку проводиться з землі за умови застосування спеціальної ізолювальної штанги, якою можна не тільки встановлювати, але і закріплювати ці заземлення.

Допускається тимчасове зняття заземлень, встановлених під час підготовки робочого місця, якщо це вимагається характером робіт, що виконуються. Тимчасове зняття і повторне встановлення заземлень виконується оперативним працівником чи (під його наглядом) членом бригади з групою III. Дозвіл на тимчасове зняття заземлень, а також на виконання цих операцій керівником робіт, слід обумовлювати в рядку наряду «Окремі вказівки» з записом про те, де і з якою метою мають бути зняті заземлення.

Електробезпека

Живлення силового обладнання, яке використовується для виконання робіт з модернізації, та системи освітлення здійснюється від чотирьохпровідної трифазної мережі 380 х 220В (фазна напруга (фаза – "0") – 220В, а міжфазна лінійна (фаза – фаза) – 380В). Категорія умов по небезпеці електротравматизму – підвищеної небезпеки, у зв'язку з наявністю у цехах підвищеної вологості.

Технічні рішення щодо запобігання електротравмам [21, 22]:

1) Для запобігання електротравм від контакту з нормально-струмопровідними елементами електроустаткування, необхідно: розміщувати неізольовані струмопровідні елементи в окремих приміщеннях з обмеженим

доступом, у металевих шафах; використовувати засоби орієнтації в електроустаткуванні - написи, таблички, попереджувальні знаки; підвід кабелів до споживачів здійснювати у закритих конструкціях підлоги;

2) При живленні однофазних споживачів струму від трипровідної мережі при напрузі до 1000 В використовується нульовий захисний провідник. При його використанні пробій на корпус призводить до КЗ. Спрацьовує захист від КЗ і пошкоджений споживач відключається від мережі.

Згідно з вимогами нормативів, повинна бути забезпечена необхідна кратність струму К.З. залежно від типу запобіжного пристрою, повинна бути забезпечена цілісність нульового захисного провідника.

3) Електрозахисні засоби захисту

Персонал, який обслуговує електроустановки, повинен бути забезпечений випробуваними засобами захисту. Перед застосуванням засобів захисту персонал зобов'язаний перевірити їх справність, відсутність зовнішніх пошкоджень, очистити і протерти від пилу, перевірити за штампом дату наступної перевірки. Користуватися засобами захисту, термін придатності яких вийшов, забороняється.

Використовуються основні та допоміжні електрозахисні засоби. Основними електрозахисними засобами називаються засоби, ізоляція яких тривалий час витримує робочу напругу, що дозволяє дотикатися до струмопровідних частин, які знаходяться під напругою. До них відносяться (до 1000В): ізолювальні штанги; ізолювальні та струмовимірювальні кліщі; покажчики напруги; діелектричні рукавиці; слюсарно-монтажний інструмент з ізольованими ручками.

Додатковими електрозахисними засобами називаються засоби, які захищають персонал від напруги дотику, напруги кроку та попереджають персонал про можливість помилкових дій. До них відносяться (до 1000 В): діелектричні калоші; діелектричні килимки; переносні заземлення; ізолювальні накладки і підставки; захисні пристрої; плакати і знаки безпеки.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці і виробничої санітарії

Мікроклімат

Для забезпечення нормального мікроклімату в робочій зоні [24] встановлюють допустиму температуру, відносну вологість і швидкість руху повітря у певних діапазонах в залежності від періоду року та категорії робіт і допустиму інтенсивність опромінення. Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Нормовані параметри мікроклімату в робочій зоні з категорією робіт Па.

Період року	Категорія робіт	Допустимі		
		t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	Середньої важкості Па	18-27	65 при 26°C	0,2-0,4
Холодний		17-23	До 75%	не більше 0,3

Для забезпечення необхідних за нормативами параметрів мікроклімату проектом передбачено [24]:

Температура внутрішніх поверхонь будівельних конструкцій робочої зони і зовнішніх поверхонь обладнання при забезпеченні допустимих параметрів мікроклімату не повинна перевищувати 2°C.

Якщо температура поверхонь вище або нижче допустимої температури повітря, то робочі місця повинні бути віддалені від них на відстань не менше 1 м.

Для забезпечення нормованих значень швидкості руху повітря проектом передбачається витяжна та припливна вентиляційні системи.

Склад повітря робочої зони

Забруднення повітря робочої зони регламентується граничнодопустимими концентраціями (ГДК) в мг/м³ [23]. Нормовані параметри забруднення повітря в робочій зоні наведено в таблиці 5.2.

Для нормалізації складу повітря робочої зони потрібно здійснювати щоденне прибирання робочого місця [25]. Нагромадження пилу глибиною в 1/8" у будь-якій області вказує на необхідність у вживанні заходів з очищення забруднених поверхонь. Потрібно підкреслити, що будь-яке нагромадження пилу може привести до загоряння. Чим дрібніше пил (менша зернистість), тим вище небезпека.

Таблиця 5.2 – Можливі забруднювачі повітря можуть і їх ГДК

Найменування речовини	ГДК, мг/куб.м		Клас небезпечності
	Максимальна разова	Середньодобова	
Оксид вуглецю		20	4
Пил нетоксичний	4	4	4

Тому необхідно здійснювати наступні заходи: очищувати металевий пил якнайчастіше, щодня протирати гарячі поверхні, при високих концентраціях пилу обробляти запилені поверхні по частинам. Низька вологість збільшує потенційну небезпеку, це повинне прийматися в увагу під час прибирання.

Виробниче освітлення

При поганому освітленні зростає потенційна небезпека помилкових дій і нещасних випадків: 5% травм можна пояснити недостатнім освітленням, а у 20% випадків воно сприяло їх появі. Погане освітлення може призвести до професійних захворювань: погіршують загальне самопочуття, зменшують фізичну і розумову працездатність.

Характеристика зорових робіт – середньої точності.

Відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 розряд зорової роботи IV, підрозряд «в». Допустимі рівні виробничого освітлення наведені в таблиці 5.3.

Для забезпечення достатнього освітлення здійснюють систематичне очищення скла та світильників від пилу (не рідше двох разів на рік), використовують жалюзі. В разі нестачі природного освітлення,

використовують загальне штучне освітленням, що створюється за допомогою світлодіодних ламп E27 LED 15W NW A60 "SG". Висота підвісу світильників над робочою поверхнею 2,5 метра.

Таблиця 5.3 – Вимоги до освітлення приміщень виробничих підприємств

Харак-ка зорової роботи	Найменший або еквівалентний розмір об'єкта розрізнення, мм	Розряд зорової роботи	Під-розряд зорової роботи	Контраст об'єкта з фоном	Характеристика фону	Штучне при системі комбінованого освітлення		Природне Ен пр	Сумісне Е сум
						всього	у т. ч. від загального		
Середньої точності	Від 0,5 до 1,0 включно	IV	в	малий середній великий	світлий середній темний	400	200	4	2,4

Світильники з світлодіодними лампами розміщують рядами; що дозволяє здійснювати їх послідовне включення (відключення) в залежності від величини природної освітленості.

Виробничий шум

Нормовані параметри виробничого шуму в робочій зоні наведено в таблиці 5.4.

Шум порушує нормальну роботу шлунку, особливо впливає на центральну нервову систему. Для забезпечення допустимих параметрів шуму в приміщенні, проектом передбачено засоби колективного захисту: акустичні, архітектурно-планувальні й організаційно-технічні.

Таблиця 5.4 – Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах з середньгеометричними частотами, Гц								
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Постійні робочі місця в промислових приміщеннях	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Засоби боротьби із шумом в залежності від числа осіб, для яких вони призначені, поділяються на засоби індивідуального захисту і на засоби колективного захисту - «ССБТ. Засоби індивідуального захисту органів слуху. Загальні технічні умови і методи випробувань» і «Засоби і методи захисту від шуму. Класифікація».

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно: безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі, стін, застосовувати підвісні звукопоглиначі; для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори.

Виробнича вібрація

У нашому цеху присутня вібрація типу – За. Тобто технологічна вібрація, яка діє на персонал цеху, або яка передається на робочі місця, не маючи джерел випромінювання. Нормовані параметри виробничої вібрації в робочій зоні наведено в таблиці 5.5.

Для зменшення дії вібрацій на працюючих проектом передбачено: динамічне погашення вібрації – приєднання до захисного об'єкту системи, реакції якої зменшують розмах вібрації об'єкта в точках приєднання системи; зміна конструктивних елементів машин; застосування засобів індивідуального захисту, а саме рукавиці, вкладиші і прокладки, віброзахисне взуття з пружнодемпферуючим низом.

Таблиця 5.5 – Допустимі рівні вібрації на постійних робочих місцях

Вид вібрації	Октавні смуги з середньгеометричними частотами, Гц									
	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000
Загальна вібрація: на постійних робочих місцях в виробничих приміщеннях	$\frac{1,3^*}{108}$	$\frac{0,45}{99}$	$\frac{0,22}{93}$	$\frac{0,2}{92}$	$\frac{0,2}{92}$	$\frac{0,2}{92}$	-	-	-	-
Локальна вібрація	-	-	$\frac{2,8}{115}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$	$\frac{1,4}{109}$

* В чисельнику середньоквадратичне значення вібрації, $\text{м/с} \cdot 10^{-2}$, в знаменнику – логарифмічні рівні вібрації, дБ.

5.3. Пожежна безпека

Пожежну безпеку промислових і інших об'єктів регламентують ССБТ «Пожежна безпека. Загальні вимоги». Типові правила пожежної безпеки для промислових підприємств і інструкції на окремих об'єктах.

