

**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 **"РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО
КЕРУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРОЮ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ПИВА"**

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

асист., д-р філософії
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Якименко І.Ю.
(П.І.Б.)

Виконав

(підпис)

Білінчук К.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. _____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

" ____ " _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи студенту

Білінчуку Костянтину Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

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

1. Тема бакалаврської кваліфікаційної роботи: "Розроблення системи автоматичного керування температурою при виробництві пива",

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. Технологія і промислове обладнання для виробництва пива.

4.2. Розробка та дослідження математичної моделі процесу пивоваріння.

4.3. Вибір регулятора та обґрунтування параметрів його налаштувань.

4.4. Розробка цифрової системи керування.

4.5. Схеми системи автоматизації.

4.6. Техніко-економічне обґрунтування.

5. Перелік графічних документів:

5.1. Функціональна схема автоматизації системи керування температурою пива.

5.2. Система автоматизації процесу пивоваріння. Схема електрична принципова.

5.3. Система автоматизації процесу пивоваріння. Схема електрична з'єднань.

5.4. Система автоматизації процесу пивоваріння. Схема електрична підключень.

5.5. Система автоматизації процесу пивоваріння. Зовнішній вид щита керування.

Дата видачі завдання "25" жовтня 2025 року

**Керівник
бакалаврської
кваліфікаційної роботи**

(підпис)

Якименко І.Ю.
(П.І.Б.)

**Завдання прийняв до
виконання**

(підпис)

Білінчук К.О.
(П.І.Б.)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ...	6
1.1. Технологічний опис об'єкта керування.....	6
1.2. Інформаційний аналіз об'єкта керування.....	8
1.3. Розробка функціональної схеми автоматизації	10
РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	12
2.1. Розробка математичної моделі об'єкта автоматизації	12
2.2. Визначення передатної функції математичної моделі.....	14
РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ	17
3.1. Вибір технічних засобів	17
3.2. Визначення передатної функції системи автоматичного керування.....	23
3.3. Вибір алгоритму керування об'єктом.....	25
3.4. Реалізація алгоритму керування об'єктом	27
3.5. Розробка інтерфейсу користувача.....	30
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СХЕМ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ	33
4.1. Розробка електричної принципової схеми	33
4.2. Вибір апаратів захисту та керування	34
4.3. Вибір проводів керуючої мережі	35
4.4. Розробка схеми з'єднань.....	35
4.5. Розробка схеми підключень.....	36
4.6. Розробка щита керування	36
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	37
5.1. Визначення витрат та їх розрахунок.....	37
5.2. Розрахунок чистого прибутку та терміну окупності.....	40
ВИСНОВКИ	42
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	43

ВСТУП

Харчова промисловість, зокрема броварна галузь, в умовах сучасного ринку висуває жорсткі вимоги до якості готової продукції, мінімізації собівартості та підвищення енергоефективності виробництва. Процес приготування пивного сусла є складним, багатостадійним і характеризується значною тепловою інерцією, високою біохімічною чутливістю ферментів до незначних коливань температури, а також високим споживанням енергоресурсів.

Традиційні підходи до автоматизації, що базувалися на ручному керуванні або простих двопозиційних регуляторах, не здатні забезпечити точність температурних пауз, що призводить до зниження екстрактивності сусла. Крім цього, в ручній роботі спостерігається викладання великих зусиль на виготовлення якісної роботи, що призводить до високих витрат на оплату праці.

Впровадження проекрованої системи автоматизації дозволить повністю виключити людський чинник на етапі затирання та варіння сусла, забезпечити точне повторення технологічних рецептур від партії до партії, знизити питоме споживання електроенергії за рахунок повторного використання тепла пари, а також підвищити загальну безпеку праці персоналу за рахунок надійних апаратних і програмних блокувань.

Об'єктом дослідження є технологічний комплекс приготування пивного сусла у сусловарильному котлі.

Задачею дослідження є розробка та впровадження високоефективних систем автоматичного керування на базі сучасних мікропроцесорних контролерів із застосуванням точних алгоритмів регулювання та контурів рекуперації тепла.

Метою дослідження є підвищення продуктивності виробництва та якості пива за допомогою автоматичного керування температурним режимом в суслі під час пивоваріння на базі сучасних контролерів з мінімізацією динамічних похибок регулювання та інтеграцією енергозберігаючого контуру.

РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

1.1. Технологічний опис об'єкта керування. Сушловарильний котел – це бак, де відбувається найбільш енергоємні та критичні до точності підтримки параметрів стадії: затирання, оцукрювання та кип'ятіння сусла. Більшість баків виготовляються із нержавіючої сталі, що забезпечують довший термін придатності, більшу стійкість до впливу хімічних речовин, а також високу термостійкість.

Пивне сусло – основний напівфабрикат для виробництва пива, який являє собою полідисперсну систему, що містить цукри, білки та хміль. Основними компонентами для виготовлення пива є солод, вода, хміль та дріжджі. Солод формує цукор, хміль балансує смак з солодом, а дріжджі перетворюють цукор на спирт.

Найважливішим технологічним процесом у приготуванні сусла є перетворення нерозчинних компонентів солоду та його на розчинний екстракт в результаті ферментативних реакцій.

Приготування пивного сусла складається з п'яти основних технологічних етапів:

1. Підготовка зернових продуктів (очищення, сортування, подрібнення).
2. Перетворення екстрактивних речовин зернових продуктів у розчин, тобто сусло, в результаті приготування затору.
3. Фільтрація затору (відділення сусла).
4. Кондиціонування сусла шляхом кип'ятіння його з хмелем або хмелевими препаратами.
5. Освітлення та охолодження сусла [12].



Рис. 1.1. Модернізоване обладнання для виробництва пива

Під час затирання сусла подрібнений солод перемішується з водою в баку, при чому співвідношення солоду до води має бути від 1:2.5 до 1:5. Для цього процесу існують так названі «пивні паузи», під час яких конкретні ферменти за визначених значень температури та часу починають активуватися. За таблицею 1.1. наведені пивні паузи, температура активації та час затримки [3].

Таблиця 1.1. Технологічні параметри кроків затирання

Пауза	Оптимальна температура	Тривалість витримки
Пауза для розщеплення β -глюкану	52 ... 53°C	10 ... 15 хв
Мальтозна пауза	62 ... 65°C	20 ... 25 хв
Пауза оцукрювання	70 ... 75°C	60 хв
Фільтрація сусла	76 ... 78°C	5 ... 10 хв

Наступний крок у пивоварінні – кип'ятіння. Додавши хміль, сусло нагрівається до рівня кип'ятіння 95 ... 100°C протягом 60 – 90 хвилин. Під час цього процесу завданням системи автоматизації є підтримка стабільної потужності нагрівачів для випаровування вологи та екстракції гірких компонентів з хмелю. При кип'ятіння сусла утворюється водяна пара в середньому від 4 до 10%, яка через витяжну трубу переноситься до інших

теплових процесів броварні, таких як підготовка води для наступної партії, або ж для теплового обміну [10].

Оптимальна температура бродіння під час низового бродіння знаходиться в інтервалі від 5 до 16°C та триває протягом 2 тижнів. Підвищення температури під час низового бродіння може призвести до підвищення активності дріжджів, погіршення стабільності піни, кольору пива, зниження рН та більшої втрати гірких сполук. Оптимальна швидкість бродіння визначає, що зменшення екстракту протягом 24 годин не повинно перевищувати 1.5% за вагою. Температура не повинна падати швидше, ніж на 1°C протягом 24 годин, щоб бродіння не переривалося. Якщо температуру змінити з 10 до 13°C, а потім темперувати при 14°C, то на останньому етапі бродіння процес бродіння можна скоротити приблизно до 28.8 годин. Ця зміна навіть покращує сенсорні властивості пива [20].

Перевагою сучасного обладнання для пивоваріння є:

- Контроль температури, часу, тиску та параметрів бродіння;
- Енергоефективність покращена теплоізоляція, знижене споживання енергії та втрати тепла;
- Підключення до програм для збору та аналізу даних.

Попри це існують і недоліки, зв'язані з виробництвом пива:

- Висока вартість на котли, а також на мішалки;
- Залежність від електроніки - у випадку збоїв програмного забезпечення процес може зупинитись повністю;
- Складність обслуговування та дороговартісність ремонту [15].

1.2. Інформаційний аналіз об'єкта керування. Процеси приготування пивного сусла мають високий рівень автоматизації, що може забезпечити необхідну якість контролю. Однак, через те, що параметри якості затору та сусла пивоварного відділення пивоварні вимірюються лабораторними методами і система не завжди вчасно реагує на ту чи іншу зміну в процесі приготування пива, традиційна система управління не завжди ефективна, а мікропроцесорна

технологія зав'язана на певні алгоритми, які вбудовані в пам'ять контролерів і не є гнучкими [16].

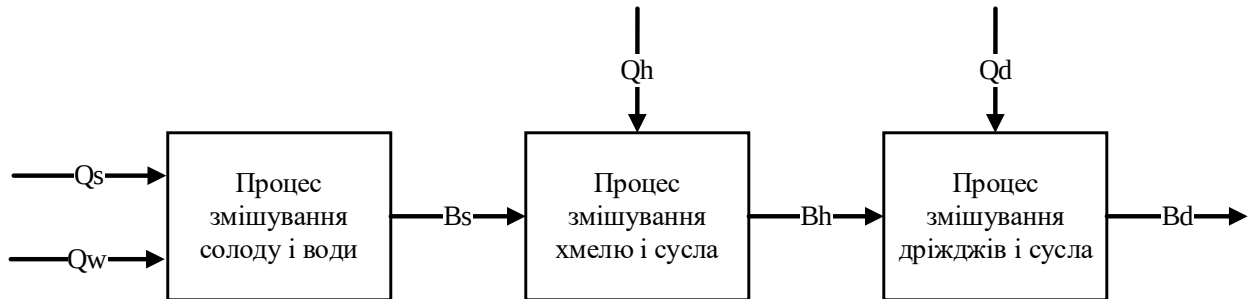


Рис. 1.2. Інформаційна схема пивоваріння

Система пивоваріння (рис. 1.2) ділиться на три етапи:

- Вода Q_w та солод Q_s надходять до баку, де відбувається процес затирання, під час якого активуються ферменти солоду, з чого отримуємо сусло для кип'ятіння;
- Суміш солоду і води B_s відправляється на кип'ятіння разом з хмелю Q_h . Після досягнення потрібного часу кип'ятіння та охолодження отримуємо сусло для ферментації B_h ;
- Кінцеве сусло B_h змішується з дріжджами Q_d , та піддається ефекту ферментації. Кінцевим продуктом є вихідний продукт B_d – пиво.

