

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Факультет інженерно-технологічний**  
**Кафедра енергетики та електротехнічних систем**

До захисту  
Допускається  
В.о. завідувача кафедри  
Олександр ЮРЧЕНКО

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Дослідження параметрів електротехнологічного комплексу  
виділення дифузійного соку з бурякової стружки в умовах ТОВ «Жовтневий  
цукровий завод»

Виконав

\_\_\_\_\_

(підпис)

Владислав ОСТАПЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Група:

ЕТЕС 2401-1 М

Науковий керівник:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Ганна БАРСУКОВА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Рецензент:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Олена ДОВЖИК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Суми – 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерно-технологічний

Кафедра енергетики та електротехнічних систем

Ступінь вищої освіти «Магістр»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри  
енергетики та електротехнічних систем

**Андрій ЧЕПЖНИЙ**

«06» листопада 2024 року

**ЗАВДАННЯ**  
на кваліфікаційну роботу  
Владиславу ОСТАПЕНКУ  
(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

- Тема кваліфікаційної роботи: Дослідження параметрів електротехнологічного комплексу виділення дифузійного соку з бурякової стружки в умовах ТОВ «Жовтневий цукровий завод»
- Керівник кваліфікаційної роботи: Барсукова Ганна Володимирівна, кандидат технічних наук, доцент
- Строк подання здобувачем роботи: «30» січня 2026 року
- Вихідні дані до роботи: паспортні дані обладнання на цукровому заводі, правила улаштування електроустановок, правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів, нормативні документи для проведення досліджень, стандарти, характеристики електроенергетичного устаткування, методичні рекомендації до виконання проекту (роботи).
- Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ; Розділ 1. Огляд літератури; Розділ 2. Аналіз існуючих методів дифузії; Розділ 3. Технологічна частина; Розділ 4. Охорона праці; Розділ 5. Техніко-економічне обґрунтування; Висновки; Список використаних джерел
- Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Презентація

Керівник роботи:

\_\_\_\_\_ (підпис)

Ганна БАРСУКОВА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняла до виконання

\_\_\_\_\_ (підпис)

Владислав ОСТАПЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Дата отримання завдання «06» листопада 2024 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1.	Збір інформації про діяльність господарства	до 02.08.2025 р.	
2.	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 08.09.2025 р.	
3.	Складання плану роботи	до 22.09.2025 р.	
4.	Написання вступу	до 29.09.2025 р.	
5.	Підготовка розділу «Розділ 1. Огляд літератури»	до 13.10.2025р.	
6.	Підготовка розділу «Розділ 2. Аналіз методів та електротехнологічного комплексу виділення дифузійного соку з бурякової стружки в умовах ТОВ «Жовтневий цукровий завод»»	до 03.10.2025 р.	
7.	Підготовка розділу «Розділ 3. Технологічна частина»	до 03.11.2025 р.	
8.	Підготовка розділу «Розділ 4. Охорона праці»	до 24.11.2025 р.	
9.	Підготовка розділу «Розділ 5. Техніко-економічне обґрунтування»	до 08.12.2025 р.	
10.	Написання висновків та пропозицій	до 15.12.2025 р.	
11.	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 25.01.2026 р.	
12.	Подання роботи на рецензування	до 22.01.2026 р.	
13.	Подання до попереднього захисту	до 29.01.2026 р.	

Керівник роботи:

\_\_\_\_\_

(підпис)

Ганна БАРСУКОВА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Здобувач

\_\_\_\_\_

(підпис)

Владислав ОСТАПЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

## АНОТАЦІЯ

Остапенко Владислав Сергійович «Дослідження параметрів електротехнологічного комплексу виділення дифузійного соку з бурякової стружки в умовах ТОВ «Жовтневий цукровий завод»».

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра за освітньою програмою «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Сумський національний аграрний університет, Суми, 2026.

У кваліфікаційній роботі досліджено теоретичні основи процесу виділення дифузійного соку з бурякової стружки та практичні аспекти автоматизації похилого дифузійного апарата в умовах сучасного цукрового виробництва. Проаналізовано актуальний стан дифузійного процесу, виявлено основні тенденції розвитку технологій екстрагування цукру та автоматизованого керування.

Особливу увагу приділено аналізу чинної нормативно-технічної бази, сучасних наукових підходів і практичного досвіду автоматизації дифузійних апаратів. Оцінено ефективність існуючих технічних рішень, виявлено їх недоліки та запропоновано напрями вдосконалення з урахуванням сучасних засобів автоматизації та енергоощадних технологій.

Розроблено систему автоматичного керування параметрами процесу дифузії, що дозволяє підвищити стабільність роботи обладнання, знизити енерговитрати, мінімізувати втрати цукру та підвищити економічну ефективність виробництва. Отримані результати можуть бути використані під час модернізації цукрових заводів і впровадження сучасних автоматизованих систем керування.

Ключові слова: дифузійний апарат, автоматизація, цукрове виробництво, бурякова стружка, електротехнологічний комплекс, енергоефективність, система керування.

## ABSTRACT

Ostapenko Vladislav Serhiyovych "Study of the parameters of the electrotechnological complex for the extraction of diffusion juice from beet chips in the conditions of LLC "Zhovtnevyi Sugar Plant"".

Qualification work for obtaining a master's degree in the educational program "Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics" in specialty 141 "Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". Sumy National Agrarian University, Sumy, 2026.

The qualification work investigated the theoretical foundations of the process of extracting diffusion juice from beet chips and the practical aspects of automating an inclined diffusion apparatus in the conditions of modern sugar production. The current state of the diffusion process was analyzed, and the main trends in the development of sugar extraction technologies and automated control were identified.

Particular attention is paid to the analysis of the current regulatory and technical framework, modern scientific approaches and practical experience in the automation of diffusion devices. The effectiveness of existing technical solutions was assessed, their shortcomings were identified, and areas for improvement were proposed, taking into account modern automation tools and energy-saving technologies.

A system for automatic control of diffusion process parameters has been developed, which allows increasing the stability of equipment operation, reducing energy consumption, minimizing sugar losses, and increasing the economic efficiency of production. The results obtained can be used during the modernization of sugar factories and the implementation of modern automated control systems.

Keywords: diffusion apparatus, automation, sugar production, beet chips, electrotechnological complex, energy efficiency, control system.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ.....	9
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ВИДІЛЕННЯ ДИФУЗІЙНОГО СОКУ З БУРЯКОВОЇ СТРУЖКИ В УМОВАХ ТОВ «ЖОВТНЕВИЙ ЦУКРОВИЙ ЗАВОД».....	15
2.1. Опис методів виділення дифузійного соку з бурякової стружки.....	15
2.2. Аналіз обладнання для виділення дифузійного соку з бурякової стружки на ТОВ «Жовтневий цукровий завод».....	23
РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	31
3.1. Проектування принципової схеми роботи обладнання.....	31
3.2. Проектування електричної системи управління.....	36
3.3. Проектування функціональної схеми базового електроприводу .....	38
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ .....	41
4.1 Аналіз небезпечних факторів .....	41
4.2 Розробка заходів щодо забезпечення безпечних умов праці.....	42
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	44
5.1 Розрахунок річного споживання електроенергії.....	44
5.2 Розрахунок експлуатаційних витрат .....	47
5.3 Розрахунок терміну окупності та ефективності.....	47
5.4 Економічний коефіцієнт ефективності .....	48
5.5 Соціально-економічний та екологічний ефект.....	49
ВИСНОВКИ .....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	53

## ВСТУП

### 1. Актуальність теми

Цукробурякова промисловість є однією з ключових галузей харчової промисловості України та має стратегічне значення для забезпечення продовольчої безпеки держави. В умовах зростання вартості енергоресурсів і посилення вимог до якості продукції особливої актуальності набуває підвищення ефективності технологічних процесів шляхом впровадження сучасних систем автоматизації.

Одним з найважливіших етапів цукрового виробництва є процес дифузії, під час якого відбувається екстрагування цукру з бурякової стружки. Саме на цьому етапі виникають значні втрати сировини та енергії, що негативно впливає на економічні показники виробництва. Тому автоматизація похилих дифузійних апаратів є актуальним завданням сучасного цукрового виробництва.

### 2. Аналіз стану наукової розробки проблеми

Питання автоматизації процесів дифузії розглядалися у працях вітчизняних та зарубіжних науковців. Разом з тим, існуючі системи керування не завжди відповідають сучасним вимогам енергоефективності та стабільності технологічного процесу, що зумовлює необхідність подальших досліджень і вдосконалення технічних рішень.

### 3. Мета дослідження

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження параметрів електротехнологічного комплексу виділення дифузійного соку з бурякової стружки та розробка ефективної системи автоматизації похилого дифузійного апарата.

### 4. Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є технологічний процес дифузії в цукровому виробництві.

### 5. Предмет дослідження

Предметом дослідження є система автоматизації похилого дифузійного апарата.

## 6. Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети у роботі передбачається виконання таких завдань:

- аналіз сучасних технологій дифузійного процесу в цукровому виробництві;
- дослідження конструкції та принципу дії похилого дифузійного апарата;
- розробка технічних рішень системи автоматизації процесу;
- обґрунтування економічної доцільності впровадження автоматизованої системи керування;
- розробка заходів з охорони праці та екологічної безпеки.

## 7. Методи дослідження

У роботі використано методи аналізу наукових джерел, інженерних розрахунків, моделювання технологічних процесів та програмних засобів автоматизації.

## 8. Структура та обсяг роботи

Кваліфікаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 56 сторінок.

## РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Буряк - цінний коренеплід із високою харчовою та лікувальною цінністю, багатий на беталаїни, фенольні сполуки та нітрати. Основний пігмент бетанін надає йому інтенсивного червоного кольору, а його екстракти використовуються як природний барвник E162 у харчовій промисловості. Завдяки антиоксидантним, антимікробним і ергогенним властивостям буряковий сік покращує працездатність, знижує тиск і має позитивний вплив на здоров'я. Для подовження терміну зберігання та збереження біоактивних речовин застосовують сучасні методи обробки - імпульсне електричне поле, високий тиск, мікрохвильову й ультразвукову обробку, які ефективніші за традиційні. Переробка буряка у продукти з доданою вартістю — соки, порошки, чіпси, желе чи йогурти - підвищує його економічну цінність і розширює можливості використання в харчовій промисловості [1].