Отже, більшість приміщень цукрового заводу, де встановлена система автоматизованого контролю та керування вологістю цукру, відносяться до категорії В з вибухонебезпечними зонами класу 22 – простір, в якому вибухонебезпечний зерновий пил у завислому стані може з'являтися нечасто та існувати недовго (у разі аварії).

Виробничі приміщення відносяться до категорії В (пожежонебезпечна), якщо в них наявні горючі гази, легкозаймисті, горючі і/або важкогорючі рідини, а також речовини і/або матеріали, як здатні вибухати та горіти або тільки горіти під час взаємодії з водою, киснем повітря і/або один з одним; тверді горючі і/або важкогорючі речовини та матеріали (включно горючий пил і/або волокна), за умови, що приміщення, в яких вони знаходяться (зберігаються, пере-робляються, транспортуються), не відносяться до категорій А або Б і питома пожежна навантага для твердих і рідких легко-

займистих, горючих та важкогорючих речовин і/або матеріалів на окремих ділянках площею не менше 10 м² кожна перевищує 180 МДж•м⁻².

До II ступеня вогнестійкості відносяться будівлі з несучими і огорожувальними конструкціями з природних та штучних кам'яних матеріалів, бетону або залізобетону із застосуванням листових та плиткових негорючих матеріалів. В покриттях будівель допускається застосовувати незахищені сталеві конструкції. Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) та максимальні межі поширення вогню по них (см) за ДБН В.1.1.7-2002 наведено в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 – Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій та максимальні межі поширення вогню по них

Ступінь вогнестійкості і будинків	Мінімальні межі вогнестійкості будівельних конструкцій (у хвиликах) і максимальні межі поширення вогню по них (см)								
	стіни				коло-ни	сходові площадки, костури, сходи, балки, марші сходових кліток	пере-криття між поверхові (у т.ч. горищні та над підвалами)	елементи суміщених покриттів	
	несучі та сходових кліток	само-несучі	зовнішні не-несучі	внутрішні не-несучі (перегородки)				плити, насти-ли, прого-ни	балки, ферми, арки, рами
II	REI 120 M0	REI 60 M0	E 15 M0	E1 15 M0	R 120 M0	R 60 M0	REI 45 M0	RE 15 M0	R 30 M0

Протипожежні перешкоди і мінімальні межі їх вогнестійкості за ДБН В.1.1.7-2002 наведено в таблиці 5.6.

Найбільшу відстань до евакуаційного виходу визначаємо за об'ємом приміщення та ступені вогнестійкості будівлі.

В виробничому приміщенні, відстань при щільності людського потоку в загальному проході, чол/м² наступна: до 1 – 100 м².

Кількість людей для розрахунку ширини евакуаційних виходів показана в таблиці 5.7.

Таблиця 5.7 – Протипожежні перешкоди та мінімальні межі їх вогнестійкості

Протипожежні перешкоди	Типи проти-пожежних перешкод або їх елементів	Мінімальна межа вогнестійкості протипожежної перешкоди (у хвиликах)	Тип заповнення прорізів, не нижче	Тип протипожежного тамбур-шлюзу, не нижче
Стіни	2	REI 60	2	1
Перегородки	2	EI 15	3	2
Перекриття	2	REI 60	2	1

Таблиця 5.8 – Кількість людей для розрахунку ширини евакуаційних виходів

Об'єм приміщення, тис. м ³	Категорія приміщення	Ступінь вогнестійкості будівлі	Кількість людей на 1 м ширини Евакуаційного
0,126	Д	II	100

На території виробничої будівлі встановлено 15 вогнегасників ВП-5.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз технологічного процесу сушіння цукру як об'єкта автоматизації. Встановлено, що ключовим фактором забезпечення якості продукції є підтримання кінцевої вологості в межах 0,03–0,05 %.

2. Розроблено математичні моделі параметричних ємнісних сенсорів маси та вологості цукру, які описують зв'язок між вологістю продукту та його діелектричною проникністю. Отримані моделі дозволили побудувати статичні характеристики, визначити робочий діапазон вимірювань.

3. Розроблено вимірювальний канал перетворення ємності в часовий інтервал та виконано аналіз похибок квантування. Обґрунтовано вибір структури та розрядності лічильника, що забезпечує необхідну точність і стабільність вимірювання вологості цукру в умовах реального технологічного процесу сушіння.

4. Запропоновано та досліджено комбінований алгоритм керування, що поєднує ПД-регулювання за відхиленням та канал випереджальної компенсації (*feed-forward*) за вхідними збуреннями. Шляхом моделювання підтверджено, що така структура дозволяє зменшити динамічну похибку регулювання.

5. Виконано техніко-економічне обґрунтування, яке підтвердило доцільність впровадження розробленої системи. Очікуваний економічний ефект досягається за рахунок раціонального використання електричної та теплової енергії. Розрахований термін окупності системи склав 3,7 роки.

6. Розроблено заходи з охорони праці та техніки безпеки при експлуатації системи, що гарантує відповідність розробки діючим нормативним актам та стандартам безпеки на підприємствах харчової промисловості.

Таким чином, розроблена система автоматизованого контролю та керування дозволяє вирішити проблему оперативного моніторингу вологості цукру та забезпечує високу якість технологічного процесу сушіння в умовах сучасного виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. М. М. Масліков, Сучасні технологічні процеси, обладнання та енерговикористання в харчовій промисловості. Цукрова, Олійна, Консервна галузі. Київ, Україна: Юнідо, 2015.
2. А. А. Ліпець, В. М. Логвін, К. Д. Скорик та ін., “Вирощування, зберігання цукрових буряків, видобування сахарози ”, у *Технологія цукру = Sugar technology*, В. М. Логвін, А. І. Українець, Ред. Київ, Україна: Нац. ун-т харч. технол. Експрес-об'ява, 2015, Т. 1, с. 288, підручник в 3 т.
3. Перспективи розвитку бурякоцукрового виробництва - Офіційний сайт «economy.-nauka.com.ua» URL: - <http://www.economy.-nauka.com.ua/?op=1&z=791>
4. Кухарчук В. В., Пляцко І. О. ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КАНАЛ ЧАСОВИХ ІНТЕРВАЛІВ ТА ЙОГО ОСНОВНІ СТАТИЧНІ МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ // The 3rd International scientific and practical conference “Science, technology and global challenges” (November 6-8, 2025) CPN Publishing Group, Tokyo, Japan. 2025. 589 p. –P.256-264.
5. Основи метрології та електричних вимірювань: Підручник / За ред. В. Кухарчука. –Херсон: Олді-Плюс, 2013. – 538с.
6. О. В. Осельський, В. В. Кухарчук. ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КАНАЛ ВІБРОЗМІЩЕННЯ З ЄМНІСНИМ СЕНСОРОМ // ISSN 1997-9266. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2025. № 2 15 <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-179-2-15-22>.УДК62-83:621.8 : 681.5. – С.15-22.
7. Ю. В. Шабатура, д. т. н., доц.; І. М. Штельмах; М. Ю. Шабатура ВИМІРЮВАЛЬНІ КАНАЛИ НА ОСНОВІ НОВИХ ПРИНЦИПІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ // АВТОМАТИКА ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА. Наукові праці ВНТУ, 2008, № 4. УДК 681.317.39. – С.1-7.

8. О.В. Осельський, В.В. Кухарчук, "Математична модель вимірювального перетворення віброзміщення ємнісним сенсором в часовий інтервал ", Фахове видання МОНУ Вісник Вінницького політехнічного інституту, №2 (173), с. 6-13, 2024. Doi*: 10.31649/1997-9266-2024-173-2-6-13.
9. Kukharchuk, V.V., Pavlov, S.V., Holodiuk, V.S.; and etc. Information Conversion in Measuring Channels with Optoelectronic Sensors // Sensors 2022,22,271. [https://doi.org/ 10.3390/s22010271](https://doi.org/10.3390/s22010271)
10. Грабко, В. В. Електропривод підприємств агропромислового комплексу [Текст] : навчальний посібник / В. В. Грабко, С. М. Левицький ; ВНТУ. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 198 с.
11. Лавріненко Ю. М., Марченко О. С., Савченко П. І., Синявський О. Ю., Войтюк Д. Г., Лисенко В. П. Електропривод : Підручник. — Київ: Ліп-К, 2009
12. Автоматизований електропривод типових виробничих механізмів. Методичні вказівки до виконання контрольних робіт для спеціальностей 7.092203; 7.090603 заочної форми навчання. /укладач Видмиш А.А./ Вінниця: ВДТУ, 2001.
13. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи / За редакцією М.Г.Поповича та О.Ю.Лозинського / Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом „Електромеханіка”. –К.: Либідь, 2005. -680 с.
14. Голуб А.П., Кузнецов Б.І., Опришко І.О., Соляник В.П.. Системи керування електроприводами: Навчальний посібник. - К.: НМК ВО, 1992.- 352с.
15. Werner Leonhard. Control of Electrical Drives, 3-е вид. — Springer, 2001
16. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування. — К.: Либідь, 1997. — 544 с.
17. Чорний О. П., Луговой А. В., Д. Й. Родькін, Сисюк Г.Ю., Садовой О.В. Моделирование электромеханических систем. — Кременчук, 2001. — 376 с.

18. ДСНіП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». Наказ МОЗ № 248 від 08.04.2014.

19. ДСТУ-Н Б А 3.2-1: 2007 Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів та їх використання в процесі зведення та експлуатації об'єктів будівництва. URL: <https://profidom.com.ua/a-3/a-3-2/824-dstu-n-b-a-3-2-12007-nastanova-shhodo-viznachenna-nebezpechnih-i-shkidlivih-faktoriv->.

