

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

В.о. завідувача кафедри
автоматики та робототехнічних систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. _____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

" ____ " _____ 2026 р.

БАКАЛАВРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему **"АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ У
ЛАБОРАТОРНІЙ РЕКТИФІКАЦІЙНІЙ УСТАНОВЦІ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА
ЕТИЛОВОГО СПИРТУ"**

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

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Дудник А.О.
(П.І.Б.)

Керівник бакалаврської кваліфікаційної роботи

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Лендєл Т.І
(П.І.Б.)

Виконав

(підпис)

Новак Є.О
(П.І.Б.)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

автоматики та робототехнічних систем

ім. акад. І.І. Мартиненка

(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. _____
(підпис)

О.О. Опришко
(ПІБ)

" ____ " _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Новаку Євгену Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

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

1. Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи: **"Автоматизована система регулювання температури у лабораторній ректифікаційній установці для виробництва етилового спирту"**,

затверджена наказом ректора НУБіП України від "24" 10 2025 р. № 2515"С"

2. Термін подання завершеної роботи на кафедру "31" травня 2026 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної бакалаврської роботи:

3.1. Завдання кафедри на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи.

3.2. Нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації.

3.3. Наукова література з тематики кваліфікаційної бакалаврської роботи.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

4.1. Аналіз технологічного процесу ректифікації етилового спирту та інформаційний аналіз об'єкта керування.

4.2. Побудова та дослідження математичної моделі насадкової частини ректифікаційної колони.

4.3. Розрахунок періоду квантування цифрової системи та параметрів ПІ-регулятора.

4.4. Вибір технічних засобів автоматизації, мікроконтролерного обладнання та кабельно-провідникової продукції.

4.5. Розробка цифрової схеми системи автоматизації.

4.6. Техніко-економічне обґрунтування.

5. Перелік графічних документів:

5.1. Функціональна схема автоматизації процесу ректифікації етилового спирту.

5.2. Схема електрична принципова.

5.3. Схема електрична з'єднань.

5.4. Схема електрична підключень.

5.5. Зовнішній вид щита керування.

Дата видачі завдання "25" жовтня 2025 року

**Керівник
бакалаврської
кваліфікаційної роботи**

(підпис)

Лендєл Т.О
(П.І.Б.)

**Завдання прийняв до
виконання**

(підпис)

Новак Є.О
(П.І.Б.)

АНОТАЦІЯ

Робота присвячена розробці та дослідженню системи автоматизованого керування процесом ректифікації етилового спирту. Об'єктом дослідження є ректифікаційна колона.

У роботі проведено аналіз динамічних характеристик об'єкта, визначено параметри чистого запізнення та постійної часу ректифікаційної колони. На основі отриманих даних обґрунтовано вибір закону керування: розроблено ПІ-регулятор для стабілізації температури «спиртової полиці» та кроковий інтегральний алгоритм для дискретної корекції відбору. Проведено синтез цифрового регулятора за допомогою Z-перетворення та методу білінійної апроксимації, що дозволило реалізувати програмний код для мікроконтролера платформи Arduino.

Розроблено електричну принципову схему та конструкцію щита керування, що включає інтерфейс оператора (LCD-дисплей, клавіатуру та світлодіодну індикацію), силовий блок комутації нагрівача та вузли керування електромагнітними клапанами. Моделювання перехідних процесів реалізовано у середовищі MATLAB, підтвердило високу динамічну точність системи та відповідність розроблених алгоритмів технологічним допускам ректифікації ($\pm 0.1^{\circ}\text{C}$)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1.1. Технологія ректифікації етилового спирту	7
1.2. Класифікація систем ректифікації за методом керування	8
1.3. Класифікація систем ректифікації за типом внутрішніх контактних пристроїв.....	11
1.4. Інформаційний аналіз технологічного об'єкта керування.....	12
РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ НАСАДКОВОЇ ЧАСТИНИ РЕКТИФІКАЦІЙНОЇ КОЛОНИ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ	18
2.1 Розв'язок диференціальних рівнянь для створення математичної моделі. 18	
2.2 Розрахунок періоду квантування цифрової системи автоматичного регулювання	20
2.3 Розрахунок параметрів ПІ-регулятора	21
РОЗДІЛ 3. ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА.....	24
3.1 Вибір силової частини електричного кола.....	24
3.2 Вибір кабельно-провідникової продукції.....	38
3.3 Розробка електричної принципової схеми.....	41
3.4 Розробка схеми електричних з'єднань	41
3.5 Розробка схеми електричних підключень	42
3.6 Розробка загального виду щита керування	42
РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ РЕКТИФІКАЦІЇ	43
4.1 Розрахунок капітальних витрат на впровадження системи автоматизації	44
4.2 Розрахунок річного економічного ефекту від автоматизації.....	46
4.3 Оцінка ефективності інвестицій в автоматизацію	47
ВИСНОВОК.....	49
Список використаних джерел	51
ДОДАТКИ	54

ВСТУП

Мета дослідження: розробка автоматизованої системи керування вузлом відбору товарного спирту у лабораторній ректифікаційній колоні. Робота спрямована на створення алгоритмів автоматизованого відбору фракцій, що забезпечують стабільну якість продукту без участі оператора протягом усього циклу розділення суміші.

Актуальність теми: зумовлена високою тривалістю та динамічною нестабільністю процесу ректифікації, що вимагає безперервного контролю параметрів протягом 10–18 годин. Ручне керування вузлом відбору є малоефективним, оскільки людський фактор призводить до помилок при відсіканні фракцій, що суттєво знижує якість кінцевого продукту. Створення системи, яка автоматизує цей етап, дозволяє забезпечити стабільність флегмового числа та звільнити оператора від необхідності постійної присутності, що є критичним для малогабаритних лабораторних установок.

Об'єкт дослідження є ректифікаційна колона.

Предмет дослідження є керування технологічним процесом відбору товарного спирту у лабораторній ректифікаційній колоні.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ РЕКТИФІКАЦІЇ ЕТИЛОВОГО СПИРТУ

1.1. Технологія ректифікації етилового спирту

Технологія ректифікації етилового спирту базується на різній леткості етилового спирту та супутніх домішок (альдегідів, ефірів, сивушних масел). Основна мета — отримати спирт міцністю не менше 96,0–96,3% об. та максимально очистити його від домішок. Процес відбувається у колонах, обладнаних контактними пристроями (тарілками або насадкою), де взаємодіють пара, що йде вгору, та флегма (рідина), що стікає вниз [1,2].

Технологічні етапи процесу:

1. Нагрівання та запуск. Після закипання суміші колона працює без відбору продукту. Пара конденсується в дефлегматорі і повністю повертається в колону. Це необхідно для концентрації легких домішок у верхній частині колони.
2. Відбір головної фракції. Видалення найбільш летких речовин (метиловий спирт, оцтовий альдегід, ефіри). За технологією цей процес має бути повільним (крапельним), щоб не «розмити» концентрацію домішок.
3. Відбір ректифікованого спирту. Цей етап є центральним у технологічному циклі, оскільки саме на ньому формується вихід кінцевого продукту заданої чистоти. Основна інженерна задача тут — підтримка стаціонарного стану колони

Критерії керування:

1. Температурний режим: Контроль температури на 2/3 висоти колони. Зростання температури в цій точці свідчить про підйом «хвостів» та слугує сигналом про необхідність регулювання
2. Флегмове число (R): Співвідношення кількості флегми до відібраного спирту. Для автономної роботи автоматика повинна динамічно збільшувати R (зменшувати відбір) у міру вичерпання спирту в кубі [3].

1.2. Класифікація систем ректифікації за методом керування

Існує три основних методи керування ректифікаційною колоною, що наведені на рис.1.1

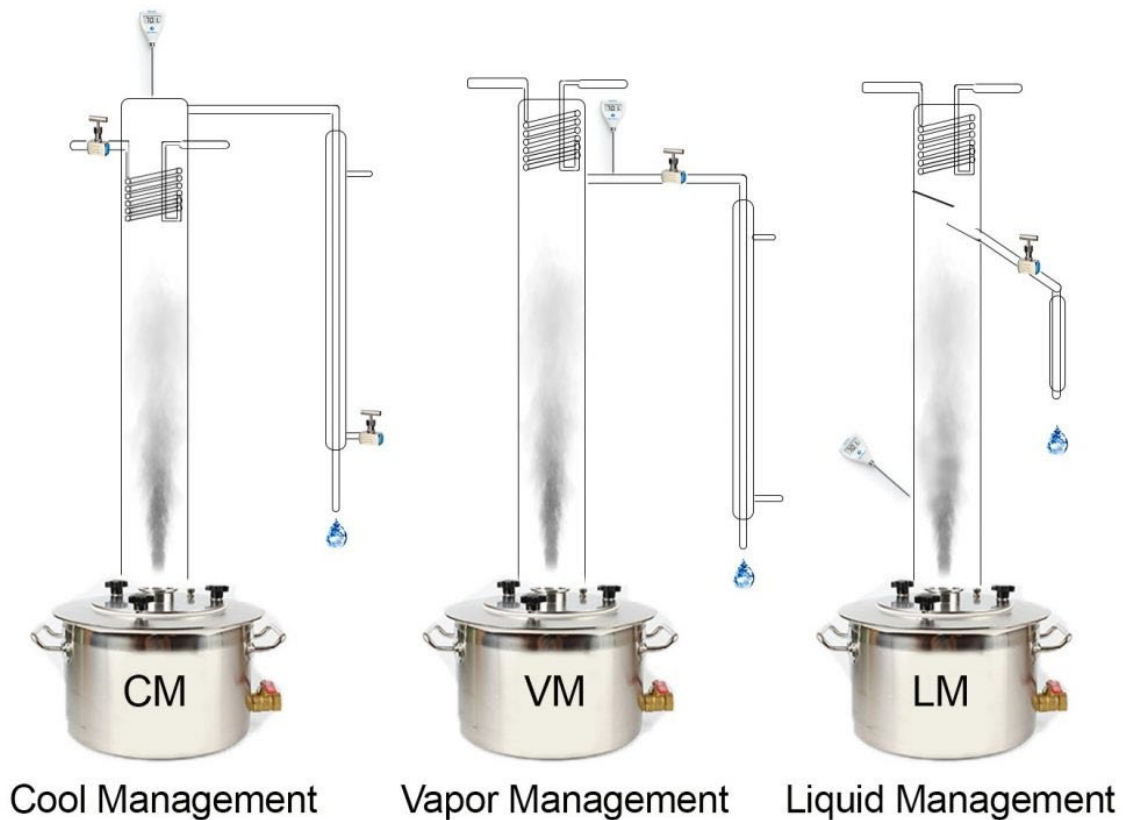


Рис 1.1 Методи керування ректифікаційною колоною

LM (liquid management) — Регулювання кількості відбору за рідиною. Найбільш зручна та легка в експлуатації схема, при якій уся пара конденсується, потім одна частина конденсату повертається в колону, інша — йде у відбір.

