

**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.

КВАЛІФІКАЦІЙНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

на тему " Розробка автоматизованої системи керування мікрокліматом в теплиці "

Спеціальність: 174 - "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка"

Гарант освітньої програми

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

(підпис)

Дудник А.О.
(П.І.Б.)

Керівник кваліфікаційної бакалаврської роботи

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

(підпис)

Лендел Т.І.
(П.І.Б.)

Виконав

(підпис)

Лозовий О.В.
(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 кваліфікаційної бакалаврської роботи студенту

Лозовий Олександр Вікторович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність: 174 - "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка"

1. Тема кваліфікаційної бакалаврської роботи: "Розробка автоматизованої системи керування мікрокліматом в теплиці",
затверджена наказом ректора НУБіП України від " 24 " 10 2025 р. № 2518"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 Технологічна характеристика об'єкта керування.
 - 4.2 Побудова та дослідження математичної моделі об'єкта керування.
 - 4.3 Реалізація алгоритму керування об'єктом.
 - 4.4 Електротехнічна частина.
 - 4.5 Техніко-економічне обґрунтування.

5. Перелік графічних документів:

5.1. Система автоматичного керування мікрокліматом в теплиці. Функціональна схема автоматизації.

5.2. Система автоматичного керування мікрокліматом в теплиці. Схема електрична принципова.

5.3. Система автоматичного керування мікрокліматом в теплиці. Схема електричних з'єднань.

5.4. Система автоматичного керування мікрокліматом в теплиці. Схема електричних підключень.

5.5. Система автоматичного керування мікрокліматом в теплиці. Зовнішній вигляд щита керування.

Дата видачі завдання "21" листопада 2025 року

**Керівник
кваліфікаційної
бакалаврської роботи**

(підпис)

Лендєл Т.І.
(П.І.Б.)

**Завдання прийняв до
виконання**

(підпис)

Лозовий О.В.
(П.І.Б.)

АНОТАЦІЯ

Розроблено автоматизовану систему керування температурним режимом блочної теплиці площею 1 га для вирощування солодкого перцю. Теплицю проаналізовано як об'єкт керування, побудовано її математичну модель (інерційна ланка першого порядку із запізненням: $K_0 = 0,68$; $T_0 = 1100$ с; $\tau = 350$ с) і синтезовано трипозиційний ПІД-закон ($K_p = 18,2$; $T_i = 1250$ с; $T_d = 132$ с) з цифровою реалізацією на вітчизняному регуляторі МІКРОЛ МІК-21. Підібрано засоби автоматизації (датчик Е+Е ЕЕ160 із сигналом 4...20 мА, триходовий клапан Belimo H780N з реверсивним приводом EV230A-TPC, насос Wilo TOP-S) і розроблено електротехнічну частину системи. Техніко-економічне обґрунтування: капітальні витрати 400 тис. грн, річна економія ≈ 789 тис. грн, термін окупності ≈ 6 місяців.

Ключові слова: ТЕПЛИЦЯ, МІКРОКЛІМАТ, АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ, ТЕМПЕРАТУРА, ПІД-РЕГУЛЯТОР, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, МІК-21.

ABSTRACT

An automated air-temperature control system was developed for a 1-ha block greenhouse growing sweet pepper. The greenhouse was analysed as a control object; its mathematical model was built (first-order lag with transport delay: $K_0 = 0.68$; $T_0 = 1100$ s; $\tau = 350$ s) and a three-position PID law ($K_p = 18.2$; $T_i = 1250$ s; $T_d = 132$ s) was synthesised and digitally implemented on the Ukrainian-made controller MIKROL MIK-21. The automation equipment was selected (E+E EE160 sensor with a 4–20 mA signal, Belimo H780N three-way valve with an EV230A-TPC reversible actuator, Wilo TOP-S pump), and the electrical part of the system was developed. Feasibility study: capital cost UAH 400,000, annual saving $\approx$ UAH 789,000, payback period ≈ 6 months.

Keywords: GREENHOUSE, MICROCLIMATE, AUTOMATIC CONTROL, TEMPERATURE, PID CONTROLLER, MATHEMATICAL MODEL, MIK-21.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	4
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ .	10
1.1. Інформаційний аналіз об'єкта керування.....	10
1.2. Актуальність та доцільність автоматизації	14
1.3. Розробка функціональної схеми автоматизації	16
РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ	19
ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	19
2.1. Методологія моделювання теплових процесів у теплиці	19
2.2 Розрахунок параметрів моделі	22
2.3 Ідентифікація об'єкта за розгінною характеристикою	23
РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ	27
3.1. Вибір та обґрунтування алгоритму	27
3.2. Вибір технічних засобів.....	29
3.2.1. Вибір сприймаючого елемента (датчик)	30
3.2.2. Вибір виконавчого механізму	32
3.3. Реалізація алгоритму керування	33
3.3.1. Визначення періоду дискретизації	34
3.3.2. Налаштування ПІД-регулятора.....	35
3.3.3. Дослідження системи.....	38
3.4. Вибір керуючого елемента	38
РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА	42
4.1. Вибір електротехнічних пристроїв.....	42
4.1.1. Вибір магнітного пускача та теплового реле	42
4.1.2. Вибір автоматичних вимикачів	44
4.1.3. Вибір проводів і кабелів	46

4.2. Розробка електричної принципової схеми	47
4.3. Розробка схеми з'єднань щита керування.....	49
4.4. Розробка схеми підключень	51
4.5. Розробка загального вигляду щита керування.....	52
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ.....	54
5.1 Мета впровадження.....	54
5.2 Аналіз існуючого рішення.....	54
5.3 Розрахунок витрат за ручного керування.....	54
5.4 Витрати на впровадження системи автоматизації.....	55
5.5 Витрати за автоматизованого керування.....	56
5.6 Економічний ефект від впровадження.....	57
ВИСНОВКИ.....	58
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	60
ДОДАТКИ.....	64

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток тепличного господарства є стратегічно важливим для стабілізації продовольчого ринку України, оскільки кліматичні умови нашої країни зумовлюють виражену сезонність виробництва овочів. У спорудах захищеного ґрунту культивування овочів дозволяє досягати високої врожайності незалежно від зовнішніх погодних умов, тоді як у відкритому ґрунті ці показники в рази нижчі. Застосування систем автоматичного регулювання мікроклімату дає змогу стабільно забезпечувати населення вітамінною продукцією у міжсезоння, коли пропозиція місцевих овочів традиційно падає до критичних значень.

Окреме місце в індустрії тепличного виробництва посідає солодкий перець — одна з найбільш енергоємних та чутливих до умов вирощування культур. Понад 85 % цієї продукції потрапляє на вітчизняний ринок у період серпневих жнив, тоді як у зимово-весняний період внутрішній ринок на 70-80 % залежить від дорогого імпорту [21]. Для отримання якісного врожаю необхідно підтримувати температуру повітря в межах 22–26 °С удень та 18–20 °С вночі. Навіть незначне відхилення на 2-3 °С нижче норми протягом тижня спричиняє стрес рослини й затримує плодоношення на 10-14 днів [20]. Саме тому температурний режим є визначальним технологічним параметром і основним об'єктом регулювання в цій роботі.

Головним бар'єром для розвитку виробництва овочів у регульованих умовах залишається висока частка енерговитрат, яка в Україні сягає 40–60 % собівартості. За даними провідних фахівців (В.П. Лисенко та ін.), впровадження сучасних алгоритмів автоматичного керування мікрокліматом дозволяє відчутно зменшити споживання природного газу за одночасного підвищення якості плодів [7].

Доцільність дослідження зумовлена тим, що автоматизація стабілізує вихід продукції у міжсезоння, коли ринкова ціна на солодкий перець істотно вища, ніж

улітку. Це робить інвестиції у засоби автоматики економічно привабливими та забезпечує відносно короткий термін окупності (орієнтовно у межах першого року експлуатації, що є типовим для систем керування з низькою вартістю обладнання). Конкретні економічні показники й термін окупності для розробленої системи визначено в розділі 5.

Мета дослідження — поліпшення функціонування системи автоматичного керування температурним режимом теплиці для вирощування солодкого перцю шляхом розробки та налаштування алгоритму регулювання, що забезпечує оптимальні умови росту рослин за зниження енерговитрат.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання [1]:

- проаналізувати технологічні вимоги до вирощування солодкого перцю, обґрунтувати температуру повітря як основний регульований параметр та виявити недоліки існуючих систем автоматизації;
- обґрунтувати водяне опалення (триходовий регулюючий клапан із циркуляційним насосом) як основний канал керування температурою, а природну вентиляцію через фрамуги як допоміжний засіб охолодження;
- розробити функціональну схему одноконтурної системи автоматичного керування [8] температурою повітря;
- сформулювати математичну модель теплиці за каналом «подача теплоносія - температура повітря» та визначити її динамічні параметри;
- обрати елементну базу (датчик, мікропроцесорний регулятор, виконавчий механізм) і розрахувати та налаштувати цифровий ПІД-регулятор;
- виконати імітаційне моделювання та оцінити якість регулювання;
- провести техніко-економічне обґрунтування [1] впровадження розробленої системи.

Об'єкт дослідження: технологічний процес автоматизованого регулювання температури повітря при вирощуванні солодкого перцю в умовах закритого ґрунту.

Предмет дослідження: закономірності функціонування одноконтурної системи автоматичного регулювання температурного режиму та їхній вплив на енергоефективність технологічного процесу.

РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

1.1. Інформаційний аналіз об'єкта керування

Тепличне господарство є одним із найефективніших напрямів сучасного агропромислового виробництва, оскільки забезпечує стабільне вирощування овочевих культур незалежно від сезонних кліматичних умов. Споруди закритого ґрунту дають змогу підтримувати оптимальні параметри мікроклімату, потрібні для інтенсивного росту рослин, підвищення врожайності та поліпшення якості продукції. На відміну від відкритого ґрунту, де врожайність значною мірою залежить від погодних умов, теплиця створює кероване штучне середовище, у якому температура, вологість, освітленість і газовий склад повітря можуть підтримуватися в межах, найсприятливіших для конкретної культури. Це дозволяє отримувати кілька врожаїв на рік, скорочувати тривалість вегетаційного періоду та підвищувати товарну якість продукції.

У межах даної бакалаврської кваліфікаційної роботи об'єктом автоматизації є блочна теплиця площею 10 000 м² (1 га). Вибір блочного типу зумовлений його високою енергоефективністю: завдяки спільним внутрішнім стінам між прольотами мінімізується площа огорожувальних конструкцій, що контактують із зовнішнім повітрям, і знижуються питомі тепловтрати порівняно з окремо розташованими ангарними спорудами. Габаритні розміри теплиці становлять приблизно 100 × 100 м при висоті до коника близько 3 м. Несучий каркас споруди виконано з металевих конструкцій, а світлопрозоре огороження забезпечує максимальне проникнення сонячної радіації у внутрішній простір.

Опалення теплиці здійснюється трубною системою обігріву з примусовою циркуляцією гарячого теплоносія, для чого передбачено циркуляційний насос та регулюючу арматуру. Для природного повітрообміну й відведення надлишкового тепла у верхній частині споруди встановлено вентиляційні

фрамуги з електроприводом [18][6]. Вирощування солодкого перцю виконується ґрунтовим способом із застосуванням крапельного зрошення, що забезпечує рівномірне постачання води й живильних речовин безпосередньо до кореневої зони рослин. Класифікацію теплиць за основними ознаками [12] наведено в таблиці 1.1, загальний вигляд блочної теплиці — на рисунку 1.1, а основні характеристики тепличного комплексу — у таблиці 1.2.

Таблиця 1.1 - Класифікація теплиць

Ознака класифікації	Види теплиць
За призначенням	овочеві, розсадні, квіткові, дослідні
За конструкцією	ангарні (однопрогінні), блочні (багатопрогінні)
За матеріалом покриття	скляні, плівкові, полікарбонатні
За періодом експлуатації	зимові (цілорічні), весняно-літні
За способом вирощування	ґрунтові, гідропонні, стелажні



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд блочної теплиці

Для подальших теплотехнічних розрахунків потрібне розрахункове теплове навантаження системи опалення. Питомі тепловтрати огорожувальних конструкцій блочної теплиці за розрахункової зовнішньої температури для центральних областей України становлять орієнтовно 140 Вт на квадратний метр площі. З урахуванням площі споруди 10 000 м² та додаткових втрат на інфільтрацію холодного повітря крізь нещільності й фрамуги приймаємо проектне значення розрахункових тепловтрат приблизно 1415 кВт [11]. Це значення надалі використовується як вхідне для побудови математичної моделі об'єкта (розділ 2), вибору обладнання (розділи 3, 4) та техніко-економічного обґрунтування (розділ 5).