20. НПАОП 40.1-1.21-98 (ДНАОП 0.00-1.21-98) Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=48644.

21. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.

22. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>.

23. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с.

24. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885

25. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. К. : МВС України, 2014. 47 с.

26. ДСТУ 8828:2019 Пожежна безпека. Загальні положення. URL: <https://dwg.ru/dnl/15125>.

ДОДАТКИ
Додаток А

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри КЕМСК

к.т.н., доц.

 Микола МОШНОРИЗ

« 21 » 10 2025 р.

ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

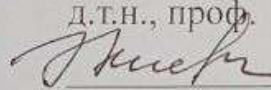
на магістерську кваліфікаційну роботу

**СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ТА
КЕРУВАННЯ ВОЛОГІСТЮ ЦУКРУ
З ЄМНІСНИМИ СЕНСОРАМИ**

08-24.МКР.009.00.000 ТЗ

Керівник роботи

д.т.н., проф.

 Василь КУХАРЧУК

« 21 » 10 2025 р.

Виконав: ст. гр. ЕПА-24м

 Іван ПЛЯЦКО

« 21 » 10 2025 р.

1 Загальні відомості

Повне найменування розробки – «Система автоматизованого контролю та керування вологістю цукру з ємнісними сенсорами».

Скорочене найменування розробки – «Система автоматизованого контролю та керування вологістю цукру з ємнісними сенсорами».

2 Підстави для розробки

Індивідуальне завдання та наказ ректора Вінницького національного технічного університету про затвердження тем магістерських кваліфікаційних робіт.

3 Призначення розробки і галузь використання

Розробка призначена для здійснення автоматизованого контролю вологістю цукру з ємнісними сенсорами для керування технологічним процесом сушки.

4 Вимоги до розробки

Основними вимогами до системи автоматизованого контролю та керування вологістю цукру є забезпечення визначення поточного значення вологості із заданими метрологічними характеристиками. Система має гарантувати надійність, енергоефективність, оперативність керування і безпечні умови експлуатації.

5 Комплектація розробки

Система, що розробляється включає вимірювальні ємнісні перетворювачі маси та діелектричної проникності, вимірювальні канали ємності та часового інтервалу, елементи системи керування тощо.

6 Технічні характеристики

Таблиця 1 – Технічні характеристики

№п\п	Показник	Позначення	Величина
1.	Діапазон зміни маси ємнісного сенсора маси, г	m	20-75
2.	Діапазон зміни вологості цукру, %	W	0 – 2,0
3.	Відносна діелектрична проникність сухого цукру	$\varepsilon_{\text{сух}}$	3,5
4.	Площа ємнісного сенсора вологості, м ²	S	0,791
5.	Ширина зазора ємнісного сенсора вологості, м	h	0,02
6.	Планова продуктивність сушки, т/год	m ₀	20

7 Джерела розробки

1. М. М. Масліков, Сучасні технологічні процеси, обладнання та енерговикористання в харчовій промисловості. Цукрова, Олійна, Консервна галузі. Київ, Україна: Юнідо, 2015.
2. А. А. Ліпєц, В. М. Логвін, К. Д. Скорик та ін., “Вирощування, зберігання цукрових буряків, видобування сахарози”, у *Технологія цукру = Sugar technology*, В. М. Логвін, А. І. Українець, Ред. Київ, Україна: Нац. ун-т харч. технол. Експрес-об'ява, 2015, Т. 1, с. 288, підручник в 3 т.
3. Основи метрології та електричних вимірювань: Підручник / За ред. В. Кухарчука. –Херсон: Олді-Плюс, 2013. – 538с.
4. Грабко, В. В. Електропривод підприємств агропромислового комплексу [Текст] : навчальний посібник / В. В. Грабко, С. М. Левицький ; ВНТУ. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 198 с.

8 Етапи виконання

Основна частина	
Графічна частина	

9 Конструктивне виконання

Система автоматизованого контролю та керування реалізується блоками, котрі реалізуються у відповідності до вимог електробезпеки у пило-вологозахищеному виконанні.

10 Показники технологічності

Система автоматизованого контролю та керування вологістю цукру виконується на сучасній елементній базі, його монтаж, заземлення, струмопровід повинні відповідати правилам улаштування електроустановок.

11 Технічне обслуговування і ремонт

Технічне обслуговування здійснюється слюсарями служби КВП та А відповідної кваліфікації. Технічний огляд пристрою здійснюється мінімум один раз на місяць. Ремонт здійснюється інженерами-електромеханіками фахівцями з електромеханічних систем автоматизації та електропривода.

12 Живлення системи

Живлення елементів системи, що розробляється повинно бути виконане напругою 380 В від силової мережі підприємства.

13 Порядок контролю та прийняття

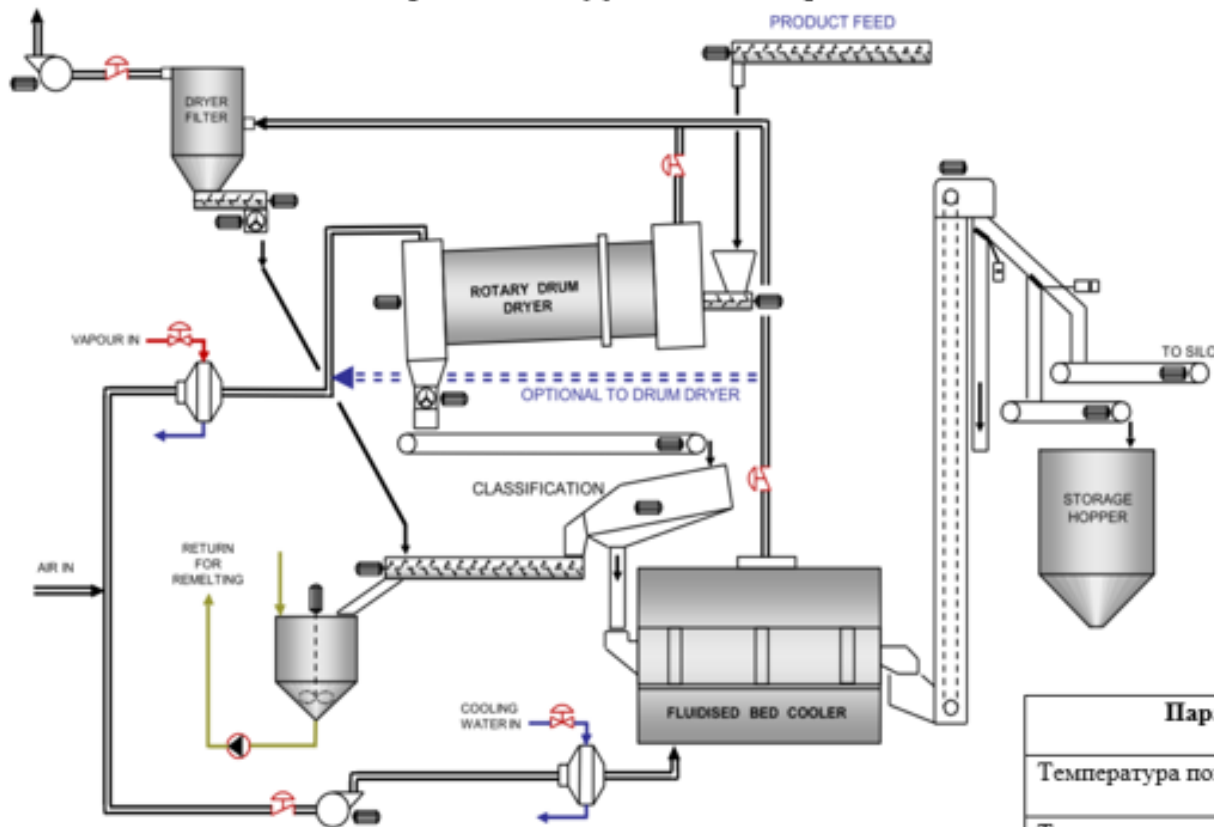
Виконання етапів графічної та розрахункової документації магістерської кваліфікаційної роботи контролюється керівником згідно з графіком виконання роботи. Прийняття роботи здійснюється комісією затвердженою зав. кафедрою згідно з графіком захисту.

Додаток Б

Графічна частина

**СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО КОНТРОЛЮ ТА
КЕРУВАННЯ ВОЛОГІСТЮ ЦУКРУ
З ЄМНІСНИМИ СЕНСОРАМИ**

Короткі відомості про технологічний процеси цукрової галузі



Параметр	Орієнтовне значення	Вплив на якість
Температура повітря на вході	110–140 °C	Надто висока — можливе плавлення кристалів
Температура цукру на виході	35–40 °C	Визначає стабільність під час зберігання
Вологість цукру на вході сушильного барабана	0,3–1,5 %	Визначає режим сушіння
Вологість готового продукту	0,03–0,05 %	Вища — ризик злежування
Швидкість повітряного потоку	1,5–3 м/с	Забезпечує <u>псевдозрідження шару</u>
Тривалість процесу	15–25 хв	Залежить від типу сушарки та вологості

