

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Розробка та дослідження автоматизованої системи керування процесом
перерозподілу теплової енергії для розмороження теплообмінників технологічного
обладнання

Виконав: студент

VI курсу, групи КАМ-61

спеціальності

174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка
(шифр і назва спеціальності)

Керівник

Микулик Д.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Медвідь В.Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Козбур І.Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент

Савків В.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тотосько О.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)

Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Савків В.Б.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

« » 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(шифр і назва спеціальності)

Студенту Микулику Денису Петровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розробка та дослідження автоматизованої системи керування процесом перерозподілу теплової енергії для розмороження теплообмінників технологічного обладнання

Керівник роботи Медвідь Володимир Романович, канд. техн. наук, доцент кафедри АВ
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «11» жовтня 2024 року № 4/7-1076

2. Термін подання студентом завершеної роботи 26 грудня 2024р.

3. Вихідні дані до роботи Технічні вимоги щодо системи розмороження

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

Аналітична частина

Технологічна частина

Конструкторська частина

Науково-дослідна частина

Спеціальна частина

Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Титульний слайд

Актуальність роботи

Завдання роботи

Основна частина

Висновки

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина			
Охорона праці та			
безпека в надзв. ситуаціях			

7. Дата видачі завдання 15 жовтня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Микулик Д.П.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Медвідь В.Р.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра складається з пояснювальної записки та графічної частини (ілюстративний матеріал – слайди).

Об'єм графічної частини дипломної роботи становить _____.

Об'єм пояснювальної записки складає ____ друкованих сторінок формату А4.

В роботі використано ____ літературних джерел.

Встановлено доцільність використання моделі прогнозного контролю для керування системами сніготанення з використанням теплообмінників і нагрітої рідини для танення снігу. Були запропоновані різні моделі системи, одна з яких була обрана як основа для розробки МРС. Модель було розроблено з використанням Simulink як середовища моделювання, що забезпечує гнучкість на етапі тестування.

Прогнозований контроль було налаштовано на дані системи танення снігу, зібрані як з історичних даних, так і з тестів крок/відповідь, які дійсно дозволяють отримати інформацію про динаміку системи. Ці дані не є оптимальними для підгонки моделі та системи керування, але достатні для тестування.

Розроблену систему було протестовано в симульованому середовищі, де імітується прогноз опадів. Різниця у споживанні енергії для 11 випадків, коли МРС перевершує PID, коливається від 8,6 кВт-год до 108,4 кВт-год, у середньому 38,3 кВт-год для всіх 12 тестових випадків.

Ключові слова: КОНТРОЛЕР, ТЕПЛООБМІННИК, ЗВОРОТНИЙ ЗВ'ЯЗОК, КЕРУВАННЯ, ТАНЕННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	7
1.1 Загальна характеристика процесу.	7
1.2. Постановка задачі досліджень	12
1.3. Теоретичні основи системи забезпечення сніготанення.....	14
2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА.....	21
2.1 Базові компоненти системи.....	21
2.2. Збір даних	25
3 КОСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	27
3.1 Дані вимірювань	27
3.2 Синтез моделі прогностного контролю	30
3.3 Опис першого варіанту реалізації.....	32
3.4 Опис другого варіанту реалізації.....	35
3.5 Опис третього варіанту реалізації	37
3.6 Опис четвертого варіанту реалізації	38
4 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	41
4.1 Постановка задачі оптимізації	41
4.2 Цільова функція.....	42
4.3 Стандартна формула квадратичного програмування	43
4.4 Горизонт прогнозування.....	46
5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА	48

5.1. Впровадження моделі та розвиток MPC в Simulink.....	48
5.2 Реалізація на існуючих керуючих засобах.....	50
5.3 Підгонка моделювання моделі до даних пробних прогонів	54
5.4 Сигнал керування клапаном проти температури зворотної лінії первинної сторони	56
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ...	60
6.1 Вимоги охорони праці під час роботи з електроустаткуванням.....	60
6.2 Вимоги безпеки під час виконання робіт	65
6.3 Вимоги безпеки після закінчення робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування	67
6.4 Розрахунок захисного заземлення	69
ВИСНОВКИ.....	75
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	76

ВСТУП

У системах опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC) водообмінники є звичайним і центральним компонентом. Обмінники вода-вода використовуються в системах, починаючи від санітарного обладнання, де його можна використовувати для відділення теплоносія від питної води, до систем охолодження для комфортного контролю температури. Кількість теплообмінників у системі опалення, вентиляції та кондиціонування повітря залежить від конструкції системи [30, 31, 32]. Більш прості системи можуть не мати теплообмінників, наприклад система водяного опалення з електричним котлом і одноконтурною. Для більш складних систем може виникнути потреба в одному або кількох водообмінниках, наприклад, система водяного опалення, що складається з централізованого теплопостачання та двох контурів опалення. У цьому прикладі один водоводяний теплообмінник може бути використаний для відокремлення централізованого опалення від місцевої системи, а інший – для відокремлення основного контуру від одного з контурів опалення через різні робочі точки температури.

Широке використання теплообмінників типу «вода-вода» в системах опалення, вентиляції та кондиціонування підвищує потенціал більш плавної роботи та потенційної економії завдяки покращеному контролю [33, 34].