Таблиця 1.2 - Основні характеристики тепличного комплексу

Характеристика	Значення
Тип теплиці	блочна (багатопрогінна)
Площа	10 000 м ² (1 га)
Габаритні розміри	100 × 100 м, висота до коника 3 м
Культура	солодкий перець
Спосіб вирощування	грунтовий із крапельним зрошенням
Система опалення	трубна з примусовою циркуляцією теплоносія
Система вентиляції	природна (вентиляційні фрамуги)
Розрахункові тепловтрати	≈ 1415 кВт

Вплив параметрів мікроклімату на вирощування солодкого перцю

Продуктивність і якість урожаю солодкого перцю безпосередньо залежать від підтримання оптимальних параметрів мікроклімату. Серед них визначальним є температура повітря, оскільки саме вона найсильніше впливає на швидкість фізіологічних процесів рослини. При зниженні температури нижче 16 °С різко сповільнюються обмінні процеси, зменшується інтенсивність фотосинтезу та погіршується розвиток кореневої системи; тривале перебування за низьких температур призводить до зупинки росту й опадання зав'язі. При підвищенні

температури понад 30 °С пригнічуються процеси запилення та формування плодів, рослина витрачає енергію на транспірацію замість плодоношення. Оптимальною для солодкого перцю є температура 22–26 °С удень та 18–20 °С уночі [20,21]. Саме тому в даній роботі температура повітря прийнята як основний регульований параметр, а решта показників мікроклімату — як супутні, що підлягають моніторингу.

Відносна вологість повітря підтримується в межах 60–75 %: її недостатній рівень спричиняє надмірне випаровування вологи рослинами та в'янення, а надмірний — створює сприятливі умови для розвитку грибкових і бактеріальних захворювань. У розробленій системі вологість контролюється (вимірюється), але автоматично не регулюється; за потреби її стабілізують опосередковано провітрюванням. Аналогічно як довідкові контролюються температура ґрунту, що впливає на роботу кореневої системи, та концентрація вуглекислого газу, потрібного для фотосинтезу. Основні фактори впливу на мікроклімат теплиці та їх роль у системі керування наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Основні фактори впливу на мікроклімат теплиці

Параметр	Роль у системі	Орієнтовне значення
Температура повітря	регульований	22–26 °С (день)
Відносна вологість	контрольований	60–75 %
Температура ґрунту	контрольований	довідково
Концентрація CO ₂	контрольований	довідково
Освітленість	неконтрольований	природна

Особливості теплиці як об'єкта автоматизації

Теплиця як технологічний об'єкт керування характеризується низкою особливостей, що визначають вибір алгоритму та засобів регулювання. Насамперед це велика теплова інерційність: завдяки значному об'єму повітря й теплоємності конструкцій температура змінюється повільно, а реакція на керуючий вплив настає із суттєвим запізненням. Крім того, об'єкту притаманні

значні зовнішні збурення, нерівномірність температурного поля по об'єму споруди та нелінійність процесів теплообміну. Через велику інерційність і запізнення ручне керування температурним режимом є практично неможливим: оператор не здатний своєчасно й точно компенсувати збурення, тому потрібна автоматична система регулювання.

Основним регульованим параметром є температура повітря в робочій зоні. Основним керуючим впливом є подача гарячого теплоносія у трубну систему обігріву, що регулюється триходовим клапаном з електроприводом за умови примусової циркуляції теплоносія насосом. Допоміжним керуючим впливом, призначеним для відведення надлишкового тепла, є відкриття вентиляційних фрамуг. Збурюючими впливами виступають зміна температури зовнішнього повітря, сонячна радіація, швидкість вітру та інфільтрація холодного повітря крізь нещільності огороження.

У зимовий період основним завданням системи є мінімізація тепловтрат і підтримання заданої температури за рахунок опалення, а в літній період — ефективне відведення надлишкового тепла природною вентиляцією. Технологічний процес підтримання температури охоплює вимірювання параметра, порівняння його із заданим значенням, формування керуючого впливу на клапан опалення (за потреби — на фрамуги) та контроль результату регулювання. Сукупність наведених властивостей — інерційність, запізнення та змінні збурення — обумовлює доцільність застосування мікропроцесорного регулятора з ПІД-законом керування, здатного забезпечити точне й стабільне підтримання температурного режиму.

1.2. Актуальність та доцільність автоматизації

Сучасне тепличне виробництво є енергоємною галуззю: витрати на опалення в собівартості продукції захищеного ґрунту можуть сягати 40–60 %, особливо в холодний період року. За таких умов навіть незначне покращення

точності підтримання температурного режиму дає відчутну економію енергоносіїв. Водночас теплиця як об'єкт є складною для ручного керування через велику теплову інерційність, запізнення та постійні зовнішні збурення, тому без засобів автоматизації неможливо одночасно забезпечити і високу якість мікроклімату, і економну витрату енергії. Усе це робить автоматизацію температурного режиму теплиці актуальним інженерним завданням.

Актуальність автоматизації зумовлена також загальною тенденцією до цифровізації агропромислового комплексу та впровадження технологій точного землеробства [19]. Застосування сучасних мікропроцесорних регуляторів із цифровим інтерфейсом дає змогу не лише підтримувати задані параметри, а й накопичувати дані про роботу обладнання, аналізувати енергоспоживання та оперативно реагувати на позаштатні ситуації. Для України, де тепличне господарство є важливою складовою продовольчої безпеки, особливого значення набуває використання надійного обладнання вітчизняного виробництва (зокрема регулятора МІКРОЛ МІК-21), що зменшує залежність від імпортованих комплектуючих і спрощує технічне обслуговування.

Доцільність автоматизації підтверджується сукупністю техніко-економічних і технологічних переваг, які вона забезпечує:

- економія теплової енергії за рахунок точного підтримання температури та усунення перегрівів і перевитрат теплоносія;
- підвищення врожайності та поліпшення якості продукції завдяки стабільному й оптимальному для культури мікроклімату;
- зниження впливу людського чинника та зменшення витрат ручної праці на контроль і керування;
- безперервний моніторинг параметрів, аварійна сигналізація та реєстрація подій, що підвищує надійність і безпеку експлуатації;
- можливість дистанційного диспетчерського керування й інтеграції з верхнім рівнем АСУ через інтерфейс RS-485 [29];

- скорочення терміну окупності завдяки одночасній економії енергії та зростанню обсягу й якості врожаю.

Економічний ефект від упровадження системи автоматизації детально обґрунтовано в розділі 5 (техніко-економічне обґрунтування). Таким чином, автоматизація температурного режиму теплиці є не лише технічно обґрунтованою, а й економічно доцільною, оскільки забезпечує одночасне зниження експлуатаційних витрат і підвищення ефективності виробництва. З огляду на наведене, розроблення автоматизованої системи керування температурою повітря в теплиці для вирощування солодкого перцю є актуальним і доцільним завданням, що й визначає мету цієї роботи.

1.3. Розробка функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема автоматизації відображає структуру одноконтурної системи автоматичного керування температурою повітря в теплиці та взаємозв'язки між засобами контролю, регулятором і виконавчими механізмами (рис. 1.2). Основним каналом керування є водяний контур опалення, а вентиляційні фрамуги виконують допоміжну функцію охолодження.

- SSA — реле швидкості з сигналізацією та блокуванням (захист фрамуг від сильного вітру);

Принцип функціонування системи. Система працює за принципом замкненого контуру з від'ємним зворотним зв'язком за температурою. Датчик TE безперервно вимірює температуру повітря; сигнал надходить на регулятор ТС, де порівнюється із заданим значенням, після чого за ПД-законом формується керуючий вплив.

При зниженні температури нижче нижньої межі ($T_{\min} = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$) регулятор збільшує подачу гарячого теплоносія, відкриваючи триходовий клапан; циркуляційний насос забезпечує рух теплоносія трубою системою, фрамуги при цьому закриті задля запобігання втратам тепла. У діапазоні $22\text{--}26\text{ }^{\circ}\text{C}$ система підтримує задану температуру за мінімального енергоспоживання.

При перевищенні верхньої межі ($T_{\max} = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$) регулятор насамперед зменшує або повністю перекриває подачу теплоносія як основний засіб зниження температури. Якщо цього недостатньо (наприклад, за інтенсивної сонячної інсоляції), додатково відкриваються вентиляційні фрамуги, забезпечуючи природне охолодження; датчик GE контролює ступінь їх відкриття. Вологість повітря та концентрація CO_2 при цьому лише контролюються й не входять до контуру автоматичного регулювання. Такий підхід забезпечує стабільний температурний режим за мінімальних енерговитрат і мінімального стресу для культури солодкого перцю.

РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

2.1. Методологія моделювання теплових процесів у теплиці

Відповідно до прийнятого в розділі 1 рішення основним каналом керування температурою повітря є водяний контур опалення. Тому математичну модель об'єкта будуємо саме за каналом «подача гарячого теплоносія температура повітря в теплиці», що відповідає реалізованому далі (розділи 3, 4) керуванню триходовим клапаном на цьому контурі.

Для створення ефективної системи автоматичного керування першочерговою задачею є розробка математичної моделі, яка відображає реакцію об'єкта на керуюче збурення. Імітаційний експеримент дає змогу встановити чисельні значення передаточного коефіцієнта, визначити транспортне запізнення та сталу часу теплової інерції системи [4].

Для реалізації алгоритмів керування реальний об'єкт (простір теплиці) декомпоновано та спрощено до моделі із зосередженими параметрами [4]: температурне поле всередині споруди приймається однорідним по всьому об'єму, а стан теплоносія характеризується середньоарифметичною температурою води на вході та виході. Об'єкт подається як послідовна структура з двох енергетичних місткостей — системи водяного теплоносія та повітряного об'єму теплиці (рис. 2.1).

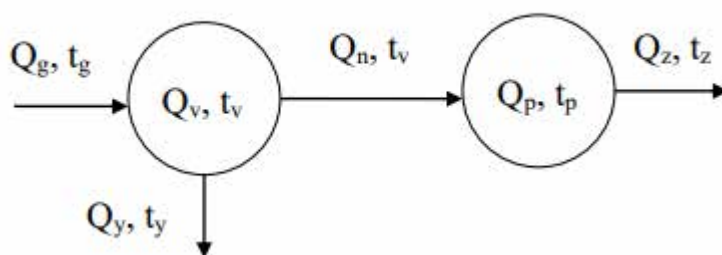


Рисунок 2.1 - Схема потоків тепла в теплиці

У статичному режимі обсяги теплової енергії, акумульовані в теплоносії та повітряному середовищі, незмінні в часі. Тоді теплові процеси описуються двома рівняннями теплового балансу для водяного контуру та для повітряного простору:

Для водяного контуру:

$$Q_g - Q_y + Q_n = 0 \quad (2.1)$$

Для повітряного простору:

$$Q_n - Q_z = 0 \quad (2.2)$$

де Q_g — теплота, що надходить із гарячою водою;

Q_y — теплота, яка виноситься водою після проходження системи;

Q_n — теплота, передана від води до повітря теплиці;

Q_z — теплота, що втрачається у навколишнє середовище.

Значення кількості тепла, що поступило в систему опалення теплиці за секунду і вийшло з неї, залежить від теплоємності води C_v , продуктивності насоса G_n , густини води ρ_v і відповідної температури води, а значення кількості тепла, що знаходиться в системі опалення, — ще й від об'єму води в системі V_v . Відповідно до цього:

$$Q_g = C_v G_n \rho_v t_g \quad (2.3)$$

$$Q_y = C_v G_n \rho_v t_y \quad (2.4)$$

$$Q_v = C_v V_v \rho_v t_v \quad (2.5)$$

Кількість теплоти, що міститься в теплиці, визначається теплоємністю повітря C_v , його густиною ρ_v , температурою повітря t_p та загальним об'ємом теплиці V_p :

$$Q_p = C_p V_p \rho_p t_p \quad (2.6)$$

Теплота, що переходить від води до повітря через стінку труби, а також від повітря через скло у середовище, визначається за законом Фур'є:

$$Q_n = k_1 F_t (t_v - t_p) \quad (2.7)$$

$$Q_z = k_2 F_c (t_p - t_z) \quad (2.8)$$

де k_1, k_2 — коефіцієнти теплопередачі через стінку труби та через скляне покриття; F_1, F_c — площі поверхні труб опалення та заклоєної поверхні. Коефіцієнти теплопередачі:

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{vt}} + \frac{\delta_t}{\lambda_t} + \frac{1}{\alpha_{tp}}} \quad (2.9)$$

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{pc}} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_{cz}}} \quad (2.10)$$

де $\alpha_{vt}, \alpha_{tp}, \alpha_{pc}, \alpha_{cz}$ — коефіцієнти тепловіддачі (вода→труба, труба→повітря, повітря→скло, скло→середовище); λ_t, λ_c — коефіцієнти теплопровідності матеріалу труби та скла; δ_t, δ_c — товщина стінки труби та скляного покриття.