Переваги

- підходить для отримання як чистих спиртів так і ароматних дистилятів;
- легко та відносно дешево автоматизується аж до створення АСУ ТП з блоками безпеки;
- немає підвищеної чутливості до стабільності тиску охолоджувальної води.

Недоліки

- якщо зафіксувати швидкість відбору на одному рівні, то в міру ректифікації флегмове число буде падати. Це суперечить технологічній необхідності в поступовому зменшенні швидкості відбору до кінця процесу, що є головним недоліком;
- необхідний розрив струменя (зв'язок з атмосферою) після регулювального крана або клапана, інакше можливі збої в регулюванні швидкості відбору через розрідження в лінії відбору, яке створюють потоки спирту, що стікають [4].

VM(Vapor Management) — регулювання розділенням потоків пари до дефлегматора. Керування колоною здійснюється шляхом зміни кількості пари, що відбирається, за допомогою шиберного або звичайного кульового крана.

Переваги

- Чутливість до положення крана є вельми малою, що дозволяє виконувати точні регулювання;
- флегмове число не залежить від зміни температури або витрати охолоджувальної води в дефлегматорі;
- немає підвищеної чутливості до стабільності тиску охолоджувальної води.

Недоліки

- система керування є інерційною: від зміни положення крана до зміни швидкості відбору може минути до 10–15 секунд;
- не підходить для отримання ароматних спиртів із натуральної сировини. Потрібні конструктивні зміни, що дозволяють регулювати кількість флегми, яка повертається, від 50 до 100%;
- колона з паровим відбором є чутливою до пробок на лінії відбору продукту. Якщо в силіконовому шлангу сформується стовпчик продукту, то під час стікання він створить розрідження і, наче насосом, потягне пару на себе, порушуючи встановлене флегмове число. Внаслідок цього різко й неконтрольовано зросте швидкість відбору, і без втручання оператора система не повернеться на колишній рівень. Зупинити неконтрольований відбір можна встановленням зв'язку з атмосферою (створити розрив

струменя). Наприклад, устроїти голку від шприца у верхню частину трубки відбору;

- автоматизація є складною та дорогою. Часто виконується у вигляді сигналізатора досягнення певних температур, але без виконавчих механізмів. Також є бажаною автоматика безпеки[5].

CM(cooling management) — регулювання кількості води, що подається в дефлегматор. Дозволяє контролювати кількість пари, яка проходить крізь дефлегматор до холодильника відбору продукту.

Переваги

- може успішно використовуватися для отримання ароматних спиртів із натуральної сировини;
- можливо отримувати високочистий спирт безпосередньо з браги.

Недоліки

- найменші коливання напору призводять до зміни швидкості відбору та флегмового числа. Якщо не вжити заходів щодо стабілізації тиску охолоджувальної води у квартирі, на процес відбору впливатиме навіть змитий сусідами унітаз;
- підвищення температури води в дефлегматорі за незмінної її кількості зменшує флегмове число, тому для підтримки стабільного флегмового числа потрібен контроль за витратою та температурою води, що подається в дефлегматор;
- необхідний зв'язок з атмосферою в лінії відбору продукту, інакше у разі випадкового вимкнення нагріву та за умови, що трубка занурена у відбір, увесь продукт знову опиниться в кубі;
- система є дорогою та складною в автоматизації [6].

1.3. Класифікація систем ректифікації за типом внутрішніх контактних пристроїв

Особливістю насадкових колон є те, що внутрішня частина заповнена спеціальними дрібними елементами або сіткою, що створює велику площу поверхні для стікання флегми. Контакт парів з флегмою відбувається по всій висоті насадкової частини



Рис.1.2 Насадкова колона

Особливістю ковпачкової колон є те, що контактні зони чітко розділені на рівні. На кожній тарілці підтримується певний рівень рідини, крізь яку барботує пара. Контакт пари з флегмою відбувається лише в місці барботування [7].



Рис.1.3 Тарілчаста колона

1.4. Інформаційний аналіз технологічного об'єкта керування

Для об'єкту керування необхідним є керувати технологічними параметрами (табл.1.1.):

- температура в контрольній точці колони: Найважливіший інформаційний параметр. Стабільність цієї температури (в межах $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$) свідчить про чистоту спиртової пари у зоні відбору;
- температура кубового залишку: Інформаційний показник, за яким система визначає поточну концентрацію спирту в кубі та фіксує момент повного завершення технологічного циклу;
- об'ємна міцність та чистота дистиляту: Фінальний показник якості (непрямо контролюється через стабільність температури в контрольній точці).

Керуючі впливи

- Швидкість відбору рідини: Реалізується через зміну коефіцієнта заповнення ШІМ соленоїдного клапана вузла відбору. Зменшення відбору збільшує флегмове число та охолоджує колону, повертаючи її в режим стабілізації.

Збуюючі впливи

- Зміна напруги в електромережі: Викликає коливання потужності ТЕНа, що змінює швидкість утворення пари та порушує тепловий баланс;
- коливання температури або тиску охолоджуючої води: Зміна температури води в автономному контурі або тиску в водопроводі змінює дефлегмацію;
- атмосферний тиск: Впливає на фізико-хімічні властивості розділюваної суміші, коливання приводять до зміщення температурного градієнта в колоні.

Контрольовані, але нерегульовані параметри(параметри безпеки та діагностики)

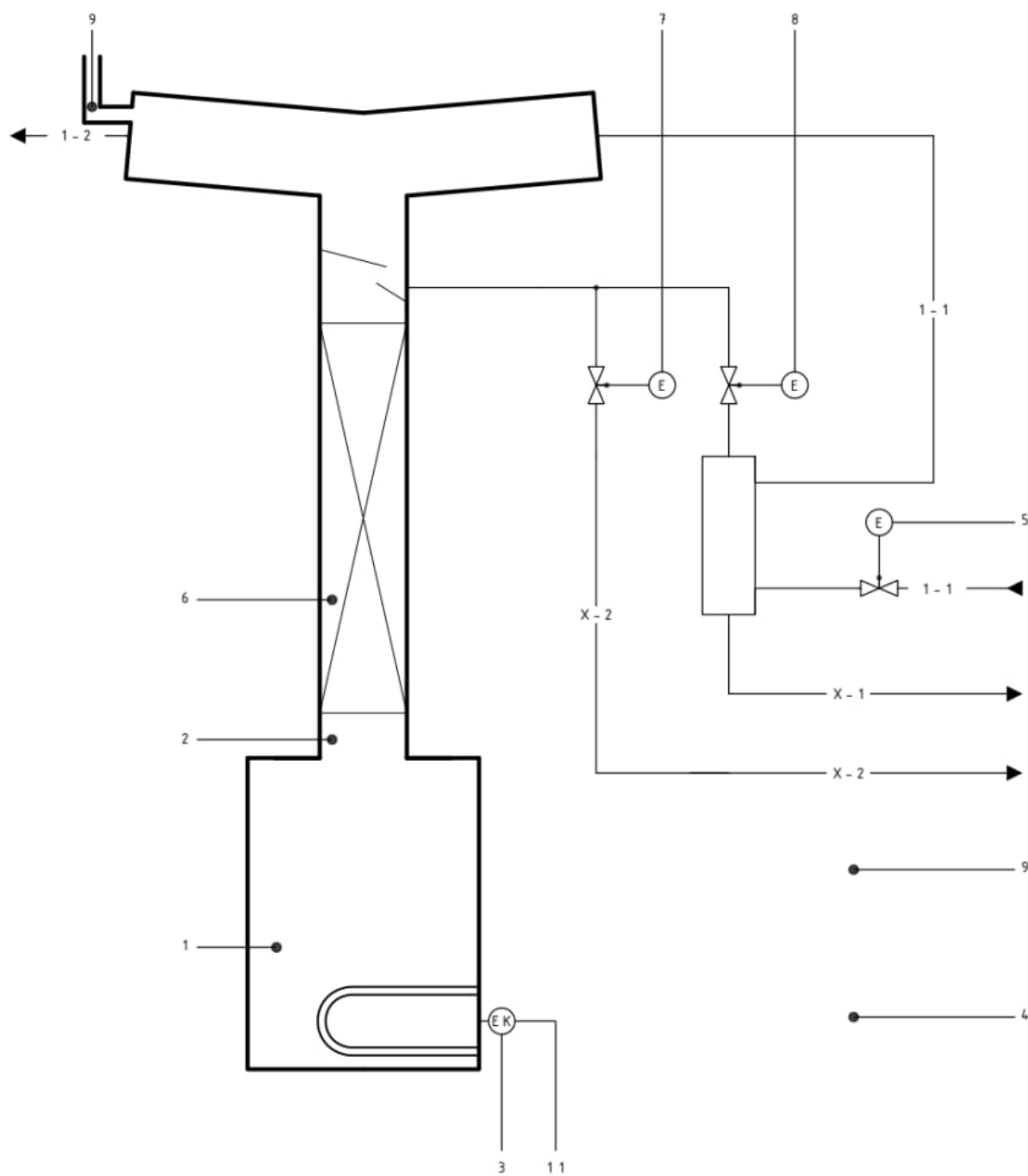
- Температура у трубці зв'язку з атмосферою(ТЗА): Різке зростання температури і цій точці свідчить про прорив парів спирту через дефлегматор-необхідне негайне знеструмлення ТЕНа;
- тиск в кубі: Характеризує гідродинамічний режим роботи установки та опір шару насадки. Є критично важливим для ідентифікації передзахлинового стану колони. У разі зростання вище критичної межі-необхідне негайне знеструмлення апарату;
- концентрація парів спирту в повітрі: Вимірювання необхідне для забезпечення протипожежної безпеки в робочому приміщенні. У випадку виходу параметра за дозволених межі-необхідне негайне знеструмлення ТЕНа [2].