Водо-водяні теплообмінники є звичайним компонентом систем сніготанення на основі рідини. Точніше, водо-спиртові обмінники, оскільки рідина на стороні плавлення обміну має бути морозостійкою. Ці системи сніготанення споживають багато електроенергії, тому бажано оптимально керувати ними. Необхідність роботи системи сніготанення залежить від погоди, але не тільки від того, чи йде сніг, а й від температури та вологості повітря. Оскільки вартість експлуатації системи сніготанення є високою, бажано, щоб час роботи такої системи був мінімальним і щоб вона працювала оптимальним чином.

1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Загальна характеристика процесу.

Згідно з дослідженням енергоспоживання системи сніготанення, необхідна потужність становить від 175 Вт/м^2 до 350 Вт/м^2 . При проектуванні даної системи необхідна потужність передбачалася приблизно 250 Вт/м^2 . Система сніготанення, про яку йдеться, розрахована на видачу $27,5 \text{ кВт}$ електроенергії на ділянку площею близько 110 м^2 . Порівняно з іншими системами опалення в комерційних будівлях потрібна висока потужність на таку площу [35, 36, 37, 38]. Для багатоквартирних будинків потужність, необхідна для опалення приміщень, становить $20 - 40 \text{ Вт/м}^2$.

Крім того, накопичувальний ефект під час танення снігу є низьким, і коли система закінчує танути сніг, майже не зберігається енергія до наступного періоду снігопаду. Система підлягає періодичному використанню з швидкою зміною параметрів, порівняно з опаленням приміщення, яке постійно працює з відносно невеликими змінами параметрів.

Враховуючи високе енергоспоживання та той факт, що параметри системи швидко змінюються порівняно з іншими системами опалення, вентиляції та кондиціонування, що базуються на температурі, існує потенціал економії енергії та покращення продуктивності за рахунок оптимізації керування системою. Завдяки оптимізації керування системою танення снігу кількість енергії, що передається, може бути мінімізована, водночас доставляючи необхідну кількість, і таким чином мінімізує витрати на експлуатацію. Якщо час, необхідний для роботи системи, можна скоротити, це може призвести до зменшення енергії, що втрачається в навколишнє середовище, поки система не тане сніг [39, 40, 41].

Система, яка використовуватиметься для спостереження та випробувань, є системою танення снігу, яка покриває територію поперечним

перерізом приблизно 110 м². Система сніготанення складається з теплообмінника вода-вода, насоса на вторинній стороні, теплообмінника вода-вода та триходового клапана. Давачі температури є на вході та виході водо-водяного теплообмінника, як на первинній, так і на вторинній стороні. Крім того, є набір давачів, встановлених у бруківці та на бруківці. Давачі температури на первинній стороні пов'язані з давачем потоку, а в поєднанні складають лічильник електроенергії. Ілюстрацію системи можна побачити на рис. 1.1. Первинна сторона складається з усього, що залишилося від теплообмінника вода-вода, а вторинна сторона складається з усього, що знаходиться праворуч від нього [42, 43]. Джерелом нагрітої води, яка доступна на первинній стороні теплообмінника вода-вода, є тепловий насос вода-вода. Цей тепловий насос отримує енергію з землі через енергетичні колодязі. Це рішення є економічним варіантом порівняно з використанням простого джерела електроенергії, але має недолік, що максимальна температура, що подається, обмежена 55°C.

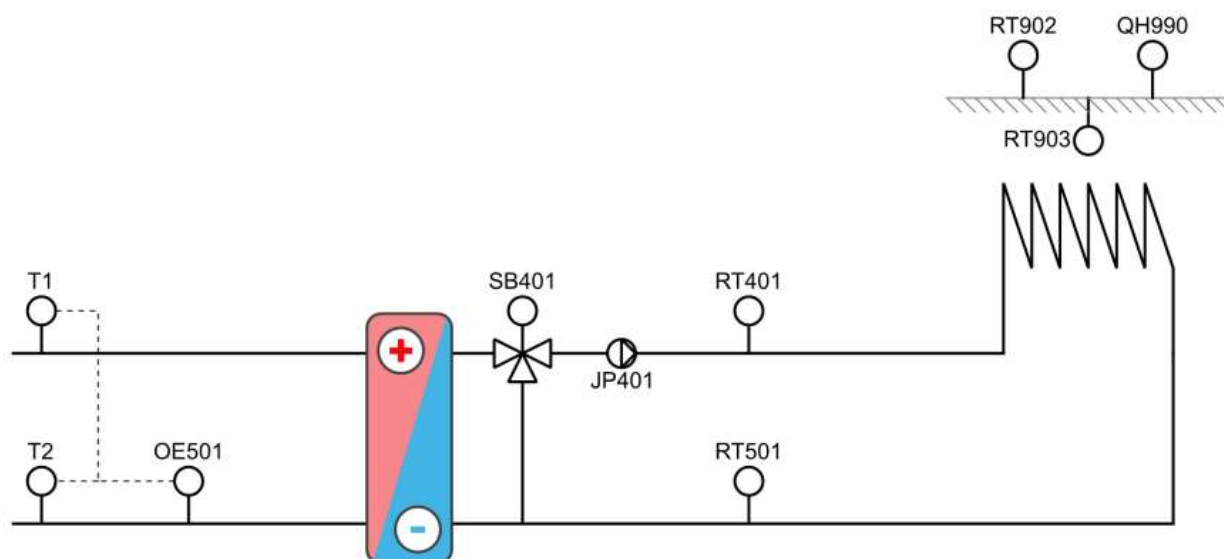


Рисунок 1.1 - Ескіз системи сніготанення з приладами.