Переходячи від статки до динаміки, складаємо систему диференціальних рівнянь, що описує зміну температури води t_v та повітря t_p у часі (об'єми, густини й теплоємності прийнято сталими):

$$\begin{aligned} C_v V_v \rho_v \frac{dt_v}{d\tau} &= Q_g - Q_y - Q_n \\ C_p V_p \rho_p \frac{dt_p}{dt} &= Q_n - Q_z \end{aligned} \quad (2.11)$$

Враховуючи, що середня температура води в системі дорівнює півсумі температур подавальної та зворотної води

$$t_v = \frac{t_g + t_y}{2}$$

де t_g — температура гарячої (подавальної) води, t_y — температура зворотної води, після спрощень систему зводимо до форми Коші, придатної для побудови моделі в середовищі MATLAB Simulink [30]:

$$\frac{dt_B}{dt} = \frac{Q_r - Q_B - Q_n}{C_B \rho_B V_B}$$

$$\frac{dt_{\Pi}}{dt} = \frac{Q_{\Pi} - Q_3}{C_{\Pi} \rho_{\Pi} V_{\Pi}} \quad (2.12)$$

Під час побудови блок-схеми моделі необхідно враховувати транспортне запізнення об'єкта за температурним каналом, що визначається швидкістю руху води, довжиною нагрівальних труб і місцем розташування датчика. Приймається, що температура повітря починає змінюватися, коли труби заповнені водою приблизно на чверть; час запізнення визначається за відповідним співвідношенням:

$$\tau = \frac{V_v}{4G_n} \quad (2.13)$$

де V_v — об'єм нагрівальних труб; G_n — продуктивність циркуляційного насоса.

2.2 Розрахунок параметрів моделі

Густина і теплоємність повітря дорівнюють 1,293 кг/м³ і 1005 Дж/(кг·град); густина і теплоємність гарячої води — 1005 кг/м³ і 4174 Дж/(кг·град); температура зовнішнього повітря $t_3 = 5$ °С. Потрібно визначити температуру гарячої води t_g для підтримання в теплиці температури $t_{\Pi} = 24$ °С (середина робочого діапазону 22...26 °С), отримати перехідні криві з урахуванням запізнення та показати, як зміниться час регулювання за зменшення витрати води удвічі. Коефіцієнти теплопередачі за рівняннями (2.9), (2.10) з урахуванням розмірностей змінних:

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{1000} + \frac{0,002}{50} + \frac{1}{15}} = 11,837 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (2.14)$$

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{7,5} + \frac{0,004}{0,74} + \frac{1}{10}} = 4,189 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (2.15)$$

Довжина нагрівальних труб при об'ємі системи опалення 80 м³ і внутрішньому діаметрі 44 мм та її поверхня теплообміну:

$$L = \frac{80}{\frac{\pi \cdot 0,044^2}{4}} = 51613,2 \text{ м} \quad (2.16)$$

$$F_1 = 51613,2 \cdot \pi \cdot 0,048 = 7933,9 \text{ м}^2 \quad (2.17)$$

Поверхню заскленої теплиці (умовно прямокутної) та об'єм повітря визначаємо як:

$$F_c = 10000 + 500 \cdot 2 \cdot 3 + 20 \cdot 2 \cdot 3 = 13120 \text{ м}^2 \quad (2.18)$$

$$V_{\pi} = 10000 \cdot 3 = 30000 \text{ м}^3 \quad (2.19)$$

Час запізнення за формулою (2.13) за продуктивності насоса 270 м³/год:

$$\tau_c = \frac{80}{4 \cdot \frac{270}{3600}} = 266,7 \text{ с} \quad (2.20)$$

Для зручності формування блочної імітаційної моделі вводимо допоміжні коефіцієнти:

$$a_1 = k_1 F_1 = 11,837 \cdot 7933,9 = 93913,6 \quad (2.21)$$

$$a_2 = k_2 F_c = 4,189 \cdot 13120 = 54959,7 \quad (2.22)$$

$$b_1 = C_{\text{в}} \rho_{\text{в}} V_{\text{в}} = 4174 \cdot 1005 \cdot 80 = 3,353 \cdot 10^8 \quad (2.23)$$

$$b_2 = C_{\pi} \rho_{\pi} V_{\pi} = 1005 \cdot 1,293 \cdot 30000 = 3,898 \cdot 10^7 \quad (2.24)$$

Тоді система диференціальних рівнянь (2.12) у блочній формі набуває вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{dt_{\text{в}}}{d\tau} &= \frac{2G_{\text{н}}}{V_{\text{в}}} (t_{\text{г}} - t_{\text{в}}) - \frac{a_1(t_{\text{в}} - t_{\pi})}{b_1} \\ \frac{dt_{\pi}}{d\tau} &= \frac{a_1(t_{\text{в}} - t_{\pi}) - a_2(t_{\pi} - t_3)}{b_2} \end{aligned} \quad (2.25)$$

2.3 Ідентифікація об'єкта за розгінною характеристикою

За одержаними коефіцієнтами побудовано імітаційну модель об'єкта в середовищі MATLAB Simulink (рис. 2.2), у якій транспортне запізнення задано блоком Transport Delay. За результатами імітаційного експерименту отримано розгінну та нормовану перехідну характеристики об'єкта (рис. 2.3, 2.4).

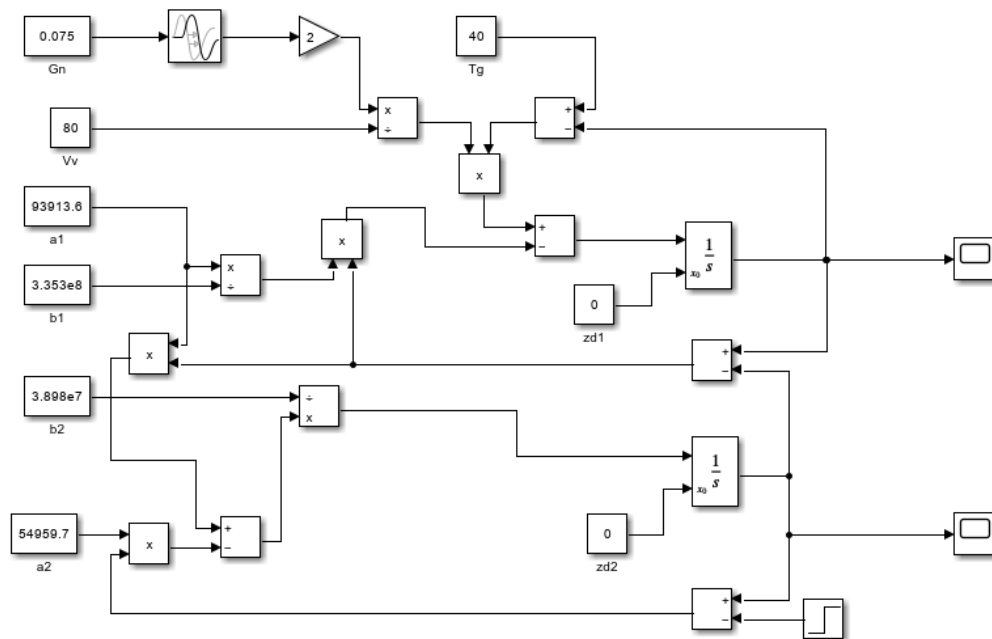


Рисунок 2.2 – Екран моделі в MATLAB Simulink

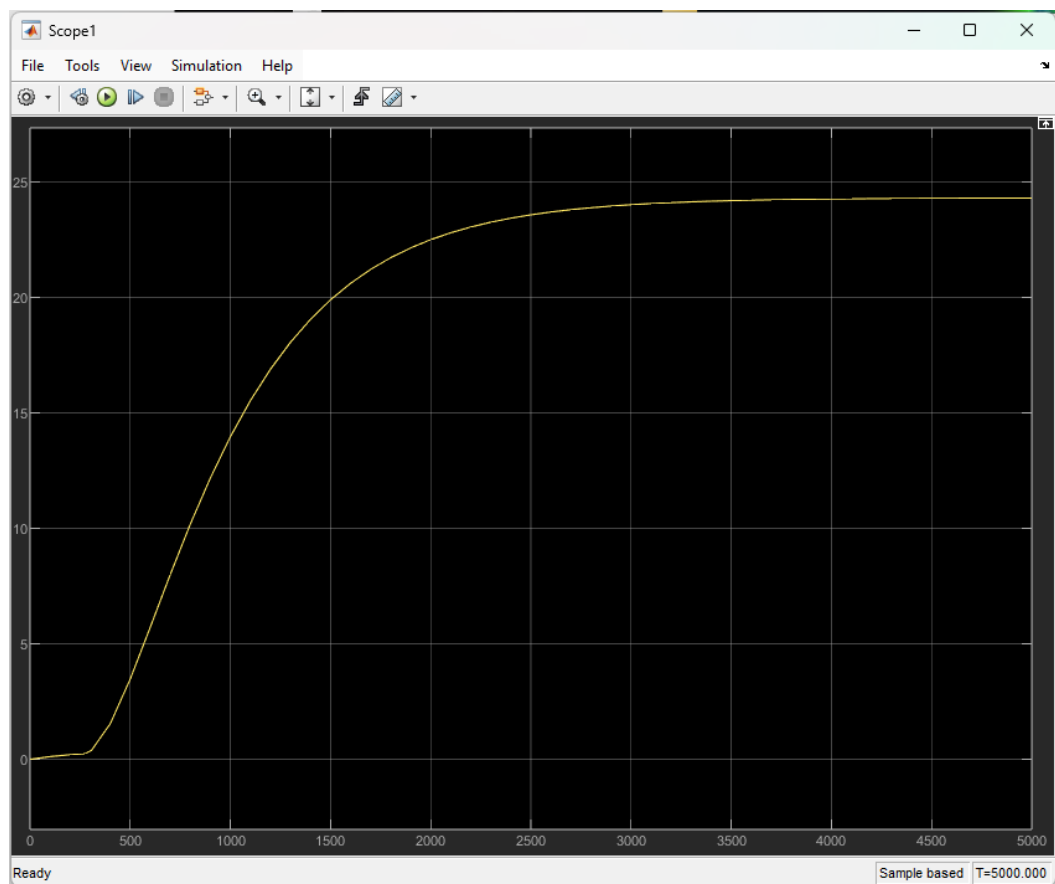


Рисунок 2.3 – Розгінна характеристика об'єкта

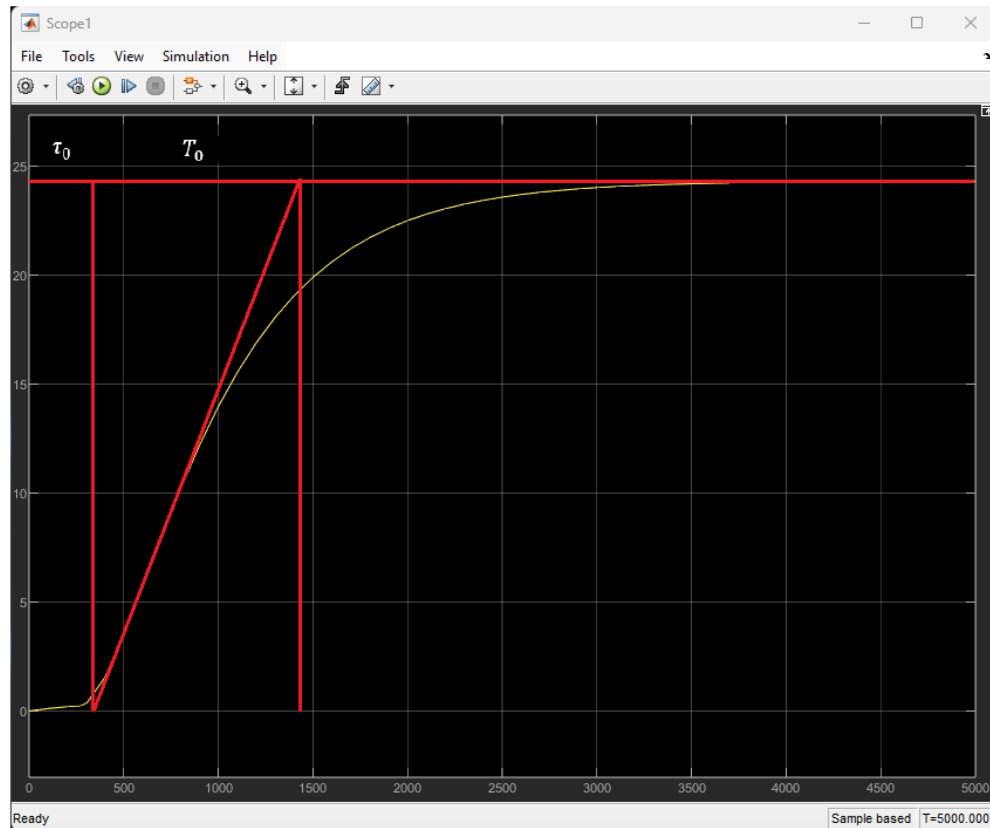


Рисунок 2.4 – Нормована характеристика перехідного процесу

За допомогою розгінної характеристики визначено основні динамічні параметри об'єкта. До найкрутішої ділянки перехідного процесу проведено дотичну: точка її перетину з віссю часу визначає еквівалентне запізнення, а відрізок до перетину з лінією усталеного значення — сталу часу об'єкта. З графіка отримано:

Отже, об'єкт регулювання подається інерційною ланкою першого порядку з транспортним запізненням. За керуючого впливу 35 % коефіцієнт передачі:

$$K_0 = \frac{\Delta t}{\Delta \varphi} = \frac{24}{35} \approx 0,68 \quad (2.27)$$

Передатна функція об'єкта керування набуває вигляду:

$$W(s) = \frac{K_0 e^{-\tau s}}{T_0 s + 1} = \frac{0,68 e^{-350s}}{1100s + 1} \quad (2.28)$$

де s — оператор Лапласа. Визначені параметри ($K_0 = 0,68$; $T_0 = 1100$ с; $\tau = 350$ с) використовуються в розділі 3 для вибору й розрахунку параметрів регулятора.

РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ

3.1. Вибір та обґрунтування алгоритму

У практиці автоматичного регулювання виробничих процесів особливе значення має правильний вибір регуляторів і розрахунок їх оптимальних параметрів налагодження. Ці завдання вирішують на стадії проєктування САР і уточнюють у процесі налагодження регуляторів безпосередньо на працюючому об'єкті.

Вказані завдання пов'язані зі статикою і динамікою об'єктів регулювання й базуються на методиці, виробленій на основі теоретичних досліджень і перевірених у практиці налагодження різних САР. Цілі, що реалізуються в процесі вибору регуляторів і розрахунку їх оптимальних параметрів, зводяться до наступного:

1. САР і регулятори, що входять до її складу, повинні відповідати технологічним та експлуатаційним вимогам виробництва і режимам роботи регульованого об'єкта;
2. система повинна бути стійкою при найбільш характерних збуреннях, що притаманні об'єкту;
3. повинна бути забезпечена потрібна якість процесу регулювання в динамічному і статичному станах системи, включаючи динамічну точність при неперервній зміні збурення, експлуатаційну надійність, мінімальну вартість і економічну ефективність.

Для оцінювання якості перехідного процесу у відповідності з технологічними й експлуатаційними вимогами оптимальним може бути процес із різним характером перехідної функції. Для реальних умов перехідні функції процесу регулювання можуть наближатись до обмеженої кількості типових перехідних процесів, один з яких буде близьким до оптимального для конкретного об'єкта.

Після вибору одного із типових перехідних процесів визначають задане значення динамічного коефіцієнта регулювання, який характеризує максимальне динамічне відхилення. Динамічний коефіцієнт регулювання для статичних об'єктів R_d являє собою відношення максимально допустимого відхилення регульованої величини X_1 у перехідному процесі до добутку коефіцієнта куст усталеного режиму об'єкта на величину збурення $u_{зб}$:

$$R_d = \frac{X_1}{k_{уст} \cdot u_{зб}} = \frac{2}{0,68 \cdot 3} \approx 0,98$$

Найкраще мінімальне значення R_d може бути отримане при використанні ПІД-регуляторів (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Динамічний коефіцієнт регулювання для статичних об'єктів

Тип регулятора	Аперіодичний	3 20 % перерегулюванням	$\int x^2 dt$
П	2,9	1,4	–
ПІ	1,4	1,3	0,9
ПІД	1,3	1,1	0,8

Об'єкт керування — повітряне середовище теплиці разом із водяним контуром опалення — є інерційним об'єктом з великою сталою часу ($T_0 = 1100$ с) і транспортним запізненням ($\tau = 350$ с). Температурний режим теплиці зазнає численних і змінних у часі збурень: коливань температури зовнішнього повітря, сонячної радіації, вітрового напору, відкривання вентиляційних фрамуг та інфільтрації повітря. За таких умов головною вимогою до регулятора є мінімальне динамічне відхилення регульованої температури під дією збурень за відсутності статичної похибки.

Пропорційний (П) регулятор не забезпечує нульової статичної похибки, а його динамічний коефіцієнт регулювання найбільший (табл. 3.1), тому для відповідального теплового об'єкта він не підходить. Пропорційно-інтегральний (ПІ) регулятор усуває статичну похибку, проте формує керуючий вплив лише за накопиченим відхиленням і має обмежену швидкодію. Найменше значення

динамічного коефіцієнта регулювання забезпечує пропорційно-інтегрально-диференційний (ПІД) регулятор ($R_d = 1,3$ проти $1,4$ у ПІ та $2,9$ у П), тобто за однакових збурень він дає найменше максимальне відхилення температури.

Перевага ПІД-закону зумовлена диференційною складовою, яка формує керуючий вплив, пропорційний швидкості зміни похибки. Завдяки цьому регулятор реагує на тенденцію зміни температури випереджально — ще до значного зростання відхилення, що зменшує динамічне відхилення під час збурень, покращує демпфування перехідного процесу та збільшує запас стійкості за рахунок фазового випередження. Таким чином, ПІД-закон поєднує переваги всіх трьох складових: пропорційна забезпечує швидку реакцію, інтегральна — нульову статичну похибку, диференційна — випереджальну дію та демпфування коливань.

З огляду на велике запізнення об'єкта та можливу зашумленість сигналу датчика диференційна складова реалізується як реальна (фільтрована) ланка, а час диференціювання приймається помірним, що запобігає підсиленню завад і надмірним перемиканням виконавчого механізму. На підставі наведеного для автоматизованої системи керування температурою повітря в теплиці обираємо пропорційно-інтегрально-диференційний (ПІД) закон регулювання.

3.2. Вибір технічних засобів

Функціональна схема САР — це схема, на якій зображено функціональні елементи системи і зв'язки між ними (рис. 3.1). Елементи на функціональній схемі позначаються у вигляді прямокутників, усередині яких скорочено пишуть назву елемента. Зв'язки між елементами показують лініями, а їх напрямки — стрілками [12]. На функціональній схемі об'єктом керування (ОК) є повітряне середовище теплиці, а контрольованим параметром — температура повітря. Первинним перетворювачем (СЕ) є датчик температури.

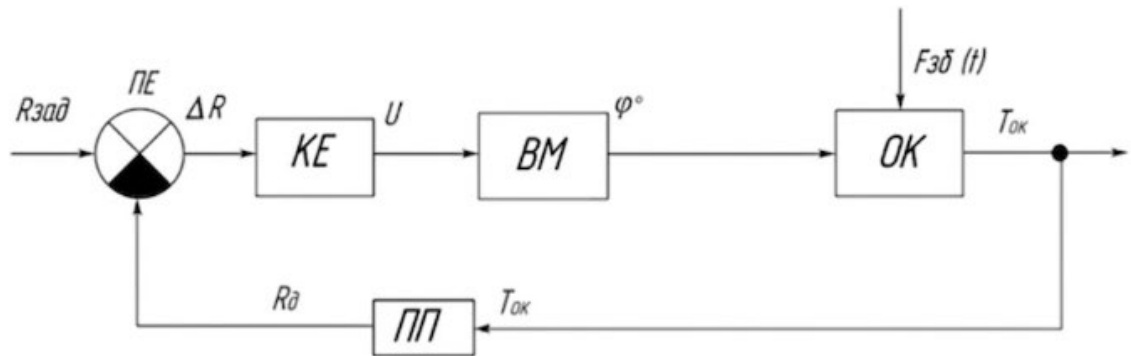


Рис. 3.1. Функціональна схема САР

На функціональній схемі позначено:

КЕ - керуючий елемент (контролер);

ВМ - виконавчий механізм (регулюючий клапан);

ОК - об'єкт керування (повітряне середовище теплиці);

ПП - первинний перетворювач (датчик температури);

$R_{\text{зад}}$ - задане значення температури, °С;

U - керуючий сигнал;

$F_{\text{зб}}$ - збурююча дія на об'єкт керування.

3.2.1. Вибір сприймаючого елементу (датчик)

СЕ — це первинний вимірювальний перетворювач. Він являє собою сприймаючий елемент (датчик). Умовою вибору СЕ є:

$$T_{\text{СЕ}} < 0,1 \cdot T_{\text{об}}$$

Для задоволення цієї умови обираємо перетворювач температури та відносної вологості повітря E+E Elektronik EE160 каналного виконання (табл. 3.2, рис. 3.2) [14].



Рисунок 3.2 – Перетворювач температури E+E Elektronik EE160

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики E+E Elektronik EE160

Параметр	Значення
Чутливий елемент	Pt1000 ($R_0 = 1000 \text{ Ом при } 0^\circ\text{C}$)
Границі вимірювання	$-40\dots+60^\circ\text{C}$
Вихідний сигнал	$4\dots20 \text{ mA}$
Теплова інерція	$T_{CE} = 30 \text{ с}$
Ступінь захисту	IP65

Перевірка умови: $T_{CE} = 30 \text{ с} < 0,1 \cdot T_{об} = 110 \text{ с}$. Передатна функція датчика:

$$W_{CE}(s) = \frac{K_{CE}}{T_{CE} \cdot s + 1} \quad (3.1)$$

$$K_{CE} = R_0 \cdot \alpha \quad (3.2)$$

де α — температурний коефіцієнт платини, $\alpha = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^\circ\text{C}$. Фізичний коефіцієнт передачі: $K_{CE} = 1000 \cdot 3,9 \cdot 10^{-3} = 3,9 \text{ Ом}/^\circ\text{C}$. Перетворювач EE160 нормує сигнал чутливого елемента Pt1000 в уніфікований струмовий сигнал $4\dots20 \text{ mA}$; у відносному (нормованому) вигляді прийнятий у моделі коефіцієнт передавання давача $K_{CE} = 0,133$. Інерційна ланка датчика:

$$W_{CE}(s) = \frac{0,133}{30s + 1}$$

3.2.2. Вибір виконавчого механізму

Виконавчим механізмом є електроприводний триходовий регулюючий клапан на водяному контурі опалення. Виходячи з необхідної пропускної здатності контуру обираємо триходовий клапан Belimo H780N (DN80, $K_{vs} = 100$ м³/год) з реверсивним електроприводом Belimo EV230A-TPC, що працює у трипозиційному режимі «відкрити/закрити» (табл. 3.3, рис. 3.3). Регулятор МІК-21 реалізує ПІД-закон у трипозиційному режимі, формуючи на привід імпульсні команди «більше/менше».

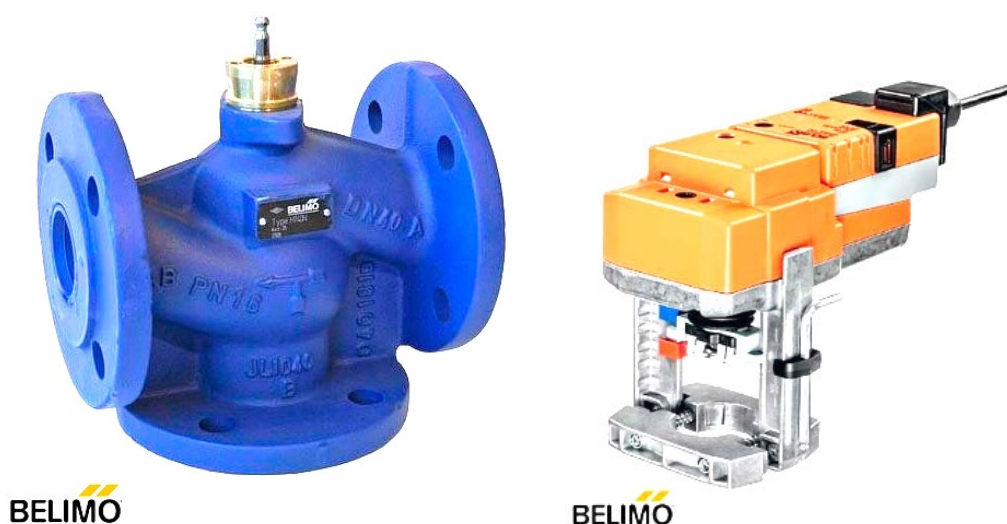


Рисунок 3.3 – Триходовий клапан Belimo H780N з реверсивним електроприводом EV230A-TPC

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики клапана Belimo H780N / EV230A-TPC

Параметр	Значення
Умовний діаметр DN	80 мм
Пропускна здатність K_{vs}	100 м ³ /год
Тип керування	трипозиційний («відкрити/закрити»)
Час повного ходу	150 с
Напруга живлення	~230 В

Передатна функція виконавчого механізму — аперіодична ланка першого порядку:

$$W_{\text{ВМ}}(s) = \frac{K_{\text{ВМ}}}{T_{\text{ВМ}} \cdot s + 1} \quad (3.3)$$

де $K_{\text{ВМ}} = 1$ (нормування переміщення штока до ходу 0...100 %); $T_{\text{ВМ}} = 150$ с — час повного ходу приводу. У трипозиційному режимі привід разом із регулятором МІК-21 утворює позиційну підсистему, яку для цілей налаштування подаємо аперіодичною ланкою зі сталою часу, що дорівнює часу повного ходу приводу. Тоді:

$$W_{\text{ВМ}}(s) = \frac{1}{150s + 1}$$

3.3. Реалізація алгоритму керування

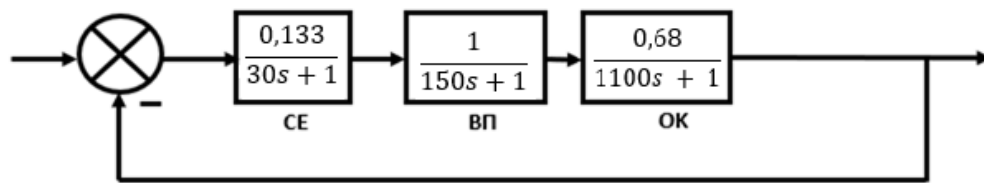


Рис. 3.4. Структурно-алгоритмічна схема САР

Параметри об'єкта керування, визначені у розділі 2: $K_0 = 0,68$; $T_0 = 1100$ с; час запізнення $\tau = 350$ с.

Визначення передатних функцій.