Критерії ефективності наступні:

- Параметричний вплив: температура, вміст та якість води та сировинних матеріалів, густина суслу;
- Збурюючими факторами є точність підтримання температури суслу, інтенсивність перемішування мішалкою та якість теплоізоляції суслотоварильного котла;
- Критерієм оптимізації є мінімізація питомих витрат електроенергії на нагрів та часу використання нагрівачів, а також якість вихідного продукту.

Метою керування суслотоварильним котлом у загальному випадку є забезпечення точного програмно-логічного відпрацювання заданого температурного часового графіка затирання, стабілізації процесу кип'ятіння та

забезпечення мікробіологічної безпеки при охолодженні сусла, з метою отримання продукту заданої якості за мінімальних енерговитрат та забезпечення безаварійної роботи обладнання.

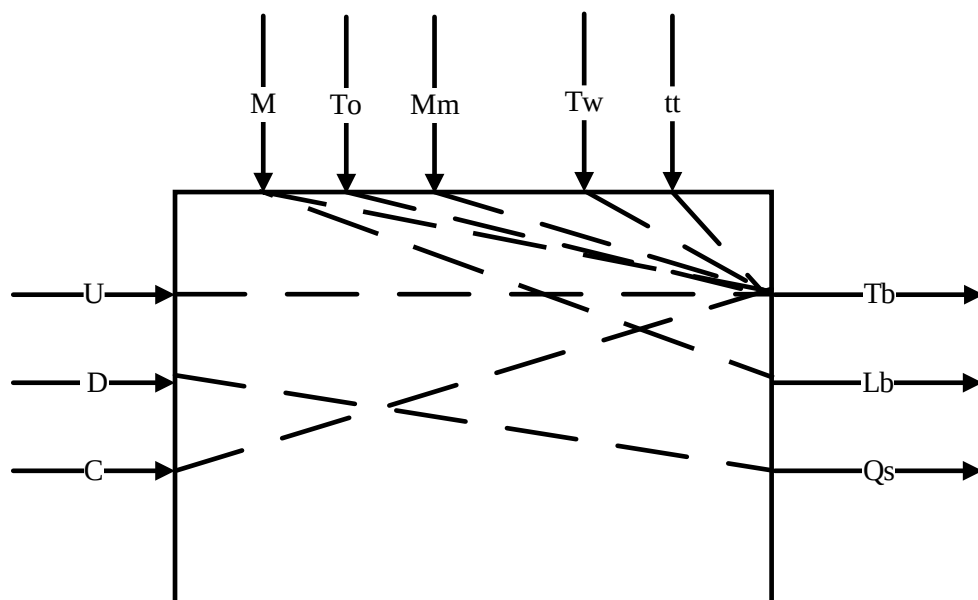


Рис. 1.3. Параметрична схема автоматизації

Параметрами схеми (рис. 1.3) є такі величини:

- Можливі керуючі дії: напруга на нагрівач U , стан мішалки D та ступінь відкриття клапану C ;
- Можливі керуючі змінні: температура сусла Tb , рівень сировини в баку Lb та швидкість обертання мішалки Qs ;
- Можливі контрольовані збурення: маса води та сировини M , температура зовнішнього середовища To та різноманітність солоду Mm ;
- Можливі неконтрольовані збурення: температура води Tw та час процесу tt .

1.3. Розробка функціональної схеми автоматизації. За результатами аналізу об'єкту керування та за технологічним процесом, потрібно забезпечити контроль рівня сусла в баку, а також його температуру. Для цього складається функціональна схема автоматизації, яка показує спрощену будову об'єкта керування. При побудові функціональних схем автоматизації використовуються

умовні позначення за ДСТУ БА.2.4-16:2008 «Автоматизація технологічних процесів. Умовні графічні зображення приладів і засобів автоматизації». Функціональна схема автоматизації наведена в додатку А. Система керування працює таким чином: Датчики рівня 1 і 3 вимірюють верхній та нижній рівень бака відповідно, забезпечуючи захист від сухого ходу, а також від недогріву. Датчик температури в баку 2 вимірює температуру, яка використовується в розрахунках в регуляторі температури. При температурі нижче заданого вмикається нагрівач 5, при високій температурі – відкривається регулюючий клапан 4. Під час роботи системи мішалка 6 працює в постійному русі, забезпечуючи рівномірний розподіл температури в баку.

РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1. Розробка математичної моделі об'єкта автоматизації. Метою цього розділу є розробка математичної моделі об'єкта керування з урахуванням впливу керуючого параметра, а також створення на основі рівняння динаміки зміни цього параметра імітаційної моделі об'єкта керування та її дослідження. Аналіз моделі дає можливість визначити сталу часу об'єкта та знайти передатний коефіцієнт об'єкта.

Кожна система керується законом збереження маси, тепла і енергії: те, що входить у систему, має обов'язково вийти із системи в одному або іншому вигляді.

На рисунку 2.1. зображена схема передачі тепла у котлі. Охолодження Q_o , яке поступає з водою, потрапляє у охолоджувач Q_c , де обмінюється теплом Q_t з теплом у баку Q_b та повертається до місця зберігання холодної води Q_a . Нагрів баку реалізовується подачею теплоти від джерела нагріву Q_h . Пиво має унікальний ефект – бродіння, що виділяється через дію хімічних речовин, яке створює додаткову теплоту Q_d . Простими словами – пиво може гріти само себе. Об'єкт має ефект збурення, а саме обмін з навколишнім середовищем, через що деяке тепло втрачається в навколишній простір Q_z .

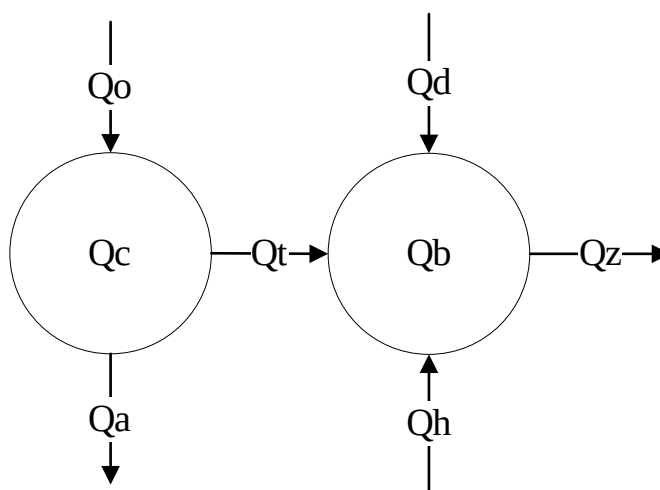


Рис. 2.1. Схема теплових потоків в об'єкті керування

Спираючись на структурну схему, рівняння балансу тепла буде записана наступною формулою:

$$Qd + Qh - Qt - Qz = 0 \quad (2.1)$$

Враховуючи, що нагрів працює прямо протилежно охолодженню, то рівняння (2.1) скорочується до вигляду:

$$Qd + Qn - Qz = 0, \quad (2.2)$$

де Qn – тепло, що отримується від нагрівання або віддається до охолоджувача.

Прирівнюємо рівняння (2.2) до рівняння зміни температури у часі:

$$m_b \frac{dT}{dt} = Qd + Qn - Qz, \quad (2.3)$$

де m_b – теплова ємність пива, а T – виміряна температура пива. Теплоємність пива визначається за формулою:

$$m_b = V_b \rho_b c_b, \quad (2.4)$$

де V_b – об'єм пива в баку, ρ_b – густина пива, c_b – питома теплоємність пива.

Теплообмін визначається за формулою:

$$Qz = KF_a(T - T_z), \quad (2.5)$$

де K – коефіцієнт теплопередачі, F_a – об'єм баку, T_z – температура навколишнього середовища. Коефіцієнт теплопередачі знаходиться за формулою:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{a_{am}} + \frac{\delta_m}{\lambda_m} + \frac{1}{a_{mb}}}, \quad (2.6)$$

де a_{am} та a_{mb} – коефіцієнти тепловіддачі відповідно від повітря до типу металу баку та від металу до пива, δ_m – товщина сталі, λ_m – коефіцієнт теплопровідності металу.

Теплота бродіння Qd визначається за формулою:

$$Q_d(\tau) = Q_m e^{-\frac{(\tau - \tau_0)^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.7)$$

де Q_m – максимальна теплота бродіння, τ_0 – час активного бродіння, σ – тривалість активного бродіння. Ці параметри не є постійними і залежать від сорту пива, який виготовляється.

Підставивши рівняння (2.4), (2.5) і (2.7) у формулу (2.3), отримуємо:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{Q_m e^{-\frac{(\tau-\tau_0)^2}{2\sigma^2}} + Q_n - KF_a(T-T_z)}{V_b \rho_b c_b} \quad (2.8)$$

2.2. Визначення передатної функції математичної моделі. Нехай ми будемо варити 100 літрів світлого елю в баку, який виготовлений із нержавіючої сталі товщиною 2 мм та має об'ємність 2 м³. Коефіцієнт тепловіддачі від повітря до нержавійки a_{at} зазвичай складає $24 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$, а від нержавійки до пива при активній мішалці складає $1000 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$. Коефіцієнт теплопровідності нержавійки складає $15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\text{К}}$. Тоді, рівняння (2.6) буде розраховано наступним чином:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{24} + \frac{0.002}{15} + \frac{1}{1000}} = \frac{1}{0.042 + 1.33 \cdot 10^{-4} + 10^{-3}} = \frac{1}{0.0431} = 23.364 = 23$$

Щільність світлого елю (концентрація цукрів) становить 12%. Густина сусла пива при температурі бродіння 20°C становить приблизно 1050 кг/м³. Питома теплоємність розраховується за формулою:

$$c_b = c_w * (1 - 0.006 * E), \quad (2.9)$$

де c_w – питома теплоємність чистої рідини, тобто води. Вона дорівнює $4.187 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$. E – щільність рідини. Тоді формула (2.9) приймає такий вигляд:

$$c_b = 4.187 * (1 - 0.006 * 12) = 3.885 \text{ кДж}$$

Отже, підставивши у формулу (2.4), отримаємо:

$$m_b = 0.1 * 1050 * 3885 = 407925 \frac{\text{Дж}}{^\circ\text{C}}$$

Температура навколишнього середовища та бродіння є збурюючими ефектами, тому для математичної моделі ми їх не враховуємо.