Порівняльний аналіз методів вимірювального контролю вологості цукру

Метод контролю вологості	Переваги	Недоліки
Гравіметричний	Найвища точність (до $\pm 0,1$ %); еталонний метод; незалежний від фізичних, електричних і оптичних властивостей цукру; використовується для калібрування інших методів	Тривалий час вимірювання (десятки хвилин); потребує відбору проб; непридатний для безперервного контролю та систем автоматизованого керування
Мікрохвильовий	Безконтактне вимірювання; висока швидкодія; придатний для онлайн-контролю; потенційно висока точність	Висока чутливість до насипної щільності та фракції цукру; складне калібрування; значний температурний вплив; висока вартість
Оптичний (ІЧ)	Дуже висока швидкодія; простота реалізації; можливість безконтактного контролю в потоці	Поверхневий характер вимірювання; залежність від кольору, пилу та стану поверхні; значний температурний вплив; обмежена точність
Акустичний	Неруйнівний метод; незалежний від електропровідності матеріалу; можливість дослідження фізичних властивостей	Висока чутливість до неоднорідності структури та пористості; складність стабільного контакту; обмежена точність; слабка придатність до промислової автоматизації
Ємнісний	Висока швидкодія; достатня точність для технологічних задач ($\pm 1-3$ %); простота конструкції; низька вартість; легка інтеграція з ПЛК і САК; придатний для безперервного контролю	Залежність від температури та щільності насипання; потребує попереднього калібрування; нижча точність порівняно з гравіметричним методом

Порівняльний аналіз методів вимірювального контролю вологості цукру

Параметр	Ємнісний метод	Гравіметричний метод
Принцип вимірювання	Визначення зміни електричної ємності сенсора, що зумовлена зміною ді-електричної проникності вологого цукру	Вимірювання втрати маси зразка після висушування до постійної ваги
Контактність	Контактний або поверхневий	Контактний, лабораторний
Точність вимірювання	Оптимальна для технологічного контролю ($\pm 2-3\%$)	Дуже висока (до $\pm 0,1\%$)
Швидкодія / Реальний час	Дуже висока; забезпечує стабільний сигнал у реальному часі	Низька; потребує тривалого циклу сушіння
Залежність від властивостей продукту	Помірна; стабільна робота при незначних змінах фракції та структури	незалежний від оптичних або електричних властивостей зразка
Необхідність калібрування	Мінімальна; коригування параметрів виконується один раз для певного типу продукту	Не потребує складного калібрування
Вплив температури	Помірний; ефективно усувається за допомогою термічної компенсації	Визначальний; контрольований під час лабораторного сушіння
Вартість впровадження	Низька; економічно найбільш доцільний варіант	Низька для лабораторії, але непридатна для промислової автоматизації
Підходить для автоматизації	Так; легко інтегрується з ПЛК і системами регулювання сушіння	Обмежено; застосовується переважно як еталонний метод
Основні переваги	Простота конструкції, низька вартість, надійність, стабільність роботи у промислових умовах	Висока точність і достовірність результатів, еталонна методика

Актуальність теми. Мета, об'єкт та задачі дослідження

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення точності вимірювального контролю вологості цукру в умовах його виробництва шляхом вдосконалення ємнісних сенсорів час-імпульсного перетворення та автоматизованого алгоритму керування процесом його сушки.

Задачі дослідження:

- Проаналізувати існуючі технології автоматизованого процесу сушки цукру;
- Обґрунтувати вибір сенсорів та виконавчих механізмів для контролю вологості цукру в лабораторних умовах та в режимі реального часу технологічного процесу;
- Розробити математичні моделі вимірювального перетворення вологості цукру в часовий інтервал для термогравіметричного і діелькометричного методів;
- Розробити структурну та функціональну схеми системи автоматизованого контролю та керування процесом моніторингу вологості цукру та сушки;
- Розробити метрологічні моделі вимірювального каналу вологості цукру в мікропроцесорному виконанні;
- Реалізувати алгоритм роботи мікроконтролера для вимірювального контролю вологості цукру та автоматизації процесу його сушки;
- Провести економічне обґрунтування впровадження системи контролю та керування;
- Розробити заходи з охорони праці при роботі з автоматизованим обладнанням.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є процес вимірювального перетворення вхідної неелектричної величини вологості цукру в електричну величину – часовий інтервал на виході ємнісного параметричного сенсора.

Предметом дослідження. Математичні моделі, алгоритми та апаратні засоби для реалізації автоматизованої системи контролю та керування процесом сушки цукру за значення його вологості.

Структурна схема ємнісного сенсора маси

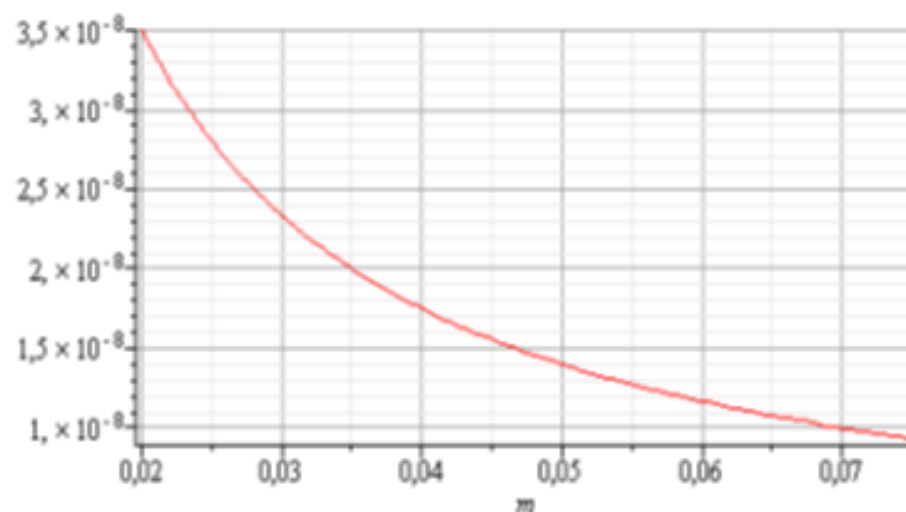
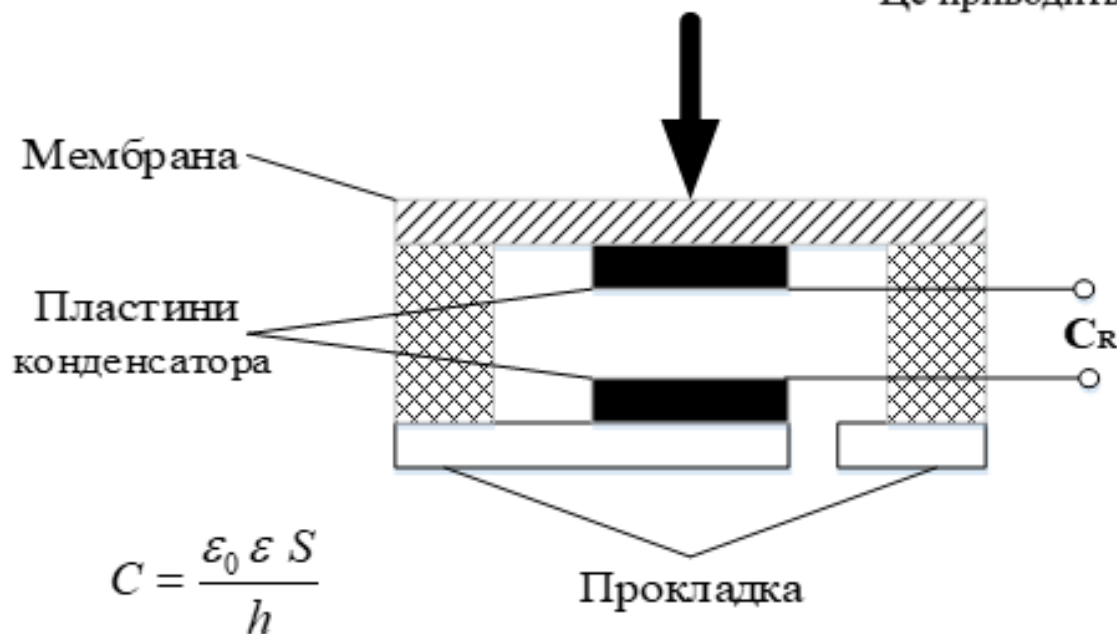
Під дією маси наважки m мембрана прогинається і відстань h між пластинами конденсатора змінюється