Крім того буряк є головним джерелом беталаїнів - природних пігментів, що забезпечують червоно-фіолетове або жовто-помаранчеве забарвлення. Основними їхніми видами є бетаціаніни (червоні) та бетаксантин (жовті), а головним пігментом буряка виступає бетанін. Він відзначається високою стабільністю у діапазоні рН 3-7, але руйнується при високих температурах і під дією металів, кисню чи світла, що обмежує його використання як харчового барвника. Незважаючи на це, бетанін залишається важливим натуральним червоним барвником завдяки своїй доступності та інтенсивному кольору. Крім того, беталаїни мають значну біологічну активність - антиоксидантну, протизапальну, протипухлинну, кардіопротекторну та антимікробну, що робить їх цінними для харчової та медичної промисловості [2].

Автоматизація технологічних процесів у харчовій промисловості - складна міждисциплінарна галузь. Вона поєднує механіку, електроніку, програмне забезпечення та менеджмент. У контексті цукрової промисловості автоматизація

спрямована на оптимізацію процесів екстракції, очищення та кристалізації цукру. Це безпосередньо впливає на вихід продукції, її якість і енергоефективність. Огляд літератури дозволяє виявити найбільш ефективні технічні рішення та алгоритми управління, а також визначити прогалини для подальших досліджень.

Історія цукробурякової промисловості України бере початок ще з XIX століття, коли почали з'являтися перші заводи, оснащені примітивним обладнанням для отримання цукру з бурякової сировини. З того часу технологія значно еволюціонувала: від ручних методів та невеликих парових установок - до сучасних комплексів із високим рівнем автоматизації. Одним із ключових етапів виробництва є етап екстрагування сахарози зі стружки буряків, у якому важливу роль відіграють дифузійні апарати.

Дифузія як метод екстрагування базується на законі руху молекул від області з вищою концентрацією до області з нижчою. У цукровому виробництві цей принцип реалізується шляхом контакту подрібненої сировини з гарячою водою. При цьому сахароза переходить у рідину, утворюючи дифузійний сік, який потім піддається подальшій очистці та випарюванню. У класичних методах дифузії основними параметрами, які впливають на ефективність, є температура (70-75 °C), тривалість процесу, розмір стружки та співвідношення сировини і води.

Дифузійні апарати - ключовий елемент технологічної лінії цукрового заводу. Технічно вони призначені для інтенсивного контакту бурякової стружки з теплою водою або розчином. Щоб забезпечити максимальний вміст розчиненої цукрози у дифузійному соку. Конструктивно апарати поділяються на вертикальні, горизонтальні і похилі. Вертикальні апарати мають просту вхідну й вихідну геометрію, зручні в монтажі, але характеризуються нерівномірним розподілом потоку і підвищеним механічним навантаженням на стружку. Горизонтальні апарати більш гомогенні по довжині робочого простору, але потребують великих площ. Похилі апарати поєднують переваги: забезпечують послідовний контакт сировини й знижують механічні uszkodження стружки. Це підвищує вихід цукрози

та знижує енерговитрати на обігрів. Описані конструктивні переваги дають підстави для вибору конкретного типу апарата залежно від виробничих умов і технологічних вимог [3].

Серед конструкцій дифузійних апаратів особливе значення мають похилі дифузійні установки. Використання шнеків дозволяє переміщувати стружку всередині апарата з одночасним її контактом із гарячою водою. Такий підхід забезпечує оптимальні умови для вилучення максимальної кількості цукру з буряків.

У сучасній науковій літературі питання автоматизації дифузійних процесів займає центральне місце. Автоматизація дає змогу підвищити стабільність технологічних параметрів, мінімізувати втрати цукру та зменшити енергоспоживання. Використання програмованих логічних контролерів (ПЛК) та SCADA-систем дозволяє здійснювати безперервний моніторинг і регулювання температури, рівня, витрати та інших ключових параметрів.

Система автоматизації дифузійного процесу складається з трьох основних рівнів: сенсорний шар (датчики температури, тиску, рівня, витратоміри), контролерний рівень (PLC/RTU) та рівень управління/візуалізації (SCADA/MES). Сучасні датчики з цифровими виходами (HART, Modbus, FOUNDATION Fieldbus) зменшують помилки вимірювання і полегшують інтеграцію у мережеве середовище. Контролери забезпечують локальні алгоритми ПД/адаптивного регулювання, а SCADA дає оператору зручні інтерфейси і можливість архівації даних для подальшого аналізу й оптимізації режимів.

Окрему увагу в літературі приділено розвитку вимірювальної техніки. Наприклад, сучасні температурні перетворювачі забезпечують точність вимірювання до 0,1 °C. Це дозволяє підтримувати оптимальний температурний режим. Рівень сокостружкової суміші контролюється за допомогою датчиків тиску та ультразвукових сенсорів. Для вимірювання витрати використовують

електромагнітні та коріолісові витратоміри. Вони характеризуються високою точністю і надійністю.

Серед зарубіжних джерел особливу цінність становлять роботи, присвячені впровадженню інтелектуальних систем керування. Вони здатні адаптуватися до зміни властивостей сировини. Такі системи ґрунтуються на принципах нечіткої логіки та штучних нейронних мереж. Це дозволяє оперативно реагувати на коливання у складі бурякової маси.

У Німеччині промислові інтегратори використовують підхід цифрових двійників у поєднанні з MES для повного управління лініями переробки. Цифровий двійник відтворює фізичну модель апарата та процесу. Це дає змогу виконувати моделювання «що-якщо», планування технічного обслуговування та оптимізацію графіків; знижує простої й підвищує ресурс обладнання, що особливо важливо на великих комплексах [4].

Французькі заводи інтегрують енергоменеджмент у систему управління що дозволяє зменшити питомі енерговитрати на тонну продукції шляхом координації пікових навантажень, оптимізації подачі пари та регулювання насосних систем. Комбінація SCADA+EMS (Energy Management System) дає як операційні, так і стратегічні вигоди у скороченні витрат та підвищенні стійкості виробництва [5].

У США фокус робиться на аналітиці великих даних і предиктивному обслуговуванні. Використання машинного навчання дозволяє прогнозувати зношування насосів і теплообмінників що знижує аварійність. Китайські підприємства швидко запроваджують IoT-рішення для віддаленого моніторингу та централізованого збору даних з розподілених майданчиків переробки буряку [6].

В Україні наукові праці спрямовані на адаптацію загальновідомих методів до умов локального сировинного забезпечення та енергетичних обмежень. В дослідженнях університетів і проектних інститутів розробляються алгоритми, що дозволяють компенсувати коливання якості буряка (вологість, вміст сухих речовин) та мінімізувати витрати пари шляхом корекції режимів на вході дифузійних

апаратів. Практичні впровадження на окремих українських заводах показали приріст виходу на 1-3 % при незмінних витратах сировини [7].

Нормативна база визначає обов'язкові вимоги до обладнання та систем керування. Для підприємств харчової промисловості важливі стандарти ISO 9001 (якість), ISO 14001 (екологія), ISO 45001 (охорона праці), а також галузеві ДСТУ. Крім цього, стандарти ISA/ANSI регламентують інтеграцію промислових систем і їхню кібербезпеку (ISA-99/IEC62443). Сьогодні це є критично важливим для захисту автоматизованих об'єктів від зовнішніх загроз [8].

Важливим аспектом сучасних досліджень є підвищення енергоефективності. Використання теплообмінників для повторного використання теплової енергії та систем автоматизованого регулювання витрат пари дозволяє знизити енергетичні витрати на 10-20%. Крім того, сучасні заводи впроваджують комбіновані системи. Вони поєднують автоматизацію технологічних процесів із моніторингом споживання енергоресурсів.

Точність вимірювань є вирішальною для коректної роботи системи управління. Вибір датчиків та методів калібрування впливає на стабільність процесу. Рекомендується застосовувати датчики з цифровим інтерфейсом та регулярну метрологічну перевірку, а також впроваджувати системи діагностики датчиків для зниження помилок, пов'язаних з відмовами або дрейфом показань [9].

Екологічні аспекти автоматизації охоплюють не лише зниження викидів CO<sub>2</sub>, а й оптимізацію використання водних ресурсів, скорочення органічних відходів та управління стоками. Системи автоматичного контролю дозволяють більш точно дозувати реагенти на очистці, зменшуючи надлишки та покращуючи якість скидів до очисних споруд. У комплексі це веде до зменшення навантаження на місцеві екосистеми [10].

Економічні обґрунтування впровадження автоматизації включають дослідження капітальних витрат (CAPEX) та експлуатаційних витрат (OPEX). Типова модель розрахунку окупності враховує зниження енерговитрат, підвищення

виходу продукції та зменшення витрат на ремонт. У багатьох проєктах внутрішня норма доходності (IRR) та чиста приведена вартість (NPV) використовуються для прийняття інвестиційних рішень [11].

Узагальнюючи результати літературного аналізу, можна зробити висновок, що розробка сучасних систем автоматизації дифузійних апаратів є необхідною умовою підвищення ефективності виробництва цукру. Використання цифрових датчиків, інтелектуальних алгоритмів та SCADA-систем дозволяє значно покращити якість керування процесом і забезпечити економічну доцільність впровадження нових технологій.

Таким чином, огляд літератури демонструє як історичний розвиток дифузійних апаратів, так і сучасні науково-технічні підходи. Вони формують основу для подальшої розробки системи автоматизації похилого дифузійного апарату.

## **РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ВИДІЛЕННЯ ДИФУЗІЙНОГО СОКУ З БУРЯКОВОЇ СТРУЖКИ В УМОВАХ ТОВ «ЖОВТНЕВИЙ ЦУКРОВИЙ ЗАВОД»**

### **2.1. Опис методів виділення дифузійного соку з бурякової стружки**

Виділення дифузійного соку з бурякової стружки є одним із ключових етапів у виробництві цукру. Основна ціль цього процесу базується у ефективному вилученні розчинних цукрів з клітин буряка при мінімальних втратах та оптимальному використанні енергії. Існує кілька методів виділення дифузійного соку. Вони застосовуються на сучасних цукрових заводах.

1) Гаряча дифузія - базується на здатності розчинних цукрів переходити із клітин стружки у воду під впливом високої температури (50-80°C). Цей метод є найбільш поширеним у промисловості.

Етапи:

1. Подрібнену бурякову стружку завантажують у дифузійні апарати.
2. Через стружку пропускають гарячу воду або попередній розчин дифузії.
3. Відбувається поступовий перехід цукрів із клітин у воду, утворюючи дифузійний сік.

До переваг можна віднести: висока концентрація цукру у кінцевому продукті; простота конструкції апаратів.