Для побудови математичної моделі керування температурою пива скористаємося програмним середовищем MATLAB та програмним пакетом Simulink (рис. 2.2):

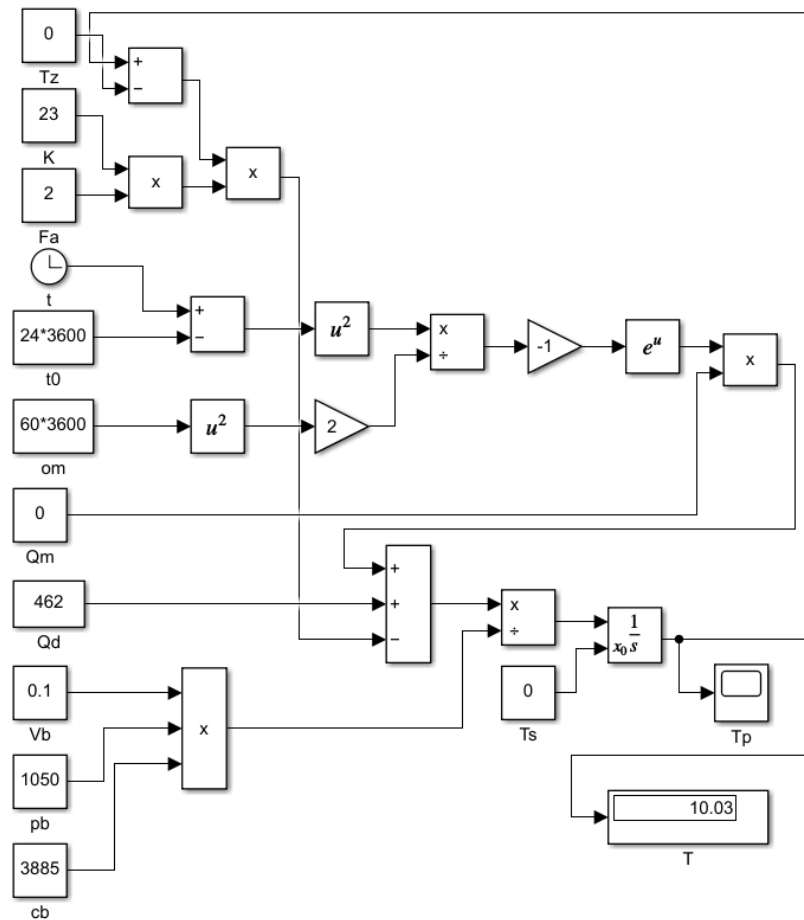


Рис. 2.2. Блок-схема моделі системи автоматичного керування

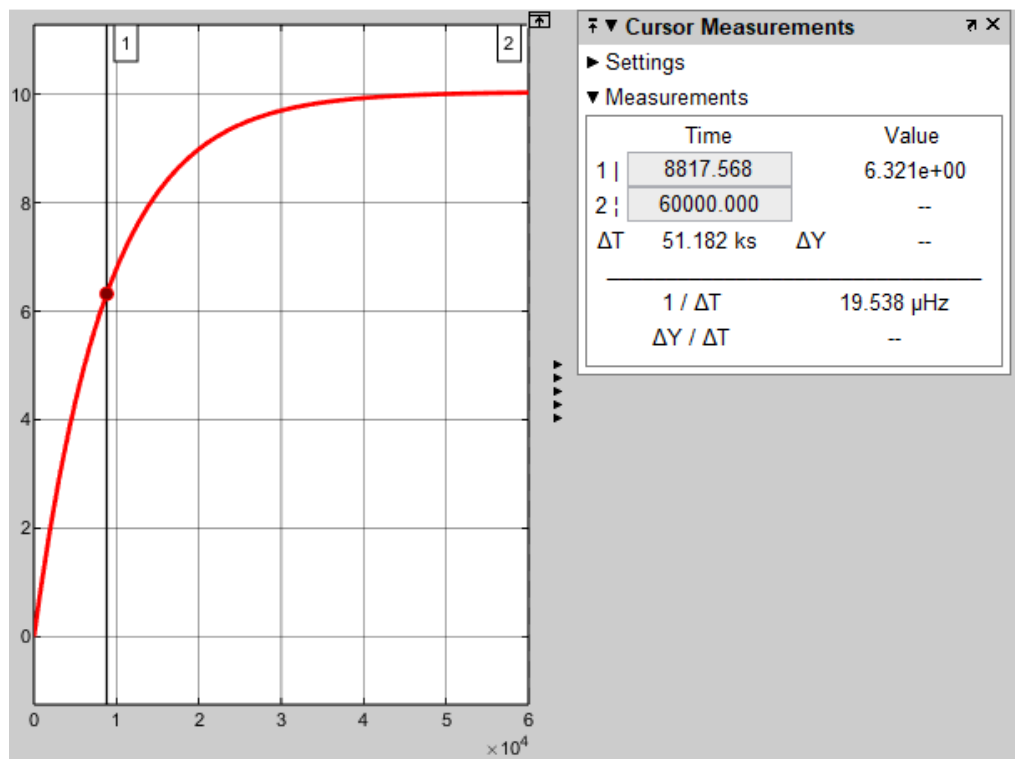


Рис. 2.3. Перехідна характеристика температури пива в баку

Був проведений експеримент нагріву температури пива з 0 до 10°C (рис. 2.3) при кількості теплоти 462 Дж. Як видно, об'єкт є статичним. Для визначення передатної функції потрібно скористуватися формулою:

$$W_o(s) = \frac{k_o * e^{-\tau_o s}}{T_o s + 1}, \quad (2.10)$$

де s – оператор Лапласа.

Об'єкт має нульовий час запізнення, що означає, що нагрівач буде вмикатися миттєво. Постійна часу знаходиться за перехідною характеристикою, де величина досягає відмітки у 63.2% від сталого значення. За графіком на рисунку 2.3, ця відмітка досягається при сталій часу 8818 секунд. Коефіцієнт передачі об'єкта визначається відношенням сталого значення температури до кількості теплоти, затраченого на зміну температури:

$$k_o = \frac{10}{462} = 0.0217$$

Отже, передатна функція математичної моделі (2.10) набуває такого вигляду:

$$W_o(s) = \frac{0.0217}{8818s + 1}$$

РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

3.1. Вибір технічних засобів. Під час вибору комплексу технічних засобів необхідно врахувати умови навколишнього середовища, а також габарити й особливості об'єкта керування. Крім цього, засоби автоматизації повинні відповідати вимогам щодо точності, чутливості, інертності та безпеки праці.

Будь-яка система автоматичного регулювання складається з регулятора та об'єкта керування. До складу регулятора входять первинний перетворювач, порівнюючий елемент, підсилювач, виконавчий механізм та регулювальний орган. Оскільки об'єкти керування можуть суттєво відрізнятися за своїми характеристиками, промислові регулятори зазвичай не комплектуються виконавчими механізмами, регулювальними органами та первинними перетворювачами, тому під час проектування системи автоматизації ці елементи підбираються окремо. Для розуміння, які прилади потрібно вибрати, скористуємося функціональною схемою автоматизації із першого розділу та побудуємо її у вигляді структурної схеми (рис. 3.1).

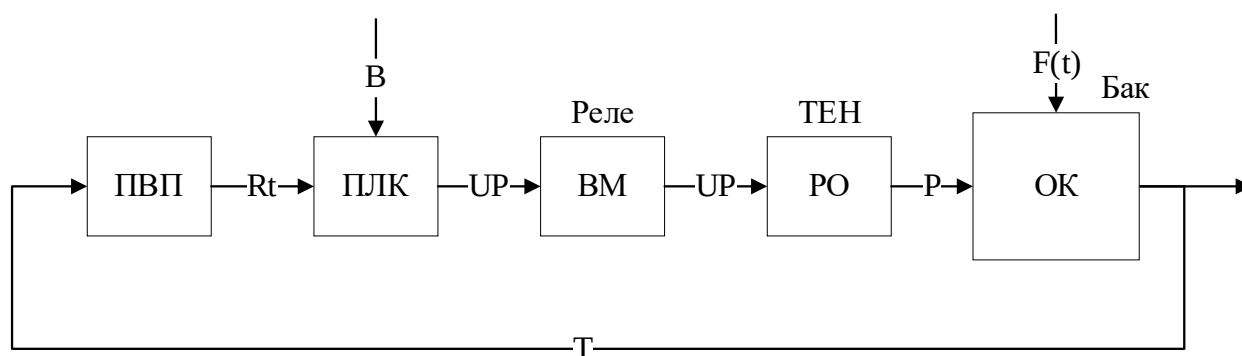


Рис. 3.1. Структурна функціональна схема системи автоматичного керування температури пива в баку

Сприймаючий елемент, який буде вимірювати температуру, потрібно підібрати таким, щоби він забезпечував потрібний діапазон вимірювання, а також мав мінімальну статичну похибку. Враховуючи, що пиво зброджується, то потрібно забезпечити надвисоку точність сприймаючого елементу.

Важливим моментом у пивоварінні є забезпечення відсутності статичної похибки та перерегулювання. Солод, що використовуються у виготовленні пива, містить ферменти, які активуються при різних значеннях температури. Якщо дійсна температура буде відрізнятися від заданої хоча-би на $2 \dots 3^{\circ}\text{C}$, то відбудеться невчасна активація ферментів, що зіпсує продукцію.

Окрім високої точності, датчик має бути водонепроникним. Вимірювання будуть відбуватися в межах $0 - 110^{\circ}\text{C}$. Оптимальним рішенням для вимірювання температури пива буде терморезистор РТ100-3010 (рис. 3.2), який має діапазон вимірювання $-50 \dots 200^{\circ}\text{C}$, а також точність вимірювання $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$.