$$h = w \cdot m,$$

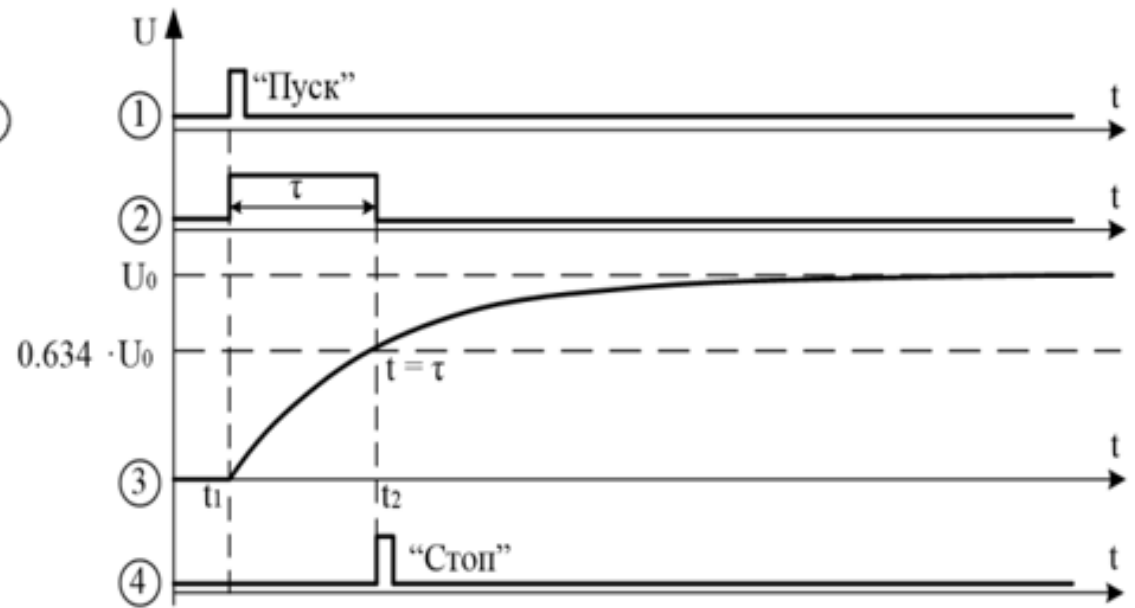
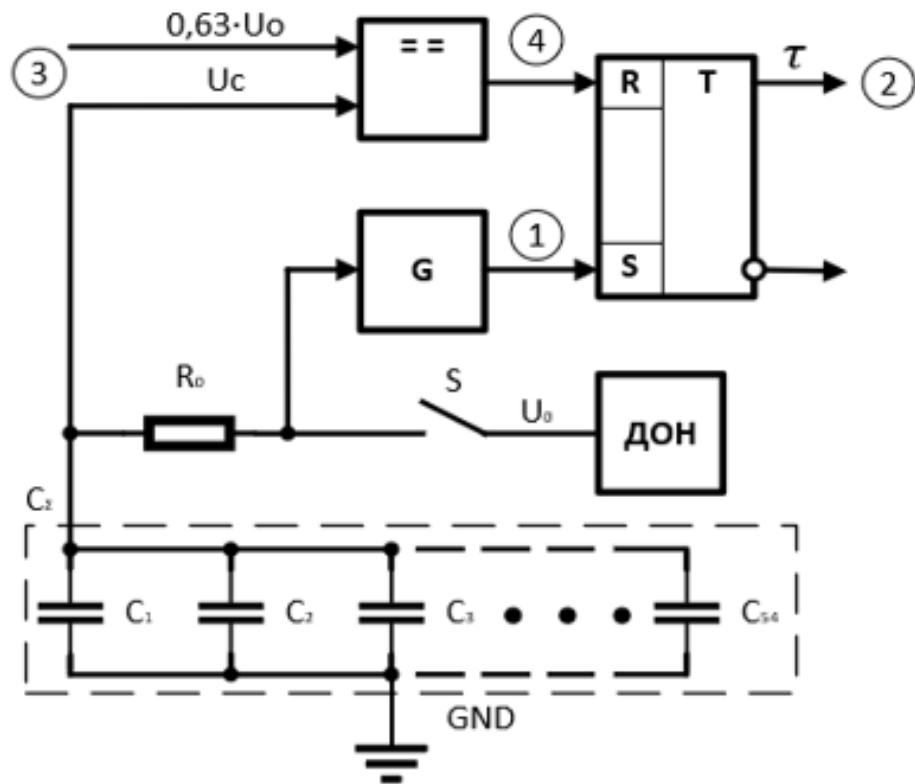
де w – протидійне зусилля пружних властивостей мембрани.

Це приводить і до відповідної зміни ємності C_m конденсатора:

$$C_m(m) = \frac{\xi_0 \varepsilon S}{w \cdot m}.$$



Перетворення ємності в часовий інтервал



$$U_c = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right),$$

де t – поточний час,

τ - постійна часу $R \cdot C_m$ кола.

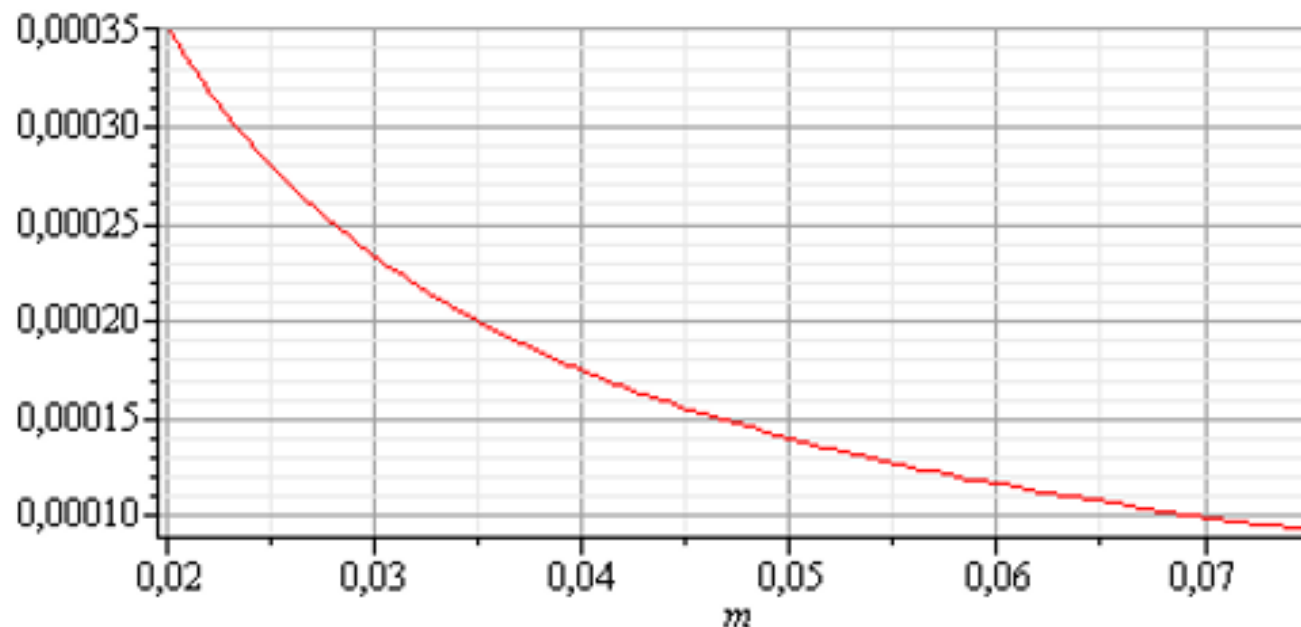
Рівняння перетворення ємнісного сенсора маси

43

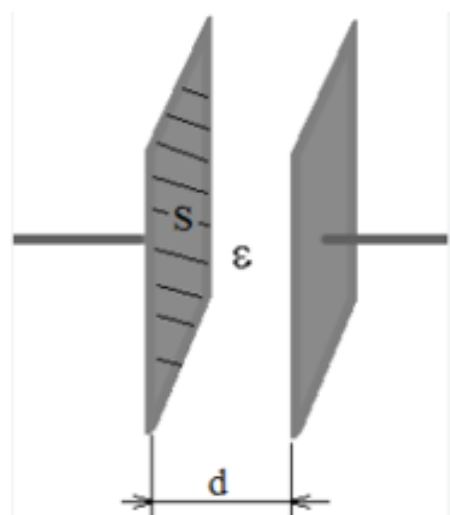
$$\tau(C_m) = R_0 \cdot C_m. \quad (2.9)$$

Підставимо в (2.9) рівняння (2.4), що однозначно пов'язує ємність конденсатора C із значенням маси m наважки, отримаємо остаточну функцію перетворення:

$$\tau(m) = R_0 \cdot C_m = R_0 \cdot \frac{\xi_0 \varepsilon S}{w \cdot m}. \quad (2.10)$$



Статична характеристика ємнісного сенсора вологості



площа конденсатора $S = 0,791 \text{ м}^2$,
зазор $h = 0,01 \text{ м}$,
відносна діелектрична проникність
сухого цукру $\varepsilon_{\text{цх}} = 3,5$,
коефіцієнт $k = 80$.

$$C_W(W=0) = 2,451 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} = 2,451 \text{ нФ},$$

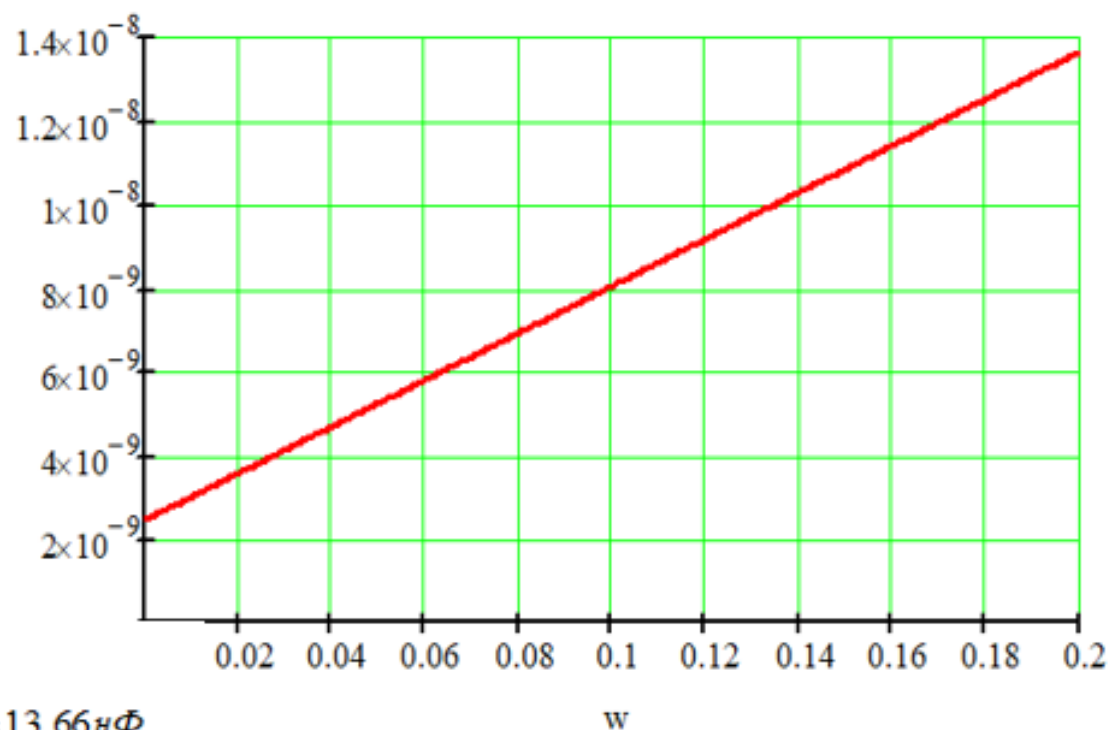
$$C_W(W=0,2) = 2,451 \cdot 10^{-9} + 56,03 \cdot 10^{-9} \cdot 0,2 = 13,66 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} = 13,66 \text{ нФ}.$$

$$C_W(W) = \frac{\varepsilon_{\text{цх}} \varepsilon_0 S}{h} + \frac{\varepsilon_0 S k}{h} \cdot W = C_{\text{цх}} + \frac{\varepsilon_0 S k}{h} \cdot W, \quad (2.15)$$

де $C_{\text{цх}} = \frac{\varepsilon_{\text{цх}} \varepsilon_0 S}{h}$ – ємність конденсатора завантаженого абсолютно

сухим цукром.