Таблиця 1.1-Технологічні параметри процесу виробництва етилового спирту

Назва параметра	Фізична суть параметра	Тип сигналу на контролер	Межі вимірювання/регулювання	Роль в алгоритмі
Температура в колоні	Температура парів у нижній третині насадки	Цифровий	70-80°C	Головний зворотній зв'язок
Температура в кубі	Температура кипіння кубового залишку	Цифровий	20-105°C	Контроль залишку етанолу
Атмосферний тиск	Поточний тиск навколишнього середовища	Цифровий	700-800мм.рт.ст	Динамічна корекція
Тиск у кубі	Гідродинамічний тиск у кубі установки	Аналоговий	0-50мм.вод.ст	Захист від захлину
Концентрація парів спирту	Наявність етанолу в повітрі робочої зони	Аналоговий	0.05-10мг/л	Протипожежна безпека

Температура ТЗА	Температура у трубі зв'язку з атмосферою	Цифровий	0-50°C	Захист від прориву пари
Стан вузла відбору тіла	Керування виконавчим механізмом відбору товарного спирту	Дискретний	0-100%	Керуючий вплив на основній стадії
Стан вузла відбору голів	Керування виконавчим механізмом відбору легкокиплячих домішок	Дискретний	0-100%	Керуючий вплив на початковій стадії
Стан клапана подачі води	Керування подачею охолодження в дефлегматор	Дискретний	Увімк/Вимк	Енергозбереження

Розроблено функціональну схему, яка представлена на рис.1.4



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Прилади по місцю	TE 1-1	PE 1-2	YS 1-3	PE 1-4	YS 1-5	TE 2-1	YV 2-2	YV 2-3	TE 3-1	QE 3-2	FE 3-3
Прилади на щиті	TI 1-6	PI 1-7	UCA 1-8		ZI 1-9	TIC 2-4	ZI 2-5	ZI 2-6	TIA 3-4	QIA 3-5	FCA 3-6

Контур 1: Контроль параметрів кипіння та регулювання потужності куба

TE(1-1)- Датчик температури, вимірює температуру кубового залишку. Призначений для контролю температури кипіння, за якою визначається поточна концентрація спирту в кубі та фіксується момент завершення ректифікації;

PE(1-2)- Диференціальний датчик тиску. Розташований на кришці перегінного куба. Забезпечує моніторинг внутрішнього тиску системи з метою контролю парового навантаження на колону та недопущення її захлину;

YS(1-3)- симісторний ключ. Встановлений в силовому ланцюзі живлення трубчастого електронагрівача для точного регулювання підведеної теплової потужності;

PE(1-4)- Датчик атмосферного тиску. Використовується для динамічної метеокорекції;

YS(1-5)- Електромагнітний клапан подачі холодної води в систему охолодження;

TI(1-6) - відображення поточної температури в кубі на дисплеї;

PI(1-7) - відображення поточного тиску в кубі на дисплеї;

UCA(1-8) - багатофункціональний мікропроцесорний блок обчислення. Опрацьовує дані датчиків куба та барометра для розрахунку потужності нагріву та початку подачі води в систему охолодження;

ZI(1-9) -індикатор поточного стану клапану подачі води;

Контур 2: Автоматизований відбір фракцій;

TE(2-1) - датчик температури встановлений у насадковій частині царги ректифікаційної колони. Фіксує підхід важких хвостових фракцій за відхиленням температури;

YV(2-2) - електромагнітний клапан, встановлений на лінії відбору першої ефірно-альдегідної фракції;

YV(2-3) - електромагнітний клапан, встановлений на лінії відбору харчової фракції;

TIC(2-4)- програмно-обчислювальний блок регулятора температури. Коли температура виходить за межі норми- зупиняє відбір через відповідний клапан, повертаючи колону до стабільного режиму;

ZI(2-5)- світлодіодний індикатор положення клапана відбору першої фракції;

ZI(2-6)- світлодіодний індикатор положення клапана відбору харчової фракції;

Контур 3: Аварійна безпека установки;

TE(3-1)- датчик температури. Встановлений на зрізі трубки зв'язку з атмосферою. Фіксує прорив парів у приміщення у випадку вимкнення чи недостатності холодуючої рідини;

QE(3-2)- Датчик концентрації спирту в повірі. Фіксує надмірну концентрацію парів спирту в робочому приміщенні;

FE(3-3) – керування витратами електричної енергії;

TIA(3-4)- аварійний сигналізатор перевищення температури ТЗА

QIA(3-5)-аварійний сигналізатор загазованості;

FCA(3-6)- центральний щитовий блок світло-звукової сигналізації та логічного захисту. При настанні будь-якої аварійної ситуації-подає сигнал на вимкнення установки.

РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ НАСАДКОВОЇ ЧАСТИНИ РЕКТИФІКАЦІЙНОЇ КОЛОНИ ЯК ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1 Розв'язок диференціальних рівнянь для створення математичної моделі

Процес масообміну в ректифікаційній колоні є ключовим фактором що визначає якість кінцевого продукту. Він описується рівнянням матеріального балансу, що характеризує зміну концентрації етилового спирту в часі

$$M_L \frac{dx_{out}}{d\tau} = G \cdot x_{in} - G \cdot x_{out} \quad (2.1)$$

де M_L -утримувальна здатність колоні (маса флегми в насадці), кг; G - масова витрата пари, кг/с; x_{in}, x_{out} -масова частка спирту на вході та виході відповідно; τ - час, с.

Знайдемо розв'язки для диференціальних рівнянь системи

Виконаємо перетворення для x_{out} . Поділимо обидві частини рівняння на G

$$\frac{M_L}{G} \frac{dx_{out}}{d\tau} = x_{in} - x_{out} \quad (2.2)$$

Перенесемо доданок з вихідною величиною x_{out} у ліву частину рівняння для групування змінних

$$\frac{M_L}{G} \frac{dx_{out}}{d\tau} + x_{out} = x_{in} \quad (2.3)$$

Введемо конструкторсько-технологічний параметр-постійну часу об'єкта керування T_0 яка характеризує його внутрішню динамічну інерційність і визначається співвідношенням утримувальної здатності апарату до величини навантаження за матеріальним потоком пари

$$T_0 = \frac{M_L}{G} \quad (2.4)$$

Після підстановки параметру отримуємо остаточну нормалізовану форму диференціального рівняння об'єкта керування

$$T_0 \frac{dx_{out}}{d\tau} + x_{out} = x_{in} \quad (2.5)$$

Для переходу від абстрактної структури динамічної моделі до конкретного фізичного об'єкта автоматизації виконаємо чисельний розрахунок параметрів для ректифікаційної колони

Масовий потік пари, що генерується в кубі установки, повністю визначається корисною тепловою потужністю ТЕНа (P) та питомою теплотою пароутворення водно-спиртової суміші високої міцності (L)

$$G = \frac{P}{L} \quad (2.6)$$

Визначаємо геометричний об'єм насадочної частини ($V_{\text{нас}}$)

$$V_{\text{нас}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H \quad (2.7)$$

Визначаємо утримувальну здатність за рідиною (M_L)

$$M_L = V_{\text{нас}} \cdot \beta \cdot \rho \quad (2.8)$$

Отже кінцева формула для визначення постійної часу приймає наступний вигляд

$$T_0 = \frac{\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H \cdot \beta \cdot \rho \cdot L}{P} \quad (2.9)$$

де D- діаметр насадкової частини (0.05м); H- висота насадкової частини (1м); β - утримувальна здатність насадки, (8% для РПН); ρ - питома густина спирту (800 кг/м³); P- потужність ТЕНа (3000Вт); L- питома теплота пароутворення спирту (925кДж/кг).

Проведемо розрахунок T_0 у MATCAD (Рис 2.1)

$$D := 0.05m \quad H := 1m \quad \beta := 8\% \quad \rho := 800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad P := 3000W \quad L := 925000 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$T_0 := \frac{\frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H \cdot \beta \cdot \rho \cdot L}{P} = 38.746 s$$

Рис 2.1 Розрахунок T_0 в MATCAD

Зобразимо імітаційну модель в системі MATLAB(Рис 2.2)

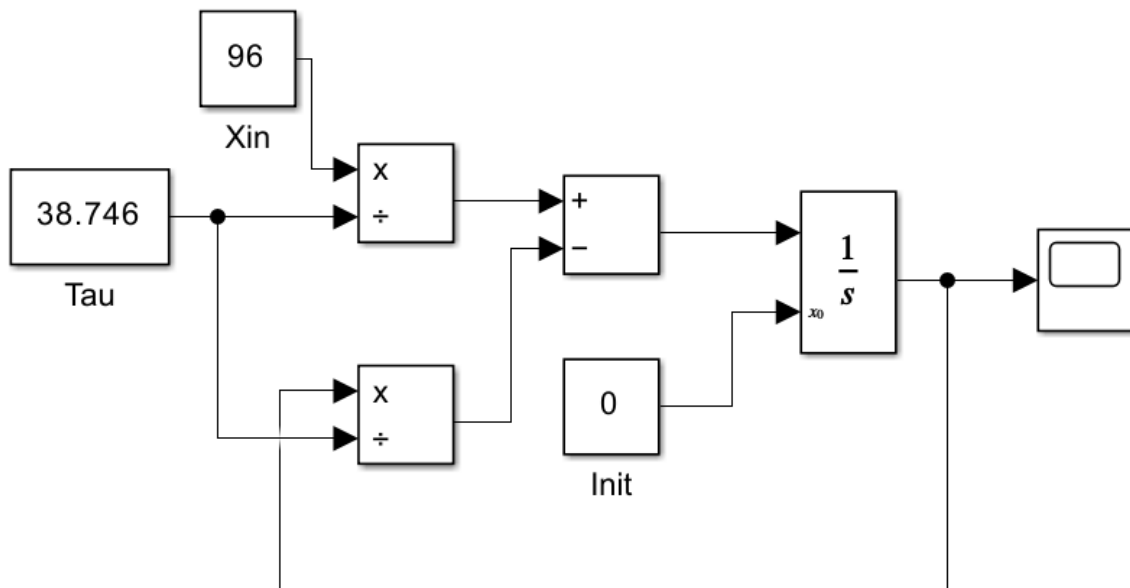


Рис 2.2 Імітаційна модель в MATLAB

2.2 Розрахунок періоду квантування цифрової системи автоматичного регулювання

Зобразимо передатну функцію в середовищі MATLAB (Рис 2.3)

```
>> w=tf([1],[38.746*0.05 38.746+0.05 1])

w =

          1
-----
1.937 s^2 + 38.8 s + 1

Continuous-time transfer function.
```

Рис. 2.3 Передатна функція в MATLAB

Визначимо критичну частоту дискретизації системи автоматичного керування(Рис 2.4)

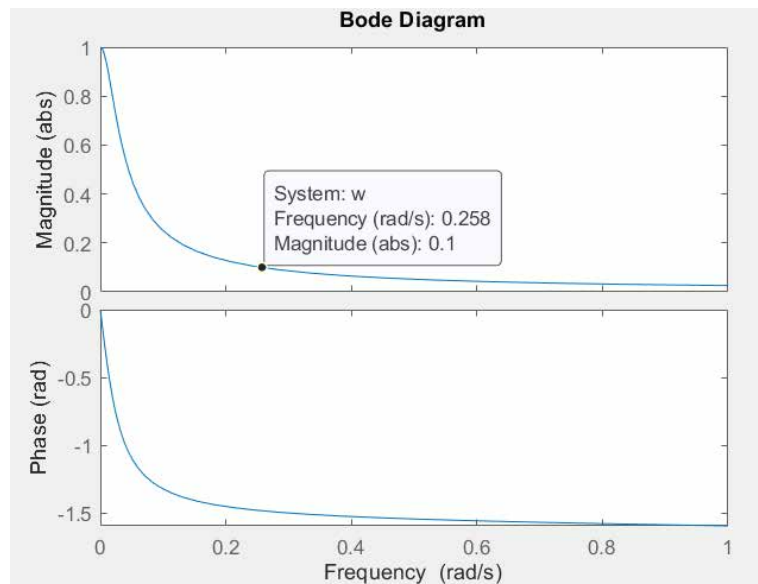


Рис.2.4 АФЧХ системи

На основі визначеної критичної частоти системи $\omega_c = 0.258 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ обчислюємо період квантування для цифрової системи керування.