До недоліків: високе енергоспоживання для нагрівання води; можлива ферментація соку при тривалому зберіганні.

2) Контактна дифузія - передбачає обробку стружки мінімальною кількістю води або соку при контрольованій температурі для поступового виділення цукрів.

Етапи:

1. Стружку зволожують гарячим водним розчином, який циркулює через стружку.
2. Розчинні речовини переходять у воду, утворюючи сік.

Переваги: економія води; менше механічних пошкоджень стружки.

Недоліки: менша швидкість дифузії порівняно з потоковими апаратами.

3) Потокова або роторна дифузія - використовуються апарати. Там стружка безперервно рухається, а гаряча вода подається у зустрічному або поперечному напрямку. Це забезпечує інтенсивне виділення цукрів.

Етапи:

1. Стружка надходить у роторний дифузор.

2. Гаряча вода або попередній сік циркулює, забезпечуючи рівномірний контакт із стружкою.

3. Відбувається швидке вилучення цукрів із клітин.

Переваги: висока продуктивність; краща ефективність вилучення цукрів.

Недоліки: складність конструкції апаратів; вища вартість обладнання.

4) Диференційна дифузія - застосовується для поступового виділення цукру з контролем температури та концентрації соку на різних етапах. Це дозволяє максимально використовувати потенціал буряка.

Етапи:

1. Стружку обробляють водою низької температури для виділення легкодоступних цукрів.

2. Потім стружку обробляють гарячою водою для вилучення решти цукру.

Переваги: зменшення втрат цукру; оптимізація використання енергії.

Недоліки: триваліший час обробки; складність контролю процесу.

Для підвищення ефективності процесу на сучасних цукрових заводах застосовують комбіновані методи. Вони поєднують контактну та потокову дифузію. Використовують також електроаналогії та автоматизовані системи контролю температури та концентрації соку. Ці технології дозволяють економити ресурси та підвищувати вихід цукру.

Методи виділення дифузійного соку з бурякової стружки залежать від технологічних умов, продуктивності підприємства та наявного обладнання. Гаряча

дифузія є традиційною та широко застосовується, контактна та потокова дифузія дозволяють економити ресурси та підвищувати ефективність процесу, а диференційна дифузія оптимізує енергетичні витрати та зменшує втрати цукру. Сучасні комбіновані методи та автоматизація процесу роблять виробництво більш ефективним та економічним.

Процес отримання дифузійного соку з бурякової стружки є одним із ключових етапів виробництва цукру, що значною мірою впливає на його якість, вихід готового продукту та загальну ефективність роботи цукрового заводу.

Головним обладнанням дифузійного відділення, яке відповідає за отримання дифузійного соку, є дифузійний апарат (ДА). Його ефективність оцінюється за продуктивністю, вмістом цукру в отриманому соку та рівнем втрат цукру в жомі [12].

Відмиті буряки з мийного відділення гвинтовим конвеєром подаються в шахтний бурякоелеватор і підіймаються на висоту 22 м. Далі за допомогою контрольного стрічкового конвеєра буряки подаються в бункер над бурякорізками. Загальний об'єм бункера складає 196 м<sup>3</sup>, запас буряків на 70 хвилин роботи. Над контрольним стрічковим конвеєром встановлений електромагнітний сепаратор. В місці вивантаження буряків із стрічкового конвеєра в бункер встановлений вентилятор для віддуву легких домішок від буряків. З бункера буряк надходить до 4-х бурякорізок. В бурякорізках використовуються ножі типу 1011-В з кроком між вершинами ребер 8.25 мм. Для продування ножів використовується пара.

Бурякова стружка стрічковим конвеєром загальною довжиною 60 м і шириною 1000 мм подається в шахту дифузійного апарату типу А1-ПД2-С30. Дифузійний апарат обігривається: перша камера - соковою парою 2 корпусу випарної станції, всі наступні - соковою парою 3 корпусу випарної станції, в період пуску – ретурною парою. Конденсат відводиться в збірник конденсату. Для висолоджування бурякової стружки в дифузійному апараті використовується

нагріта до 65 - 68 °С сульфітована барометрична вода. Сік після дифузійного апарату насосами подається на пульпоуловлювач. Після відокремлення пульпи дифузійний сік самопливом надходить до збірника дифузійного соку, звідки насосами через індукційний витратомір подається на прогресивний переддефекатор вертикального типу, а пульпа скидається в першу камеру дифузійного апарату. Жом після дифузійного апарату вивантажується в жомозмішувач, там змішується із зворотною жомовою водою. Жомоводяна суміш насосами подається на жомовіджимні преси. Жомопресова вода самопливом подається в збірник і далі насосами вертається в жомозмішувач. Віджатий в жомових пресах жом шнеком подається на стрічковий конвеєр галереї жомовидалення, за допомогою якого транспортується в жомосховище [13].

Для дифузійного процесу на цукровому заводі використовується сульфітована барометрична вода. Барометрична вода з температурою 40 - 45 °С зі збірника гідрозатвору метричних конденсаторів насосами подається на пароконтактний підігрівач. Там підігрівається до температури 65 - 68°C . В нижню частину контактного підігрівача підведена сокова пара з корпусу випарної станції і ретур. Кількість подавання пари регулюється регулюючими органами в залежності від заданої температури. Підігріта вода самопливом подається в збірник живильної води, звідки насосом подається на сульфітатор. Після сульфітатора вода самопливом направляється в збірник води після сульфітації, з якого сульфітована вода насосами подається на живлення дифузійного апарату.

Екстрагування цукристих речовин із бурякової сировини складається з чотирьох етапів:

- проникнення екстрагента в пори бурякової стружки;
- розчинення цукристих речовин;
- перенос цукристих речовин із глибини частки до поверхні бурякової стружки (молекулярна дифузія);

- перенос цукристих речовин від поверхні бурякової стружки в глибину екстрагенту (конвективна дифузія).

Похилий дифузійний апарат являє собою коритоподібний корпус, що охоплює транспортуючі стружку шнеки, які приводяться в рух керованим електроприводом постійного струму, що дозволяє використати їх як стабілізуючий фактор для забезпечення оптимального виробничого потоку заводу (рисунок 1.1). На корпусі змонтовані жомовідвантажуючий апарат, приводи транспортуючих шнеків і жомовідвантажуючого пристрою, системи підігріву і комунікації. Корпус апарата нахилений до горизонту під кутом 8 - 11°, розміри апарата залежать від розрахункової продуктивності: довжина від 22 до 35 м, ширина від 5 до 8 м, висота від 7 до 10 м. У бурякопереробному відділенні, окрім дифузійного апарата, розташоване різноманітне допоміжне устаткування: бурякорізки, підігрівачі, апарати для підготовки та подачі води, збірники дифузійного соку, транспортери тощо. Саме дифузійні апарати є головними машинами, що визначають ефективність і стабільність роботи всього бурякопереробного відділення цукрового заводу.

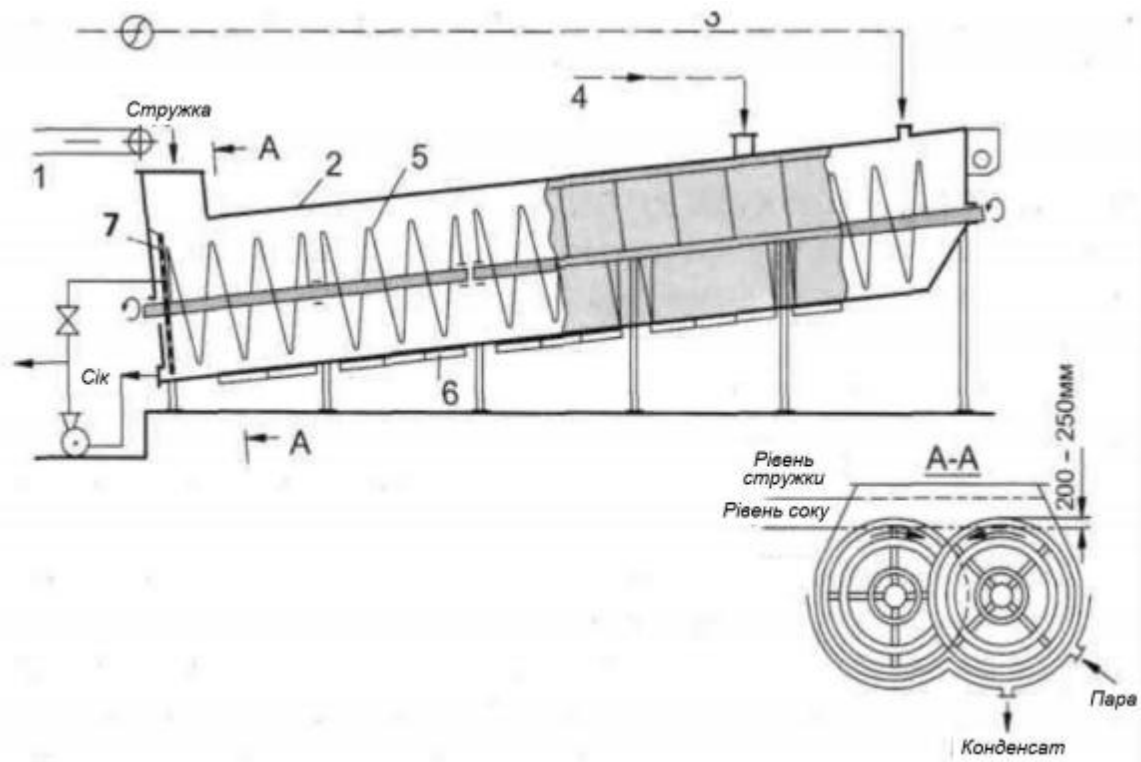


Рисунок 1.1 – Схема похилого шнекового дифузійного апарату  
 1 - стружка; 2 - корпус дифузійного апарату; 3 - живильна вода; 4 - жомопресова вода; 5 - шнеки; 6 - парова камера; 7 - лобове сито

У дифузійних апаратах безперервної дії бурякова стружка та дифузійний сік переміщуються у протиточному напрямку. У такій системі в будь-якому перерізі апарата встановлюється стала концентрація речовин як у твердій, так і в рідкій фазі. Таким чином, процес екстрагування в кожному перерізі можна вважати стаціонарним. Водночас усередині самої стружки вміст цукру змінюється в процесі її руху вздовж ПДА, тому загалом процес характеризується певною нестаціонарністю та просторовим розподілом параметрів [12].