$C(w)$



Залежність часового інтервалу від вологості

$$\tau_W(W) = C_W(W) \cdot R_0.$$

$$\tau_W(W) = C_{\text{ox}} R_0 + \frac{\varepsilon_0 S k R_0}{h} \cdot W$$

Прийmemo $R_0 = 100 \text{ Ом}$. Тоді:

$$\tau_W(W) = 24,5 \cdot 10^{-6} + 560,3 \cdot 10^{-6} \cdot W$$

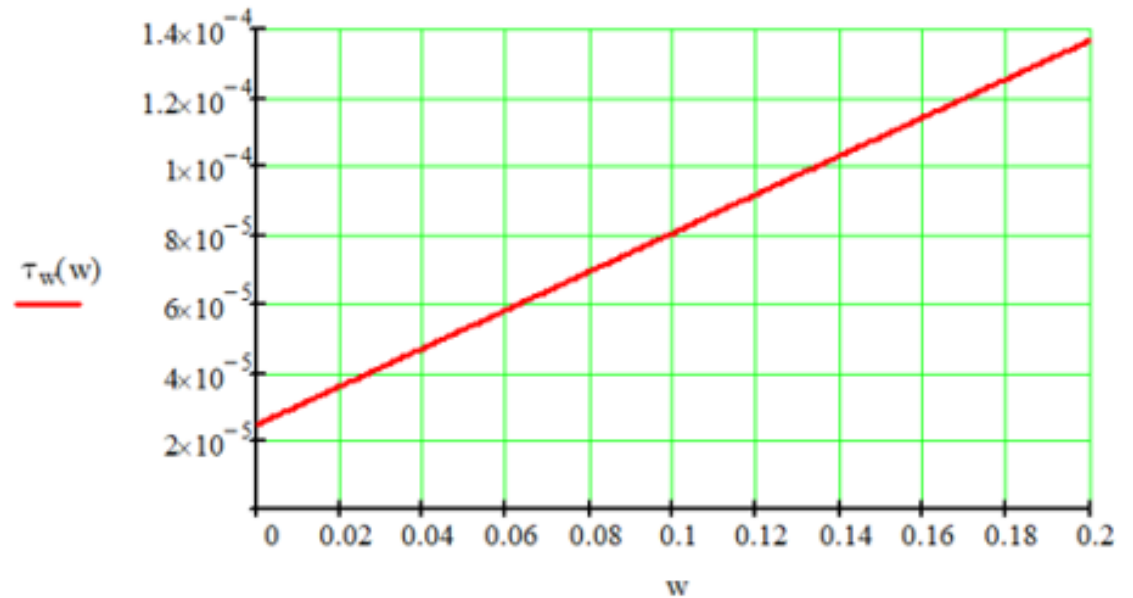
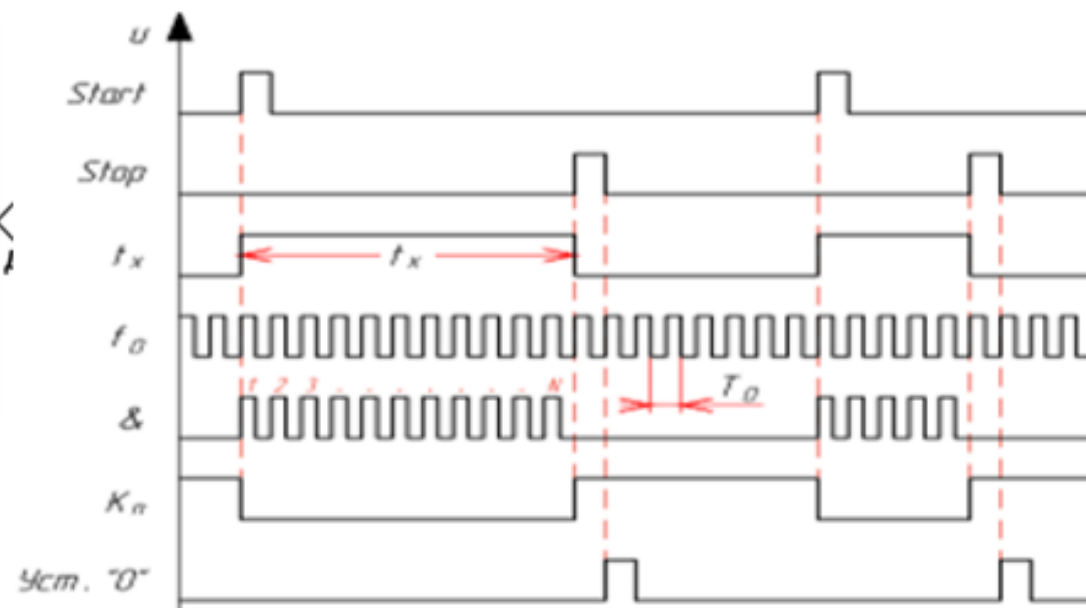
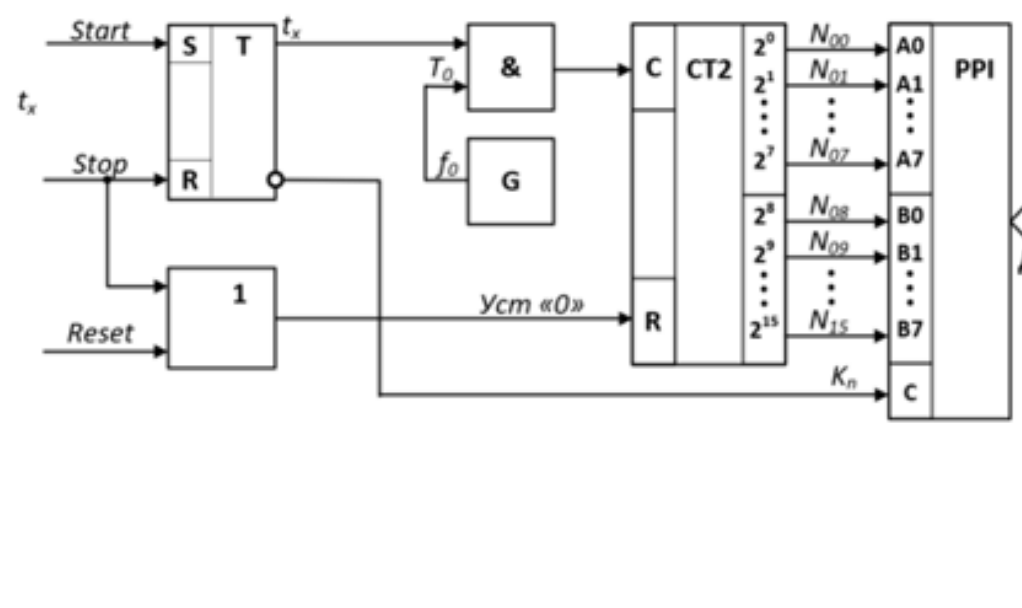