В якості резерву воду можна нагріти за допомогою електричного бойлера. Його можна використовувати у випадках, коли тепловий насос

несправний або для обробки піків споживання енергії. Пікове споживання енергії можна пов'язати з системою танення снігу, оскільки це процес, що споживає високу енергію, і активний протягом обмежених інтервалів часу.

На вторинній стороні теплообмінника вода-вода середовищем є суміш води та спирту, це необхідно для того, щоб труби не замерзали. В ідеальних умовах температура теплоносія не опускається нижче 0°C, але існує ризик, тому потрібна рідина, яка має нижчу температуру замерзання, ніж вода [43, 44, 45].

Доступні вимірювання пов'язані з раніше згаданим приладом. Перелік доступних вимірювань можна побачити в таблиці 1.1. На первинній стороні є два вимірювання температури, подачі (T1) і повернення (T2), і один витратомір (OE501) на зворотній стороні. Ці давачі разом видають енергію, витягнуту в теплообміннику вода-вода. На вторинній стороні є два вимірювання температури, подача (RT401) і зворот (RT501). Насос (JP401) на вторинній стороні має ряд внутрішніх давачів і видає вимірювання температури подачі, витрати, тиску та споживання електроенергії. Три давачі, розташовані в бруківці та на бруківці, є двома давачами температури, один для температури ґрунту (RT903), а інший для температури поверхні (RT902). Останній давач – детектор вологості (QH990), розташований на поверхні бруківки. Ці три давачі є частиною компонента.

Поточна система керування для системи танення снігу базується на пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) контролерах і визначенні уставки на основі прогнозів погоди. ПІД-регулятори організовані в каскадному порядку з головним контролером і підлеглим контролером. Підлеглий контролер керує триходовим клапаном (SB401), щоб забезпечити бажану температуру зворотної лінії на вторинній стороні, виміряну датчиком температури RT501. Задане значення для підлеглого контролера задається головним контролером. Головний контролер контролює задане значення для

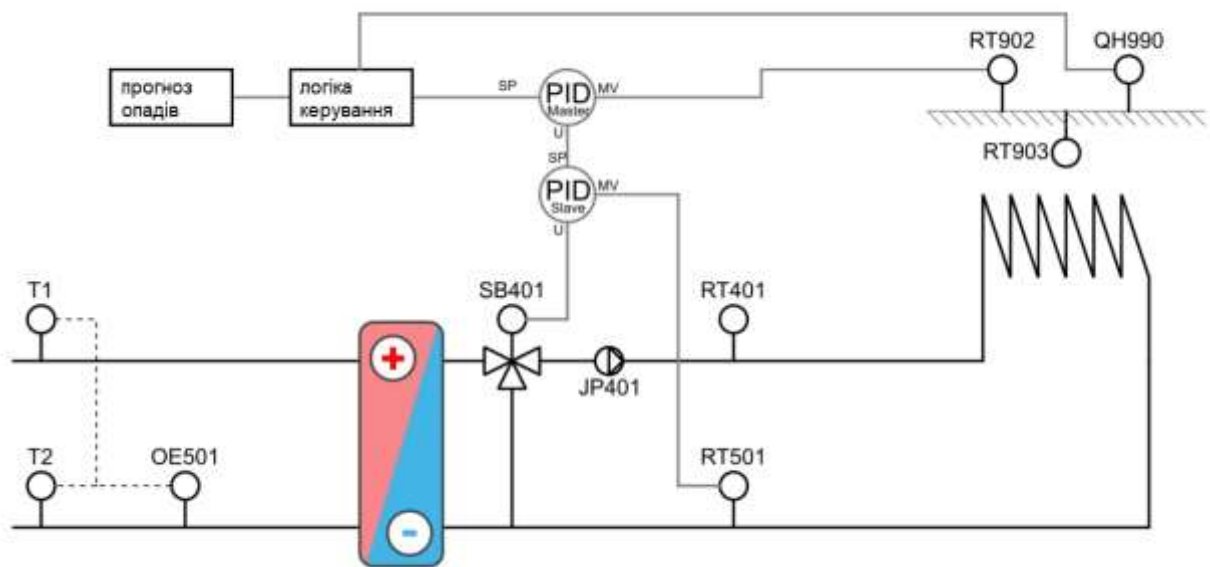
підлеглого, щоб забезпечити бажану температуру на поверхні бруківки, виміряну давачем температури RT902.

Головний контролер отримує задане значення від логічного блоку керування, використовуючи прогноз погоди та детектор вологості для визначення заданого значення. Ілюстрацію системи можна побачити на рис. 1.2

Система сніготанення має п'ять режимів роботи, що визначаються логічним керуванням. Ці режими залежать від прогнозованого дощу/снігопаду, прогнозованої температури та визначення вологості на бруківці.

Таблиця 1.1 – Список виміряних змінних від системи сніготанення.