Згідно з класичним підходом, період дискретизації визначається як:

$$T_K = \frac{\pi}{\omega_c} = \frac{3.14}{0.258} = 12.17 \text{ с} \quad (2.10)$$

2.3 Розрахунок параметрів ПІ-регулятора

Для переходу від безперервної передатної функції ПІ-регулятора до її цифрового еквівалента проведемо Z-перетворення (Рис 2.5).

```
>> wz=c2d(w,12.17)

wz =

    0.2686 z + 0.0009438
    -----
    z^2 - 0.7304 z + 8.11e-17

Sample time: 12.17 seconds
Discrete-time transfer function.
Model Properties
```

Рис.2.5 Z-перетворення в MATLAB

Тоді визначаємо коефіцієнти K_i та K_p (Рис 2.6)

$$K_i := \frac{0.098}{\left(\frac{0.2686 + 0.0009438}{1^3 - 0.7304^2 + 8.11 \cdot 10^{-17}} \right)} = 0.17$$

$$T := 38.746 \quad K_p := 0$$

Given

$$\frac{K_i \cdot T - 2 \cdot K_p}{K_i \cdot T + 2 \cdot K_p} = 0.259$$

$$\text{Find}(K_p) = 1.934$$

Рис.2.6 Визначення інтегрального та пропорційного коефіцієнтів в
MATCAD

Пропорційний коефіцієнт ПІ регулятора $K_p=1,934$

Інтегральний коефіцієнт ПІ регулятора $K_i=0,17$

Складемо схему в Simulink Matlab (Рис 2.7):

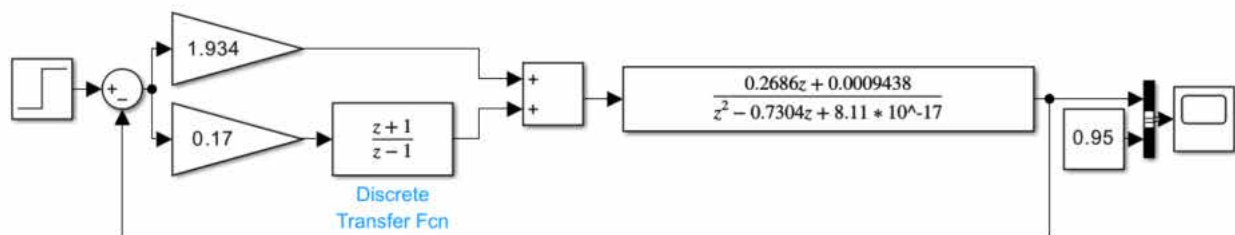


Рис.2.7 Структурно-алгоритмічна схема системи

Перехідний процес цифрової системи керування отримано в середовищі
MATLAB Simulink та показаний на (Рис 2.8).

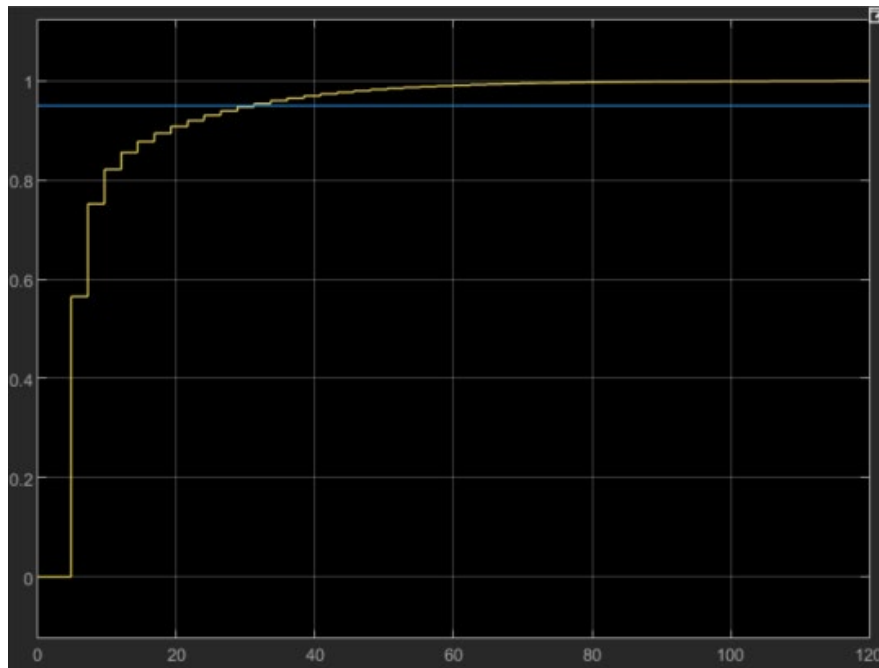


Рис.2.8 Графік перехідного процесу цифрової системи з ПІ-регулятором

Показники якості перехідного процесу:

1. Статична похибка рівна нулю;
2. Час регулювання рівний 32 с;
3. Коливальність рівна нулю.

РОЗДІЛ 3. ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Вибір силової частини електричного кола

Трубочастий електронагрівач (ТЕН 3 кВт) (Рис.3.1): Забезпечує необхідну швидкість випаровування суміші в кубі, а клампове кріплення 2" гарантує швидкий герметичний монтаж і зручність обслуговування. [8]



Рис.3.1 ТЕН 3кВт кламп

Таблиця 3.1. Технічні характеристики ТЕНа

Характеристика	Значення
Потужність	3кВт
Кріплення	Кламп 2“
Напруга	230/400В

Диференційний автоматичний вимикач (Рис.3.2): Обрано через можливість одночасного забезпечення захисту від короткого замикання (16 А) та витоків струму на корпус, а також як частина системи аварійного вимикання. [9]



Рис.3.2 Диференційний автомат 16А

Таблиця 3.1. Технічні характеристики диференціального автомата АД1-40

Характеристика	Значення
Номінальний струм	16А
Кількість полюсів	1

1. Вимикач навантаження (Рис.3.3): Вибрано з метою забезпечення гарантованого, видимого та безпечного ручного знеструмлення силової частини(ТЕНа) установки під час проведення профілактичних робіт [10].



Рис.3.3 Вимикач навантаження

Таблиця 3.1. Технічні характеристики вимикача навантаження ВН-1

Характеристика	Значення
Номінальний струм	50А
Кількість полюсів	1

Силовий симістор (ВТА40) (Рис.3.4): Вибір аргументовано високим номінальним струмом (40 А) та напругою (800 В), що створює необхідний технологічний запас надійності при тривалій комутації ТЕНа і виключає механічний знос. [11]



Рис.3.4 Симістор ВТА40

Таблиця 3.4. Технічні характеристики симістора ВТА40

Характеристика	Значення
Номінальний струм	40А
Номінальна напруга	800В
Корпус	RD-91
Динамічний опір	10мОм

Вентилятор охолодження (кулер) (Рис.3.5): Організація активного охолодження обумовлена високою ринковою доступністю стандартних вентиляторів та необхідністю ефективного відведення теплової потужності симістора (до 95 Вт) для запобігання його тепловому пробою. [12]

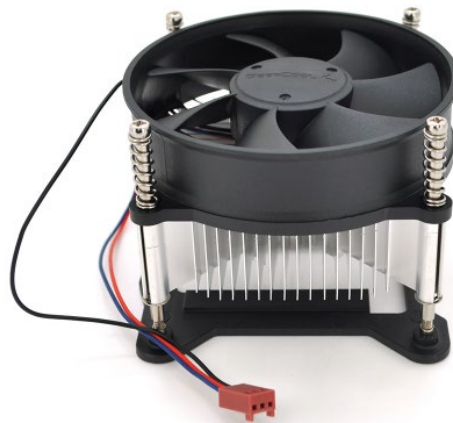


Рис.3.5 Кулер

Таблиця 3.5. Технічні характеристики кулера DeepCool СК-11508

Характеристика	Значення
Номінальна потужність розсіювання	95Вт
Напруга живлення	12В

Вибір керуючого вузла на базі компактного модуля Arduino Mega 2560 Pro (Рис.3.6) обумовлений наявністю 256 КБ флеш-пам'яті та великої кількості апаратних портів, що дозволило реалізувати об'ємні алгоритми ПІД-регулювання та підключити всю периферію без додаткових розширювачів. Інтеграція цього модуля на спеціалізовану друковану плату з паяним монтажем і гвинтовими клемми забезпечує високу механічну надійність з'єднань, об'єднуючи в єдиному блоці стабілізатори напруги та ключі керування клапанами. Крім того, оптимізована топологія провідників із належним розведенням контурів заземлення та фільтрацією ліній живлення гарантує високий рівень завадостійкості логічних кіл від електромагнітних наведень з боку силового ланцюга ТЕНа.