Рисунок 2.13 – Функціональна залежність $\tau_W = f(W)$

$$\tau_W(W=0) = 24,5 \cdot 10^{-6} \text{ c} = 24,5 \text{ мкс};$$

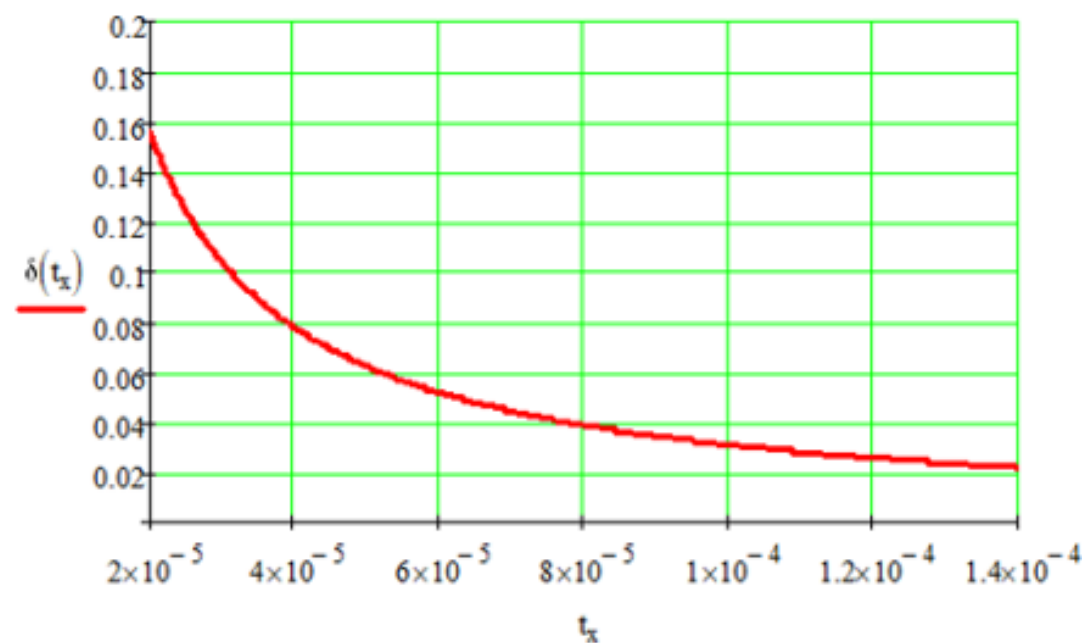
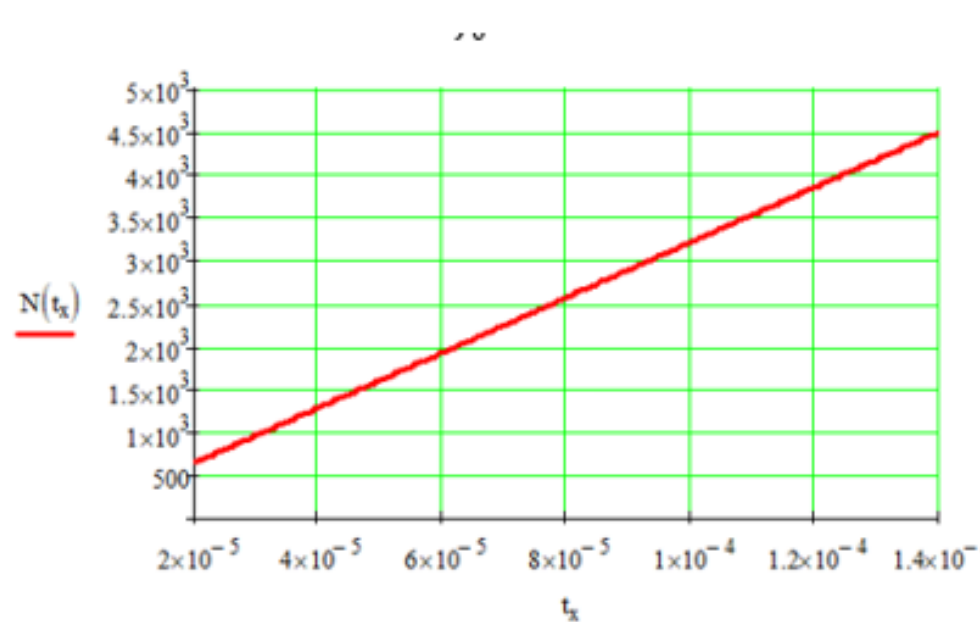
$$\tau_W(W=0,2) = 24,5 \cdot 10^{-6} + 560,3 \cdot 10^{-6} \cdot 0,2 = 136,6 \cdot 10^{-6} \text{ c} = 136,6 \text{ мкс}.$$

Вимірювальний канал часового інтервалу

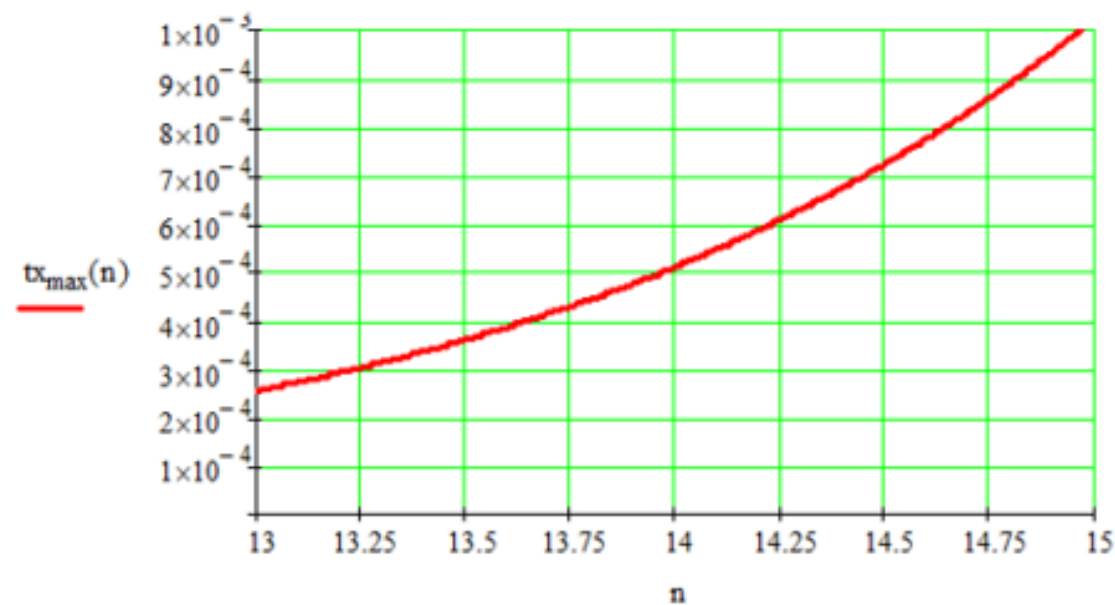
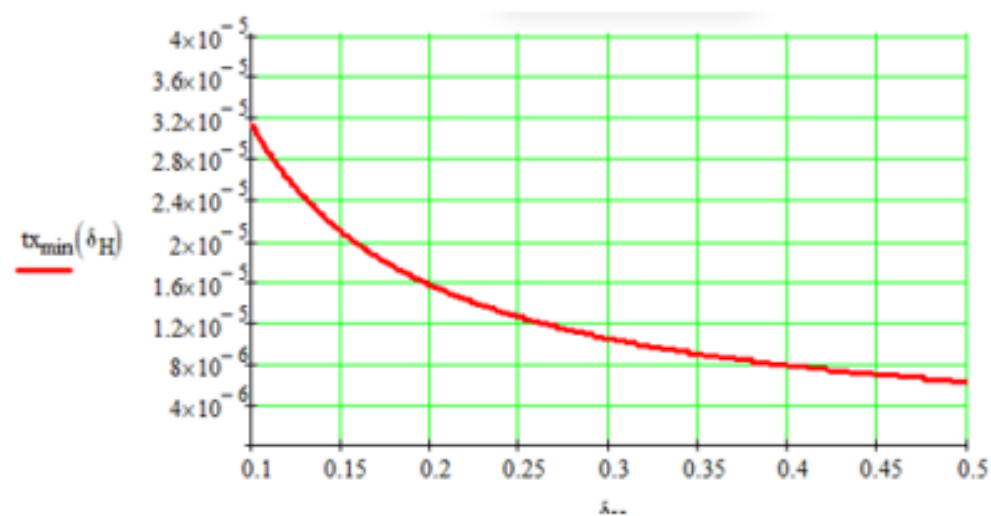


$$N = t_x \cdot f_0$$

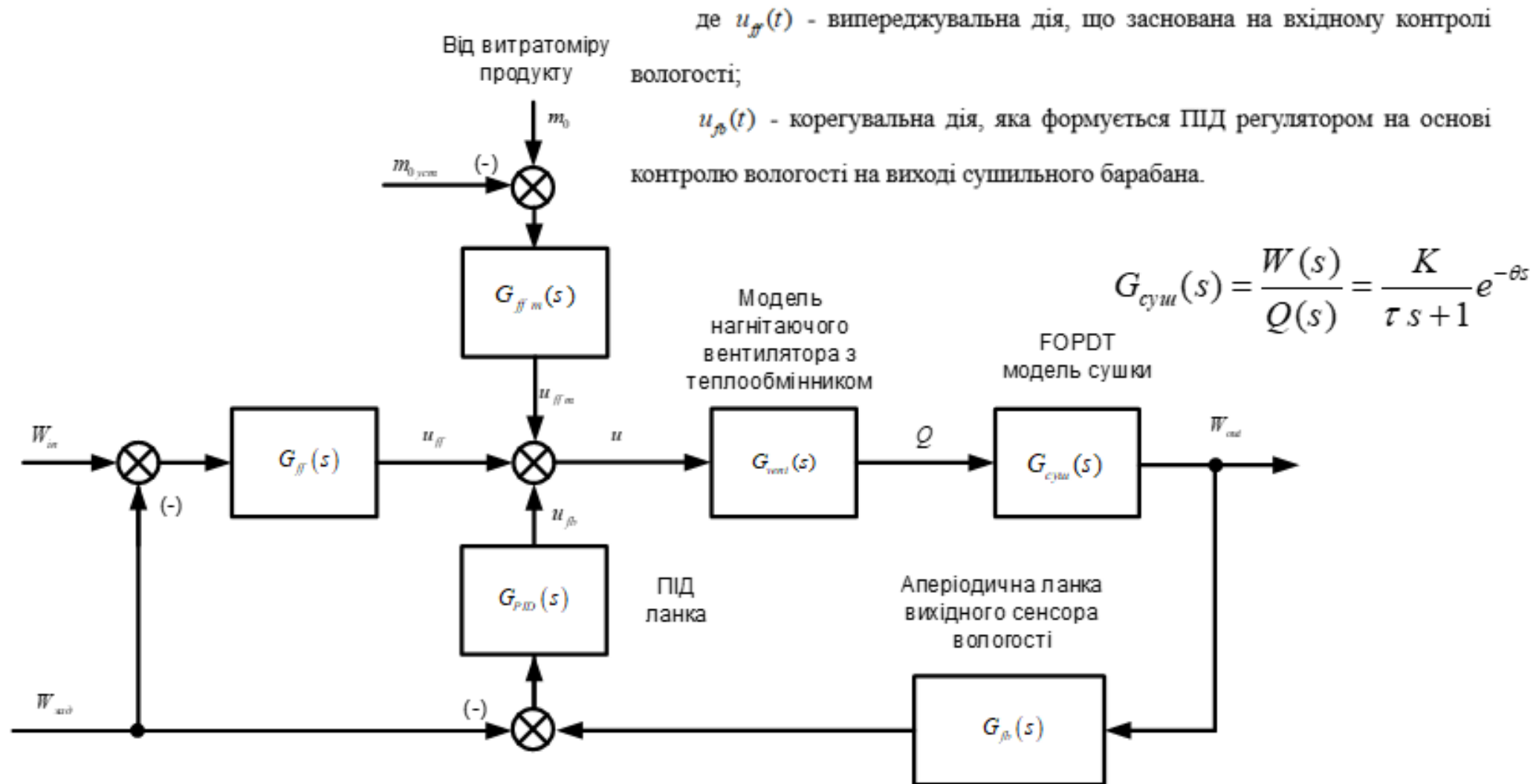
Статична характеристика та похибка квантування ВК часового інтервалу