а) Передатна функція розімкнутої системи ($f = 0$) дорівнює добутку передатних функцій об'єкта керування, виконавчого механізму та сприймаючого елемента з урахуванням транспортного запізнення:

$$W_{\text{роз}}(s) = W_{\text{ОК}}(s) \cdot W_{\text{ВМ}}(s) \cdot W_{\text{СЕ}}(s) \cdot e^{-\tau s}$$

$$W_{\text{роз}}(s) = \frac{0,68}{1100s + 1} \cdot \frac{1}{150s + 1} \cdot \frac{0,133}{30s + 1} \cdot e^{-350s}$$

Загальний коефіцієнт передачі незмінної частини:

$$K_{\text{н}} = K_{\text{ОК}} \cdot K_{\text{ВМ}} \cdot K_{\text{СЕ}} = 0,68 \cdot 1 \cdot 0,133 = 0,090$$

Перемноживши знаменники, отримуємо характеристичний поліном третього степеня:

$$(1100s + 1)(150s + 1)(30s + 1) = 4950000s^3 + 202500s^2 + 1280s + 1$$

де коефіцієнти полінома: при s^3 — $1100 \cdot 150 \cdot 30 = 4950000$; при s^2 — $1100 \cdot 150 + 1100 \cdot 30 + 150 \cdot 30 = 202500$; при s — $1100 + 150 + 30 = 1280$. Остаточна передатна функція розімкнутої системи:

$$W_{\text{роз}}(s) = \frac{0,090 \cdot e^{-350s}}{4950000s^3 + 202500s^2 + 1280s + 1}$$

б) Передатна функція замкнутої системи за керуванням ($f = 0$):

$$W_{\text{зам}}(s) = \frac{W_{\text{роз}}(s)}{1 + W_{\text{роз}}(s)} = \frac{0,090}{4950000s^3 + 202500s^2 + 1280s + 1,090}$$

3.3.1. Визначення періоду дискретизації

При проектуванні цифрової системи керування виникає питання обмеження частоти квантування. При збільшенні частоти квантування точність зростає, але збільшується завантаження мікропроцесора; при зменшенні — втрачається інформація про сигнал. Найменша частота квантування має бути не меншою за $2\omega_c$, де ω_c — найбільша суттєва частота у спектрі неперервного сигналу. Межу спектра визначають за умовою:

$$W_{\text{роз.н.ч}}(s) \leq \theta_{\text{зад}} \quad (3.4)$$

Частота квантування $\omega_s = 2\pi/T$ повинна задовольняти $\omega_s \leq 2\omega_c$, тому допустимий період квантування:

$$T_{\text{ц}} \leq \frac{\pi}{\omega_c} \quad (3.5)$$

Неперервна частина цифрової системи має передатну функцію:

$$W_{\text{роз.н.ч}}(s) = \frac{0,090}{4950000s^3 + 202500s^2 + 1280s + 1}$$

Потрібно знайти допустимий період квантування, що забезпечує максимальну похибку відтворення сигналу $\theta_{\text{зад}} = 1\%$. Передатна функція неперервної частини замкненої системи:

$$W_{\text{зам.н.ч}}(s) = \frac{0,090}{4950000s^3 + 202500s^2 + 1280s + 1,090}$$

Амплітудно-частотну характеристику неперервної частини замкненої системи знаходимо як модуль АФЧХ (підстановка $s = j\omega$):

$$A(\omega) = \frac{0,090}{\sqrt{(1,090 - 202500\omega^2)^2 + (1280\omega - 4950000\omega^3)^2}}$$

Значення АЧХ при нульовій частоті та права частина рівняння:

$$A(0) = \frac{0,090}{1,090} = 0,083; \quad A(0) \cdot \theta = 0,083 \cdot 0,01 = 0,00083$$

Розв'язанням рівняння $A(\omega) = 0,00083$ знаходимо найбільшу суттєву частоту $\omega_c = 0,0229$ рад/с. Максимально допустимий період квантування:

$$T_{\text{ц}} = \frac{\pi}{\omega_c} = \frac{3,14}{0,0229} = 137 \text{ с}$$

Остаточно приймаємо період квантування $T = T_{\text{ц}}/10 = 13,7$ с.

3.3.2. Налаштування ПД-регулятора

Визначаємо параметри ПД-регулятора. Незмінна частина складається з об'єкта керування $W_{\text{ок}}(s) = 0,68/(1100s+1)$, виконавчого механізму $W_{\text{вм}}(s) = 1/(150s+1)$ та сприймаючого елемента $W_{\text{се}}(s) = 0,133/(30s+1)$. Передатна функція незмінної частини:

$$W_{\text{нч}}(s) = \frac{0,090}{(1100s + 1)(150s + 1)(30s + 1)}$$

Для визначення параметрів ПД-регулятора компенсуються дві постійні часу $T_1 = 1100$ с (об'єкт) та $T_2 = 150$ с (виконавчий механізм). Сумарна некомпенсована постійна часу — це постійна сприймаючого елемента та транспортне запізнення $T_{\mu} = T_{\text{се}} + \tau = 30 + 350 = 380$ с. Параметри налаштування ПД-регулятора:

$$K_p = \frac{T_1 + T_2}{K_H \cdot 2 \cdot T_\mu} = \frac{1100 + 150}{0,090 \cdot 2 \cdot 380} \approx 18,2 \quad (3.6)$$

$$K_i = \frac{1}{K_H \cdot 2 \cdot T_\mu} = \frac{1}{0,090 \cdot 2 \cdot 380} \approx 0,0146 \quad (3.7)$$

$$K_d = \frac{T_1 \cdot T_2}{K_H \cdot 2 \cdot T_\mu} = \frac{1100 \cdot 150}{0,090 \cdot 2 \cdot 380} \approx 2401 \quad (3.8)$$

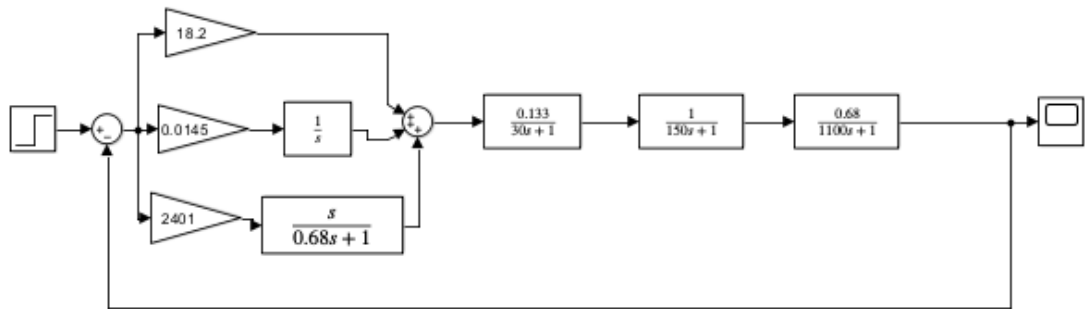


Рис. 3.5. Імітаційна модель аналогової системи керування

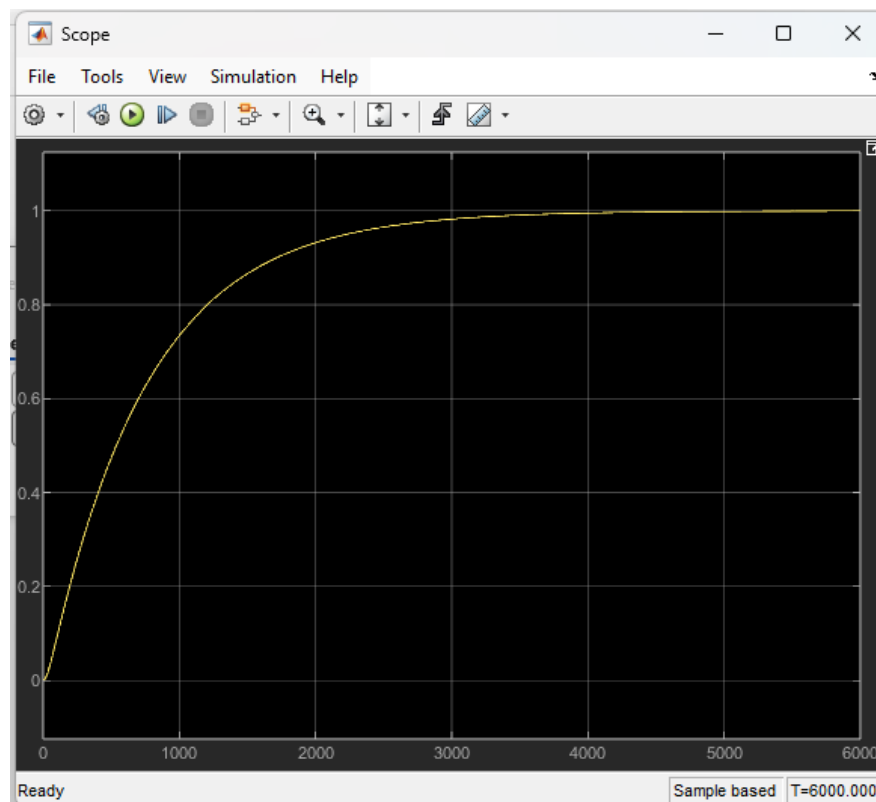


Рис. 3.6. Перехідні характеристики системи з ПД-регулятором об'єкта інерційних ланок

Показники якості скоректованої системи:

- статична похибка $\delta = (1-1)/1 \cdot 100 = 0 \%$;
- час регулювання $t_p \approx 2500$ с;
- перерегулювання $\sigma \approx 0 \%$ (монотонний процес);
- коливальність $n = 0$.

При створенні Simulink-моделі скоректованої системи з цифровим ПІД-регулятором потрібно визначити дискретну передатну функцію цифрового регулятора:

$$W_{\text{per}}(z) = K_p + \frac{K_i \cdot T \cdot (z+1)}{2(z-1)} + \frac{K_d \cdot (z-1)}{T \cdot z} \quad (3.9)$$

Період квантування $T = T_{\text{ц}}/10 = 13,7$ с. Коефіцієнти:

$$K_p = 18,2; \quad \frac{K_i \cdot T}{2} = \frac{0,0146 \cdot 13,7}{2} = 0,10; \quad \frac{K_d}{T} = \frac{2401}{13,7} = 175$$

$$W_{\text{per}}(z) = 18,2 + 0,10 \cdot \frac{z+1}{z-1} + 175 \cdot \frac{z-1}{z}$$

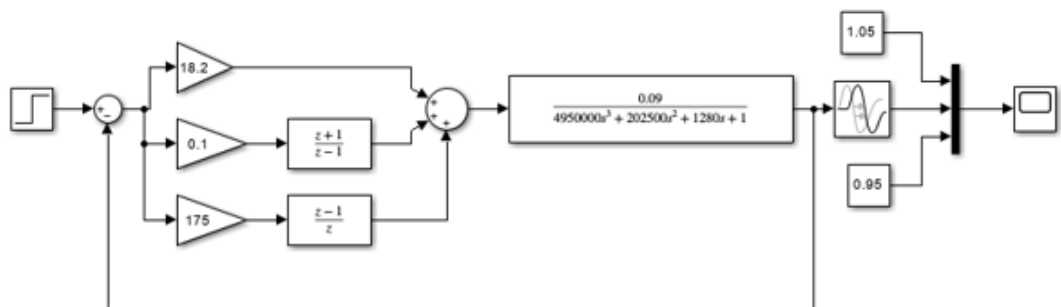


Рис. 3.7. Simulink-модель САР з цифровим ПІД-регулятором

3.3.3. Дослідження системи

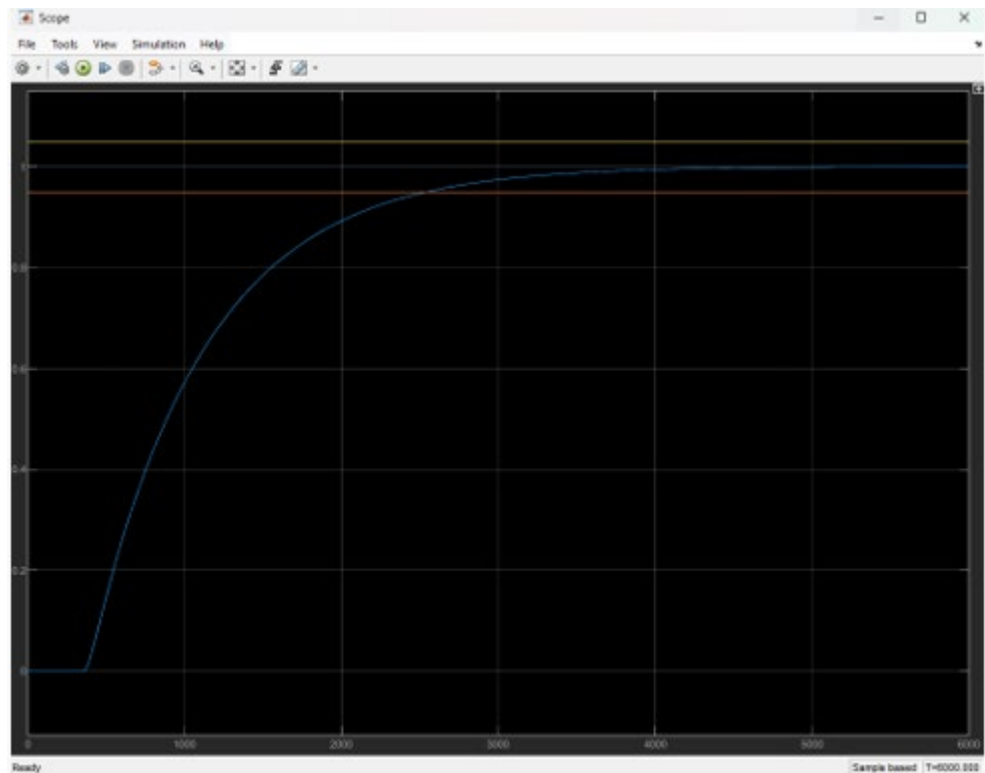


Рис. 3.8. Перехідна характеристика цифрової системи з ПІД-регулятором

Показники якості цифрової системи збігаються з показниками аналогової САР, наведеними вище: статична похибка $\delta = 0 \%$, час регулювання $t_p \approx 2500$ с, перерегулювання $\sigma \approx 0 \%$, коливальність $n = 0$. Це підтверджує коректність обраного періоду квантування $T = 13,7$ с, за якого перехід до цифрової реалізації не погіршує якості регулювання.