Технологічний процес у дифузійному апараті відбувається наступним чином: цукровий буряк подрібнюється в бурякорізці, спіралі Архімеда якої обертаються за допомогою двигуна постійного струму і переміщує буряк відносно ножів, при

цьому витрата стружки є функцією швидкості обертання спіралі і заповнення бурякорізки буряком.

Далі стружка у вигляді безперервного потоку транспортується стрічковим транспортером. Витрата стружки вимірюється ваговим дозатором, платформа якого переміщується на величину пропорційну вазі стружки, яка знаходиться на ній. Сенсор дозатора здійснює дистанційну передачу показів витрат стружки. З дозатора стружка потрапляє в дифузійний апарат, де переміщується двома шнеками. Шнеки приводяться в рух двигунами постійного струму. Корпус апарата підігрівається за допомогою парових камер, в які подають пару. Проходячи через апарат, наповнений підігрітою водою, стружка віддає майже весь цукор воді, яка перетворюється в дифузійний сік. Жом видаляється з апарата жомовим колесом, яке приводиться в рух двигуном змінного струму.

Режим роботи нахиленого шнекового дифузійного апарату:

- довжина 100 г стружки	9 - 12 м
- відкачка соку, % до маси буряку	120 %
- тривалість активної дифузії	70-75 хв
- питоме навантаження робочого об'єму апарата стружкою	0.6 т/ м <sup>3</sup>

У процесі виробництва цукру з буряків утворюються два основних побічних продукти - бурякова меляса та залишок карбонізованого вапна (CR). Бурякова меляса є рідким побічним продуктом, який вже знайшов широке застосування у будівельній галузі як пластифікатор, водоредуктор, сповільнювач тверднення цементу, а також як добавка, що модифікує мікроструктуру та підвищує міцність бетонів і розчинів. Іншим важливим побічним продуктом є залишок карбонізованого вапна, який утворюється на етапі очищення дифузійного соку при обробці його вапняним молоком та вуглекислим газом, у результаті чого випадає осад карбонату кальцію (CaCO<sub>3</sub>). Цей залишок вже застосовується в різних галузях

як наповнювач для пластмас, паперу, гуми, коригувач рН та добриво для ґрунтів, а також як добавка до портландцементу й геополімерних матеріалів. Після прожарювання CR перетворюється на оксид кальцію (CaO) і може використовуватися як активна мінеральна добавка для підвищення міцності, довговічності та скорочення часу схоплювання геополімерних паст і цементів. Однак, попри численні можливості повторного використання, значна частина цього побічного продукту досі утилізується екологічно небезпечними способами. Тому переробка CR у будівельних матеріалах, зокрема в геополімерах на основі метаксаоліну, є перспективним напрямом, який дозволяє одночасно зменшити обсяги промислових відходів і негативний вплив на навколишнє середовище [14].

Побічні продукти, замість утилізації, можуть бути ефективно використані для отримання цінних речовин і продуктів з доданою вартістю. Наприклад жом містить значну кількість клітковини, пектину, білків і мінеральних речовин, тому може бути використаний для екстракції пектину - природного полісахариду, що застосовується як загусник, стабілізатор і джерело харчових волокон у харчовій промисловості. Сучасні методи екстракції - ультразвукова, мікрохвильова, високотискова чи імпульсна електрична обробка - забезпечують вищий вихід пектину, зменшують енерговитрати та шкідливі стоки порівняно з традиційними кислотними способами. Використання побічних продуктів дифузійного виробництва буряка як сировини для переробки є екологічно доцільним рішенням, що сприяє зменшенню відходів, створенню доданої вартості та підвищенню ефективності цукрового виробництва [15].

## 2.2. Аналіз обладнання для виділення дифузійного соку з бурякової стружки на ТОВ «Жовтневий цукровий завод»

Для вимірювання температури використовуються перетворювачі температури типу CTR-4 (рисунок 2. 1) [16].



Рисунок 2.1 - Перетворювач температури CTR-4

Рівень вимірюється перетворювачем тиску РС -28-PZ з мембранним роздільником типу S-P (рисунок 2.2).

Вимірювання рівня за допомогою зонда базується на прямій залежності між висотою стовпа рідини та гідростатичним тиском. При цьому вимірювання тиску проводиться в зоні розташування роздільної мембрани.

Електронний підсилювач, який стандартизує сигнал знаходиться під дзеркалом засобу вимірювання в корпусі зі ступенем захисту IP 54 або IP 67 залежно від використовуваного електричного з'єднання. Електричні дроти що з'єднують підсилювач з датчиком знаходяться в трубі  $\text{Ø}17.2 \times 1.6$ , яка є конструкційним елементом зонда [17].



Рисунок 2.2 - Перетворювач тиску PC-28-PZ з мембранним роздільником типу S-P

Електромагнітний витратомір PEM-1000 (рис. 2.3) використовується для визначення об'ємної витрати електропровідних рідин. Прилад забезпечує вимірювання як швидкості потоку, так і загального об'єму рідини, що проходить через нього, у будь-якому напрямку руху — прямому чи зворотному.

Для отримання максимальної точності показів необхідно, щоб трубопровід був повністю заповнений робочим середовищем. Конструкція витратоміра не має внутрішніх виступаючих частин, що мінімізує гідравлічні втрати під час роботи приладу. Витратомір PEM-1000 ефективно застосовується для вимірювання витрати в'язких рідин, емульсій, а також різноманітних хімічних розчинів, включно з агресивними середовищами та іншими технічними рідинами [18].



Рисунок 2.3 - Електромагнітний витратомір РЕМ- 1000

Конвеєрні автоматичні ваги СВЕДА ВК (рис. 2.4) призначені для безперервного визначення маси сипучих та кускових матеріалів, які транспортуються стрічковими конвеєрами. Прилад забезпечує відображення на цифровому табло поточної продуктивності конвеєра, а також обчислення маси зважуваних матеріалів наростаючим підсумком під час проведення комерційних, облікових та технологічних операцій [19].



Рисунок 2.4 - Стрічкові ваги ВК-201

Величина рН вимірюється комплектом вимірювального перетворювача liquisys CPM 253, який складається з електродної системи CLS 21 та перетворювача [20] (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Комплект вимірювального перетворювача liquisys CPM 221

Промисловий рефрактометр CM-800  $\alpha$  - це остання розробка в серії CM. Удосконалена версія знятого з виробництва CM-780N зі збільшеною точністю у ширшому діапазоні Вгіх. Як і решта промислових рефрактометрів, даний прилад призначений для вимірювання концентрації речовин промисловим способом, тобто у виробництві, безпосередньо в технологічному потоці. Як правило, такі прилади ставляться на трубу або монтуються в стінку танка. Прилад відображає дані на екрані за шкалою %Вгіх [21].



Рисунок 2.6 – Рефрактометр CM-800  $\alpha$

Електропневматичний позиціонер TROVIS 3730- 1 призначений для встановлення на регулюючі пневматичні клапани з метою координації положення клапана (регульований параметр  $x$ ) з величиною керуючого сигналу (задане значення  $w$ ) [22].

Керуючий сигнал. Це надходить із системи управління, порівнюється з величиною ходу/кутом відкриття регулюючого клапана, виробляючи при цьому керуючий тиск для пневматичного приводу.

Основні елементи позиціонера: безконтактний шляховий датчик, пневматичне та електронне обладнання з мікроконтролером. Положення клапана передається або у вигляді кута повороту або у вигляді ходу на важіль, звідти на датчик ходу та на мікроконтролер. Алгоритм ПІД у мікроконтролері порівнює положення клапана, виміряне датчиком переміщення, керуючим сигналом постійного струму 4–20 мА, який видається системою управління після зміни А/Д перетворювачем.

У разі відхилення заданого значення активація і/р модуля змінюється таким чином: на приводі регулюючого клапана створюється відповідний тиск або вентиляція над вихідним підсилювачем. Внаслідок цього запірний елемент клапана (наприклад, плунжер) переміщується у становище, визначене заданим значенням.

Позиціонер керується обертово-натискною кнопкою для навігації по меню на дисплеї.



Рисунок 2.7 - Електропневматичний позиціонер TROVIS 3730- 1

Регулюючі клапани Samson з пневматичним приводом складаються з клапана та приводу. Корпус клапана може виготовлятися із чавуну, кованої сталі або корозійностійкої кованої сталі, а також зі спеціальних матеріалів. При необхідності можуть оснащуватися, на вибір, електричними, пневматичними, ручними або електрогідравлічними приводами [23].

Для керування цим обладнанням та сигналізації ходу на клапани встановлюються позиціонери, кінцеві вимикачі та соленоїдні клапани з приєднанням DIN 60534-6.



Рисунок 2.8 - Виконавчий механізм Samson

Частотний перетворювач LENZE 8200 vector (рисунок 2.9) призначений для управління асинхронними двигунами, які приводять в рух насоси, вентилятори, мішалки, технологічні лінії, конвеєри та інше [24].

Принцип роботи: векторна або вольт-частотна зміна частоти і струму приводить до зміни обертів вала двигуна. А також забезпечують повний захист двигуна від перевантаження по струму, перегрів пропадання та перекос фаз мережі та інші характеристики.



Рисунок 2.9 - Частотний перетворювач LENZE 8200 vector

Блок ручного керування БРУ-17 (рисунок 2.10) використовується у локальних та комплексних системах промислової автоматизації виробничих процесів як станція ручного керування аналоговими виконавчими механізмами або як ручний задатчик аналогових сигналів із функцією індикації [25]. Пристрій БРУ-17 призначений для перемикання контурів керування виконавчими механізмами, відображення режимів роботи, а також для вимірювання та індикації одного з технологічних параметрів.



Рисунок 2.10 - Блок ручного управління БРУ- 17

System 200V є модульним програмованим логічним контролером (ПЛК), призначеним для побудови як централізованих, так і розподілених систем керування. Програмування здійснюється за допомогою середовищ WinPLC та/або STEP7 від компанії Siemens. Завдяки компактній конструкції та сумісності з системою команд Simatic S7-300, пристрої цієї серії відзначаються високою ефективністю роботи. Наявність різноманітних інтерфейсних і комунікаційних модулів у складі серії забезпечує можливість застосування контролерів у розподілених системах керування зі складною мережевою структурою.

Розгалужена система модулів розширення дозволяє реалізовувати за допомогою обладнання System 200V майже будь-які завдання автоматизації керування процесами невеликої та середньої складності [26].