змінна	Тег	Одиниця	Точність
Температура подачі первинної сторони	T1	°C	±0,4%
Температура зворотної лінії первинної сторони	T2	°C	±0,4%
Температура вторинної сторони подачі	RT401	°C	±0,3°C
Температура вторинної сторони подачі	RT501	°C	±0,3°C
Температура поверхні тротуару	RT902	°C	±0,3°C
Температура дорожнього покриття	RT903	°C	±0,3°C
Температура зовнішнього повітря	RT901	°C	±0,3°C
Вологість поверхні тротуару	QH991	Увімкнення/ вимкнення	
Первинний бічний потік	OE501	м ³ /год	±0,15%
Вторинний бічний потік	JP401	м ³ /год	—



Режими є наступними:

- Неактивний: коли немає потреби в таненні снігу, а прогноз погоди не передбачає дощ/снігопад. У цьому режимі ПІД-регулятори вимкнено, а клапан примусово закривається. Насос зупинено. Для всіх інших режимів насос працює та забезпечує постійний потік.
- Попередній нагрів низький: коли прогноз погоди вказує на те, що протягом наступних 12 годин буде дощ, а температура за прогнозами буде нижче певного рівня протягом того самого періоду часу. У цьому режимі активуються ПІД-контролери і запускається насос. Задане значення температури поверхні бруківки, вимірюється RT902, встановлено на X°C. Цей режим призначений для попереднього прогріву бруківки.
- Сильний попередній нагрів: прогноз погоди вказує на те, що протягом наступних 6 годин буде дощ/снігопад, а за прогнозами температура буде нижче X°C протягом того самого періоду часу. У цьому режимі ПІД-контролери активні, насос працює, а задане значення температури поверхні, виміряної RT902, встановлено на X°C. Цей режим призначений для пізнього прогріву тротуару.

- Танення: зовнішня температура нижче $X^{\circ}\text{C}$, а детектор вологості QN990 виявляє сніг/дощ. У цьому режимі ПД-контролери активні, насос працює, а задане значення температури поверхні тротуару, виміряної RT902, встановлено на $X^{\circ}\text{C}$.

- Захист від замерзання роси: очікується, що найближчими годинами температура впаде нижче точки роси, і температура настільки низька, що роса замерзне на бруківці та утворить шар льоду.

Насос JP401 керується вмиканням/вимиканням зовні (системою керування) і має внутрішнє регулювання швидкості, що означає, що насос забезпечує постійний потік суміші.

Ця філософія керування базується на досвіді та попередніх дослідженнях і зазвичай не налаштована для конкретної системи. Час активації попереднього нагріву, 12 годин для низького рівня та 6 годин для високого, є обґрунтованим припущенням щодо того, як рано потрібно розпочати підігрів, щоб попередньо нагріти бруківку та технологічні поверхні, щоб вони були достатньо гарячими, для забезпечення процесу танення снігу, коли він потрапляє на поверхню, і не дозволити йому накопичуватися.

1.2. Постановка задачі досліджень

Дані про прогноз погоди збираються з рішення інтерфейсу прикладного програмування (API), наданого Норвезьким метеорологічним інститутом [46, 47]. Прогнозовані дані надаються для наступних інтервалів: наступні 1-6 годин, наступні 6-12 годин, наступні 12-18 годин, наступні 18-24 години, наступні 24-30 годин, наступні 30-36 годин, наступні 36-42 години годин і наступні 42-48 годин. Для поточної системи контролю для визначення режимів використовуються лише наступні 1-6 та 6-12 годин.

Першим завданням є отримання математичної моделі системи теплообмінника вода-вода, придатної для прогнозного керування. Це не буде досягнуто, якщо досліджувати наявні роботи над моделями теплообмінників типу вода-вода, які можуть представляти систему, про яку йде мова [48, 49, 50]. Модель має базуватися на змінних, які можна отримати за допомогою наявних інструментів або з припущень.

Друге завдання полягає в тому, щоб перевірити поведінку моделі системи обміну вода-вода шляхом підгонки моделі до даних, отриманих від відповідної системи танення снігу. Дані можна отримати, запустивши тестову послідовність на системі танення снігу.

Третє завдання полягає в аналізі системи танення снігу теплообмінника типу вода-вода, щоб визначити, які змінні оптимізувати для покращення контролю. Буде виконано техніко-економічне обґрунтування можливості реалізації задачі оптимального керування на основі наявних вимірювань і сигналів керування.

Четверте завдання полягає в тому, щоб спочатку використати встановлену модель системи водо-водяного теплообмінника для створення моделі прогнозованого керування (MPC). Ця модель повинна контролювати систему оптимальним чином, щодо змінної, яку було знайдено для оптимізації [51, 52, 53]. Тоді можна визначити продуктивність контролера відносно існуючої реалізованої філософії керування.

П'яте завдання полягає в аналізі економічної вигоди від впровадження контролера на основі моделі. Буде визначено, чи вартість впровадження MPC може бути виправдана збереженням використанням енергії. Слід брати до уваги очікуваний термін служби системи. Необхідно розглянути коригування, необхідні для MPC у разі зміни контрольного обладнання, і витрати на здійснення цих коригувань повинні бути прийняті до уваги під час аналізу здійсненності.

Для цього необхідно вирішити такі завдання:

- Розглянути напрацювання про різні способи використання та налаштування водо-водяних теплообмінників в установках HVAC.
- Провести дослідження того, які змінні можна оптимізувати в системі сніготанення.
- Створити математичну модель теплообмінника з метою імітації його поведінки. Модель може бути описана за допомогою нелінійних диференціальних рівнянь, звичайних диференціальних рівнянь або першого порядку плюс мертвий час. Необхідно дослідити можливість використання системної ідентифікації для отримання математичної моделі.
- Модель має бути адаптована до даних, зібраних з вибраної системи. Дані повинні надходити з тестових прогонів, де виконується ступінчаста відповідь.
- Розробити модель передбачуваного контролера для керування теплообмінником. Які змінні для оптимізації мають відображати знахідки під час вивчення літератури.
- Перевірити роботу контролера з допомогою симуляції та порівняти результати з моделюванням за допомогою традиційних методів керування. Використати прогноз погоди для прогнозування змін у системі та впровадження змін у задачу оптимального керування.
- Виконати економічну оцінку можливої економії.