Рис. 3.2. Терморезистор РТ100-3010 платиновий водонепроникний

Датчики рівня вибираються двопровідні та без рухомих частин, оскільки цукор із сусла може зацукрувати їх, через що вони стануть менш рухомими. Для цього обираються кондуктометричні датчики рівня, які працюють на принципі двох стрижнів: коли між ними з'являється рідина, то між ними проходить струм і вони замикаються. Оптимальним рішенням для визначення високого та низького рівня рідини в баку будуть трьохелектродні датчики ДС.П.3 від ОВЕН (рис. 3.3). Вони дозволяють витримувати температуру середовища до 240°C .



Рис. 3.3. Трьохелектродний кондуктометричний датчик ДС.П.3

Замість того, щоби ставити понад дорогі підсилювачі або трансформатори, у якості виконавчого механізму вибирається твердотільне реле, який буде замикати шлях між мережею та регулюючим органом. Найкращим вибором у якості регулюючого органа для системи пивоваріння є вибір трубчастого електричного нагрівача (ТЕН), оскільки він дуже легко монтується, а також може миттєво вмикатися та вимикатися.

Для вибору реле та виконавчого механізму потрібно розрахувати максимальну потужність, яка буде подаватися на регулюючий орган. Максимальна потужність визначається за формулою:

$$P_m = \frac{V_b c_b T_m}{\eta}, \quad (3.1)$$

де T_m – максимальна можлива зміна температури за секунду, η – коефіцієнт корисної дії, який для ТЕН дорівнює 0.95. Максимально можливе збільшення температури спостерігається під час меш-ауту, де за 1 хвилину сусло має нагрітися на 1°C. Тобто:

$$T_m = \frac{1}{60} = 0.0167^\circ\text{C}$$

Підставивши у формулу (3.1), отримуємо:

$$P_m = \frac{100 * 3885 * 0.0167}{0.95} = 6816 \text{ Вт}$$

Додатково потрібно врахувати перевантаження в 15% у випадок падіння напруги:

$$P_m * 115\% = 7839 \text{ Вт}$$

Отже, регулюючий орган потрібно вибрати потужністю 8000 Вт (рис. 3.4).



Рис. 3.4. Трубчастий електричний нагрівач потужністю 8 кВт

Розрахуємо струм для твердотільного реле:

$$I = \frac{P_m}{\sqrt{3} * U * \cos \varphi}, \quad (3.2)$$

де $\sqrt{3}$ – константа трифазної системи, U – лінійна напруга живлення, станом на 2026 рік яка дорівнює 400 В, $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності. Оскільки ТЕН – це активний опір, то у нього немає індуктивної складової, тому $\cos \varphi = 1$. Підставивши значення у формулу (3.2), розраховуємо:

$$I = \frac{8000}{\sqrt{3} * 400 * 1} = 11.31 \text{ A}$$

Для забезпечення граничного струму для твердотільного реле рекомендується обирати його з номінальним струмом в 2 рази більше за максимальну. Оптимальним рішенням у якості виконавчого механізму за такими параметрами буде вибір твердотільного реле SSR-40 DA (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Твердотільне реле SSR-40 DA

Таблиця 3.1. Характеристики твердотільного реле SSR-40 DA

Номінальний робочий струм	40 А
Комутована напруга	90-380 В АС
Падіння напруги	1.6 В / 25°C
Керуюча напруга	3-32 В DC
Керуючий струм для DC5	15 мА
Струм витоку в вимкненому стані	≤ 2 мА
Час вмикання / вимикання	≤ 10 мс
Електрична міцність ізоляції	2500 В АС
Опір ізоляції (при 500 В DC)	1000 МОм
Температура навколишнього повітря	-30°C ... + 75°C

У якості мішалки обирається лопатева мішалка із нержавіючої сталі малої ємності у зборі з мотор-редуктором на 70 об/хв потужністю 1.5 кВт та струмом 2.1 А.

У якості виконавчого механізму, а також регулюючого органа для охолодження вибирається регулюючий клапан, який визначається за пропускною здатністю за формулою:

$$K_v = Q * \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P}}, \quad (3.4)$$

де Q – потрібна витрата води для охолодження, ρ – густина рідини, ΔP – перепад тиску. Витрата води визначається за формулою:

$$Q = \frac{F}{c_w * \Delta T_c} * 3.6, \quad (3.5)$$

де c_w – теплоємність води ($4187 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$), ΔT_c – різниця температури холодної води на вході в теплообмінник та на виході з неї. F – теплова потужність охолодження, яка визначається за формулою:

$$F = \frac{m_b * \Delta T_b}{\tau_c}, \quad (3.6)$$

де ΔT_b – різниця температури сусла до охолодження та після, τ_c – час охолодження. Після додавання дріжджів потрібно охолодити пиво як можна швидше. Занадто малий час не рекомендується ставити, оскільки тоді ми не зможемо регулювати ферментацію сусла. На цьому етапі температура має знизитися з 100°C до 17°C. Час зазвичай встановлюється в 30 хвилин. Отже, підставивши значення у формулу (3.6), отримаємо:

$$F = \frac{407925 * (100 - 17)}{30 * 60} = 18810 \text{ Вт}$$

У теплообміннику при температурі сусла 100°C холодна вода за час перебування в ній може нагрітися з 2°C до 15°C. Підставляємо знайдені значення у формулу (3.5):

$$Q = \frac{18810}{4187 * (15 - 2)} * 3.6 = 1.244 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$$

За стандартом густина рідини приймається за одиницю, а перепад тиску в 0.4 бар. Підставляємо визначені значення у формулу (3.4):

$$K_v = 1.244 * \sqrt{\frac{1}{0.4}} = 1.967 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$$

Клапани мають такі номінали пропускної здатності:

$$0.63, 1.0, 1.6, 2.5, 4.0, 6.3, \dots$$

Найближчим більшим значенням буде пропускна здатність 2.5. У якості клапана вибираємо регулюючий клапан Belimo H615R (рис. 3.8).



Рис. 3.8. Клапан регулюючий двоходовий Belimo H615R

Таблиця 3.4. Характеристики клапана Belimo H615R

Тип приєднання	DN15
Матеріал корпусу	Чавун
Пропускна здатність	4 м ³ /год
Максимальна температура	120°C
Робочий тиск	6 бар

3.2. Визначення передатної функції системи автоматичного керування. Для датчиків типу PT100 номінальний опір дорівнює 100 Ом. Температурний коефіцієнт опору платинових датчиків дорівнює $3.9 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Стала часу не враховується, бо це сприймаючий елемент, і виміряна температура не буде відставати від дійсної в реальних умовах. Отже, передатна функція сприймаючого елементу буде розрахована наступним чином:

$$W_{CE}(s) = 3.9 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 0.39$$

Коефіцієнт передачі нагрівача дорівнює його потужності. Знаходимо постійну часу виконавчого механізму:

$$t_{\text{BM}} = \frac{m_b C_b}{P_m} = \frac{100 \cdot 3885}{8000} = 48.56, \quad (3.3)$$

Отже, передатна функція для ТЕН буде:

$$W_{\text{BM}}(s) = \frac{8000}{48.56s + 1}$$

Передатна функція розімкнутої системи складається із всіх визначених вище передатних функцій, а також із часу передачі температури від нагрівача до датчика, який складає 8 секунд:

$$W_{\text{роз}}(s) = W_{\text{CE}}(s) * W_{\text{BM}}(s) * W_{\text{MM}}(s) * e^{-\tau s} = 0.39 * \frac{8000}{48.56s + 1} * \frac{0.0217}{8818s + 1} * e^{-8s}$$

$$e^{-8s} = \frac{0.42 \cdot 8000 \cdot 0.0217 \cdot e^{-8s}}{48.56s \cdot 8818s + 48.56s + 8818s + 1} = \frac{72.912 \cdot e^{-8s}}{428202s^2 + 8867s + 1} \quad (3.4)$$

Визначаємо передатну функцію замкненої системи:

$$W_{\text{зам}}(s) = \frac{W_{\text{роз}}(s)}{1 + W_{\text{роз}}(s)} = \frac{72.912 \cdot e^{-8s}}{428202s^2 + 8867s + 1 + 72.912 \cdot e^{-8s}} \quad (3.5)$$

Будуємо математичну модель розімкнутої системи в програмному середовищі MATLAB Simulink:

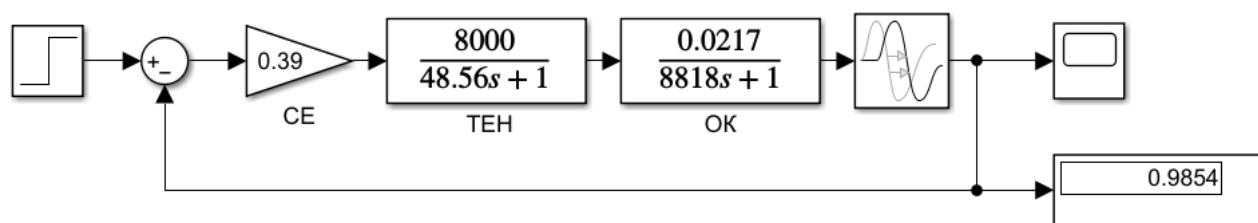


Рис. 3.9. Математична модель розімкнутої системи керування

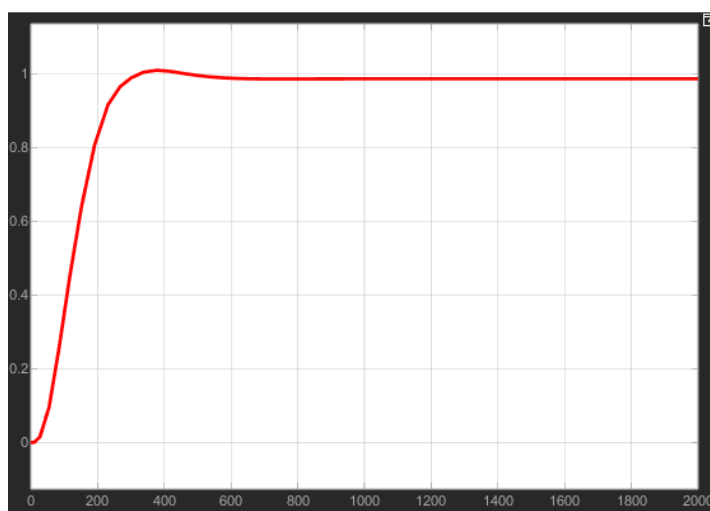


Рис. 3.10. Перехідна характеристика некерованої системи

Показники якості некерованого перехідного процесу (рис. 3.10):

- Статична похибка $\delta = \frac{y_{\text{зад}} - y_{\text{уст}}}{y_{\text{зад}}} * 100\% = \frac{1 - 0.9854}{1} * 100 = 1.46\%$;
- Час регулювання $t_p = 600$ с;
- Перерегулювання $\sigma = \frac{y_{\text{max}} - y_{\text{уст}}}{y_{\text{max}}} * 100\% = \frac{1.01 - 0.9854}{0.9854} * 100 = 2.49\%$;
- Коливальність $n = 1$.