## РОЗДІЛ 3. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 3.1. Проектування принципової схеми роботи обладнання

Для ефективної роботи похилого дифапарату необхідно реалізувати наступні контури:

- керування і регулювання температури по зонах дифузійного апарату;
- керування і стабілізація рівня по зонах дифузійного апарату;
- керування приводами шнеків дифузійного апарату;
- керування відкачкою дифузійного соку з апарату;
- регулювання співвідношення стружка - вода;
- керування вмісту сухих речовин в дифузійному соку;
- керування витрати дифузійного соку;
- керування і регулювання величини рН живильної води.

Керування і регулювання температури по зонам дифапарату здійснюється наступним чином. В зонах дифапарату встановлені перетворювачі температури типу СTR-4 (поз. 1а - 4а). З перетворювачів уніфікований струмовий сигнал надходить на блоки ручного управління БРУ-17 (поз. 1б - 4б), де відображається значення температури. З аналогових виходів БРУ-17 сигнал ретранслюється на аналогові входи модуля розширення ПЛК VІРА system 200V. Контролер обробляє сигнали, передає дані про стан температури по зонам на ЕОМ і у відповідності до встановленого ціль формує керуючі сигнали 4-20 мА, через БРУ-17, на електропневматичні позиціонери ТRОVІS 3730-1 (поз. 1в - 4в). Вони перетворюють струмові сигнали в пневматичні 20-100 кПа. Потім керуючі сигнали передаються на виконавчі механізми Samson (поз. 1г - 4г). Вони за допомогою заслінок регулюють подачу гріючої пари в зони дифапарату і таким чином змінюють температуру в зонах дифапарату.

Потрібний рівень сокостружкової суміші по довжині дифузійного апарату підтримують підбиранням частоти обертання нижніх і верхніх шнеків відповідно

заданої продуктивності і якості бурякової стружки. Керування рівня сокостружкової суміші по зонах дифузійного апарату здійснюється за допомогою перетворювачів тиску РС-28-PZ з мембранними роздільниками типу S-P (поз. 5а, 5б, 5в, 5г, 5д) з яких уніфікований сигнал 4 - 20 мА подається до ПЛК VIPA system 200V та ЕОМ. Згідно програми на модуль аналогових вихідних сигналів подається керуючі сигнали 4 - 20 мА, які поступають на входи перетворювачів частоти LENZE 8200 vector (поз. 5е, 5є). Вони в свою чергу керують приводом насосу дифузійного соку. Також передбачено передачу інформації в схему управління бурякорізками.

Витрата стружки вимірюється автоматично на стрічкових вагах ВК-230. Складаються з первинного перетворювача (поз. 6а) та вагового процесора ПВ- 310 (поз. 6б). Вони встановлені за місцем. Уніфікований струмовий сигнал з вагового процесора подається до ПЛК. Там обробляється і передається до ЕОМ. Витрата води вимірюється електромагнітним витратоміром РЕМ-1000 (поз. 6в). Вона відображається на індикаторі блоку ручного управління БРУ-17 (поз. 6г). З БРУ-17 сигнал, пропорційний витраті, подається до аналогового модуля вхідних сигналів ПЛК. В ПЛК, згідно програми користувача, відпрацьовується алгоритм регулювання співвідношення і формується керуючий сигнал до модуля аналогових виходів. З модуля аналогових виходів сигнал поступає на БРУ-17 і з нього на електропневматичний позиціонер TROVIS 3730-1 (поз. 6д). З перетворювача пневматичний сигнал поступає на виконавчий механізм Samson з пневмоприводом (поз. 6е). Він регулює кількість води, яка подається в дифузійний апарат і таким чином забезпечується завдане співвідношення стружка - вода.

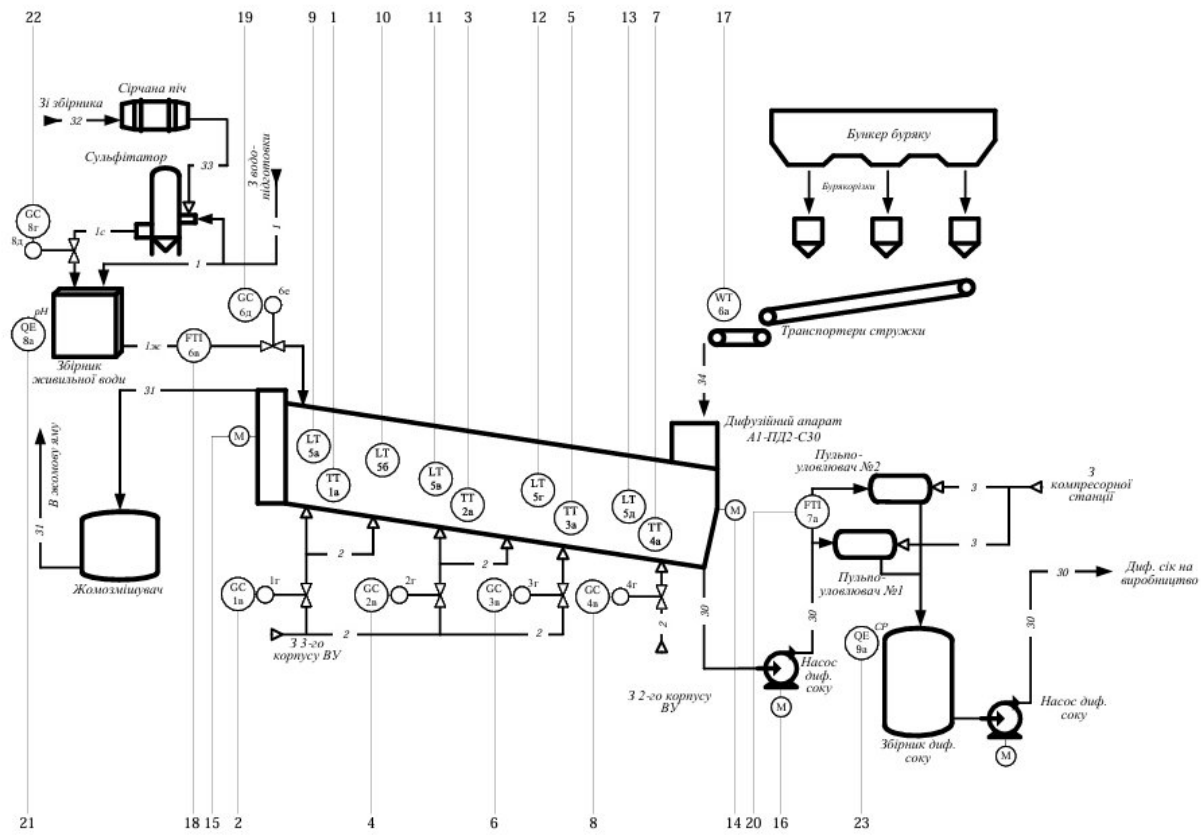
Витрата дифузійного соку з апарату вимірюється електромагнітним витратоміром РЕМ-1000 (поз. 7а). Сигнал, пропорційний витраті, подається до аналогового модуля вхідних сигналів ПЛК та ЕОМ.

Величина рН живильної води вимірюється рН-метром Liquisys M CPM 253 (поз. 8а). Він працює в комплекті з електродною системою рН - метра CLS 21 (поз. 8б). рН-метр, встановлений за місцем, має дисплей. З перетворювача уніфікований

струмовий сигнал надходить на блок ручного управління БРУ-17 (поз. 8в), де відображається величина рН. З аналогового вихода БРУ-17 сигнал ретранслюється на аналоговий вхід модуля розширення ПЛК VIPA system 200V. Контролер обробляє сигнал, передає дані на ЕОМ і у відповідності до встановленої ціль формує керуючий сигнал 4-20 мА, через БРУ-17, на електропневматичний позиціонер TROVIS 3730-1 (поз. 8г), який перетворює струмовий сигнал в пневматичний 20-100 кПа. Потім керуючий сигнал передається на виконавчий механізм Samson (поз. 8д), який за допомогою заслінки регулює подачу сульфатованої води в збірник перед дифузійним апаратом.

Керування та контроль вмісту сухих речовин реалізовано на базі автоматичного рефрактометра СМ-800 α (поз. 9а, 9б), сигнал з якого (4 - 20 мА) передається до ПЛК та ЕОМ.

Схемою автоматизації передбачено сигналізацію технологічних параметрів та реалізацію графічного інтерфейсу системи на ЕОМ.



		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
			68 °C регулювання	70 °C регулювання	72 °C регулювання	68 °C регулювання		2.1 м	2.3 м	2.3 м	2.3 м	2.3 м		керування	керування	керування	керування в ступінь керування буравчорітальної	115 т/год	100 м <sup>3</sup> /год регулювання	110 м <sup>3</sup> /год регулювання	6 - 6.5 рН	регулювання	16 - 17 %	
Прилади за місцем															SIC 5c	SIC 5c	SIC 5a	WTI 6b			QTI 8b	QTI 9b		
Прилади на щиті			HC 16	HL 1	HC 26	HL 2	HC 36	HL 3	HC 46	HL 4					HL 5	HL 6	HL 7	HL 8	HL 9		HC 6r	HC 8n		
ПНК VIPA 200V	Y																							
	C																							
	A																							
	B																							
EOM	B																							
	I																							
	R																							
	K A																							

Рисунок 3.1 – Принципова схема роботи обладнання

Таблиця 3.2 – Специфікація обладнання

Позн.	Найменування	К-ть
	Прилади за місцем	
1а-4а	Перетворювач температури типу СTR-4	4
5а-5д	Перетворювач тиску РС-28-РZ з мембранним роздільником типу S-Р	5
6а	Багатороликові конвеєрні ваги ВК-230	1
6б	Процесор ваговий ПВ-310	1
6в, 7а	Електромагнітний витратомір РЕМ-1000	2
8а	Електродна система рН-метра CLS 21	1
8б	Перетворювач Liquisys М СРМ 253	1
9а, 9б	Промисловий рефрактометр СМ-800 $\alpha$	1
1в-4в, 6д, 8г	Електропневматичний позиціонер TROVIS 3730-1	6
1г-4г, 6е, 8д	Регулюючий клапан Samson з пневматичним приводом	6
5е-5ж	Перетворювач частоти LENZE 9300 vector - 75	3
	Прилади на щиті	
1б-4б, 6г, 8в	Блок ручного управління БРУ-17	6
	ПЛК VIPA system 200V	1

### 3.2. Проектування електричної системи управління

Електрична система управління похилого дифузійного апарату повинна забезпечувати надійну, безпечну та ефективну роботу обладнання в умовах безперервного виробництва. Вона має функціонувати як в автоматичному, так і в ручному режимах, інтегруватися із SCADA та ERP системами, мати багаторівневий захист. Вимоги включають відповідність стандартам ДСТУ EN та ІЕС, високий рівень електробезпеки, резервування вузлів, енергозбереження та простоту обслуговування. Деталізований опис передбачає приклади використання стандартів, технічних характеристик обладнання, а також дослідження практичного використання на цукрових заводах України та ЄС.