1.3. Теоретичні основи системи забезпечення сніготанення

Водо-водяний теплообмінник — це пристрій для передачі енергії від рідини до іншої без змішування рідин.

Існує кілька типів водо-водяних теплообмінників, але ми зосередимося на пластинчастих теплообмінниках. У цих теплообмінниках рідини проходять через камери, розділені тонкими металевими пластинами. Енергія

передається від однієї рідини через металеву пластину та поглинається іншою рідиною.

Динамічна система може бути описана кількома типами математичних моделей. У центрі уваги будуть два підходи: перші принципи та перший порядок плюс мертвий час.

Модель перших принципів

Моделі основних принципів базуються на фундаментальній фізиці, яку можна використовувати для опису системи чи процесу. Перші принципи — це поняття, що описують поведінку системи, наприклад енергетичний баланс, баланс маси та інші закони фізики для виведення математичних рівнянь. [1, 15, 16]

Один із таких підходів для моделі теплообмінника вода-вода базується на тому, що енергетичний баланс використовується як основа для розробки математичної моделі водо-водяного теплообмінника, і модель може бути представлений у вигляді наступного енергетичного балансу:

$$\frac{dE}{dt} = \sum Q_{in} - \sum Q_{out} \quad (1.1)$$

Де енергія представлена E , Q_{in} представляє потік енергії в систему, а Q_{out} представляє енергію, видобуту із системи. Поділ камер водо-водяного теплообмінника на менші секції та визначення окремих енергетичних балансів, що описують обмін енергією між ними. Можна вивести набір із десяти диференціальних рівнянь, п'ять для первинної сторони і п'ять для вторинної сторони теплообмінника, які дають такі рівняння:

$$\dot{T}_{p1} = \frac{1}{c_p \rho_p (V_p/5)} (c_p w_p(t) (T_{pin} - T_{p1}) + U(A/5) (T_{sout} - T_{p1})) \quad (1.2)$$

$$\dot{T}_{sout} = \frac{1}{c_s \rho_s (V_s/5)} (c_s w_s(t) (T_{s2} - T_{sout}) - U(A/5) (T_{sout} - T_{p1})) \quad (1.3)$$

$$\dot{T}_{p_2} = \frac{1}{c_p \rho_p (V_p/5)} (c_p w_p(t) (T_{p_1} - T_{p_2}) + U(A/5) (T_{s_2} - T_{p_2})) \quad (1.4)$$

$$\dot{T}_{s_2} = \frac{1}{c_s \rho_s (V_s/5)} (c_s w_s(t) (T_{s_3} - T_{s_2}) - U(A/5) (T_{s_2} - T_{p_2})) \quad (1.5)$$

$$\dot{T}_{p_3} = \frac{1}{c_p \rho_p (V_p/5)} (c_p w_p(t) (T_{p_2} - T_{p_3}) + U(A/5) (T_{s_3} - T_{p_3})) \quad (1.6)$$

$$\dot{T}_{s_3} = \frac{1}{c_s \rho_s (V_s/5)} (c_s w_s(t) (T_{s_4} - T_{s_3}) - U(A/5) (T_{s_3} - T_{p_3})) \quad (1.7)$$

$$\dot{T}_{p_4} = \frac{1}{c_p \rho_p (V_p/5)} (c_p w_p(t) (T_{p_3} - T_{p_4}) + U(A/5) (T_{s_4} - T_{p_4})) \quad (1.8)$$

$$\dot{T}_{s_4} = \frac{1}{c_s \rho_s (V_s/5)} (c_s w_s(t) (T_{s_5} - T_{s_4}) - U(A/5) (T_{s_4} - T_{p_4})) \quad (1.9)$$

$$\dot{T}_{p_{out}} = \frac{1}{c_p \rho_p (V_p/5)} (c_p w_p(t) (T_{p_4} - T_{p_{out}}) + U(A/5) (T_{s_5} - T_{p_{out}})) \quad (1.10)$$

$$\dot{T}_{s_5} = \frac{1}{c_s \rho_s (V_s/5)} (c_s w_s(t) (T_{s_{in}} - T_{s_5}) - U(A/5) (T_{s_5} - T_{p_{out}})) \quad (1.11)$$

Це можна побачити у зв'язку з ілюстрацією на рисунку 1.3

У рівняннях 1.2 - 1.11 c_p і c_s представляють теплоємність рідин, w_p і w_s представляють потоки маси, U — коефіцієнт теплопередачі конкретного

теплообмінника, A — площа контакту між камерами, ρ_p і ρ_s представляють густину рідин.