Як було сказано вище, ферменти дуже чутливі до зміни температури, тому навіть невеликі відхилення від норми спричиняють значні наслідки, через що ці показники якості системи не задовольняють технічному завданню.

Аналізуємо систему на стійкість:

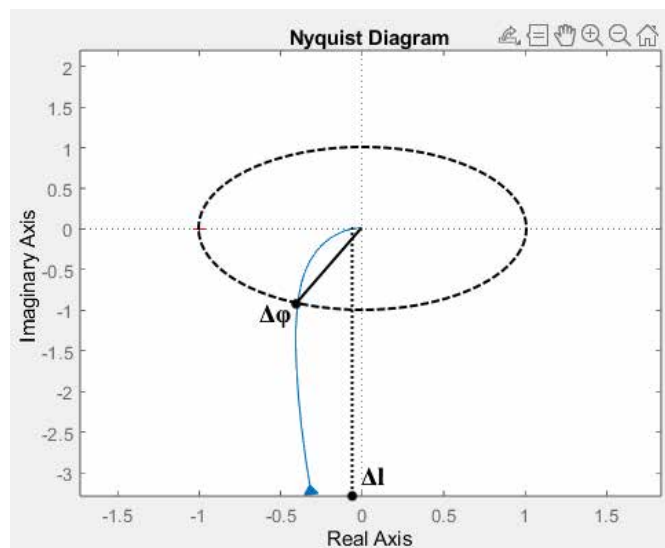


Рис. 3.11. Графік АФЧХ за критерієм Найквіста

Графік на рисунку 3.7 не охоплює точку з координатами $(-1; -j0)$, отже система стійка. Визначаємо запаси стійкості:

- Запас стійкості за фазою $\Delta\varphi = 49^\circ$;
- Запас стійкості за амплітудою $\Delta l = 20 \lg \frac{1}{0.0543} = 25$ дБ.

3.3. Вибір алгоритму керування об'єктом. Динамічні властивості об'єктів керування дають змогу визначити на стадії проектування алгоритм

управління. Для визначення алгоритму управління потрібно обрати один із трьох законів регулювання:

- Позиційний закон працює дискретно – якщо параметр нижче норми, то механізм вмикається, в іншому випадку – вимикається;
- Лінійний закон працює лише з аналоговими сигналами – виконавчий механізм отримує струм керування, який протилежно-пропорційний вихідному параметру в межах можливого діапазону;
- Імпульсний закон може працювати як дискретно, так і аналогово – керування відбувається за допомогою ШІМ, який подає імпульси тривалістю, які протилежно-пропорційні вихідному параметру в межах можливого діапазону.

Оскільки задачею є підтримка високої точності, а ТЕН працює дискретно, то доцільно застосувати імпульсний закон регулювання.

Методика вибору найкращого алгоритму керування полягає у визначенні динамічного коефіцієнта регулювання. Для статичних об'єктів:

$$R_D = \frac{y_1}{K_o y_{max}} \quad (3.6)$$

де y_1 – максимально динамічне відхилення. В умовах пивоваріння вибираються такі об'єкти, при яких цей параметр мінімізується. Для нашого випадку виставимо значення в 1°C . y_{max} – максимально можливе значення збурення по навантаженням. Враховуючи вплив бродіння та зовнішнього середовища, можна сказати, що це значення буде приблизно дорівнювати 20% від коефіцієнта передачі виконавчого механізму:

$$y_{max} = K_{BM} * y_C = 8000 * 20\% = 1600 \text{ Вт} \quad (3.7)$$

Підставивши знайдені значення у формулу (3.6), отримаємо:

$$R_D = \frac{1}{0.0217 * 1600} = 0.029$$

Як бачимо, параметри є мінімальними, що не сильно впливає на вибір регулятора за графіком, тому визначимо регулятор розрахунково. Розрахуємо заданий час регулювання за формулою:

$$t = \psi \tau \quad (3.8)$$

де ψ – відносний час регулювання, який визначається за часом регулювання, об'єктом та алгоритмом керування. Для статичного П-регулятора з аперіодичним перехідним процесом час складає 4.5 с. Отже, підставивши у формулу (3.8) отримуємо:

$$t = 4.5 * 8 = 36 \text{ с}$$

Прирівняємо до постійної часу об'єкта:

$$t = 36 < 8818 = T_o$$

Отже, постійна часу забезпечує час регулювання. Для П-регулятора розрахуємо статичну похибку:

$$\Delta = K_o * y_{max} * y_c = 0.0217 * 1600 * 20\% = 6.944\% \quad (3.9)$$

Прирівнюємо отримане значення з числом 0.3:

$$\Delta = 6.944 > 0.3$$

Отже, П-регулятор не задовольняє технологічним вимогам. Розглянемо наступний, ПІ-регулятор. Для ПІ-регулятора відносний час регулювання складає Розраховуємо заданий час регулювання ПІ-регулятора за формулою (3.8):

$$t = 8 * 8 = 64 \text{ с}$$

Прирівняємо до постійної часу об'єкта:

$$t = 64 < 8818 = T_o$$

Постійна часу забезпечує час регулювання. Статична похибка у ПІ-регулятора відсутня, тому, як алгоритм керування, вибираємо саме його.

3.4. Реалізація алгоритму керування об'єктом. У якості регулятора, який буде керувати виміряними величинами, а також подавати напругу до виконавчих механізмів, було обрано програмований логічний контролер ПЛК-160-24В компанії AQtack (рис. 3.12). Цей пристрій має 16 дискретних та 8 аналогових входів, а також 12 дискретних та 4 аналогових виходи. Він має легке програмування, а також зв'язок через порти USB, Ethernet та RS-232. Присутнє як дистанційне зчитування інформації з контролера через Ethernet або GPRS, так і провідне через борти RS-232 та RS-485.

Робота ПЛК має забезпечуватися кодом, який буде регулювати технологічний процес. Міжнародним стандартом для програмування ПЛК є стандарт IEC 61131-3, який передбачає програмування на одному із 5 мов програмування: LD (Ladder Diagram), FBD (Function Block Diagram), SFC (Sequential Function Chart), ST (Structured Text) та IL (Instruction List). Для ПЛК типу ОВЕН програмування відбувається в програмному середовищі CoDeSys v2. Для зручності програмування обрано мову програмування ST. Код для ПЛК наведений у додатку Б.



Рис. 3.12. Програмований логічний контролер ПЛК-160-24В

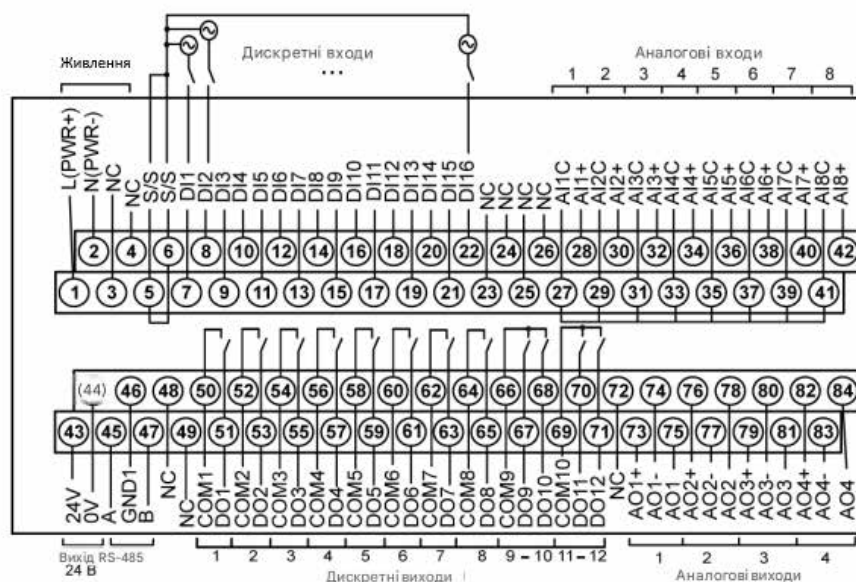


Рис. 3.13. Схема підключень ПЛК-160-24В

Для визначення ПІ-регулятора потрібно розрахувати коефіцієнт пропорційності та час інтегрування. Найпопулярнішим методом розрахунку є компенсаційний метод, за якою при ПІ-регуляторі найбільша із постійних часу або часу запізнення компенсується, а всі інші сумуються. Найбільшою постійною часу в системі замкнутого контуру пивоваріння є постійна об'єкта керування, яка складає 8818 секунд. Тоді сума некомпенсованих постійних буде дорівнювати $48.56+8=56.56$ секунд. Параметри процесу розраховуються за такими формулами:

$$K_p = \frac{T_b}{K*2*T_s} = \frac{8818}{72.912*2*56.56} = \frac{8818}{8248} = 1.0691 \quad (3.10)$$

$$T_i = \frac{1}{K*2*T_s} = \frac{1}{8248} = 1.212 * 10^{-4} \quad (3.11)$$

При розробці системи керування потрібно врахувати імпульсну дію регулятора. Кожен регулятор з процесором має час квантування, через яке відбудеться опитування вхідних сигналів. Для ПЛК160 час квантування складає 1 мс. Тоді інтегральна складова буде розрахована за такою формулою:

$$T_{iz} = \frac{T_i T_z}{2} = \frac{1.212*10^{-4}*0.1}{2} = 6.06 * 10^{-6} \quad (3.12)$$

Отже, передатна функція ПІ-регулятора буде виглядати так:

$$W_{\text{рег}}(s) = 1.0691 + \frac{6.06*10^{-6}(z+1)}{z-1} \quad (3.13)$$

Підставляємо параметри ПІ-регулятора в математичну модель розімкненої системи (рис. 3.14):