Рис.3.6 Контролер на базі контролера Arduino Mega2560 Pro

Таблиця 3.6. Технічні характеристики контролера на базі Arduino Mega2560 Pro

Характеристика	Значення
Напруга живлення	230В
Підключень клапанів	3
Аналогових входів	8
Вихіді напруги	12В,5В
Наявні протоколи комунікації	I2C, 1Wire, UART

Мікроконтролер Weemos d1 mini (Рис.3.7): Обрано завдяки його мінімальній вартості, компактним габаритам та наявності інтегрованого Wi-Fi інтерфейсу, що дозволяє реалізувати бездротовий моніторинг без купівлі додаткових плат розширення.[13]



Рис.3.7 Мікроконтролер Weemos d1 mini

Таблиця 3.7. Технічні характеристики мікроконтролера Weemos d1 mini

Характеристика	Значення
Напруга живлення	5В
Дискретних входів/виходів	11
Аналогових входів	1
Об'єм IRAM	64kB
Об'єм DRAM	96kB
Об'єм FLASH	16MB
Підтримувані інтерфейси зв'язку	UART,SPI,I2C,WIFI 2.4Ghz

LCD дисплей (20x04 I2C) (Рис.3.8): Вибір зумовлений наявністю вбудованого I2C-конвертера, який дозволяє виводити великий об'єм текстової інформації, використовуючи лише два цифрові порти мікроконтролера. [14]

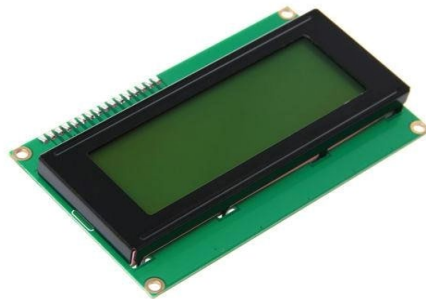


Рис.3.8 LCD дисплей 20x04 I2C

Таблиця 3.8. Технічні характеристики LCD-дисплея 20x04 I2C

Характеристика	Значення
Напруга живлення	5В
Кількість рядків	4
Кількість символів в рядку	20
Протокол комунікації	I2C

Модуль клавіатури (Рис.3.9): Вибрано через його схему з аналоговим виходом, що дозволяє підключити 5 фізичних кнопок керування до одного аналогового входу контролера, заощаджуючи цифрові піни. [15]



Рис.3.9 Модуль клавіатури

Таблиця 3.9. Технічні характеристики аналогового модуля клавіатури

Характеристика	Значення
Напруга живлення	5В
Кількість кнопок	5
Вихідний сигнал	Аналоговий

Вибір світлодіодів (Рис.3.10,3.11,3.12,3.13) зумовлений необхідністю реалізації оперативної та енергоефективної візуальної індикації поточних режимів роботи системи й стану виконавчих механізмів безпосередньо на лицьовій панелі шафи керування [16]



Рис.3.10 Світлодіод червоний

Таблиця 3.10. Технічні характеристики червоного світлодіода

Характеристика	Значення
Номінальний струм	20мА
Напруга живлення	1.9-2.1В
Діаметр	5мм



Рис.3.11 Світлодіод жовтий

Таблиця 3.11. Технічні характеристики жовтого світлодіода

Характеристика	Значення
Номінальний струм	20мА
Напруга живлення	2.1-2.18В
Діаметр	5мм



Рис.3.12 Світлодіод зелений

Таблиця 3.12. Технічні характеристики червоного світлодіода

Характеристика	Значення
Номінальний струм	20мА
Напруга живлення	3-3.5В
Діаметр	5мм



Рис.3.13 Світлодіод синій

Таблиця 3.13. Технічні характеристики синього світлодіода

Характеристика	Значення
Номінальний струм	20мА
Напруга живлення	3-3.2В
Діаметр	5мм

Електромагнітний клапан ZE-4F180 (Рис.3.14): Вибір даної моделі з котушкою живлення 12 В зумовлений необхідністю автоматизації контуру подачі охолоджувальної води з водопроводу, де клапан забезпечує швидке перекриття магістралі та стабільно витримує тиск комунальної мережі при мінімальному власному енергоспоживанні [17].



Рис.3.14 Клапан електромагнітний ZE-4f180

Таблиця 3.14. Технічні характеристики клапана ZE-4f180

Характеристика	Значення
Номінальний струм	500мА
Напруга живлення	12В
Діаметр підключення	1/2"

Електромагнітний клапан 2V025-08 (Рис.3.15): Цю модель двопозиційного клапана прямої дії (з різьбою 1/4" та живленням 12 В) обрано для контуру точного відбору дистиляту («голів» та «тіла») за алгоритмом «старт-стоп» завдяки високій хімічній стійкості його конструкційних матеріалів до тривалого впливу гарячого концентрованого етилового спирту та здатності надійно спрацьовувати за нульового початкового тиску в системі [18].



Рис.3.15 Клапан електромагнітний 2V025-08

Таблиця 3.14. Технічні характеристики клапана 2V025-08

Характеристика	Значення
Номінальний струм	230мА
Напруга живлення	12В
Діаметр підключення	1/4"

Цифрові датчики температури DS18B20 (Рис.3.16): Вибір обґрунтовано високою заводською точністю (до 0.0625 °C) та підтримкою заводостійкої шини 1-Wire, що виключає вплив довжини ліній зв'язку на похибку вимірювань [19].



Рис.3.16 Датчик температури DS18b20

Таблиця 3.16. Технічні характеристики DS18B20

Характеристика	Значення
Діапазон вимірюваних температур	-55...+125°C
Точність вимірювання	0.0625°C
Час отримання даних	750мс
Споживання в спокої	750нА
Споживання при вимірюванні	1мА
Напруга живлення	5В
Інтерфейс зв'язку	1Wire
Довжина гільзи	50мм

Цифровий датчик тиску BMP280 (Рис.3.17): Вибрано через його мінімальні габарити, низьке енергоспоживання та підтримку інтерфейсу I2C для зняття точного опорного значення атмосферного тиску [20].

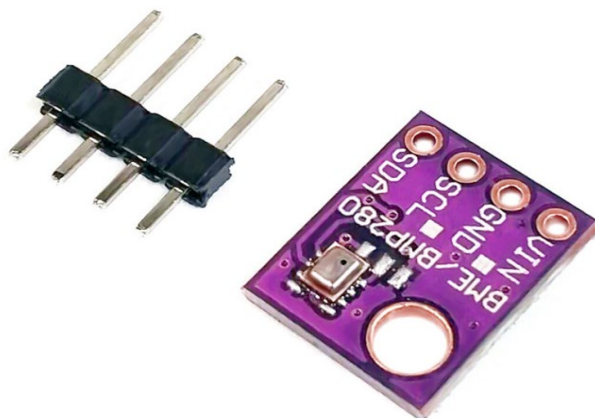


Рис.3.17 Датчик атмосферного тиску BMP280

Таблиця 3.17. Технічні характеристики BMP280

Характеристика	Значення
Напруга живлення	5В
Діапазон вимірювання	300hPa- 1100hPa
Споживаний струм	2.7мА
Швидкість вимірювань	1Hz
Протокол комунікації	I2C

Диференційний датчик тиску MPX5010DP (Рис.3.18): Обрано через ідеальну відповідність його лінійного аналогового діапазону (0–10 кПа) малому робочому тиску всередині ректифікаційної колони, що необхідно для точного виявлення перед-аварійних станів [21].



Рис.3.18 Диференційний датчик тиску MPX5010DP

Таблиця 3.18. Технічні характеристики MPX5010DP

Характеристика	Значення
Напруга живлення	5В
Діапазон вимірювання	0-10kPa
Споживаний струм	5мА
Швидкість вимірювань	1000Hz
Тип сигналу	Аналоговий

Газоаналізатор парів спирту MQ-3 (Рис.3.19): Застосовано у зв'язку з його високою вибірковою чутливістю до молекул етанолу в повітрі (0.05–10 мг/л), що дозволяє надійно побудувати систему захисту від технологічних витоків [22].



Таблиця 3.19. Технічні характеристики MQ-3

Характеристика	Значення
Напруга живлення	5В
Діапазон вимірювання	0.05мг/л-10мг/л
Споживаний струм	5-200мА
Час розігріву	2хв
Тип сигналу	Аналоговий

Трансформатор струму GTA20L (Рис.3.20): Обрано для реалізації безконтактного та безпечного моніторингу змінного струму в діапазоні 0–20 А, що необхідно для безперервної діагностики цілісності ТЕНа.



Рис.3.20 Трансформатор струму GTA20L

Таблиця 3.20. Технічні характеристики GTA20L

Характеристика	Значення
Співвідношення витків	1000:1
Діапазон вимірювання	0-20А
Номінальна напруга	5В
Тип сигналу	Аналоговий

3.2 Вибір кабельно-провідникової продукції

Вибір провідників для під'єднання ТЕНу

Кабель ПВС (3х1.5) (Рис.3.21): Вибір обумовлений тим, що переріз мідних жил 1.5 мм² повністю задовольняє вимогам тривалого струмового навантаження від ТЕНа потужністю 3 кВт.[23]

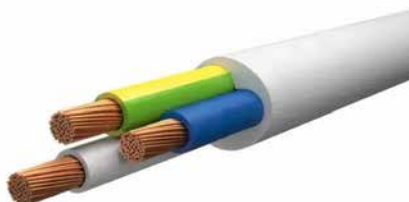


Рис.3.21 Кабель ПВС 3х1.5

Вибір провідників для під'єднання клапанів

Кабель ШВВП (2х0.5) (Рис.3.22): Вибрано як найбільш гнучке та економічно вигідне рішення для підключення низьковольтних клапанів відбору всередині монтажних кабель-каналів [24].



Рис.3.22 Кабель ШВВП 2х0.5

Вибір провідників для під'єднання виносних датчиків

Кабель КСПЕВ (4х0.22) (Рис.3.23): Застосовано через наявність суцільного екрануючого обплетення, яке захищає слабкострумові інформаційні сигнали датчиків від наведень з боку паралельних ліній 220 В [25].



Рис.3.23 Кабель КСПЕВ (4х0.22)

Вибір провідників для внутрішніх з'єднань

Провід НВ-4 (0.22 мм²) (Рис.3.24): Обрано для внутрішньоштитового монтажу модулів завдяки високій гнучкості багатожильної структури та стійкості ізоляції до оплавлення під час паяння [26].



Рис.3.24 Набір проводів НВ-4 (0.22 мм²)

Таблиця 3.21. Характеристики кабелів та проводів

Тип кабелю	Переріз	Призначення
ПВС	3x1.5мм ²	Під'єднання ТЕНа
ШВВП	2x0.5мм ²	Під'єднання клапанів
КСПЕВ	4x0.22мм ²	Під'єднання датчиків
НВ	0.22мм ²	Внутрішні з'єднання

Вибір шафи розподільчої

Шафа розподільча ШМР-3Ф-12А-3 (Рис.3.25): Вибір зумовлений відповідністю її габаритних розмірів (430x260x150 мм) для вільного та безпечного розміщення всього переліку обраного обладнання із забезпеченням класу захисту IP30 [27].