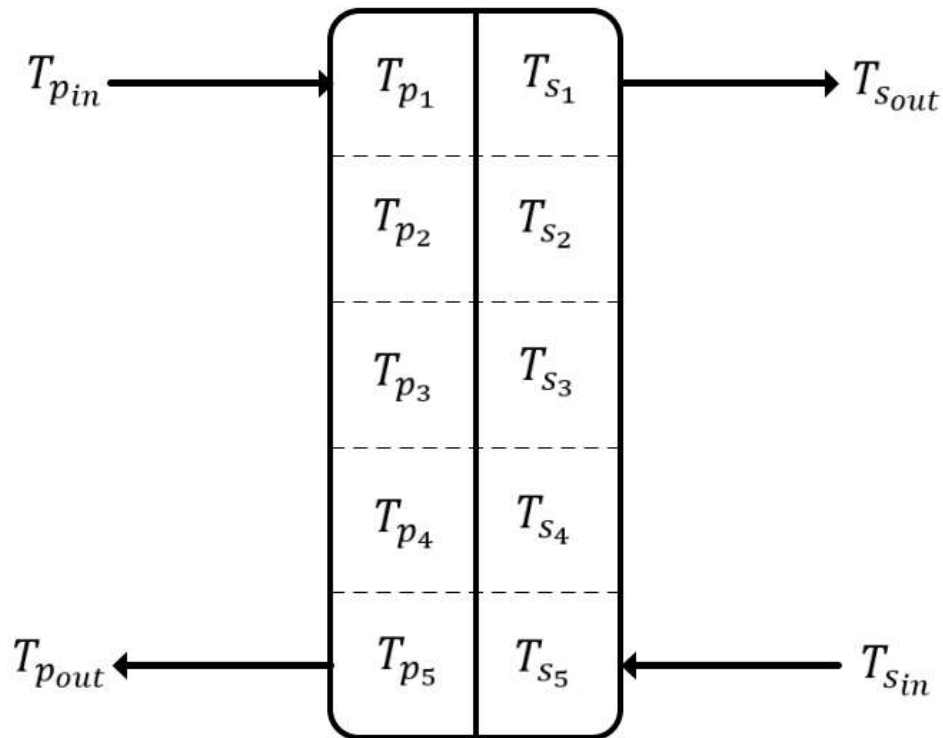


Рисунок 1.3 - спрощене схема та взаємодія між енергетичними балансами, що утворюють модель теплообмінника вода-вода.

Модель першого порядку та мертвий час.

Модель першого порядку та мертвий час (FOPDT) може описати багато динамічних процесів [54, 55]. Температурні процеси зазвичай мають такий характер, що їх можна описати моделлю FOPDT, яка визначається наступним чином [2, 17, 18]:

$$\tau_p \frac{dy(t)}{dt} = -y(t) + K_p u(t - \theta_p) \quad (1.12)$$

де K_p — коефіцієнт підсилення процесу, τ_p — постійна часу процесу, а θ_p — час зависання процесу.

Приріст процесу базується на впливі зміни вхідного $u(t)$ на вихід $y(t)$.
Приріст процесу визначається:

$$K_p = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (1.13)$$

Мертвий час, також відомий як затримка транспортування, - це час, який минув від моменту зміни вхідних даних до відповіді, яку можна побачити у вихідних даних.

Постійна часу описує, наскільки швидко працює система без урахування мертвого часу, і вимірюється часом, який потрібен від виявлення зміни вихідного сигналу до моменту, коли вихідний сигнал досягає 63,2% різниці між початковим і кінцевим стаціонарним станом.

Передавальна функція для моделі FOPDT (First Order Plus Dead Time) може бути задана:

$$G(s) = \frac{K_p e^{-t_0}}{dt} \quad (1.14)$$

Модель FOPDT може бути отримана з Перших принципів, але подальшу інформацію про це залишаємо читачеві.

Адаптація моделі.

Як для моделей First Principles, так і для моделей First Order Plus Dead Time існує потреба в адаптації моделі. Для моделей перших принципів базова поведінка системи описується фізикою та параметрами, які використовуються для розробки моделі, але все ще існує потреба адаптувати модель, щоб усунути помилку в параметрах і збуреннях, не реалізованих у моделі. Моделі First Order Plus Dead Time описані на основі трьох параметрів,

посилення процесу, постійної часу та мертвого часу [55, 56]. Ці параметри відрізняються від моделі перших принципів, яка частково задана параметрами в моделі, і їх потрібно повністю адаптувати. Існує декілька підходів до підгонки моделі як аналітично, так і математично. Поширеним методом є регресія, яку можна використовувати як для лінійних, так і для нелінійних систем. Іншим поширеним методом є ручне налаштування моделей на основі графіків [3, 19, 20, 21].

Ідентифікація системи.

Ідентифікація системи — це метод отримання моделей системи, зазвичай фізичних або економічних, на основі даних вимірювань, отриманих із системи. Ідентифікація системи використовує статистичні методи для створення математичної моделі. Існують різноманітні способи підходу до ідентифікації системи, але найпоширеніший метод називається «Чорна скринька» та коли те, що відбувається всередині системи, невідомо, а математичні моделі будуються лише на основі поведінки входів і виходів системи. Інший підхід називається сірим ящиком, і на відміну від методів чорного ящика, те, що відбувається всередині системи, певною мірою відомо. Модель FOPDT може бути використана для такого підходу, де залежність дещо визначена, але параметри коефіцієнта підсилення процесу, постійна часу та мертвого часу є вільними змінними, які визначаються ідентифікацією системи.

Загальні методи керування (PID і каскад).

Впроваджена на даний момент філософія керування на тестовому місці базується на ПІД-контролерах. Використання PID є загальним для цих типів систем керування та вважається надійним рішенням. ПІД-регулятор — це регулятор на основі помилок, який обчислює керуючий сигнал за допомогою трьох компонентів: пропорційної частини, інтегруючої частини та похідної частини.