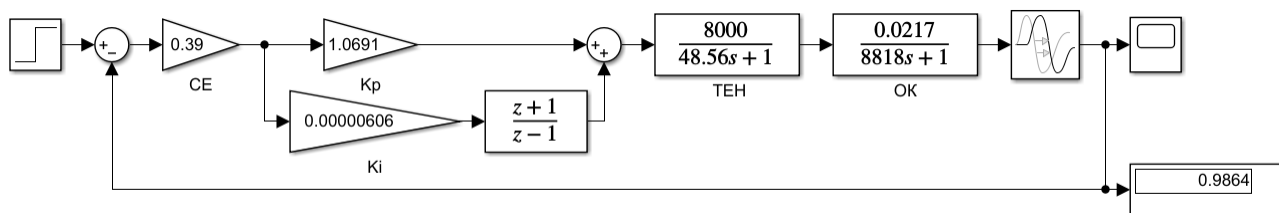


Рис. 3.14. Математична модель розімкненої системи з ПІ-регулятором

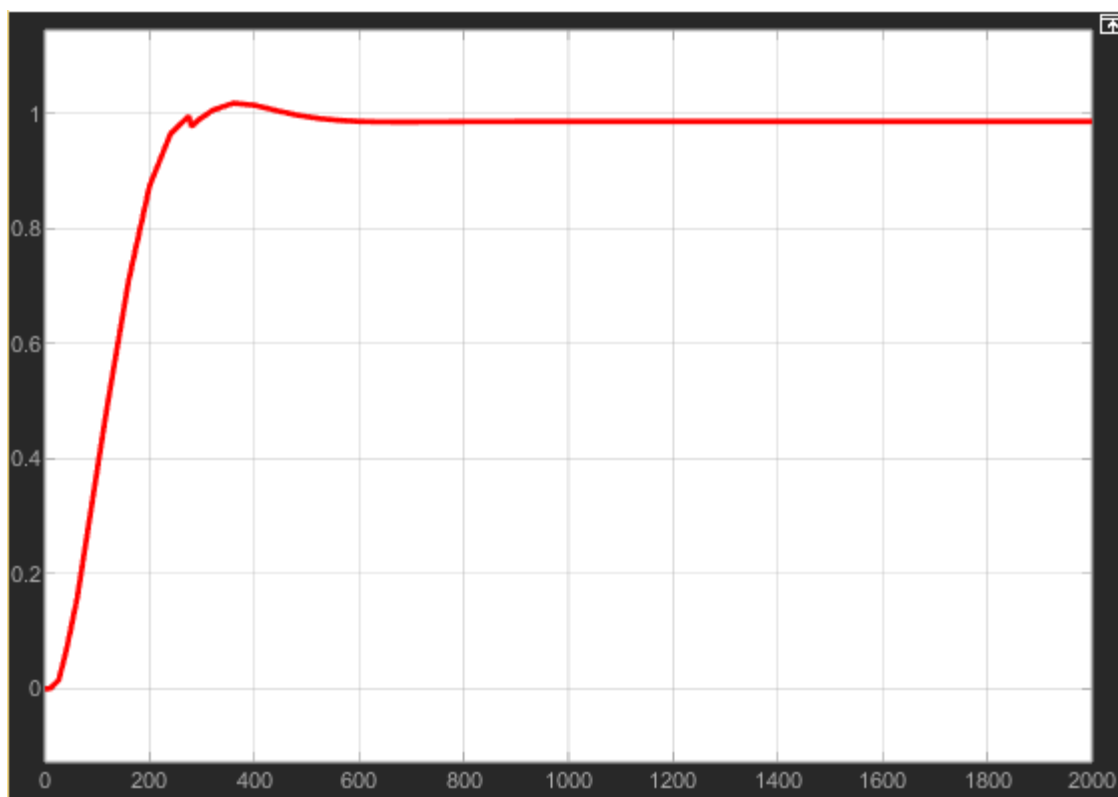


Рис. 3.15. Перехідний процес математичної моделі з ПІ-регулятором

Показники якості перехідного процесу з ПІ-регулятором (рис. 3.15):

- Статична похибка $\delta = \frac{y_{\text{зад}} - y_{\text{уст}}}{y_{\text{зад}}} * 100\% = \frac{1-1}{1} * 100 = 0\%$;
- Час регулювання $t_p = 600$ с;
- Перерегулювання $\sigma = \frac{y_{\text{max}} - y_{\text{уст}}}{y_{\text{max}}} * 100\% = \frac{1.01-1}{1} * 100 = 1\%$;
- Коливальність $n = 0$.

Отже, з використанням ПІ-регулятора досягнуто того, що статична похибка та перерегулювання ніяк не впливають на процес, що підходить для нашої системи керування.

3.5. Розробка інтерфейсу користувача. Для аналізу інформації про температуру сусли потрібно створити інтерфейс, який буде відображати поточне значення температури. ПЛК160 має вихід через інтерфейс RS-485, який дозволяє обмінюватися даними між комп'ютером та ПЛК. Для зручності та можливості дистанційного аналізу був створений бот в безкоштовному чат-месенджері

Telegram, який дозволяє вивести поточне значення температури, звернувшись до нього. Для його роботи потрібно здійснення трьох умов:

- Комп'ютер має бути під'єднаний до мережі Інтернет;
- Комп'ютер має мати змогу оброблювати інформацію;
- ПЛК має передавати інформацію через RS-485.

Програма інтерфейсу відображена у вигляді коду, написаного на мові програмування Python, який наведений в додатку В.



Рис. 3.16. Виконання програми бота

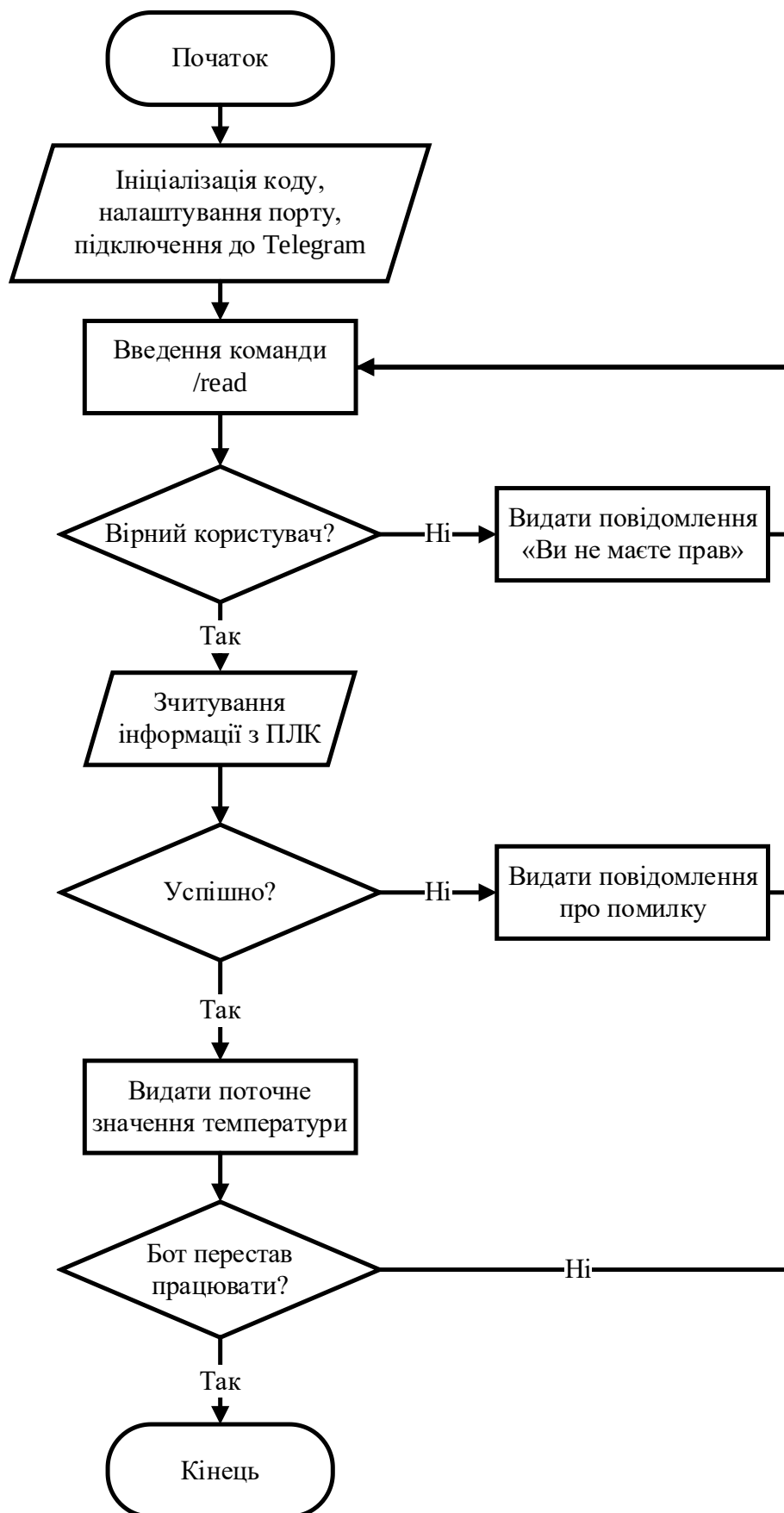


Рис. 3.17. Блок-схема алгоритму моніторингу температури сусли в реальному часі

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СХЕМ СИСТЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ

4.1. Розробка електричної принципової схеми. Під час виконання дипломного проекту була створена електрична принципова схема, де визначено повний склад електричних елементів та їх зв'язків.

Електрична принципова схема керування температурою в баку наведена в додатку Г.

Автоматичний вимикач QF1 та запобіжник FU1 призначений для захисту електричної схеми від струмів короткого замикання. Автоматичні вимикачі QF2 та QF3 здійснюють захист двигуна М1 та електронагрівача ЕК1 від короткого замикання та перевантаження. Одна із фаз живлення подається на блок живлення GB1, яка з'єднана з нулем живлення. Блок живлення перетворює змінну напругу 400 В у постійну напругу 24 В. Лампа HL1 сповіщає про роботу живлення. Перемикач SA1.1 перемикає режими роботи схеми між автоматичним і ручним режимами роботи.