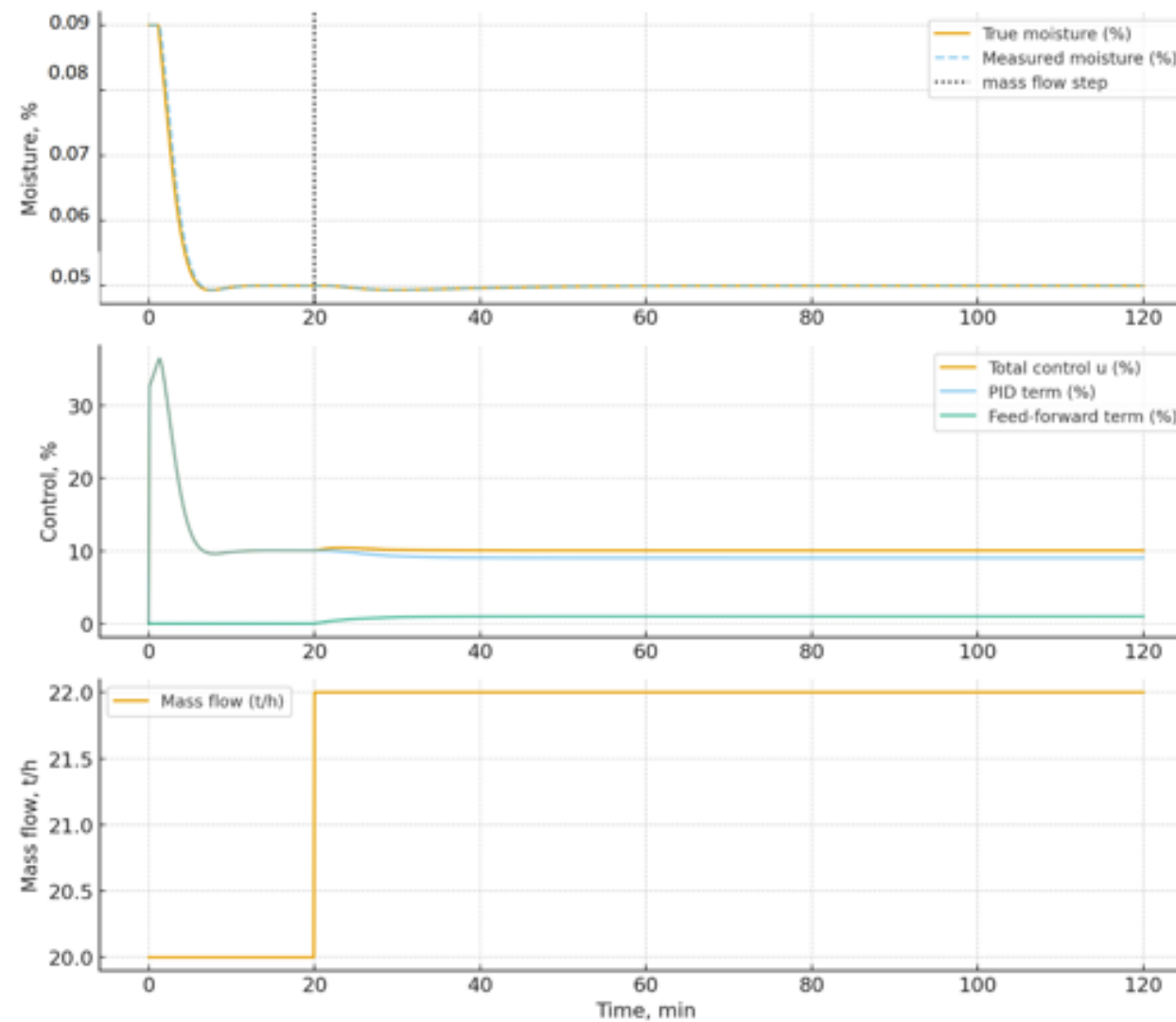
Межі вимірювального каналу часового інтервалу



Система автоматизованого керування вологістю цукру



Часові діаграми, що ілюструють роботу системи автоматизованого керування



Техніко економічні показники

Очікуване зменшення споживання електричної енергії за сезон виробництва, кВт*год	6000
Середня собівартість виробництва електричної енергії ТЕЦ цукрового заводу, грн	4,68
Очікуване зменшення витрат на електроенергію за виробничий сезон, грн	$6000 \cdot 4.68 = 28080$
<u>Очікуване</u> зменшення витрати пару за сезон виробництва, т	25
Середня собівартість виробництва пару на ТЕЦ цукрового заводу, грн	2060
Очікуване зменшення витрати пару за виробничий сезон, грн	$25 \cdot 2060 = 51500$
Очікуване зменшення втрат через простой, грн	50 000
Сукупне зменшення витрат на виконання технологічного процесу, грн	129 580

$$T_{OK} = \frac{C_{\Sigma} + C_{DM} + C_B}{C_{\Sigma} - C_B}$$

$$T_{OK} = \frac{152\,550 + 719\,831,5 + 15\,255}{129\,580 - 79\,233} = \frac{187\,636,5}{50\,347} = 3,7 \text{ (роки)}.$$

Висновки

Наукова новизна.

Отримала подальший розвиток математична модель параметричного ємнісного сенсора, що однозначно пов'язує між собою вихідну електричну величину часовий інтервал з вимірюваною вологістю цукру, яка на відмінну від відомих дозволила одночасно реалізувати на основі такого вимірювального перетворювача термогравіметричний і діелькометричний методи, перший з яких забезпечує високу точність, а другий швидкодію.

Практичне значення.

Отримано рівняння чутливості, швидкості її зміни, номінальну функцію перетворення та аналітичну залежність для оцінювання абсолютної та відносної похибок квантування, які і є основними статичними метрологічними характеристиками сенсора вологості цукру.

Розроблено структурну і функціональну схеми системи автоматизованого контролю і керування процесом сушки цукру в режимі реального часу протікання технологічного процесу. В середовищі програмного забезпечення Micro Cap 9 здійснено комп'ютерне моделювання вимірювального каналу вологості цукру і підтверджено його працездатність.

Оцінено основні статичні метрологічні характеристики мікропроцесорного вимірювального каналу вологості цукру у вигляді рівнянь перетворення і чутливості, похибки квантування, нижньої та верхньої меж вимірювання.

Запропоновано автоматизований алгоритм керування технологічним процесом сушки цукру в реальному режимі шляхом постійного вимірювального контролю вологості цукру.

Результати дослідження можуть бути впроваджені в практику сучасного цукрового виробництва як для високоточних лабораторних досліджень, так і для експрес аналізу вологості цукру в режимі реального часу.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати магістерської кваліфікаційної роботи отримані автором практично самостійно.

Висновки

Апробація і публікації. Результати роботи доповідалися і опубліковані у вигляді тез доповідей на міжнародній науково-технічній конференції:

Кухарчук В. В., Пляцко І. О. ВИМІРЮВАЛЬНИЙ КАНАЛ ЧАСОВИХ ІНТЕРВАЛІВ ТА ЙОГО ОСНОВНІ СТАТИЧНІ МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ // The 3rd International scientific and practical conference "Science, technology and global challenges" (November 6-8, 2025) CPN Publishing Group, Tokyo, Japan. 2025. 589 p. –P.256-264.



ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Система автоматизованого контролю та керування вологістю цукру з ємнісними сенсорами
Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота
Підрозділ: кафедра КЕМСК, ФЕЕМ, гр. ЕПА-24м

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 5,43 %

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

- ☒ Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту
- ☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

Зав. кафедри КЕМСК Мошноріз М.М.

(прізвище, ініціали, посада)

Гарант ОП

Проценко Д.П.

(прізвище, ініціали, посада)

(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку

Паянок О.А.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

(підпис)

Кухарчук В. В.

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувач

(підпис)

Пляцко І. О.

(прізвище, ініціали)

08-24.МКР.009.00.000 ПЗ

Зм.	Ари.	№ докумен.	Підпис	Дата	Система автоматизованого контролю та керування вологістю цукру з ємнісними сенсорами	Літ.	Маса	Масштаб
Розробив		Пляцко І. О.	<i>[Signature]</i>	22.11				
Перевірив		Кухарчук В. В.	<i>[Signature]</i>	25.11				
Т. контр.								
Опачив		Войточ	<i>[Signature]</i>			Аркуш	Аркушів	
Норм. кон.		Павлюк	<i>[Signature]</i>	24.11		ВНТУ, гр. ЕПА-24м		
Затверд.		Мошноріз М. М.	<i>[Signature]</i>	25.11				