ПІД-регулятори організовані каскадним способом. Це спосіб керування системою з двома різними контурами регулювання з двома наборами ПІД-параметрів. Каскадне керування складається з одного зовнішнього циклу, який зазвичай повільніший і контролює основний параметр процесу, і одного внутрішнього циклу, який зазвичай швидший і контролює внутрішню змінну процесу, яка впливає на основний параметр процесу.

Модель прогнозного управління

Model Predictive Control (MPC) — це концепція керування динамічними процесами. Він використовує знання про поведінку системи у формі математичної моделі, щоб визначити відповідні контрольні виходи, щоб отримати бажану майбутню поведінку системи. MPC моделює поведінку системи для кінцевого майбутнього часового горизонту на основі поточних станів і майбутніх відомих збурень і знаходить відповідні керуючі виходи (входи в систему) для отриманих бажаних станів системи. MPC можна використовувати для керування як фізичною системою, так і абстрактними системами, такими як економічні системи. Існує багато підходів до MPC, і ступінь складності може бути різним. Однією з концепцій, до яких слід звернути увагу щодо використання MPC для керування фізичною системою, є рухомий горизонт, де проблема керування перераховується на кожному кроці в циклі керування, а горизонт прогнозування зміщується вперед із часом. Як згадувалося, концепція Moving Horizon підходить для прямого керування динамічною системою, але випадки, коли вона не застосовується, можуть бути під час використання MPC для планування довгострокових систем, таких як інвестиції.

2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Базові компоненти системи

Встановлена система керування поставляється компанією Schneider Electric, контролери належать до типу контролерів SmartX і є типом сервера автоматизації (AS). Сервери автоматизації є типом програмованого логічного контролера (PLC), але для використання в аналогових системах керування. Деякі відмінності між PLC і AS полягають у тому, що AS призначений для обробки аналогових даних і має довший час циклу. Крім того, AS має більшу ємність для зберігання даних і інтерфейсів користувача. Обладнання системи сніготанення складається з переважно добре відомих типів датчиків, таких як термістори для вимірювання температури та ультразвук для вимірювання витрати. Датчик для виявлення снігу, який називається «Snøostat», є незвичайним компонентом, який використовується лише в системах сніготанення.

Контролер

Керування реалізоване на сервері автоматизації, компанії Schneider Electric. Ця система, окрім запуску програмного забезпечення для здійснення контролю, містить датчики та виконавчі механізми системи. Він може реалізувати численні типи вводу-виводу, а також найпоширеніші шинні системи, такі як Modbus і BACnet. Давачі температури, а також Snøostat і клапан реалізовані за допомогою вводу/виводу, тоді як насос і витратомір реалізовані за допомогою Modbus.

AS, який використовується для керування системою сніготанення, є лише одним із багатьох серверів у системі, які складають систему керування HVAC для розглянутої будівлі. Поряд з іншими серверами в будівлі AS для системи сніготанення розміщено на системі нагляду під назвою Enterprise Server (ES). ES – це місце, де обробляється інтерфейс користувача, а також

контроль над серверами автоматизації, обробка сигналів тривоги, тривале журналювання та адміністрування. Зв'язок між корпоративним сервером і серверами автоматизації здійснюється за власним протоколом. AS має можливість інтегрувати інтерфейс для отримання прогнозів погоди, але з міркувань впровадження це робиться в ES. Спрощену топологію системи можна побачити на рис. 2.1.