Дифузійний етап у похилому апараті базується на вимиванні сахарози з бурякової стружки гарячою водою. Система управління контролює параметри: температуру (70–75 °С), рівень рідини, витрату води та швидкість шнека. Коливання цих параметрів впливають на якість дифузійного соку та подальшу роботу заводу, тому електрична система повинна забезпечити точний керування і автоматичне коригування режимів роботи у реальному часі.

Основними елементами системи є ПЛК, датчики (температури, тиску, рівня, витрати), виконавчі механізми (електроприводи клапанів, насоси, частотний перетворювач для шнека), НМІ панель. Для захисту та живлення використовуються автоматичні вимикачі, контактори, реле. ПЛК виконує функції збору та обробки сигналів, керування виконавчими механізмами, а також передачу даних у SCADA.

Алгоритм роботи побудований на принципах стабілізації основних параметрів. ПІД-регулятори підтримують температуру та рівень, витрата води регулюється автоматичним клапаном, швидкість шнека - частотним перетворювачем. Усі дані збираються в ПЛК. Там формуються сигнали керування. При аварійних відхиленнях система автоматично переходить у безпечний режим із зупинкою апарата та подачею сигналу оператору.

Щит управління містить ПЛК, модулі введення/виведення, апаратуру живлення й захисту. Автоматичні вимикачі захищають силові кола, диференційні вимикачі забезпечують захист персоналу, теплові реле захищають двигуни. Передбачено аварійне відключення, індикацію станів, екранування кабелів та надійне заземлення.

SCADA забезпечує візуалізацію процесу, архівування даних, формування звітів і тривоги. Інтеграція здійснюється через промислові протоколи (Modbus, Profibus, Ethernet/IP). Це дозволяє оператору контролювати параметри, змінювати установки, аналізувати історію роботи та інтегрувати апарат у систему управління підприємством.

Система має багаторівневі заходи безпеки: резервування датчиків і живлення, самодіагностику ПЛК, аварійні алгоритми. Електробезпека досягається за рахунок правильного вибору кабелів, заземлення, використання пристроїв захисного відключення. Надійність системи підтверджується використанням обладнання провідних виробників та відповідністю міжнародним стандартам.

Розроблена система управління забезпечує стабільність процесу, високу якість соку, енергоефективність і безпеку. Вона відповідає вимогам сучасної автоматизації та створює умови для подальшої інтеграції у цифрові виробничі комплекси.

### **3.3. Проектування функціональної схеми базового електроприводу**

Базовий електропривід шнека є одним із ключових вузлів технологічного обладнання, який забезпечує безперервне транспортування або подачу матеріалу у виробничому процесі. Вибір електроприводу визначається вимогами до плавності руху, стабільності швидкості, енергоефективності та надійності. Для приводу шнека застосовується асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором, який у поєднанні з частотним перетворювачем дозволяє реалізувати плавне

регулювання частоти обертання, керований пуск і зупинку, а також підвищену точність керування. Електропривод даного типу відзначається високою надійністю, простотою обслуговування, відносно невисокою вартістю та широкими можливостями для автоматизації. Він забезпечує регулювання швидкості у широкому діапазоні. Це особливо важливо для процесів, де необхідно адаптувати рух шнека до змін навантаження або властивостей матеріалу.

Шнек виконує функцію транспортування або подачі бурякової стружки до похилого дифузійного апарату. Рівномірність подачі матеріалу впливає на стабільність технологічного процесу, тому важливо забезпечити плавність обертання вала шнека. У процесі роботи електропривід має адаптуватися до зміни навантаження, в'язкості або густини сировини. Основні вимоги до приводу шнека включають плавний пуск і зупинку, можливість реверсу, точне підтримання заданої швидкості обертання, захист від перевантажень, коротких замикань і перегріву. Для досягнення цих вимог доцільно використовувати частотний перетворювач, який дозволяє реалізувати автоматичне регулювання швидкості обертання двигуна відповідно до заданих параметрів.

Для приводу шнека обрано трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором, який характеризується простотою конструкції, високою надійністю, невеликими витратами на технічне обслуговування та можливістю роботи у важких умовах. Номінальні параметри двигуна визначаються з урахуванням потужності, необхідної для подолання опору руху матеріалу, та запасу для забезпечення стабільної роботи. Рекомендовані параметри: енергія 5-7,5 кВт, номінальна напруга 380 В, частота обертання 1450 об/хв. Асинхронні двигуни такого типу добре поєднуються з частотними перетворювачами. Це дозволяє підвищити енергоефективність і забезпечити тривалий термін служби без надмірних навантажень.

Частотний перетворювач призначений для зміни частоти та напруги живлення електродвигуна. Це дозволяє плавно регулювати швидкість обертання. Він також

забезпечує функції електронного захисту двигуна, автоматичного перезапуску після короткочасного збою, динамічного гальмування та керування за сигналами від контролера або панелі оператора.

Перетворювач має систему самодіагностики. Це дозволяє виявляти несправності у силовому колі, перевантаження або порушення фазного балансу. Для приводу шнека доцільно використовувати перетворювачі провідних виробників (Siemens, Schneider Electric, Danfoss). Вони мають вбудовані ПД-регулятори і можливість підключення до мережі Modbus або Profibus.

Функціональна схема базового електроприводу включає асинхронний двигун, частотний перетворювач, контролер, панель оператора, апаратуру захисту та комунікаційні лінії. Контролер формує сигнали керування, здійснює зворотний зв'язок і аналізує параметри роботи системи. Датчики струму, температури, швидкості та положення передають дані в контролер, який порівнює їх із заданими значеннями. У разі відхилення частотний перетворювач змінює частоту живлення, тим самим стабілізує оберти двигуна. Система забезпечує як автоматичний, так і ручний режим роботи. Оператор може змінювати налаштування через НМІ-панель або SCADA-систему.

Після подачі живлення контролер активує частотний перетворювач, який плавно підвищує частоту та напругу, забезпечуючи м'який пуск двигуна. Шнек починає обертатися з мінімальною швидкістю, після чого швидкість регулюється залежно від навантаження та сигналів з датчиків. У разі перевантаження або перегріву система автоматично знижує частоту обертання або зупиняє двигун. Всі параметри відображаються на панелі оператора. За необхідності можливе ручне керування через інтерфейс або локальні кнопки керування.

Система керування побудована на базі ПЛК, який реалізує алгоритми автоматичного пуску, стабілізації швидкості, аварійного зупину та самодіагностики. Контролер забезпечує обмін даними із частотним перетворювачем та НМІ через промислові протоколи. Для захисту передбачено

автоматичні вимикачі, реле контролю фаз, датчики температури обмоток двигуна, захист від короткого замикання, обриву фази, перевантаження та перегріву. Електричні кола мають заземлення, а сигнальні - екранування. Це зменшує електромагнітні завади та підвищує надійність системи.

Використання частотного регулювання дозволяє знизити енергоспоживання до 25-35 % у порівнянні з нерегульованими приводами. Плавний пуск і зупинка зменшують механічні навантаження. Це подовжує термін служби редуктора та підшипників. Завдяки використанню сучасних компонентів досягається висока стабільність роботи, зниження кількості аварійних ситуацій і простоїв. Всі елементи схеми взаємозамінні та легко інтегруються в системи автоматизованого управління підприємством.

Розроблена функціональна схема базового електроприводу шнека з асинхронним двигуном і частотним перетворювачем забезпечує плавне регулювання швидкості, стабільність процесу транспортування матеріалу та високу енергоефективність. Використання частотного керування дає можливість оптимізувати енергоспоживання, зменшити динамічні навантаження на механізми та підвищити ресурс обладнання. Запропоноване технічне рішення відповідає сучасним вимогам промислової автоматизації, підвищує надійність технологічного процесу та створює умови для інтеграції в систему енергоефективного керування підприємством.

## РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Аналіз небезпечних факторів

Під час роботи електротехнологічного комплексу виділення дифузійного соку на виробництві ТОВ «Жовтневий цукровий завод» на працівників впливають низка небезпечних і шкідливих виробничих факторів. Основні з них пов'язані з технологічним процесом, обладнанням, мікрокліматом і електроустановками.

До фізичних факторів належать:

- підвищена температура технологічних середовищ (до 80-85 °С), що може викликати перегрів організму та опіки;
- висока вологість повітря через наявність пари у зоні дифузії;
- шум і вібрація, які створюються електродвигунами, насосами та шнеками (до 85 дБА);
- рухомі частини механізмів (вали, транспортери, шнеки), що становлять ризик травмування при недотриманні техніки безпеки;
- електричний струм, оскільки в установці використовуються трифазні двигуни з напругою 380 В.

До хімічних факторів належить забруднення повітря парами вологи, цукровим пилом та продуктами термічної обробки сировини. За тривалого впливу вони можуть викликати подразнення слизових оболонок та алергічні реакції.

До психофізіологічних факторів відносяться значні фізичні навантаження, монотонність праці та емоційна напруга під час аварійних ситуацій.

Виробниче приміщення дифузійного апарата належить до категорії В за пожежною безпекою та до особливо небезпечних за ступенем ураження електричним струмом (через підвищену вологість).

Згідно з вимогами [27], усі механізми мають бути обладнані захисними кожухами, сигнальним маркуванням і аварійними вимикачами. Персонал повинен мати допуск до роботи з електроустановками відповідної групи з електробезпеки.

Таким чином, головними небезпечними чинниками під час роботи електротехнологічного комплексу є дія електричного струму, нагрітих поверхонь, рухомих механічних частин, шуму, вібрацій і високої температури навколишнього середовища.

#### **4.2 Розробка заходів щодо забезпечення безпечних умов праці**

Для зниження впливу небезпечних та шкідливих факторів у дифузійному відділенні розроблено комплекс організаційних і технічних заходів.

##### *Організаційні заходи:*

- проведення вступного, первинного та повторного інструктажів з охорони праці;
- допуск до роботи лише осіб, які пройшли медичний огляд і навчання з безпеки праці;
- розробка та затвердження інструкцій з охорони праці;
- організація зон безпеки та розміщення попереджувальних знаків;
- щорічна перевірка знань персоналу щодо правил електробезпеки та пожежної безпеки.