У ручному режимі вмикається лампа HL8, який сповіщає про ручний режим роботи. Цей режим роботи передбачає керування двигуном мішалки, нагрівачем та клапаном. Кожен механізм має кнопку увімкнення (SB3, SB5, SB7) та вимкнення (SB4, SB6, SB8). Натискання на кнопку увімкнення вмикає відповідне реле (KM1, KM2, KM3), який замикає схему між живленням та механізмом (М1, ЕК1, YA1), а також вмикає відповідну лампу (HL2, HL3, HL4). Схема працює до тих пір, поки не буде натиснуто кнопку вимкнення або реле якимось чином не розімкне схему.

При автоматичному режимі подається живлення на ПЛК А1, на порти живлення вихідних сигналів, на лампу HL7, який сповіщає про роботу ПЛК, на кнопки «Старт» SB1 і «Стоп» SB2, а також на датчики верхнього рівня SL1 та нижнього рівня SL2. ПЛК подає живлення на терморезистор ВК, отримує напругу від кнопок, датчиків рівня та терморезисторів, та виконує функцію, як у ручному режимі, а також подає сигнали на лампи HL5 та HL6, які сповіщають відповідно про високий та низький рівень сигналу.

4.2. Вибір апаратів захисту та керування. Автоматичні вимикачі, магнітні пускачі та запобіжники призначені для захисту електричних кіл від перепаду напруги та інших несправностей. Автоматичні вимикачі визначаються за максимальним струмом, який може податися на електричне коло, а також за кількістю фаз. Автоматичні вимикачі та запобіжники мають такі номінали струмів спрацювання:

1, 2, 3, 4, 6, 10, 16, 20, 25, 32, ... А

За вимогами до схеми побудовані таблиці, які показують споживання струму кожної схеми, а також модель вимикача, який підібраний до неї.

Таблиця 4.1. Вибір автоматичних вимикачів

Схема	Струм, А			Кількість фаз	Модель вимикача
	Робочий	Імпульс	Номінал		
Живлення	15	25	25	3	A9F75325
ТЕН	11.3	-	16	3	A9F73316
Двигун мішалки	2.1	13	4	3	A9F74304

Таблиця 4.2. Вибір запобіжників

Місцезнаходження	Номінал струму, А
Після блоку живлення	4
Перед ПЛК	1
Перед СОМ дискретних виходів ПЛК	2

Магнітний пускач ставиться перед двигуном та вибирається за умовами струму та напруги. Двигун споживає 2.1 А. Магнітний пускач FC10009400 забезпечує 9 А струму комутації та напругу котушки 380 В.



Рис. 4.1. Магнітний пускач FC10009400

4.3. Вибір проводів керуючої мережі. Проводи з декількома фазами йдуть в одній збірці для спрощеного з'єднання кіл. Для внутрішнього монтажу всередині щита використовуються мідні проводи. Їх вибір подібний до вибору автоматичних вимикачів – за допустимим струмом та за кількістю фаз, при цьому при розрахунках нульовий робочий провід чотирипровідної трифазної системи струму не враховується.

Тип кабелю вибирають в залежності від нагріву та механічної міцності. Для мідних кабелів напругою 380 В, площа поперечного перерізу при 16 А становить 1.5 мм², при 25 А – 2.5 мм², а при 30 А – 4.0 мм². За таблицею 4.1 вибираються такі кабелі:

- Для живлення – ВВГнГ - 5х4.0;
- Для ТЕН – ВВГнГ - 4х2.5;
- Для двигуна мішалки – ВВГнГ - 4х1.5;
- Для кола керування – ПуГВ - 1х1.5.

4.4. Розробка схеми з'єднань. На основі електричної принципової схеми створена схема з'єднань, яка показує, як дроти у схемі прямують від одних технічних засобів до інших.

Схема з'єднання системи керування температурою в баку наведена в додатку Д.

Ця схема складається із трьох частин – передня панель, задня панель, а також панель затискачів. На передній панелі виносяться засоби, які сигналізують роботу системи, кнопки керування, а також перемикач між автоматичним та ручним режимом роботи. На задній схемі знаходиться все, що не передбачено використовувати працюючому при нормальному режимі роботи. Схема з'єднань передбачає присутність збірок клемних затискачів, які забезпечують «чистий вид» щита керування – одна збірка призначена для з'єднання кабелів між фронтальною та задньою панеллю щита, інша призначена для з'єднання дротів між задньою панеллю щита та зовнішніми пристроями, які не включені в склад щита. Це забезпечить надійну роботу монтажникам та не буде спричиняти «перетирання» між кабелями.

4.5. Розробка схеми підключень. На основі електричної принципової схеми та схеми з'єднань створена схема підключень, яка показує, як дроти із зовнішнього клемного затискача з'єднуються із механізмами ззовні щита.

Схема підключень системи керування температурою в баку наведена в додатку Е.

4.6. Розробка щита керування. Враховуючи електричну принципову схему та технічні засоби, потрібно підібрати габарити для щита керування, щоби він забезпечував 60% габаритних розмірів технічних засобів. Враховуючи, що у схемі присутнє твердотільне реле, яке сильно гріється, то для нього потрібно спеціальне ізоляційне місце, а також вентилятор з щита керування. Експериментальним шляхом підібрані розміри щита в 650x400x200 мм.

Схема щита керування температурою в баку наведена в додатку Ж.

Згідно з ДСТУ EN 61439 передбачено умовний запис щитової продукції:

ШК-(650,400,200)-УХЛ4-ІР54-ДСТУ EN 61439

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

5.1. Визначення витрат та їх розрахунок. Для доцільності впровадження автоматизації у виробництво потрібно визначити чистий прибуток, який знаходиться різницею між експлуатаційними витратами та річним прибутком виробництва, а також термін окупності внесення автоматизації в систему, які є відношенням капітальних витрат до річного чистого прибутку. Капітальні витрати передбачають у себе одноразові витрати на покупку технічних засобів, на монтування, а також на перевезення. Експлуатаційні річні витрати показують, скільки було витрачено за 1 рік роботи системи.

Для визначення капітальних витрат спочатку визначаємо витрати на засоби автоматизації:

- Трифазний автоматичний вимикач – 1500 грн за 3 шт.;
- Твердотільне трифазне реле – 370 грн.;
- Магнітний пускач – 800 грн;
- Блок живлення 24 В – 615 грн;
- ПЛК-160-24В – 23 500 грн;
- Щит керування – 750 грн;
- ТЕН 8кВт – 1700 грн;
- Датчик рівня – 550 грн за 2 шт.;
- Лопатева мішалка з мотором-редуктором – 91 200 грн;
- Регулюючий клапан - 16 500 грн.;
- Інші засоби (лампи, кнопки, датчики, запобіжники) – 2000 грн.

Підсумувавши всі засоби, отримуємо:

$$K_3 = 1500 + 370 + 800 + 615 + 23500 + 750 + 1700 + 550 + 91200 + 16500 + 2000 = 139485 \text{ грн} \quad (5.1)$$

Витрати на перевезення складають 5% від суми технічних засобів:

$$K_{\text{мм}} = 0.05 * 139485 = 6974 \text{ грн} \quad (5.2)$$

Витрати на монтажні засоби, такі як проводи, позначення, рейки, затискачі, складають 10% від суми технічних засобів:

$$K_{мз} = 0.1 * 139485 = 13949 \text{ грн} \quad (5.3)$$

Витрати на монтування (збірка щита, написання коду) складають 20% від суми технічних засобів:

$$K_{м} = 0.2 * 139485 = 27897 \text{ грн} \quad (5.4)$$

Додаткові витрати складають 3% від суми технічних засобів:

$$K_{л} = 0.03 * 139485 = 4185 \text{ грн} \quad (5.5)$$

Підсумувавши капітальні витрати, отримуємо:

$$K = K_{з} + K_{мм} + K_{мз} + K_{м} + K_{л} = 139485 + 6974 + 13949 + 27897 + 4185 = 192489 \text{ грн} \quad (5.6)$$

Річні експлуатаційні витрати визначаються, як:

$$B = B_{а} + B_{р} + B_{з} + B_{у} + B_{н}, \quad (5.7)$$

де $B_{а}$ – амортизаційні відрахування, $B_{р}$ – відрахування на поточний ремонт, $B_{з}$ – відрахування на зарплату, $B_{у}$ – вартість електроенергії, а $B_{н}$ – вартість сировини. Амортизаційні відрахування складають 12% від суми капітальних витрат:

$$B_{а} = 0.12 * 192489 = 23099 \text{ грн} \quad (5.8)$$

Відрахування на поточний ремонт складають 4% від суми капітальних витрат:

$$B_{р} = 0.04 * 192489 = 7700 \text{ грн} \quad (5.9)$$

Відрахування на зарплату знаходяться за формулою:

$$B_{з} = n * S * 12, \quad (5.10)$$

де n – кількість працюючих, S – середня зарплата на 1 робітника. Система налаштована так, що для підтримки її роботи достатньо однієї людини. Середня зарплата в Україні станом на 2026 рік – 20000 грн/місяць. Враховуючи, що робота не на навантаження, то приблизна зарплата для такого робітника буде складати 15000 грн. Отже формула (5.10) буде розрахована таким чином:

$$B_{з} = 1 * 15000 * 12 = 180000 \text{ грн}$$

Відрахування на поточний ремонт розраховуються, як:

$$B_y = W * H_y * kWt, \quad (5.11)$$

де H_y – час роботи системи за рік, kWt – ціна 1 кВт за 1 годину використання, W – споживання електроенергії засобами автоматизації за 1 годину.

Система працює по 8 годин на добу, 250 днів на рік. Отже, час роботи системи буде становити:

$$H_y = 250 * 8 = 2000 \text{ год} \quad (5.12)$$

Ціна електроенергії станом на 2026 рік для бізнесу – 11.5 грн за 1 кВт/год. Споживання електроенергії визначається, як сума добутків споживання живлення технічних засобів та відношення використання пристрою до тривалості 1 циклу роботи:

$$W_i = w_i * U_i \quad (5.13)$$

ТЕН споживає 8 кВт/год та працює в середньому 45% часу від 1 циклу роботи. Розраховуємо споживання ТЕН:

$$W_T = 8.5 * 0.45 = 3.6 \text{ кВт/год}$$

Електродвигун мішалки споживає 1.5 кВт/год та працює 95% часу від 1 циклу роботи. Розраховуємо споживання двигуна:

$$W_D = 1.5 * 0.95 = 1.425 \text{ кВт/год}$$

Інші прилади споживають 0.1 кВт/год та працюють увесь час роботи. Розраховуємо їх споживання:

$$W_O = 0.1 * 1 = 0.1 \text{ кВт/год}$$

Підсумуємо розраховані значення:

$$W = 3.6 + 1.425 + 0.1 = 5.125 \text{ кВт/год}$$

Отже, витрати на електроенергію (5.11) становитимуть:

$$B_y = 5.125 * 2000 * 11.5 = 117875 \text{ грн}$$

Відрахування на сировину розраховуються, як:

$$B_y = T_s * Pr, \quad (5.14)$$

де T_s – кількість циклів роботи за 1 рік, Pr – відрахування на сировину за 1 цикл.