3.4. Вибір керуючого елементу

Керуючий елемент є центральною ланкою системи автоматичного регулювання: він приймає сигнал від первинного вимірювального перетворювача, порівнює виміряне значення температури із заданою уставкою, обчислює похибку регулювання та за обраним законом (ПІД) формує керуючий вплив на виконавчий механізм. Саме від функціональних можливостей і точності керуючого елемента залежить якість підтримання температурного режиму, тому

до його вибору ставлять вимоги щодо підтримуваних законів регулювання, типів вхідних і вихідних сигналів, наявності цифрового інтерфейсу для зв'язку з верхнім рівнем та зручності налаштування.

Як керуючий елемент для вимірювання, реєстрації й регулювання температури повітря в теплиці обираємо універсальний мікропроцесорний ПІД-регулятор МІКРОЛ МІК-21 вітчизняного виробництва (рис. 3.9). Прилад призначений для побудови систем автоматичного регулювання технологічних параметрів (температури, тиску, витрати, рівня, вологості) у промисловості, енергетиці, комунальному та сільському господарстві, зокрема для керування виконавчими механізмами в системах опалення й теплопостачання. Зовнішній вигляд приладу показано на рисунку.



Рис. 3.9. Панель регулятора МІКРОЛ МІК-21

Вибір МІК-21 для розроблюваної системи обґрунтований повною відповідністю його технічних можливостей структурі контуру регулювання. По-

перше, прилад реалізує саме ПД-закон регулювання, обраний у підрозділі 3.1, з можливістю задання коефіцієнтів K_p , T_i та T_d , розрахованих у підрозділі 3.3. По-друге, універсальний вимірювальний вхід контролера безпосередньо приймає сигнал датчика E+E EE160 [23] (як уніфікований струмовий сигнал 4...20 мА, так і сигнал від термоперетворювача опору Pt1000 [16]), що виключає потребу в додаткових перетворювачах. По-третє, дискретними виходами прилад реалізує трипозиційне керування реверсивним електроприводом Belimo EV230A-TRC, відпрацьовуючи розрахований ПД-закон зміною ступеня відкриття триходового клапана.

Важливою перевагою приладу є функція автоматичного налаштування (самоналаштування) параметрів регулятора, яка дає змогу уточнити розрахункові коефіцієнти безпосередньо на працюючому об'єкті, а також наявність цифрового інтерфейсу RS-485 з протоколом Modbus RTU для передавання даних на верхній (диспетчерський) рівень. Завдяки автономності контуру регулювання прилад продовжує підтримувати заданий температурний режим навіть за втрати зв'язку з верхнім рівнем.

Основні функціональні можливості та переваги регулятора МІКРОЛ МІК-21:

- універсальний аналоговий вхід (термоперетворювачі опору ТСМ, ТСП, Pt100; термопари ТХК, ТХА; уніфіковані сигнали 0...5, 0...20, 4...20 мА, 0...10 В);
- реалізація П-, ПІ-, ПІД-, дво- і трипозиційного законів регулювання;
- автоматичне налаштування (самоналаштування) параметрів регулятора;
- аналоговий вихід 0/4...20 мА (0...10 В) та дискретні виходи (реле / оптосимістор / транзистор), якими реалізується трипозиційне керування виконавчим механізмом і технологічна сигналізація;

- цифровий інтерфейс RS-485 з протоколом Modbus RTU для зв'язку з верхнім рівнем АСУ;
- ручний, автоматичний і дистанційний режими керування, програмні уставки та сигналізація виходу параметра за встановлені межі;
- висока точність вимірювання (основна похибка $\pm 0,25$ %) та зручний цифровий інтерфейс оператора на лицьовій панелі.

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики МІКРОЛ МІК-21

Параметр	Значення
Виробник / країна	МІКРОЛ, Україна
Тип	мікропроцесорний ПІД-регулятор, одноканальний
Закони регулювання	П, ПІ, ПІД, дво- і трипозиційний
Вхідні сигнали	ТСП/ТСМ/Pt100, ТП, 0...5/0...20/4...20 мА, 0...10 В
Аналоговий вихід	0/4...20 мА, 0...10 В
Дискретні виходи	реле / симістор / транзистор
Інтерфейс	RS-485, Modbus RTU
Основна похибка	$\pm 0,25$ %
Напруга живлення	~220 В
Клас захисту	IP20

Таким чином, регулятор МІКРОЛ МІК-21 узгоджується з усіма елементами розробленої системи: одержує сигнал від датчика температури Е+Е ЕЕ160 через універсальний вхід, обчислює керуючу дію за ПІД-законом із розрахованими параметрами та керує реверсивним електроприводом Belimo EV230A-TPC триходового клапана Belimo H780N за трипозиційним ПІД-законом, а через інтерфейс RS-485 може передавати поточні значення параметрів на верхній (диспетчерський) рівень. Вибір приладу вітчизняного виробництва (МІКРОЛ, Україна) додатково забезпечує доступність технічної підтримки, комплектуючих і відповідність вимогам імпортонезалежності.

РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

4.1. Вибір електротехнічних пристроїв

Електротехнічна частина системи містить силове та комутаційно-захисне обладнання, що забезпечує живлення, увімкнення, захист і комутацію електроспоживачів нижнього рівня — циркуляційного насоса М1, електропривода регулюючого клапана М2, мікропроцесорного регулятора А1 та кіл сигналізації. Вибір апаратів виконується за умовами, що регламентуються Правилами улаштування електроустановок [15] (ПУЕ), з урахуванням номінальних параметрів навантаження, режимів роботи та напруги мережі ~380/220 В. Усе обладнання прийнято вітчизняного або неросійського виробництва.

Силове коло системи живить трифазний асинхронний електродвигун, за струмом якого вибирають комутаційно-захисні апарати. Номінальний струм двигуна приймаємо $I_{\text{ном}} = 3,06$ А, кратність пускового струму $k_{\text{п}} = 6$. Пусковий струм при прямому пуску:

$$I_{\text{пуск}} = k_{\text{п}} \cdot I_{\text{ном}} = 6 \cdot 3,06 = 18,4 \text{ А} \quad (4.1)$$

Решта електроспоживачів (електропривод клапана М2, регулятор А1, блок живлення, кола сигналізації) є малопотужними, їхні робочі струми не перевищують часток ампера. Вибір апаратів виконують за наведеними нижче умовами.

4.1.1. Вибір магнітного пускача та теплового реле

Магнітний пускач призначений для дистанційного вмикання й вимикання силових кіл електроспоживачів, а також для їх захисту (у комплекті з тепловим реле) від перевантажень і роботи на двох фазах. Умовою вибору пускача в категорії застосування АС-3 є відповідність його номінального струму струму навантаження:

$$I_{\text{н.п}} \geq I_{\text{ном}} \quad (4.2)$$

де $I_{\text{н.п}}$ — номінальний струм пускача; $I_{\text{ном}}$ — номінальний струм двигуна.

Номінальний струм навантаження $I_{\text{ном}} = 3,06$ А. Найближчий стандартний номінал пускача — 9 А, отже умова (4.2) виконується: $I_{\text{н.п}} = 9 \text{ А} \geq I_{\text{ном}} = 3,06 \text{ А}$. Обираємо магнітні пускачі Промфактор FC1/9 [28]/380 (KM1–KM3) з номінальним струмом 9 А та напругою кіл $\sim 380/220$ В. Пускач KM1 комутує коло насоса М1, а пускачі KM2 і KM3 — коло електропривода клапана М2. Для захисту двигуна насоса від перевантажень і обриву фази застосовуємо теплове реле РТ-1314 (КК1) з уставкою, що дорівнює номінальному струму двигуна $I_{\text{ном}} = 3,06$ А.



Рис. 4.1. Магнітний пускач FC1/9/380



Рис. 4.2. Реле теплове РТ-1314

Таблиця 4.1 – Магнітні пускачі та теплове реле

Позначення	Тип	Характеристика
КМ1–КМ3	Промфактор FC1/9/380	$I_n = 9 \text{ A}$; $\sim 380/220 \text{ В}$; 3 полюси
КК1	Реле теплове РТ-1314	уставка = $3,06 \text{ A}$ ($I_{\text{ном}}$ двигуна)

4.1.2. Вибір автоматичних вимикачів

Автоматичні вимикачі забезпечують захист кіл від струмів короткого замикання та тривалого перевантаження. Номінальний струм розчіплювача обирають за умовою захисту від перевантаження, а струм відсічки перевіряють за умовою неспрацювання від пускового струму двигуна:

$$I_{\text{розч}} \geq 1,25 \cdot I_{\text{ном}} \quad (4.3)$$

$$I_{\text{відс}} \geq 1,25 \cdot I_{\text{пуск}} \quad (4.4)$$

де $I_{розч}$ — номінальний струм розчіплювача; $I_{відс}$ — струм спрацювання електромагнітної відсічки; $I_{пуск}$ — пусковий струм двигуна.

Автомат кола насоса QF2. За умовою (4.3): $I_{розч} \geq 1,25 \cdot 3,06 = 3,8$ А — приймаємо найближчий стандартний номінал 6 А. Перевірка за умовою (4.4) для характеристики типу С (струм відсічки $5 \cdot I_n$): $I_{відс} = 5 \cdot 6 = 30$ А $\geq 1,25 \cdot 18,4 = 23$ А — автомат не спрацює при пуску двигуна. Обираємо QF2 — 3-полюсний, 6 А, характеристика С.

Увідний автомат QF1 обирають за сумарним струмом електроспоживачів з урахуванням пускових режимів та забезпечення селективності з груповими автоматами; приймаємо 3-полюсний, 20 А. Автомати кіл регулятора QF3 та електропривода клапана QF4 захищають малопотужні кола (струм менше 1 А), тому приймаємо мінімальний стандартний номінал — 1-полюсні, 2 А. Усі автомати — Аско-Укрем ВА-3017 [27].



Рис. 4.3. Автоматичний вимикач Аско-Укрем ВА-3017

Таблиця 4.2 – Автоматичні вимикачі

Позначення	Тип	Полюси / Ін
QF1 (увідний)	Аско-Укрем ВА-3017	3Р / 20 А
QF2 (М1)	Аско-Укрем ВА-3017	3Р / 6 А, хар-ка С
QF3 (регулятор)	Аско-Укрем ВА-3017	1Р / 2 А
QF4 (М2)	Аско-Укрем ВА-3017	1Р / 2 А

4.1.3. Вибір проводів і кабелів

Проводи й кабелі вибирають за тривало допустимим струмом, механічною міцністю та умовами прокладання. Переріз струмопровідної жили має задовольняти умову нагрівання допустимим струмом:

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{ном}} \quad (4.5)$$

де $I_{\text{доп}}$ — тривало допустимий струм проводу (кабелю); $I_{\text{ном}}$ — номінальний струм навантаження.

Коло насоса М1 та ввід виконуємо важкогорючим кабелем ВВГнг 4×2,5 мм², тривало допустимий струм якого $I_{\text{доп}} = 25$ А задовольняє умову (4.5): $25 \text{ А} \geq I_{\text{ном}} = 3,06 \text{ А}$, і водночас перевищує номінальний струм автомата QF2 (6 А), чим забезпечується захист кабелю. Коло електропривода клапана М2 виконуємо кабелем ВВГнг 3×1,5 мм² ($I_{\text{доп}} = 19 \text{ А}$), що з великим запасом перекидає робочий струм приводу. Сигнальне коло датчика температури ВК1 виконуємо екранованим контрольним кабелем КВВГЕ 4×0,75 мм², який струмом навантаження практично не навантажений, а екран захищає сигнал від електромагнітних завад. Внутрішній монтаж щита виконуємо гнучким мідним проводом марки ПВ-3 перерізом 1,5 мм² для силових кіл та 0,75 мм² для кіл керування й сигналізації. Кабельно-провідникову продукцію обираємо виробництва ПАТ «Одескабель».