##### *Технічні заходи:*

- усі електродвигуни, шафи керування та металеві корпуси обладнання підлягають захисному заземленню;
- електроустановки оснащуються пристроями захисного відключення (ПЗВ) з уставкою 30 мА;
- запроваджено блокування пуску механізмів при відкритих кожухах або несправних датчиках;
- встановлено аварійні вимикачі “Стоп” у доступних місцях;
- передбачено вентиляційну систему для відведення надлишкової пари та тепла.

##### *Мікроклімат і вентиляція:*

Вентиляція у приміщенні забезпечує 6-8 крат обміну повітря за годину, що відповідає вимогам [28]. Температура підтримується в межах 18-25 °С, а відносна вологість - до 70 %. Для усунення теплового випромінювання встановлені теплоізоляційні кожухи на трубопроводах і апаратах.

*Шум і вібрація:*

Для зменшення шуму застосовуються віброізолюючі основи під електродвигуни, шумопоглинаючі кожухи та прокладки. Рівень шуму в робочій зоні не перевищує 80 дБА, що відповідає вимогам [29].

*Пожежна безпека:*

Приміщення обладнане вогнегасниками ВП-5, пожежною сигналізацією та евакуаційними виходами. Забороняється використання відкритого полум'я, а також паління у виробничих зонах. Щорічно проводяться тренування щодо дій у разі пожежі та перевірка стану електромереж.

*Екологічна безпека:*

Для зменшення впливу виробництва на довкілля застосовуються енергозберігаючі технології, фільтрація повітря, утилізація бурякової стружки як кормової сировини. Система очищення стічних вод відповідає вимогам [30].

Отже, впровадження комплексу організаційно-технічних заходів забезпечує безпечні та комфортні умови праці в дифузійному відділенні ТОВ «Жовтневий цукровий завод». Умови праці відповідають вимогам чинних нормативів - ДБН, ДСТУ, ПУЕ, НПАОП і Закону України «Про охорону праці». Реалізація цих заходів дозволяє мінімізувати виробничі ризики, запобігти травматизму та забезпечити стабільну роботу обладнання.

## РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Економічне обґрунтування є важливим етапом дипломної роботи, оскільки воно дає змогу оцінити доцільність упровадження модернізованого електротехнологічного комплексу виділення дифузійного соку з бурякової стружки. Метою цього розділу є визначення економічної ефективності запропонованих технічних рішень, а також оцінка їх впливу на собівартість продукції та енергоспоживання підприємства.

Модернізація електротехнологічного комплексу передбачає впровадження частотно-регульованого електроприводу шнека, що забезпечує стабілізацію технологічного процесу, зменшення навантаження на двигун, підвищення ККД і зниження споживання електроенергії.

Таблиця 5.1 - Основні параметри

№	Параметр	Значення	Од. виміру
1	Потужність асинхронного двигуна	22	кВт
2	Коефіцієнт завантаження	0,85	-
3	Тривалість роботи	6000	год/рік
4	Тариф на електроенергію	5,2	грн/кВт·год
5	Вартість модернізації	250 000	грн
6	Очікуване зменшення енергоспоживання	20	%

### 5.1 Розрахунок річного споживання електроенергії

Для оцінки ефективності модернізації обладнання виконаємо розрахунок річного споживання електроенергії до та після впровадження енергоощадних заходів.

*До модернізації*

Річне споживання електроенергії визначається за формулою:

$$W_1 = P \cdot T \cdot k \quad (5.1)$$

де:

$P = 22$ кВт - встановлена потужність обладнання;

$T = 6000$ год/рік - річний фонд роботи;

$k = 0,85$  - коефіцієнт завантаження.

Підставивши вихідні дані кВт год/рік, , отримаємо:

$$W_1 = 22 \times 6000 \times 0,85 = 112\,200 \text{ кВт}\cdot\text{год}. \quad (5.2)$$

Таким чином, до модернізації обладнання споживало 112,2 тис. кВт·год електроенергії на рік.

*Після модернізації*

У результаті модернізації очікується зменшення споживання електроенергії на 20 % завдяки використанню більш енергоефективних технологій. Тоді річне споживання після модернізації визначається за формулою:

$$W_2 = W_1 / 100\% \cdot 20\% \quad (5.3)$$

Підставляючи числові значення:

$$W_2 = 112\,200 / 100 \cdot 20 = 89\,760 \text{ кВт}\cdot\text{год}. \quad (5.4)$$

Отже, після модернізації річне споживання електроенергії становитиме 89,76 тис. кВт·год.

Економія електроенергії:

Річна економія електроенергії визначається як різниця між споживанням до та після модернізації:

$$\Delta W = W_1 - W_2 \quad (5.5)$$

Підставляючи отримані дані:

$$\Delta W = 112\,200 - 89\,760 = 22\,440 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік}. \quad (5.6)$$

Таким чином, завдяки модернізації буде зекономлено 22,44 тис. кВт·год електроенергії на рік.

Розрахунок економії коштів

Економічний ефект від зниження енергоспоживання визначається за формулою:

$$E = \Delta W \times C \quad (5.7)$$

де:

$\Delta W = 22\,440$  кВт·год/рік— річна економія електроенергії;

$C = 5,2$  грн/кВт·год— тариф на електроенергію.

Підставляючи значення:

$$E = 22\,440 \times 5,2 = 116\,688 \text{ грн/рік}. \quad (5.8)$$

Отже, річна економія коштів становить 116,7 тис. грн, що підтверджує доцільність виконання модернізаційних заходів та їх позитивний економічний ефект.

Таблиця 5.2 - Капітальні витрати на впровадження

№	Стаття витрат	Вартість, грн
1	Частотний перетворювач	120 000
2	Монтаж і налагодження	60 000
3	Датчики, шафа управління, кабель	50 000
4	Навчання персоналу	10 000
	Разом	240 000

Впровадження енергоощадних заходів передбачає встановлення частотного перетворювача для регулювання швидкості електродвигуна, монтаж та

налагодження системи, встановлення додаткових вимірювальних елементів і шафи управління, а також проведення навчання обслуговуючого персоналу.

Сумарні капітальні витрати на реалізацію проєкту становлять 240 тис. грн. Ці витрати є одноразовими й будуть враховані при визначенні строку окупності заходу.

## 5.2 Розрахунок експлуатаційних витрат

Таблиця 5.3 – Експлуатаційні витрати

№	Стаття витрат	Вартість, грн/рік
1	Технічне обслуговування	8 000
2	Поточні ремонти	5 000
3	Амортизаційні відрахування	3 000
	Разом	16 000

До статей експлуатаційних витрат входить (табл. 5.3) вартість щорічного технічного обслуговування обладнання, витрати на поточні ремонти та амортизаційні відрахування, які враховують поступове зношення елементів системи. Загальна сума експлуатаційних витрат становить 16 тис. грн на рік.

## 5.3 Розрахунок терміну окупності та ефективності

Для визначення економічної доцільності запропонованих заходів проведемо розрахунок строку окупності інвестицій у модернізацію обладнання.

Термін окупності показує, за який період часу капітальні витрати будуть відшкодовані за рахунок отриманої економії коштів від зменшення споживання електроенергії.

Розрахунок виконується за формулою:

$$T = K / (E - C_p) \quad (5.9)$$

де:

$K = 240\,000$  грн— капітальні витрати;

$E = 116\,688$  грн/рік— річна економія коштів;

$C_p = 16\,000$  грн/рік— річні експлуатаційні витрати.

Підставляючи значення отримаємо:

$$T = 240\,000 / (116\,688 - 16\,000) = 2,3 \text{ роки} \quad (5.10)$$

Отже, термін окупності модернізації становить приблизно 2,3 роки, тобто вкладені кошти повернуться менш ніж за два з половиною роки експлуатації.

#### **5.4 Економічний коефіцієнт ефективності**

Для оцінки загальної економічної доцільності проєкту розраховується коефіцієнт економічної ефективності за формулою:

$$E_k = 1 / T \quad (5.11)$$

де:

$T = 2,3$  року— термін окупності проєкту.

Підставимо значення:

$$E_k = 0,435 > 0,15 \quad (5.12)$$

Отримане значення перевищує нормативне , що свідчить про високу економічну ефективність запропонованих заходів. Таким чином, модернізація є економічно доцільною та фінансово вигідною для підприємства.

#### *Додаткові результати модернізації.*

Окрім безпосереднього зниження енергоспоживання, впровадження частотного перетворювача та нової системи керування забезпечить низку додаткових позитивних ефектів:

- зниження енергетичних витрат на 20%;
- скорочення простоїв обладнання на 15 % завдяки стабільнішій роботі системи керування;

- підвищення терміну служби електродвигуна на 25-30 % за рахунок плавного пуску та зменшення механічних навантажень;
- підвищення стабільності роботи технологічної лінії, що позитивно вплине на якість та продуктивність виробництва.

### **5.5 Соціально-економічний та екологічний ефект**

Впровадження частотно-регульованого приводу має не лише економічне, а й вагоме соціально-екологічне значення. Застосування сучасної системи керування електродвигуном забезпечує зниження рівня шуму та покращення умов праці обслуговуючого персоналу, оскільки зменшуються вібрації, удари під час пуску й зупинки, а робота обладнання стає більш стабільною. Це сприяє створенню безпечного й комфортного виробничого середовища.

Крім того, модернізація сприяє зменшенню викидів CO<sub>2</sub> на 12-15 т/рік, що відповідає вимогам чинних екологічних стандартів [30]. Зниження споживання електроенергії безпосередньо впливає на обсяги спалювання палива на електростанціях, тим самим зменшуючи негативний вплив підприємства на навколишнє середовище.

Покращення надійності системи керування та зменшення кількості аварійних зупинок обладнання призводить до підвищення загальної стабільності технологічного процесу, зменшення простоїв та витрат на ремонт.

Річна економія електроенергії становить 22,4 тис. кВт·год, що забезпечує економію коштів у розмірі 116,7 тис. грн на рік.

Термін окупності проекту - 2,3 роки, після чого підприємство отримує чистий прибуток від реалізованих заходів.

Зниження собівартості виробництва за рахунок економії енергії та технічного обслуговування становить приблизно 116,7 тис. грн/рік.

Таким чином, модернізація є не лише технічно виправданою, а й соціально та екологічно доцільною, оскільки сприяє сталому розвитку підприємства та відповідає сучасним вимогам енергоощадності й охорони довкілля.