Рис.2.25 Шафа ШМР-3Ф-12А-3

Таблиця 3.22. Технічні характеристики шафи ШМР-3Ф-12А-3

Характеристика	Значення
Габаритні (ВхШхГ)	430х260х150
Ступінь пило-волого захисту	IP30

3.3 Розробка електричної принципової схеми

Розробка електричної принципової схеми виконувалась відповідно до синтезованої структури системи автоматизованого керування процесом ректифікації. Електричну принципову схему наведено в додатку А.

3.4 Розробка схеми електричних з'єднань

Схема електричних з'єднань була розроблена базуючись на електричній принциповій схемі. На передній панелі відведено місце для дисплея, що

забезпечує зчитування необхідних параметрів та п'ятиклавішної клавіатури для вибору та зміни параметрів. Схему електричних з'єднань наведено в додатку Б

3.5 Розробка схеми електричних підключень

Схема електричних з'єднань виконавчих механізмів передбачає підключення потужного ТЕНа. Живлення проводиться через симістор, керування яким проводиться з головної плати керування.

Керування електромагнітними клапанами відбувається низьковольтною комутаційною апаратурою встановленою на головній платі керування. Схему електричних підключень наведено в додатку В.

3.6 Розробка загального виду щита керування

Щит керування є центральною ланкою системи автоматизації процесу ректифікації, яка забезпечує оператору можливість локального моніторингу та керування технологічним процесом. Його конструкція та масогабаритні параметри визначаються виходячи з умов експлуатації, ергономіки та електробезпеки.

Щит розміщений в металевому корпусі, що забезпечує ступінь пило-волого захисту IP-30. Враховуючи відсутність агресивного середовища та впливу зовнішніх елементів є прийнятним

На дверцятах щита встановлено органи індикації та керування, що забезпечують оператору швидкий доступ до головних функцій не відкриваючи корпусу. Схему загального виду щита керування представлено в додатку Д.

РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ РЕКТИФІКАЦІЇ

Впровадження системи автоматичного керування процесом ректифікації на базі мікроконтролера Arduino Mega2560 Pro є науково та практично обґрунтованим кроком, спрямованим на модернізацію технологічного вузла розділення багатокомпонентних сумішей.

Основною метою розробки є мінімізація та повне усунення «людського фактору» з контуру керування процесом. Ректифікація спирту вимагає тривалого й прецизійного підтримання температурного режиму та робочого тиску в колоні. За ручного керування оператор не здатний миттєво реагувати на коливання тиску чи зміну температури у дефлегматорі, що призводить до потрапляння сивушних масел у готовий продукт або до аварійного «захливання» колони. Автоматизація дозволяє перекласти рутинні операції вимірювання, стабілізації потужності ТЕНа за допомогою симістора ВТА40 та дискретного відбору фракцій через електромагнітні клапани на мікропроцесорну систему, забезпечуючи цілодобову повторюваність технологічних циклів та безпеку виробництва.

Економічний ефект від реалізації проєкту досягається за рахунок:

- оптимізації роздільної здатності колони, що забезпечує збільшення виходу високоякісного товарного спирту (класу «Люкс» / «Альфа») за рахунок точного відсікання головної та хвостової фракцій за сигналами датчиків DS18B20 та MPX5010DP;
- зниження питомих витрат сировини (спирту-сирцю) на одиницю готової продукції внаслідок мінімізації технологічного браку.

4.1 Розрахунок капітальних витрат на впровадження системи автоматизації

Капітальні витрати на впровадження розробленої системи автоматизованого керування охоплюють вартість електронних компонентів, виконавчих механізмів, датчиків, допоміжних матеріалів, а також витрати на проектування, монтаж щита керування та програмування контролера.

Загальна формула розрахунку капіталовкладень ($K_{\text{заг}}$) має вигляд:

$$K_{\text{заг}} = \sum (C_i \cdot K_i) + Z_{\text{мон}} + Z_{\text{налад}} + Z_{\text{рез}} \quad (4.1)$$

де:

C_i -вартість і-го елемента специфікації обладнання, грн

K_i -кількість одиниць і-го елемента, шт

$Z_{\text{мон}}$ -витрати на електричний та механічний монтаж обладнання, грн

$Z_{\text{налад}}$ -витрати на програмування контролера та налагодження контурів керування, грн

$Z_{\text{рез}}$ -резерв на непередбачувані витрати (дрібні комплектуючі, кріплення тощо), грн

Таблиця 4.1 вартість обладнання

Найменування компонента / матеріалу	Кількість (K_i)	Ціна за одиницю (C_i), грн	Загальна вартість, грн
Головна плата керування (з елементами обв'язки)	1 шт.	3000	3000
ТЕН підігріву куба (3 кВт, кламп 2")	1 шт.	1240	1240
Електромагнітний клапан відбору (сірий)	1 шт.	382,69	382,69
Електромагнітний клапан відбору (білий)	2 шт.	205	410
Датчик диференційного тиску MPX5010DP	1 шт.	700	700
Цифровий датчик температури DS18B20	3 шт.	72,83	218,49

Диференційний автомат захисту 16А	1 шт.	285	285
Рідкокристалічний дисплей (LCD 20x04)	1 шт.	250	250
Радіатор охолодження з кулером	1 шт.	250	250
Модуль бездротового зв'язку WeMos D1 mini	1 шт.	200	200
Промислові циліндричні конектори GX12	8 шт.	100	800
Вимикач навантаження вхідної напруги	1 шт.	100	100
Симістор силовий ВТА40 (40А, 800В)	1 шт.	100	100
Matrix клавіатура керування	1 шт.	100	100
Датчик контролю струму	1 шт.	88	88
Датчик концентрації парів спирту MQ-3	1 шт.	70	70
Цифровий барометр/датчик тиску BMP280	1 шт.	30	30
Сигнальні діоди	5 шт.	2	10
Кабель силовий ПВС 3x1.5	8 м	60	480
Кабель ШВВП 2x0.5	6 м	16	96
Кабель сигнальний екранований	4 м	16	64
Комплекти 3D-пластику (для корпусних елементів)	1 шт.	400	400
Разом за матеріальну частину	9 074,18		

Організаційно-технічні витрати на проектування, збірку та пусконаладження системи керування приймаються на основі загальної трудомісткості робіт:

- Витрати на електричний монтаж та комутацію щита автоматики ($Z_{\text{мон}}$): 1800 грн.
- Витрати на розробку ПЗ для Arduino та налагодження алгоритмів ($Z_{\text{налад}}$): 2200 грн.
- Резерв на непередбачувані витрати, монтажні розхідники ($Z_{\text{рез}}$): 925,82 грн.

Отже, сумарні загальні капітальні витрати на реалізацію проекту автоматизації становлять:

$$K_{\text{заг}} = 9074.18 + 1800 + 2200 + 925.82 = 14000 \text{ грн} \quad (4.2)$$

4.2 Розрахунок річного економічного ефекту від автоматизації

Вихідними даними для оцінки прибутковості системи є річний об'єм переробки сировини та оптимізація корисного виходу чистого спирту-ректифікату за рахунок точного мікропроцесорного керування.

Загальний річний об'єм сировини (спирту-сирцю): $V_{\text{сир}} = 500 \text{ л/рік}$

Базовий вихід чистого спирту за ручного регулювання (через нестабільність відбору та температурні коливання значна частина продукту втрачається або переходить у фракцію низькоякісних «хвостів»): приймаємо середній ККД розділення на рівні 75% від об'єму абсолютної суміші. Тобто умовний базовий вихід товарного ректифікату складає:

$$V_{\text{баз}} = 500 \cdot 0,75 = 375 \text{ л/рік.} \quad (4.2)$$

Приріст виходу продукту завдяки автоматизації: Впровадження точного симісторного регулювання нагріву ТЕНа за алгоритмом відстеження тиску (MPX5010DP) та стабілізація температури у верхній точці колони (DS18B20) дозволяє підвищити вихід високоякісного ректифікату класу «Люкс» щонайменше на 12% за рахунок мінімізації втрат та чіткого фазового розділення.

Додатковий об'єм отриманого високоочищеного продукту за рік (ΔV):

$$\Delta V = 375 \cdot 0,12 = 45 \text{ л/рік.} \quad (4.3)$$

Грошова оцінка економічного ефекту (Дохід): Приймаючи консервативну ринкову вартість одного літра харчового ректифікату високої якості на рівні

350грн/л, розрахуємо річний додатковий грошовий потік (ГП), який генерує впроваджена система автоматизації:

$$\text{ГП} = \Delta V \cdot C_{\text{спирту}} = 45 \cdot 350 = 15750 \text{ грн/рік.} \quad (4.4)$$

Чистий прибуток (Π) за перший рік експлуатації системи (з урахуванням повного покриття первинних інвестицій на закупівлю автоматики) розраховується за формулою:

$$\Pi = \text{ГП} - K_{\text{заг}} = 15750 - 14000 = 1750 \text{ грн.} \quad (4.5)$$

4.3 Оцінка ефективності інвестицій в автоматизацію

Для аналізу доцільності капіталовкладень у розроблену мікропроцесорну систему визначимо термін окупності проєкту ($T_{\text{окуп}}$) та коефіцієнт рентабельності інвестицій (ROI).

Термін окупності системи автоматизації (у роках) становить:

$$T_{\text{окуп}} = \frac{K_{\text{заг}}}{\text{ГП}} = \frac{14000,00}{15750,00} \approx 0,89 \text{ року.} \quad (4.6)$$

Переведемо отримане значення у місяці роботи установки:

$$T_{\text{окуп/міс}} = 0,89 \cdot 12 \approx 10,7 \text{ місяців.} \quad (4.7)$$

Розрахуємо рентабельність інвестицій (ROI), яка демонструє фінансову віддачу від кожної вкладеної гривні безпосередньо у розробку електронного модуля та контурів керування:

$$\text{ROI} = \frac{\text{ГП}}{K_{\text{заг}}} \cdot 100\% = \frac{15750}{14000} \cdot 100\% \approx 112,5\% \quad (4.8)$$

Проведений техніко-економічний аналіз повністю доводить доцільність та високу фінансову ефективність розробки системи автоматичного керування процесом ректифікації спирту.