Один цикл займає 8 годин, отже кількість циклів за 1 рік становитимуть:

$$T_s = \frac{2000}{8} = 250 \text{ циклів}$$

Відрахування визначається сумою добутоків витрат сировини на 1 цикл роботи та ціною сировини. За 1 цикл виготовляється 100 літрів пива. Для одного циклу потрібно 140 літрів води, 20 кг солоду, 0.2 кг хмелю та 0.08 кг дріжджів. Станом на 2026 рік в Україні один літр води для промислового виробництва коштує 0.09 грн/літр, один кілограм солоду коштує 50 грн/кг, один кілограм хмелю коштує 2000 грн/кг, один кілограм дріжджів коштує 300 грн/кг. Тоді, відрахування на сировину за 1 цикл становитимуть:

$$Pr = 140 * 0.09 + 20 * 50 + 0.2 * 2000 + 0.08 * 300 = 1437 \text{ грн}$$

Примножуємо розраховані значення до формули (5.14):

$$B_y = 250 * 1437 = 359303 \text{ грн}$$

Підставляємо розраховані експлуатаційні витрати у формулу (5.7) та знаходимо загальні річні експлуатаційні витрати:

$$B = 23099 + 7700 + 180000 + 117875 + 359303 = 687977 \text{ грн}$$

5.2. Розрахунок чистого прибутку та терміну окупності. Розраховуємо річний прибуток при внесенні автоматизації у систему:

$$P_f = (P_b * L_w * T_y) * (1 - N_g), \quad (5.15)$$

де P_b – ціна пива за 1 літр, яка станом на 2026 рік на ринку складає 40 грн/літр, L_w – кількість літрів виготовленого пива за 1 цикл роботи, тобто 100 літрів за 1 варку, T_y – кількість циклів за рік, який складає 250 циклів N_g – податок від річного прибутку, який станом на 2026 рік складає 18%. Підставляємо знайдені значення у формулу (5.15):

$$P_f = (40 * 100 * 250) * (1 - 0.18) = 820000 \text{ грн}$$

Відраховуємо річні витрати та отримуємо чистий прибуток:

$$P = P_f - B = 820000 - 687977 = 132023 \text{ грн} \quad (5.16)$$

Розрахуємо приблизно суму витрат до автоматизації. У випадку неавтоматизованої роботи ми маємо 2 працюючих (один стежить за

температурою, інший керує самою температурою). Тоді, при зарплаті в 20000 грн відповідно, ми маємо:

$$B_{zo} = 2 * 20000 * 12 = 480000 \text{ грн}$$

Витрати на сировину без автоматизації складають 120% від витрат з автоматизацією:

$$B_{no} = B_n * 1.2 = 359303 * 1.2 = 431164 \text{ грн}$$

Річні експлуатаційні витрати без автоматизації:

$$B_o = B_{zo} + B_{no} = 480000 + 431164 = 911164 \text{ грн}$$

Ручне діяння містить 7% браку. Враховуючи однаковий темп виготовлення пива, маємо:

$$P_{fo} = P_f * (1 - 0.07) = 820000 * 0.93 = 762000 \text{ грн}$$

Відрахуємо річні витрати з автоматизацією та отримаємо річний прибуток без автоматизації:

$$P_o = P_{fo} - B_o = 762600 - 911164 = -148564 \text{ грн}$$

Те, що чистий прибуток приймає негативне значення вже свідчить про те, що система не є економічно вигідною і вигідніше буде зовсім не застосовувати таку систему. Отже, можна зробити висновок, що автоматизована система є ефективною.

Розраховуємо термін окупності при внесенні автоматизації в систему:

$$T = \frac{K}{P} = \frac{192489}{132023} = 1.46 \text{ рік} \rightarrow 17.5 \text{ місяць} \quad (5.17)$$

Отже, зважаючи на те, що ручне діяння виводить бізнес в мінус, річний чистий прибуток після внесення автоматизації буде складати 132023 грн, а термін окупності – 1.5 роки. Установка є економічно ефективною і використовувати її, як систему, доцільно.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз системи процесу пивоваріння. Встановлено, що основним параметром в технологічному процесі, який потрібно керувати, є температура сусла.

2. За результатами аналізу процесу розроблена функціональна схема автоматизації керування температурою пива в баку, а також визначено, що параметри, які ми маємо вводити до автоматизованого пристрою, досить сильно залежать від сорту пива, яке буде варитися. Ці параметри потрібно дізнаватися експериментальним шляхом або ж запозичувати рецепти у інших.

3. За вимогами до системи було обрано сприймаючий елемент – РТ100-3010 та виконавчий механізм – ТЕН 8кВт, який виконує функцію обігріву.

4. За технічними вимогами обрано імпульсний закон регулювання, за чим було обрано та розраховано цифровий ПІ закон керування. Ці закони забезпечують відсутність статичної похибки, а також відсутність перерегулювання.

5. Техніко-економічне обґрунтування впровадження автоматизації в систему показало, що обрана схема є значно ефективнішим за систему без автоматизації, а термін окупності технічних засобів становить близько 1.5 роки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технологія спирту : підручник для студентів вищих навчальних закладів / В. О. Маринченко та ін. ; за ред. В. О. Маринченка ; Національний університет харчових технологій. Київ : НУХТ, 2003. 495 с.
2. Самойчук К. О., Пупинін А. А., Феофанов М. О. Аналіз сировини для виробництва пива. URL: http://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/ophv_17/ (дата звернення: 17.05.2026)
3. Самойчук К. О., Пупинін А. А., Феофанов М. О. Основи технології пивоваріння. URL: http://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/ophv_18/ (дата звернення: 17.05.2026)
4. Самойчук К. О., Пупинін А. А., Феофанов М. О. Показники якості крафтового пива. URL: http://elib.tsatu.edu.ua/dep/mtf/ophv_19/ (дата звернення: 17.05.2026)
5. Пивоваріння. Терміни та визначення понять : ДСТУ 3139:2015 (На заміну ДСТУ 3139-95). Чинний від 2015-11-01. Київ : УкрНДНЦ, 2015. III, 27 с. (Національний стандарт України).
6. Домарецький В. А. Технологія солоду та пива : підручник для студентів вищих закладів освіти, які навчаються за спеціальністю «Технологія бродильних виробництв і виноробства». Київ : Урожай, 1999. 542 с.
7. Домарецький В. А. Технологія екстрактів, концентратів та напоїв із рослинної сировини: підручник для студентів вищих навчальних закладів. Київ: Нова Книга, 2005. 408 с.
8. Костриця М. Ю., Рейтман Й. Г. Хміль та пиво в Україні з давнини до сьогодення / ред. Й. Г. Рейтман ; Інститут сільського господарства Полісся. Житомир : [б. в.], 1997. 238 с.
9. Бліщ Р. О., Петришин Н. З., Бабич І. М. Альтернатива хмелю у виробництві пива. *Вісник ЛТЕУ. Технічні науки*. 2021. Вип. 25. С. 31–37. <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2021-25-04>.

10. Бліщ Р. О., Петришин Н. З., Бабич І. М. Енергозберігаючі технології приготування пивного суслу. *Вісник ЛТЕУ. Технічні науки*. 2021. Вип. 28. С. 13–17. <https://doi.org/10.36477/2522-1221-2021-28-02>.

11. Мошер. Р. Смак пива. Інсайдерський путівник у світі найвидатнішого напою людства / пер. з англ. Л. Світанкова. Львів : Видавництво Старого Лева, 2018. 388 с.

12. Самойчук К. О., Фучаджи Н. О., Ломейко О. П. Оптимізація технологічних процесів при приготуванні пивного суслу. Мелітополь, 2022. С. 116–123. URL: <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/16574> (дата звернення: 18.05.2026)

13. Чорний В. В., Хом'як С. В. Технології виробництва, сучасні дослідження український ринок кислого пива та пива спонтанного бродіння. *Chemistry, Technology and Application of Substances*. 2024. Т. 7. № 2. С. 146–152. URL: <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/124450> (дата звернення: 18.05.2026)

14. Формування смаку пива / Н. Нагурна та ін. *Innovations and Technologies in the Service Sphere and Food Industry*. 2023. №1 (7). С. 48–56. [https://doi.org/10.32782/2708-4949.1\(7\).2023.9](https://doi.org/10.32782/2708-4949.1(7).2023.9)

15. Олійнічук С. Т., Коляновська Л. М. Сучасні технології та виклики крафтового пивоваріння: аналіз тенденцій в Україні та світі. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2025. № 1 (116). С. 120–130. URL: <https://socrates.vsau.org/repository/card.php?id=39272> (дата звернення: 18.05.2026)

16. Романов М. С., Кишенько В. Д., Ладанюк А. П. Оптимізація процесу пивоваріння з використанням сценарного підходу в умовах ситуаційної невизначеності. *Харчова наука та технологія*. 2014. № 3. С. 89–96. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Khnit_2014_3_20 (дата звернення: 21.05.2026)

17. Сташейко В. І., Шмаглій О. Б. Розвиток сировинної бази пивоваріння в Україні. *Економіка АПК*. 2013. № 9. С. 25–31. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/E_apk_2013_9_6 (дата звернення: 18.05.2026)

18. Жученко А. І., Козаневич З. Я., Тюріна Є. О. Сучасна теорія автоматичного керування. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2025. 85 с. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/77304> (дата звернення: 18.05.2026)

19. Zhang J., Liu J. Temperature control for beer fermentation process. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1176, no. 5. Art. 052002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1176/5/052002>.

20. Effect of temperature on the process of beer primary fermentation / M. Solgajová et al. *Journal of microbiology, biotechnology and food sciences*. 2013. Vol. 2, no. 1. URL: <https://office2.jmbfs.org/index.php/JMBFS/article/view/7273> (date of application: 21.05.2026)