## ВИСНОВКИ

У дипломній роботі виконано комплексне дослідження, спрямоване на вдосконалення електротехнологічного комплексу виділення дифузійного соку з бурякової стружки. Робота охоплює повний цикл - від аналізу існуючих технологічних процесів до технічного проектування системи керування, економічного обґрунтування її впровадження та оцінки умов праці.

Під час виконання роботи було проведено аналіз технологічних процесів отримання дифузійного соку, визначено основні фактори, які впливають на стабільність і якість дифузійного процесу. Встановлено, що значну частку енерговитрат цукрового виробництва становить робота дифузійного апарату, зокрема його приводної системи. Аналіз показав, що модернізація електроприводу за допомогою частотно-регульованої системи дозволяє оптимізувати роботу обладнання, зменшити енергоспоживання та підвищити продуктивність.

Проведено вибір електроприводу для шнекового механізму похилого дифузійного апарату. Обґрунтовано доцільність використання асинхронного двигуна з частотним перетворювачем, що забезпечує плавний пуск, регулювання швидкості обертання, зниження динамічних навантажень і стабілізацію технологічного процесу. Запропонована система дозволяє ефективно реагувати на зміни технологічних параметрів, що підвищує рівень автоматизації й точність керування.

Розроблено принципову та функціональну схеми електричної системи керування дифузійним апаратом. У процесі проектування використано сучасні засоби контролю, датчики струму, тиску, температури, а також засоби програмованого логічного керування (ПЛК). Розроблена схема забезпечує автоматичне підтримання технологічних параметрів у заданих межах, що підвищує ефективність дифузійного процесу, зменшує втрати цукру в жомі та покращує якість отриманого соку.

Виконані технічні розрахунки електроприводу підтвердили, що його робота відповідає вимогам енергоефективності, надійності та безпечності. Впровадження частотно-регульованого електроприводу дозволяє знизити споживання електроенергії в середньому на 20-22 %, що значно скорочує експлуатаційні витрати підприємства.

У розділі охорони праці виконано аналіз небезпечних і шкідливих факторів, що супроводжують роботу електротехнологічного комплексу, та розроблено заходи для запобігання травматизму і забезпечення безпечних умов праці. Особливу увагу приділено питанням електробезпеки, вентиляції, освітлення, контролю мікроклімату та шумового навантаження на персонал. Запропоновані технічні й організаційні рішення відповідають чинним нормативним документам [28], [31].

В економічному розділі доведено ефективність упровадження запропонованої системи керування. Річна економія електроенергії становить 22,4 тис. кВт·год, що відповідає економії 116,7 тис. грн на рік. Термін окупності капітальних вкладень складає 2,3 роки, а коефіцієнт економічної ефективності дорівнює 0,435, що перевищує нормативне значення (0,15). Такі результати свідчать про високу економічну доцільність модернізації.

Крім того, впровадження частотно-регульованого електроприводу забезпечує суттєве покращення екологічних показників виробництва за рахунок зниження енергоспоживання та викидів CO<sub>2</sub> на 12-15 т/рік. Зменшення динамічних навантажень і поліпшення регулювання процесу позитивно впливає на ресурс роботи обладнання, знижуючи витрати на технічне обслуговування та ремонти.

Отримані результати підтверджують, що модернізований електротехнологічний комплекс є технічно досконалим, енергозберігаючим і економічно вигідним рішенням для сучасного цукрового виробництва. Реалізація проєкту забезпечує підвищення ефективності роботи дифузійного відділення, стабілізацію технологічних параметрів, покращення якості сировини та зниження собівартості готової продукції.

У процесі виконання дипломної роботи були досягнуті такі результати:

- виконано аналіз сучасних технологій виділення дифузійного соку та обґрунтовано необхідність модернізації обладнання;
- розроблено технічні рішення з автоматизації процесу та вибрано оптимальні елементи системи керування;
- здійснено техніко-економічні розрахунки, що підтвердили доцільність упровадження нової системи;
- розроблено заходи з охорони праці та екологічної безпеки;
- підготовлено рекомендації щодо практичної реалізації модернізації у виробничих умовах.

Таким чином, усі поставлені в дипломній роботі завдання виконано повністю. Результати дослідження мають практичне значення і можуть бути впроваджені на підприємствах цукрової промисловості України. Запропонований електротехнологічний комплекс забезпечує підвищення енергоефективності, надійності, екологічності та конкурентоспроможності виробництва, що відповідає сучасним тенденціям розвитку промислової автоматизації та концепції індустрії.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Atul Dhiman, Rajat Suhag, Divya Singh Chauhan, Dhruv Thakur, Shubham Chhikara, Pramod K. Prabhakar, Status of beetroot processing and processed products: Thermal and emerging technologies intervention, Trends in Food Science & Technology, Volume 114, 2021, Pages 443-458, ISSN 0924-2244, <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.042>.
2. Ramon Bocker, Eric Keven Silva, Pulsed electric field assisted extraction of natural food pigments and colorings from plant matrices, Food Chemistry: X, Volume 15, 2022, 100398, ISSN 2590-1575, <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100398>.
3. Extraction of Sugar from Beets (H. H. Yang & J. C. Brier)
4. Siemens AG. Digital Twin for the Process Industry - From Integrated Engineering to Integrated Operations. - Munich: Siemens White Paper, 2021.
5. Schneider Electric. Energy Management and Automation Solutions in the Food & Beverage Industry. - Rueil-Malmaison, France, 2020.
6. Rockwell Automation. Smart Manufacturing and Industrial IoT in the Sugar Industry. - Milwaukee, USA, 2022.
7. Петренко О.О., Дяченко І.В. Автоматизація технологічних процесів у цукровому виробництві. - Вісник Національного університету харчових технологій, №3, 2021.
8. ДСТУ ISO 9001:2018, ДСТУ ISO 14001:2015, ДСТУ ISO 45001:2019, ISA-99/IEC 62443.
9. Endress+Hauser. Measurement Instrumentation in Sugar Production: Accuracy and Reliability Guide. - Reinach, Switzerland, 2020.
10. FoodTech Alliance. Sustainable Automation Practices in the Food Industry. - Brussels, 2021.
11. OECD. Cost-Benefit Analysis of Industrial Automation Projects in Manufacturing. - Paris, 2020.

12. Патент на винахід № 104150 «Дифузійний апарат нахиленого типу».
13. Maria Nelly Garcia Gonzalez, Lovisa Björnsson, Life cycle assessment of the production of beet sugar and its by-products, Journal of Cleaner Production, Volume 346, 2022, 131211, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131211>.
14. Alaa M. Rashad, Sayieda R. Zeedan, Mahmoud Gharieb, Appreciation of sugar beet waste in metakaolin geopolymer mortar for compressive strength and drying shrinkage, Sustainable Chemistry and Pharmacy, Volume 37, 2024, 101429, ISSN 2352-5541, <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101429>.
15. Santosh Kumar, Jyotismita Konwar, Manashi Das Purkayastha, Sweety Kalita, Avik Mukherjee, Joydeep Dutta, Current progress in valorization of food processing waste and by-products for pectin extraction, International Journal of Biological Macromolecules, Volume 239, 2023, 124332, ISSN 0141-8130, <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124332>.
16. Промисловий перетворювач температури CTR - Режим доступу: [www.URL: https://aplisens.com.ua/product/ctr/](http://www.aplisens.com.ua/product/ctr/)
17. Вимірювальний перетворювач тиску PC-28 - Режим доступу: [www.URL: https://aplisens.com.ua/product/pc-28/](http://www.aplisens.com.ua/product/pc-28/)
18. Електромагнітний витратомір PEM-1000 - Режим доступу: [www.URL: https://aplisens.com.ua/product/rem-1000/](http://www.aplisens.com.ua/product/rem-1000/)
19. Однороликові конвеєрні ваги BK-202 [https://sweda.com.ua/produksiya/odnorolikovye-konveiernye-vesy-vk-202/](http://sweda.com.ua/produksiya/odnorolikovye-konveiernye-vesy-vk-202/)
20. pH/Redox-transmitter panel-mounted - Режим доступу: [www.URL: https://www.be.endress.com/en/field-instruments-overview/CPM221?t.tabId=product-overview](https://www.be.endress.com/en/field-instruments-overview/CPM221?t.tabId=product-overview)
21. Проточний рефрактометр CM-800 alpha-EG - Режим доступу: [www.URL: https://atago.com.ua/product/protochnyy-refraktometr-cm-800-alpha-eg/](https://atago.com.ua/product/protochnyy-refraktometr-cm-800-alpha-eg/)

- 22.Позиціонер Samson TROVIS 3730-1 - Режим доступа: [www.URL: https://trade-control.com.ua/ua/samson-trovis-3730-1](http://www.URL: https://trade-control.com.ua/ua/samson-trovis-3730-1)
- 23.23. Клапани Samson 240 - Режим доступа: [www.URL: https://trade-control.com.ua/ua/products/samson-240](http://www.URL: https://trade-control.com.ua/ua/products/samson-240) 8200 vector frequency inverters - Режим доступа: [www.URL: https://www.lenze.com/ru-ru/produkcija/inventory/predshestvujushchie-produkty-inventory/8200-vector](http://www.URL: https://www.lenze.com/ru-ru/produkcija/inventory/predshestvujushchie-produkty-inventory/8200-vector)
- 24.[https://www.lenze.com/ru-ru/produkcija/inventory/predshestvujushchie-produkty-inventory/8200-vector](http://www.lenze.com/ru-ru/produkcija/inventory/predshestvujushchie-produkty-inventory/8200-vector)
25. Блок ручного управління БРУ-17 - Режим доступа: [www.URL: http://www.microl.ua/index.php?page=shop.product\\_details&flypage=garden\\_flypage.tl&product\\_id=171&category\\_id=95&option=com\\_virtuemart&Itemid=71&lang=](http://www.URL: http://www.microl.ua/index.php?page=shop.product_details&flypage=garden_flypage.tl&product_id=171&category_id=95&option=com_virtuemart&Itemid=71&lang=)
26. System 200V - Режим доступа: [www.URL: https://vipa.com.ua/products/control-systems/200v.html](http://www.URL: https://vipa.com.ua/products/control-systems/200v.html)
27. ДСТУ EN 60204-1:2018. Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги. - К.: УкрНДНЦ, 2018.
28. ДБН В.2.5-28-2018 "Природне і штучне освітлення".
29. ДСН 3.3.6.037 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
30. ДСТУ ISO 14001:2015. Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосування. - К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016.
31. ДСТУ ISO 45001:2019. Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці. Вимоги та настанови щодо застосування. - К.: ДП «УкрНДНЦ», 2019.