Попри відносно малі масштаби переробки сировини (до 500 л спирту-сирцю на рік), первинні капіталовкладення в автоматизацію у розмірі 14 000 грн окупаються за 10,7 місяців експлуатації установки, тобто менш ніж за один рік. Показник рентабельності інвестицій $ROI = 112,5\%$ підтверджує стійку фінансову вигоду від модернізації вузла керування.

При цьому головний технологічний результат полягає у виключенні людського фактору з критичних контурів термостабілізації дефлегматора та регулювання тиску, що гарантує стабільно високу якість одержуваного ректифікату, захист обладнання від позаштатних режимів (таких як «захлинання» колони) та істотне полегшення умов праці оператора. Система рекомендована до практичного впровадження на малогабаритних роздільних установках.

ВИСНОВОК

У результаті виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи вирішено комплексне інженерне завдання, що полягає у розробці автоматизованої системи керування вузлом відбору лабораторної ректифікаційної колони періодичної дії. Така система дозволяє забезпечити функціонування установки в повністю автономному режимі завдяки реалізації алгоритмів інтелектуального розділення фракцій, що повністю мінімізує суб'єктивний фактор оператора, забезпечує стабільність флегмового числа та гарантує високі якісні показники кінцевого продукту протягом усього тривалого циклу розділення суміші.

На основі аналізу науково-технічної літератури та існуючих технологічних практик керування (LM, VM, CM) обґрунтовано вибір схеми рідинного відбору (Liquid Management) як найбільш придатної та гнучкої для глибокої автоматизації процесу. Здійснено інформаційне моделювання об'єкта керування, визначено основні керовані й регульовані змінні (температурні показники у кубі та на висоті 2/3 колони), канали зовнішніх збурень, а також чітко окреслено контури аварійного захисту за параметрами тиску, температури трубки зв'язку з атмосферою та загазованості парів спирту.

В межах математичного моделювання об'єкта дослідження виведено аналітичну залежність для визначення постійної часу колони за матеріальним балансом. На основі аналізу частоти зрізу системи розраховано період квантування цифрової системи, який становить $T_K = 12,1\text{с}$, а також синтезовано й верифіковано у середовищі MATLAB Simulink дискретний ПІ-регулятор із розрахованими коефіцієнтами: пропорційним $K_p = 1,934$ та інтегральним $K_i = 0,17$.

Електротехнічна частина проєкту охоплює розробку електричної принципової схеми, схеми з'єднань виконавчих механізмів, вибір кабельно-провідникової продукції та обґрунтування конструкції металевого щита керування зі ступенем захисту IP30. Апаратна реалізація базується на обчислювальному ядрі мікроконтролера Arduino Mega2560 Pro у зв'язці з

бездротовим модулем WeMos D1 mini, що забезпечує збір даних з цифрових датчиків температури DS18B20, контроль тиску за допомогою вимірювального перетворювача MPX5010DP, фазове регулювання потужності нагрівача (потужністю 3 кВт) через симістор ВТА40 та дискретну комутацію електромагнітних клапанів відбору фракцій.

У техніко-економічному розділі розрахунковим шляхом підтверджено високу доцільність впровадження розробленої системи автоматизації. За загальних капітальних інвестицій у розмірі 14 000 грн на модернізацію вузла відбору, термін окупності системи за рахунок підвищення корисного виходу спирту високої якості та усунення технологічного браку становить 10,7 місяців, а коефіцієнт рентабельності інвестицій (ROI) досягає 112,5%. Отримані результати повністю підтверджують як інженерну ефективність запропонованого мікропроцесорного рішення, так і його високу практичну цінність для малотоннажних лабораторних і дослідних установок.

Список використаних джерел

1. Технологія спирту. В.О.Маринченко, В.А.Домарецький, П.Л.Шиян, В.М.Швець, П.С. Циганков, І.Д.Жолнер. /Під ред. проф. В.О. Маринченка. — Вінниця: "Поділля-2000", 2003. – 496 с.
2. Luyben W. L. Distillation design and control using Aspen simulation. 2nd ed. Hoboken, N.J. : Wiley, 2013. 472 p.
3. Reflux : Homedistiller.org. URL: <https://homedistiller.org/wiki/index.php?title=Reflux> (дата звернення: 25.05.2026).
4. Liquid management : Homedistiller.org. URL: https://homedistiller.org/wiki/index.php?title=Liquid_management (дата звернення: 25.05.2026).
5. Vapor management : Homedistiller.org. URL: https://homedistiller.org/wiki/index.php?title=Vapor_management (дата звернення: 25.05.2026).
6. Cooling management : Homedistiller.org. URL: https://homedistiller.org/wiki/index.php?title=Cooling_management (дата звернення: 25.05.2026).
7. Distillation Columns: Plates and Packing : EPCM Holdings. URL: <https://epcmholdings.com/distillation-columns-plates-and-packing/> (дата звернення: 25.05.2026).
8. ТЕН кламповий нержавійка : Kors.in.ua. URL: <https://kors.in.ua/ua/p1384842744-ten-klampovuj-nerzhavejka.html> (дата звернення: 30.05.2026).
9. Вимикач диференціального струму АД1-40 : Electrotm.ua. URL: <https://electrotm.ua/vikljuchatel-differencialnogo-toka-ad1-40--16a--30ma--1p-n.html> (дата звернення: 30.05.2026).
10. Вимикач навантаження модульний ВН-1 : Electrotm.ua. URL: <https://electrotm.ua/vikljuchatel-nagruzki-modulnij--vn1-32--1p--50a.html> (дата звернення: 30.05.2026).

11. BTA40-600B Datasheet : STMicroelectronics. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/bta40.pdf> (дата звернення: 30.05.2026).
12. Cooler Master I50 CPU Cooler : Cooler Master. URL: <https://www.coolermaster.com/en-global/products/RR-I5A7-22FK-N1.html> (дата звернення: 30.05.2026).
13. Wemos D1 mini documentation : Wemos.cc. URL: https://www.wemos.cc/en/latest/d1/d1_mini.html (дата звернення: 30.05.2026).
14. I2C 2004 LCD Module datasheet : Handsontec. URL: https://www.handsontec.com/dataspecs/I2C_2004_LCD.pdf (дата звернення: 30.05.2026).
15. Keystudio AD Key Button Module : Keystudio. URL: <https://www.keystudio.com/products/keystudio-ad-key-button-module-for-arduino> (дата звернення: 30.05.2026).
16. Набір кольорових світлодіодів : Arduino.ua. URL: <https://arduino.ua/prod2596-nabor-cvetnih-svetodiodov-3mm-i-5mm-100sht> (дата звернення: 30.05.2026).
17. ZE-4F180 12V Water Solenoid Valve : E-Gizmo. URL: <https://e-gizmo.net/oc/kits%20documents/ZE-4F180%2012v%20Water%20Solenoid%20Valve/ZE-4F180%2012V%20Water%20solenoid%20valve.pdf> (дата звернення: 30.05.2026).
18. 2V Series Solenoid Valve Datasheet : Airtac. URL: <https://sa-es.airtac.com/upload/044-2V-202107270231564166.PDF> (дата звернення: 30.05.2026).
19. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer : Analog Devices. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf> (дата звернення: 30.05.2026).
20. BMP280 Digital Pressure Sensor : Bosch Sensortec. URL: <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bmp280-ds001.pdf> (дата звернення: 30.05.2026).

21. MPX5010 Series Integrated Silicon Pressure Sensor : NXP Semiconductors. URL: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPX5010.pdf> (дата звернення: 30.05.2026).

22. MQ-3 Alcohol Sensor : SparkFun. URL: <https://cdn.sparkfun.com/assets/6/a/1/7/b/MQ-3.pdf> (дата звернення: 30.05.2026).

23. Провід багатожильний ПВС 3х1.5 : Epicentrk.ua. URL: <https://epicentrk.ua/ua/shop/provod-mnogozhilnyy-expert-power-pvs-3x1-5.html> (дата звернення: 30.05.2026).

24. Провід багатожильний ШВВП 2х0.5 : Epicentrk.ua. URL: <https://epicentrk.ua/ua/shop/provod-mnogozhilnyy-expert-power-shvvp-2x0-5-belyu.html> (дата звернення: 30.05.2026).

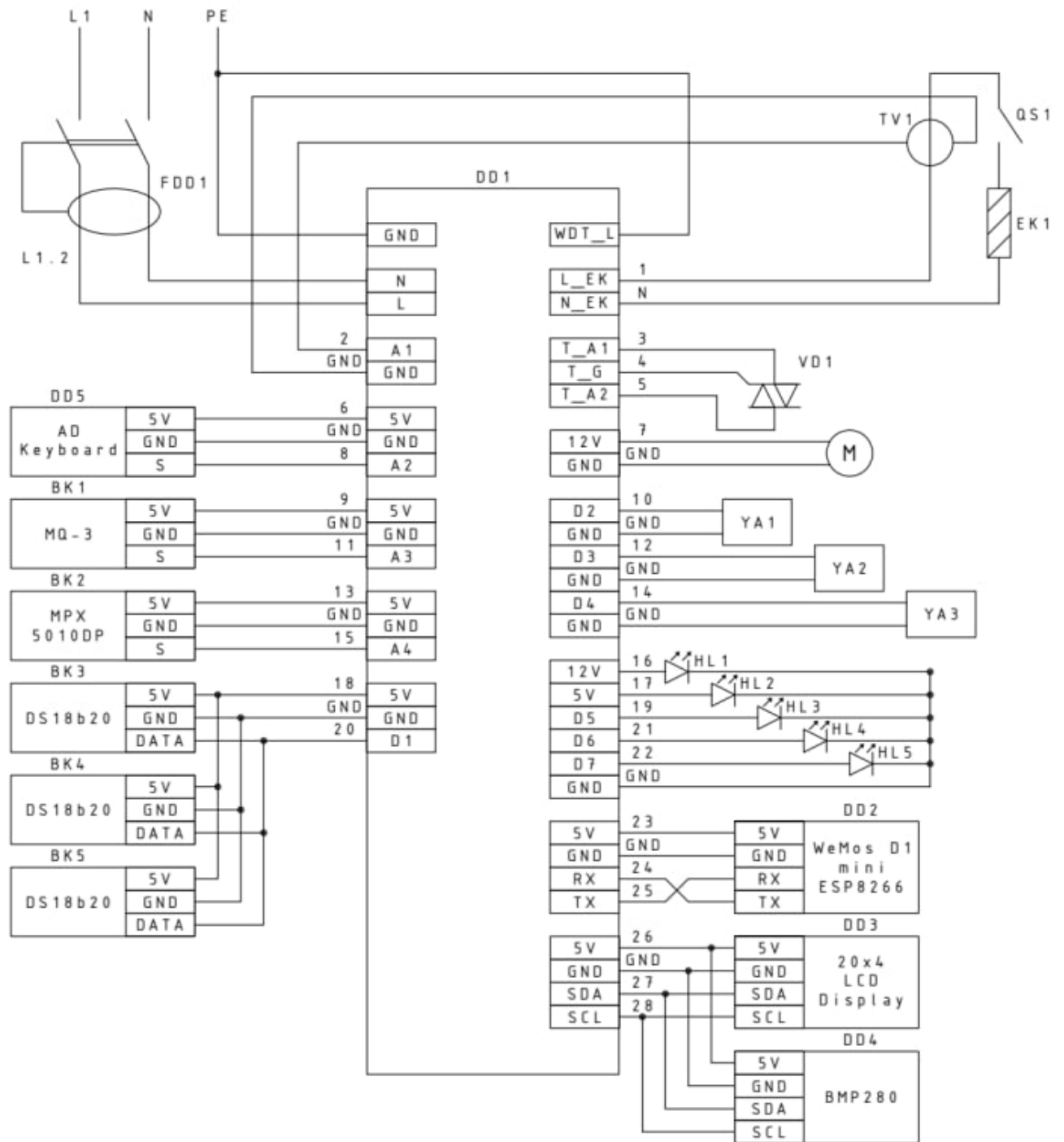
25. Кабель сигнальний 4х0.22 в екрані : Epicentrk.ua. URL: <https://epicentrk.ua/ua/shop/kabel-signalnyy-emt-4x0-22-v-ekrane-kse4022.html> (дата звернення: 30.05.2026).