Таблиця 4.3 – Проводи й кабелі

Призначення	Марка	Переріз / Ідоп
Ввід / насос М1	ВВГнг	4×2,5 мм ² / 25 А
Електропривод клапана М2	ВВГнг	3×1,5 мм ² / 19 А
Датчик температури ВК1	КВВГЕ (екранований)	4×0,75 мм ²
Внутрішній монтаж щита	Мідний ізолюваний провід	1,5 / 0,75 мм ²

Обране електрообладнання за номінальними параметрами відповідає умовам вибору й режимам роботи системи та узгоджується з електричною принциповою схемою (підрозділ 4.2).

4.2. Розробка електричної принципової схеми

Електрична принципова схема визначає повний склад електричних елементів системи та зв'язки між ними, відображає принцип дії електрообладнання й послідовність роботи апаратури при реалізації функцій живлення, захисту, керування та сигналізації. Вона дає детальне уявлення про роботу системи на рівні окремих апаратів і кіл.

Призначення схеми — розкрити принцип електричної взаємодії всіх пристроїв нижнього рівня системи: як подається живлення, як вмикаються й захищаються електроспоживачі, як регулятор формує керуючі впливи та як реалізовано сигналізацію й режими роботи. Принципова схема є основою для розроблення схеми з'єднань, схеми підключень і виконання монтажних та налагоджувальних робіт. Схему виконано відповідно до ДСТУ Б А.2.4-3:2009 «Правила виконання робочої документації автоматизації технологічних процесів» з використанням умовних графічних позначень за чинними стандартами.

На схемі зображено:

- **силову частину** — живлення від трифазної мережі 380/220 В, 50 Гц через увідний автоматичний вимикач QF1 (3Р, 20 А) та групові автоматичні вимикачі QF2–QF4;
- **коло циркуляційного насоса M1** (Wilo TOP-S [26] 80/15 DM): QF2 (3Р, 6 А) → магнітний пускач KM1 → теплове реле KK1 → двигун насоса M1;
- **коло електропривода регулюючого клапана M2** (Belimo EV230A-TPC): QF4 → реверсивні пускачі KM2 («відкрити») і KM3 («закрити»), якими МІК-21 реалізує трипозиційний ПІД-закон, змінюючи ступінь відкриття клапана й витрату теплоносія;
- **мікропроцесорний регулятор A1** (МІКРОЛ МІК-21) з живленням через QF3, на аналоговий вхід якого надходить сигнал від датчика температури ВК1 (Е+Е EE160);
- **блок живлення G1** (ABL8RPS24050) — джерело стабілізованої напруги =24 В для кіл керування, проміжних реле, датчика та сигналізації;
- **проміжні реле KL1–KL3**, через які дискретні виходи регулятора керують котушками пускачів KM1–KM3 і забезпечують гальванічну розв'язку кіл =24 В та ~220 В;
- **кола керування із самоутриманням** — кнопки «Пуск»/«Стоп» (SB1/SB2 — насос, SB3/SB4 та SB5/SB6 — клапан) з допоміжними контактами пускачів (контакти 13–14), що фіксують увімкнений стан після відпускання кнопки;
- **перемикач режимів SA1** «Автоматичний / Ручний» та аварійну кнопку SB із фіксацією для знеструмлення кіл керування;

- **сигналізацію** — світлодіодні сигнальні лампи HL1 «Живлення» та HL2–HL4 (стан насоса й приводу клапана), що керуються через реле KL1–KL3;
- **захист** — теплове реле KK1 (захист двигуна насоса від перевантажень і обриву фази) та автоматичні вимикачі QF1–QF4 (захист від струмів короткого замикання).

Таким чином, електрична принципова схема повністю описує електричну частину системи автоматичного керування температурним режимом теплиці й забезпечує реалізацію функцій живлення, захисту, керування виконавчими механізмами та сигналізації. Зведений перелік елементів схеми наведено у специфікації на кресленні.

Схема електрична принципова наведена в додатку А.

4.3. Розробка схеми з'єднань щита керування

Схема з'єднань (монтажна схема) визначає з'єднання складових частин виробу між собою в межах одного конструктивного виробу — щита керування — та показує проводи, якими ці з'єднання виконуються, а також місця їх приєднання (виводи апаратів і клеми). На відміну від принципової схеми, яка розкриває принцип дії, схема з'єднань відображає реальне розташування апаратів і фактичне прокладання провідників між їхніми виводами.

Призначення схеми — забезпечити виконання монтажних робіт (збирання щита й електричне з'єднання апаратів) та подальше обслуговування й ремонт системи. За нею електромонтажник з'єднує виводи апаратів провідниками згідно з нумерацією та визначає підключення зовнішніх кіл до клемної рейки. Схему виконано відповідно до ДСТУ Б А.2.4-3:2009 «Правила виконання робочої документації автоматизації технологічних процесів».

На схемі зображено:

- **апарати захисту й комутації** — автоматичні вимикачі QF1–QF4, магнітні пускачі KM1–KM3 з тепловим реле КК1, зображені з усіма силовими (1–6) та допоміжними (13–14) контактами й котушками (A1–A2);
- **проміжні реле KL1–KL3** з котушками (A1–A2) та контактними групами (11–14, 21–24), через які комутуються котушки пускачів;
- **мікропроцесорний регулятор A1** (МІКРОЛ МІК-21) з усіма його виводами — живлення (220), входу датчика та дискретних виходів (клеми 21–23, 31–33, 41–43, 51–53);
- **блок живлення G1** (ABL8RPS24050) з виводами мережі (L, N) та виходу =24 В (+, –);
- **органи керування й сигналізації** — кнопки «Пуск»/«Стоп» SB1–SB6, аварійну кнопку SB, перемикач режимів SA1 та сигнальні лампи HL1–HL4 з виводами (1–2);
- **клемну рейку XT1**, на яку виведено зовнішні кола — живлення від мережі ~400 В, лінії до датчика температури, до двигуна насоса й до приводу клапана;
- **нумерацію (маркування) провідників** — кожен провід позначено номером, що відповідає номерам виводів апаратів, до яких він приєднується, що однозначно визначає порядок монтажу.

Внутрішні з'єднання щита виконуються одножильним мідним монтажним проводом, прокладеним у перфорованих кабельних каналах; колір ізоляції відповідає функціональному призначенню кіл (силові, керування, =24 В, захисне заземлення). Усі провідники з обох кінців маркуються нумерованими кабельними бирками згідно з позначеннями на схемі, що забезпечує зручність монтажу та подальшого обслуговування системи.

Схема електричних з'єднань наведена в додатку Б.

4.4. Розробка схеми підключень

Схема підключень визначає підключення зовнішніх кіл до щита керування через клемну рейку та показує марки й способи прокладання кабельних ліній між щитом і обладнанням, установленим за його межами. На відміну від схеми з'єднань, яка відображає внутрішній монтаж апаратів усередині щита, схема підключень показує зв'язок щита керування із зовнішнім обладнанням системи — мережею живлення, насосом, електроприводом клапана та датчиком температури.

Призначення схеми — забезпечити правильне підключення зовнішніх кабелів під час монтажу системи на об'єкті. Вона визначає марки та перерізи кабелів, кількість жил і точки їх приєднання до клемної рейки щита. Схему виконано відповідно до ДСТУ Б А.2.4-3:2009 «Правила виконання робочої документації автоматизації технологічних процесів».

На схемі зображено:

- **клемну рейку ХТ** з нумерованими клемами (1–23) та клемами вводу живлення А, В, С, N, до яких приєднуються зовнішні кабельні лінії;
- **лінію живлення** — від трифазної мережі 400 В, 50 Гц, кабель ВВГнг 4×2,5 мм² (клеми А, В, С, N);
- **лінію до датчика температури ВК1** (Е+Е ЕЕ160) — екранований кабель КВВГЕ 4×0,75 мм² (клеми 9–11);
- **лінію до двигуна циркуляційного насоса М1** (Wilo TOP-S 80/15 DM) — кабель ВВГнг 4×2,5 мм² (клеми А3, В3, С3);
- **лінію до електропривода клапана М2** (Belimo EV230A-TRC) — кабель ВВГнг 3×1,5 мм² (клеми 15–17);
- **таблицю переліку зовнішнього обладнання** — живлення (400 В, 50 Гц), датчик (Е+Е ЕЕ160), двигун (Wilo TOP-S 80/15 DM), клапан (Belimo EV230A-TRC).

Прокладання зовнішніх кабельних ліній виконується в захищених трасах (металевих лотках, гофрованих трубах або металорукавах) відповідно до вимог ПУЕ. Силові (400/220 В) та контрольні (сигнал датчика, кола керування) кабельні траси розділяються, екран сигнального кабелю датчика заземлюється з боку щита, а захисне заземлення корпусів обладнання й щита виконується окремими провідниками до шини РЕ.

Схема підключень наведена в додатку В.

4.5. Розробка загального вигляду щита керування

Креслення загального вигляду щита керування відображає зовнішній вигляд щита та розташування органів керування й засобів сигналізації на його лицьовій панелі. Воно дає наочне уявлення про конструктивне виконання щита й компонування елементів, доступних оператору.

Призначення креслення — слугувати основою для виготовлення щита та розмічання лицьової панелі під установлення апаратури. Воно визначає габаритні розміри щита, взаємне розташування й розміри під монтаж органів керування та індикації з урахуванням ергономічних вимог. Креслення виконано відповідно до ДСТУ Б А.2.4-3:2009.

На схемі зображено:

- **корпус щита** — металевий навісний корпус зі ступенем захисту IP54; габаритні розміри лицьової панелі 500×600 мм;
- **мікропроцесорний регулятор А1** (МІКРОЛ МІК-21) — у центральній частині панелі на рівні очей оператора (відображення поточної температури й уставки, задавання параметрів);
- **сигнальні лампи HL1–HL4** — у верхньому ряду панелі з кроком 70 мм (індикація живлення, роботи насоса й стану приводу клапана);

- **перемикач режимів SA1** «Автоматичний / Ручний» та аварійну кнопку SB — обабіч регулятора, у зоні швидкого доступу;
- **кнопки керування SB1–SB6** — у нижній частині панелі, згруповані рядами за функціональним призначенням;
- **специфікацію елементів лицьової панелі** із зазначенням типів: регулятор МІКРОЛ МІК-21, сигнальні лампи XB7EV04MP, перемикач XB7ND33, кнопки XB7EA.

Розташування органів керування й сигналізації виконано з урахуванням ергономічних вимог: цифровий індикатор регулятора розміщено у верхній частині на рівні очей, перемикач режимів та аварійну кнопку — у центрі для швидкого доступу, а кнопки керування й сигнальні лампи згруповано за функціональним призначенням, що забезпечує зручність і безпеку експлуатації системи.

Схема загального вигляду щита керування наведена в додатку Г.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

5.1 Мета впровадження

Метою впровадження системи автоматичного керування температурним режимом теплиці є підвищення ефективності вирощування солодкого перцю шляхом точного автоматичного підтримання заданої температури повітря в межах 22–26 °С. Це забезпечує зниження споживання природного газу, скорочення витрат ручної праці на цілодобовий контроль мікроклімату та зменшення втрат продукції, спричинених температурними відхиленнями, що загалом підвищує економічність і стабільність технологічного процесу.

5.2 Аналіз існуючого рішення

Існуюче (ручне) керування температурним режимом теплиці, за якого оператор самостійно регулює подачу теплоносія та провітрювання, має низку суттєвих недоліків:

- неточне підтримання температури (відхилення сягають $\pm 3 \dots 5$ °С);
- перевитрати природного газу через перегрів і несвоєчасне провітрювання;
- потреба у постійному цілодобовому контролі з боку оператора;
- втрати врожаю та затримка плодоношення внаслідок температурного стресу рослин;
- висока залежність якості регулювання від людського фактора.