26. Набір монтажних проводів 24AWG : Arduino.ua. URL: <https://arduino.ua/prod7280-nabir-montajnih-provodiv-24awg-10m> (дата звернення: 30.05.2026).

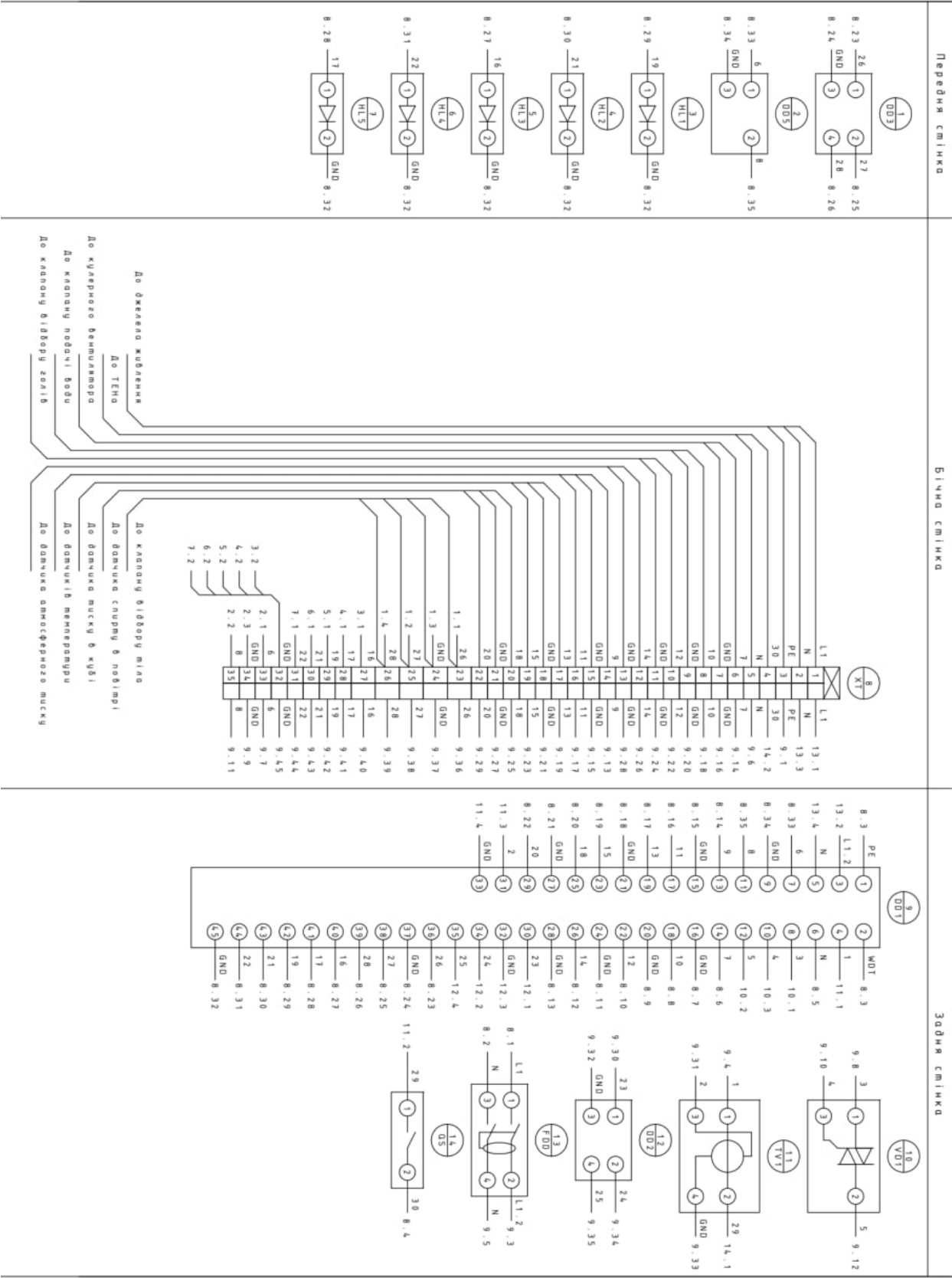
27. Щиток розподільчий 12-модульний E.NEXT : Epicentrk.ua. URL: <https://epicentrk.ua/ua/shop/shchitok-raspredelitelnyy-12-modulnyy-e-next-shmr-3f-12a-z-pod-schetchik-e-mbox-stand-n-f3-12-z-s010.html> (дата звернення: 30.05.2026).

ДОДАТКИ

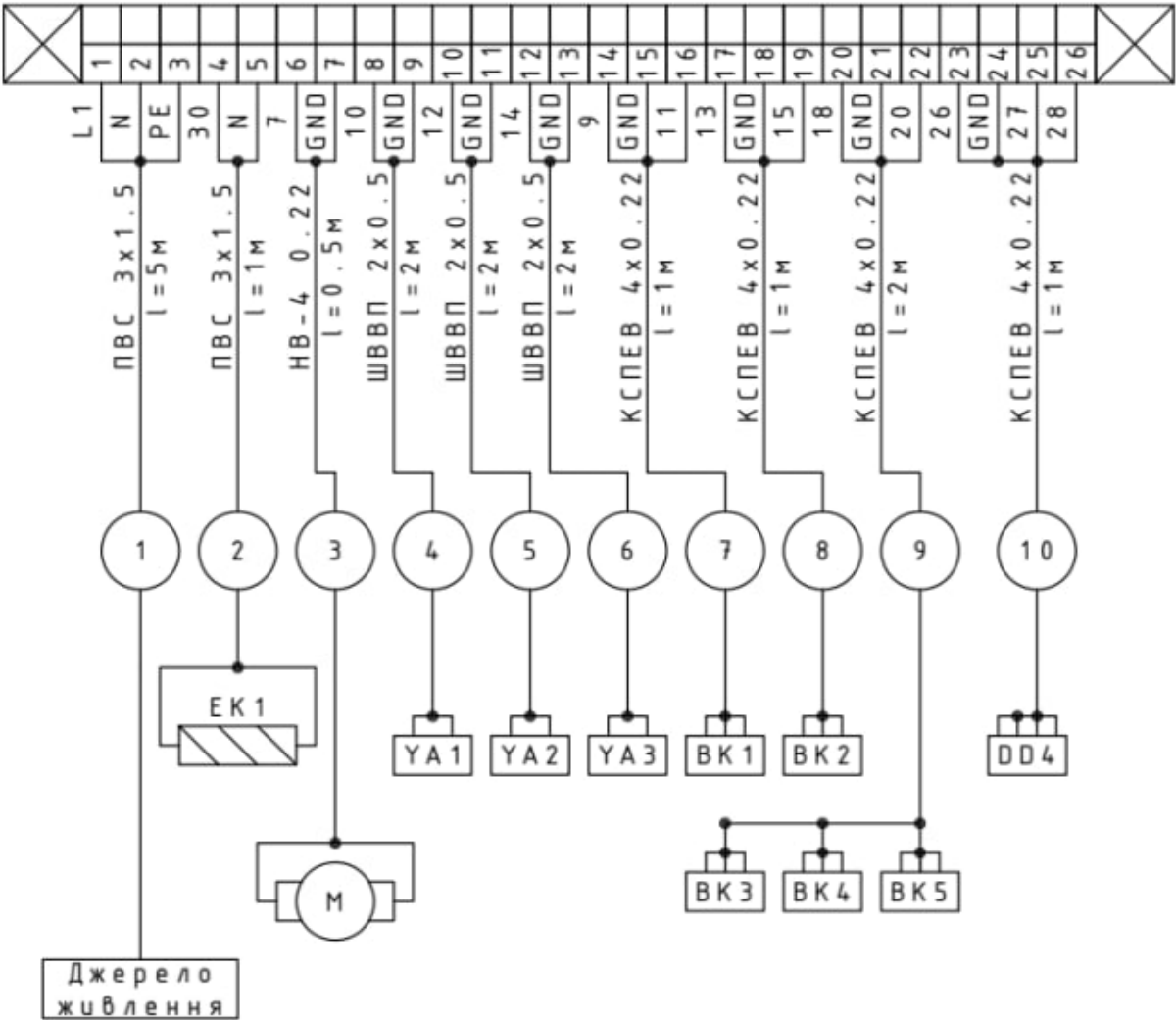
Додаток А. Схема електрична принципова



Додаток Б Схема електричних з'єднань



Додаток В Схема електричних підключень



Щит	ТЕН	Кулер	Клапан відбору голів	Клапан відбору тіла	Клапан подачі води	Датчик спирту	Дифф. датчик тиску	Датчик температури	Датчик атм. тиску
ЩСА	220В 3кВт клапан 2"	Deer Cool СК- 11508	ZE- 4F180	2V025 -08	ZE- 4F180	MQ-3	MPX 5010 DP	DS18B20	BMP280

Додаток Г Загальний вигляд щита керування