5.3 Розрахунок витрат за ручного керування

Основними складниками витрат на підтримання температурного режиму є вартість природного газу на опалення та оплата праці оператора. Річну потребу теплоти визначають множенням розрахункового (пікового) теплового

навантаження $Q_{\max} = 1415$ кВт (розділи 1, 2) на число годин використання максимуму теплового навантаження $h \approx 2500$ год/рік для умов центральних областей України:

$$Q_{\text{рік}} = Q_{\max} \cdot h = 1415 \cdot 2500 = 3\,537\,500 \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (5.1)$$

Річне споживання газу за ККД котла $\eta = 0,90$ та нижчої теплоти згоряння $Q_H = 9,5$ кВт·год/м³:

$$V_{\text{газ}} = \frac{Q_{\text{рік}}}{\eta \cdot Q_H} = \frac{3\,537\,500}{0,90 \cdot 9,5} = 413\,743 \text{ м}^3 \quad (5.2)$$

Витрати на газ за ціни $C_G = 30$ грн/м³ (непобутові споживачі, 2026 р.):

$$B_{\text{газ}} = V_{\text{газ}} \cdot C_G = 413\,743 \cdot 30 = 12\,412\,281 \text{ грн} \quad (5.3)$$

Річні витрати на оплату праці оператора за місячної заробітної плати

$З_{\text{п}} = 20\,000$ грн:

$$B_{\text{пр}} = З_{\text{п}} \cdot 12 = 20\,000 \cdot 12 = 240\,000 \text{ грн} \quad (5.4)$$

Загальні річні витрати за ручного керування:

$$B_{\text{ручн}} = B_{\text{газ}} + B_{\text{пр}} = 12\,412\,281 + 240\,000 = 12\,652\,281 \text{ грн} \quad (5.5)$$

5.4 Витрати на впровадження системи автоматизації

Витрати на впровадження складаються з вартості технічних засобів автоматизації (обраних у розділах 3 і 4), їх монтажу й пусконаладження та навчання персоналу. Зведений кошторис капітальних витрат наведено в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 – Капітальні витрати на систему автоматизації

Найменування	К-сть	Ціна, грн	Сума, грн
Регулятор МІКРОЛ МІК-21	1	12 000	12 000
Датчик температури E+E EE160	1	15 000	15 000
Клапан триходовий Belimo H780N	1	30 000	30 000
Електропривод Belimo EV230A-TRC	1	35 000	35 000
Блок живлення ABL8RPS24050	1	5 000	5 000
Магнітний пускач Промфактор FC1/9/380	3	800	2 400
Теплове реле РТ-1314	1	900	900

Автоматичний вимикач Аско-Укрем ВА-3017	4	400	1 600
Проміжне реле	3	600	1 800
Щит керування (корпус, арматура)	1	12 000	12 000
Кабельна продукція (Одескабель)	—	—	28 000
Монтажні матеріали, дрібні комплектувальні	—	—	6 300
Разом обладнання та матеріали			150 000
Монтажні роботи (кабельні траси, збирання й установлення щита)			180 000
Пусконаладження (налаштування МІК-21, ПІД, перевірка)			50 000
Навчання персоналу			8 000
Проектні роботи			12 000
Усього капітальних витрат			400 000

Найбільшу частку капітальних витрат становлять монтажні роботи — прокладання кабельних трас по всій площі теплиці (1 га), збирання та встановлення щита керування — і пусконаладження системи (налаштування регулятора МІК-21, перевірка контурів). Сумарні капітальні витрати на впровадження системи:

$$K_{\text{впр}} = 150\,000 + 180\,000 + 50\,000 + 8\,000 + 12\,000 = 400\,000 \text{ грн} \quad (5.6)$$

5.5 Витрати за автоматизованого керування

Точне автоматичне підтримання температури та усунення перегрівів зменшує споживання природного газу. Прийнято консервативну оцінку економії 5 % порівняно з наявним рівнем регулювання. Витрати на газ за автоматизованого керування:

$$B_{\text{газ.а}} = 0,95 \cdot B_{\text{газ}} = 0,95 \cdot 12\,412\,281 = 11\,791\,667 \text{ грн} \quad (5.7)$$

Потреба в ручному контролі суттєво зменшується — за оператором залишається періодичний нагляд (близько 25 % попередніх витрат праці): $V_{пр.а} = 0,25 \cdot 240\,000 = 60\,000$ грн. Додатково враховуємо витрати на утримання системи автоматики (технічне обслуговування та спожиту приладами електроенергію) $V_{утр} \approx 12\,000$ грн. Загальні річні витрати за автоматизованого керування:

$$V_{авт} = V_{газ.а} + V_{пр.а} + V_{утр} = 11\,791\,667 + 60\,000 + 12\,000 = 11\,863\,667 \text{ грн} \quad (5.8)$$

5.6 Економічний ефект від впровадження

Річна економія від упровадження системи автоматизації:

$$E_{річ} = V_{ручн} - V_{авт} = 12\,652\,281 - 11\,863\,667 = 788\,614 \text{ грн} \quad (5.9)$$

Середньомісячна економія становить $E_{міс} = 788\,614 / 12 \approx 65\,718$ грн.

Термін окупності капітальних витрат:

$$T_{ок} = \frac{K_{впр}}{E_{річ}} = \frac{400\,000}{788\,614} \approx 0,51 \text{ року } (\approx 6 \text{ міс}) \quad (5.10)$$

Термін окупності близько півроку є цілком прийнятним для систем промислової автоматизації й досягається завдяки економії природного газу та скороченню витрат ручної праці. Навіть за консервативної оцінки економії газу (5 %) капітальні витрати окупаються протягом одного опалювального сезону. Отже, упровадження системи автоматичного керування температурним режимом теплиці є економічно доцільним.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розв'язано актуальну інженерну задачу — розроблено автоматизовану систему керування температурним режимом блочної теплиці площею 1 га для вирощування солодкого перцю, що забезпечує підтримання оптимального мікроклімату за одночасного зниження енерговитрат. За результатами виконаної роботи зроблено такі висновки:

1. Проаналізовано теплицю як об'єкт керування та обґрунтовано температуру повітря як основний регульований параметр (22–26 °С удень та 18–20 °С уночі). Визначено розрахункові тепловтрати споруди (≈ 1415 кВт) і розроблено функціональну схему одноконтурної системи автоматичного регулювання з керуванням подачею теплоносія через триходовий клапан і допоміжним відведенням тепла вентиляційними фрамугами.

2. Побудовано математичну модель об'єкта на основі рівнянь теплового балансу із зосередженими параметрами (дві енергетичні ємності — теплоносій і повітря теплиці). За розгінною характеристикою, отриманою в середовищі MATLAB Simulink, об'єкт ідентифіковано як інерційну ланку першого порядку із транспортним запізненням з параметрами $K_0 = 0,68$; $T_0 = 1100$ с; $\tau = 350$ с, а його передатна функція має вигляд $W(s) = 0,68 \cdot e^{-350s} / (1100s + 1)$.

3. Обґрунтовано вибір вітчизняного мікропроцесорного регулятора МІКРОЛ МІК-21 і синтезовано трипозиційний ПД-закон керування з параметрами $K_p = 18,2$; $T_i = 1250$ с; $T_d = 132$ с та його цифрову реалізацію з періодом квантування $T = 13,7$ с. Показники якості перехідного процесу (статична похибка 0 %, перерегулювання ≈ 0 % за монотонного процесу, час регулювання ≈ 2500 с) задовольняють технологічні вимоги.

4. Підібрано засоби автоматизації: первинний перетворювач температури Е+Е ЕЕ160 з уніфікованим струмовим сигналом 4...20 мА, триходовий регулюючий клапан Belimo H780N з реверсивним електроприводом Belimo

EV230A-TPC (трипозиційне керування) та циркуляційний насос Wilo TOP-S 80/15 DM.

5. Розроблено електротехнічну частину системи: розраховано й вибрано комутаційну та захисну апаратуру (магнітні пускачі «Промфактор», автоматичні вимикачі «Аско-Укрем», теплове реле), а також кабельну продукцію виробництва «Одескабель» (ВВГнг, КВВГЕ, провід ПВ-3). Виконано принципову електричну схему, схеми з'єднань і підключень та компонування щита керування.

6. Техніко-економічним обґрунтуванням підтверджено доцільність упровадження системи: капітальні витрати становлять 400 тис. грн, річна економія за консервативної оцінки (5 %) — близько 789 тис. грн, а термін окупності — приблизно 6 місяців. Оскільки опалення формує переважну частку собівартості тепличної продукції, досягнута економія безпосередньо впливає на рентабельність господарства.

7. Мету роботи досягнуто: розроблена система технічно обґрунтована та економічно доцільна, забезпечує точне й стабільне підтримання температурного режиму й побудована переважно на обладнанні вітчизняного та європейського виробництва, що підвищує надійність рішення та зменшує залежність від імпортних комплектувальних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1.Лисенко В.П., Дудник А.О., Мірошник В.О., Руденський А.А., Заєць Н.А. Основні методи та методики підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра: навчальний посібник. Київ: Компрінт, 2023. 303с.
- 2.Головінський Б.Л., Шуруб Ю.В., Лисенко В.П. Теорія автоматичного управління: навчальний посібник. Київ: Видавничий центр НУБіП України, 2012. 240с.
- 3.Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: підручник. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ: Либідь, 2007. 656с.
- 4.Ладанюк А.П., Архангельська К.С., Власенко Л.О. Теорія автоматичного керування технологічними об'єктами: навчальний посібник. Київ: НУХТ, 2014. 297с.
- 5.Голюк П.Ф., Гречин Т.М. Теорія автоматичного керування: навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. 280с.
- 6.Лавріненко Ю.М., Марченко О.С., Савченко П.І., Синявський О.Ю., Войтюк Д.Г., Лисенко В.П. Електропривод: підручник / за ред. Ю.М.Лавріненка. Київ: Видавництво «Ліра-К», 2009. 504с.
- 7.Лисенко В.П., Заєць Н.А., Штепа В.М., Дудник А.О., Болбот І.М. Інтелектуальні системи керування біотехнічними об'єктами: навчальний посібник. Київ: Видавничий центр НУБіП України, 2017. 218с.
- 8.Ладанюк А.П., Трегуб В.Г., Ельперін І.-В. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: підручник. Київ: Аграрна освіта, 2013. 410с.
- 9.Кафедра автоматики та робототехнічних систем ім.акад.І.І.Мартиненка: офіційний сайт. URL: <https://nubip.edu.ua/node/1376> (дата звернення: 15.05.2026).
10. Освітньо-професійна програма «Автоматизація, комп'ютерно інтегровані технології та робототехніка» першого (бакалаврського) рівня вищої

освіти: освітня програма. Київ: НУБіП України, 2023. 28с. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u37/osvitnoprofesiyna_programa_avtomatizaciya_ta_kompyuterno-integrovani_tehnologiyi_os_bakalavr.pdf (дата звернення: 15.05.2026).

11.ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування: державні будівельні норми України. Київ: Мінрегіон України, 2013. 149с.

12.ДБН В.2.2-2:2008. Будинки і споруди. Теплиці і парники: державні будівельні норми України. Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. 36с.

13.ДБН В.2.5-23 [13]:2010. Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення: державні будівельні норми України. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 64с.

14.ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель: державні будівельні норми України. Київ: Мінрегіон України, 2021. 71с.

15.Правила улаштування електроустановок. 5-те вид., перероб. і доп. Київ: Міненерговугілля України, 2017. 617с.

16.ДСТУ EN 60751:2017. Промислові платинові термоперетворювачі опору та платинові датчики температури (EN-60751:2008, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 32с.

17.ДСТУ EN 61131-3:2017. Контролери програмовані. Частина 3. Мови програмування (EN-61131-3:2013, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 286с.

18.ДСТУ Б EN 13779:2011. Вентиляція громадських будівель. Вимоги до виконання систем вентиляції та кондиціонування повітря (EN-13779:2007, IDT). Київ: Мінрегіон України, 2011. 76с.

19.Дудник А.О. Системи автоматизованого керування мікрокліматом промислових теплиць: монографія. Київ: ЦП «Компринт», 2019. 196с.

20.Гайдук С.М., Соколовська Г.В. Технологія вирощування овочів у захищеному ґрунті: навчальний посібник. Київ: Аграрна освіта, 2015. 384с.

21.Тепличне овочівництво України: довідник / Ю.М.Бондаренко та ін. Київ: Урожай, 2020. 256с.

22.МІК-21. Мікропроцесорний регулятор: керівництво з експлуатації. Івано-Франківськ: НВП «МІКРОЛ», 2023. 48с. URL: <http://www.microl.ua> (дата звернення: 18.05.2026).

23.EE160 Humidity and Temperature Sensor for HVAC: technical datasheet. E+E-Elektronik Ges.m.b.H., Engerwitzdorf, Austria, 2024. 16p. URL: <https://www.epluse.com/products/humidity-instruments/humidity-transmitters-for-hvac/ee160/> (дата звернення: 18.05.2026).

24.H780N. 3-Way Globe Valve, DN-80, PN-16, Kvs100m³/h: technical datasheet. Belimo Automation AG, Hinwil, Switzerland, 2024. URL: https://www.belimo.com/at/shop/en_GB/Valves/Globe-Valves/H780N/p?code=H780N (дата звернення: 19.05.2026).

25.EV230A-TPC. Globe Valve Actuator (two-/three-point control, 100...240 B): technical datasheet. Belimo Automation AG, Hinwil, Switzerland, 2024. URL: https://www.belimo.com/mam/general-documents/datasheets/en-gb/belimo_EV230A-TPC_datasheet_en-gb.pdf (дата звернення: 19.05.2026).

26.Циркуляційні насоси Wilo-Stratos: технічний каталог. WILO Ukraine LLC, 2024. URL: <https://wilo.com/ua/uk/> (дата звернення: 19.05.2026).

27.Автоматичні вимикачі серії ВА: технічний каталог. Корпорація АСКО-УКРЕМ, Київ, 2024. URL: <https://www.аско.ua> (дата звернення: 19.05.2026).

28.Магнітні пускачі серії FC: технічний каталог. ТОВ «Промфактор», Україна, 2024. URL: <https://promfactor.com> (дата звернення: 19.05.2026).

29.Modbus Application Protocol Specification V1.1b3: technical document. Modbus Organization, Hopkinton, USA, 2012. 50p. URL: <https://modbus.org/specs.php> (дата звернення: 19.05.2026).

30.MATLAB та Simulink: середовище імітаційного моделювання: документація. The MathWorks Inc., Natick, USA, 2024. URL: <https://www.mathworks.com/help/> (дата звернення: 19.05.2026).

ДОДАТКИ