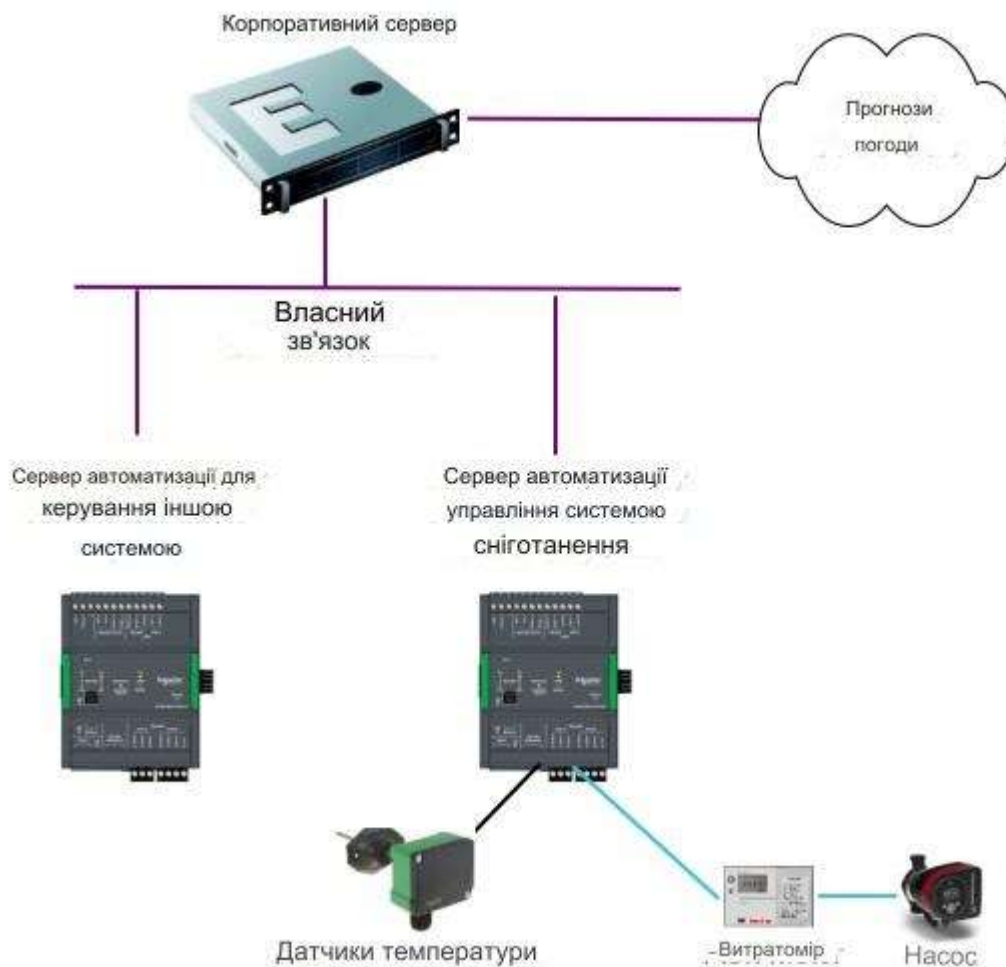


Рисунок 2.1 - Спрощена топологія структури сервера.

Польове обладнання

Система сніготанення оснащена компонентами, які є звичайними в галузі ОВК. Датчики температури мають термістор типу NTC20, що дають 10 кОм при 25°C. NTC означає негативний температурний коефіцієнт і вказує на те, що опір в сенсорному елементі обернено пропорційний температурі.

У цій системі використовуються давачі температури Schneider Electric STP100, приклад давача температури можна побачити на рис. 2.2.



Рисунок 2.2 – Давачі температури, які використовуються в системі сніготанення

Насос, встановлений на вторинній стороні системи сніготанення, є Grundfos Magna 3. Це комбінований насос і частотний перетворювач. Насос налаштований на подачу постійний потік і оснащений внутрішніми датчиками для контролю потоку. З інтеграції насоса можна зчитувати різні робочі дані, такі як швидкість і споживання енергії. Крім того, доступні дані з внутрішніх давачів [4, 22, 23, 24, 25].

Лічильник електроенергії, який використовується на первинній стороні системи сніготанення, є Kampstrup Multical 602. Цей лічильник складається з одного давача потоку та двох давачів температури. Давачі температури типу PT100. Давачі температури PT100 – це платиновий термістор, який має опір 100 Ом при 0°C, і є найпоширенішим елементом датчика температури, який використовується в промисловості. Давач потоку називається ULTRAFLOW і

є ультразвуковим датчиком. Ультразвук для вимірювання потоку здійснюється шляхом надсилання звукового імпульсу від одного вузла до іншого та вимірювання часу, який знадобився для проходження звукового імпульсу між вузлами. Оскільки звук поширюється з різною швидкістю в різних середовищах, середовище потрібно знати. Для системи сніготанення основним середовищем є вода, а звук поширюється у воді зі швидкістю 1481 м/с. Якщо середовище в лічильнику рухається, час, який потрібен від випромінювання звукового імпульсу з одного вузла до його виявлення іншим вузлом, зміниться. Якщо середовище тече від випромінюючого вузла до вузла виявлення, час, який використовує звуковий імпульс, зменшується, якщо середовище тече в протилежному напрямку, час збільшується. З цього відхилення в часі разом із фізичними розмірами давачів та іншими фізичними константами можна розрахувати потік.

Snøostat

Давач снігу під «Snøostat» — це продукт, який постачає Jan Grosh AS, розроблений виключно для використання в системах сніготанення. Пристрій складається з двох давачів температури, один встановлений на поверхні вгору на тому ж рівні, що й поверхня бруківки, а інший встановлений вниз у землі для вимірювання температури землі. Температурні елементи такого ж типу, як і для STO100. Існує також давач вологості, який використовує зміну опору для виявлення води/снігу на поверхні. На поверхні давача встановлений нагрівальний елемент для випаровування снігу та води на датчику. Нагрівальний елемент потрібен, оскільки сама система сніготанення не охоплює зону, яку охоплює Snøostat. Компоновку Snøostat можна побачити на рис.2.3.

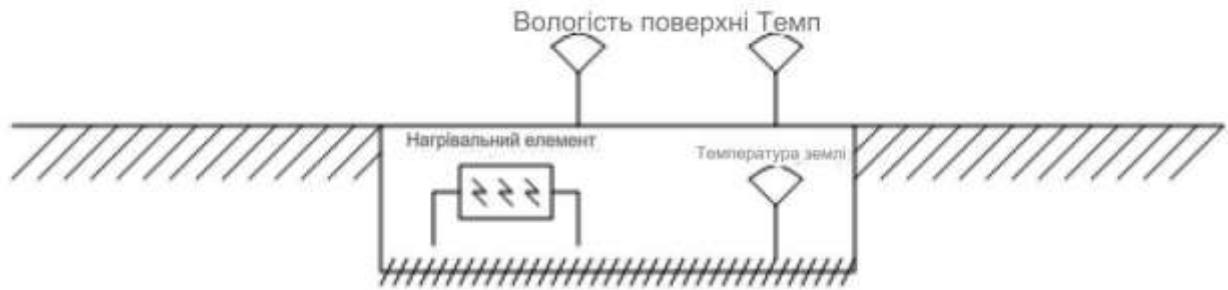


Рисунок 2.3 - Ескіз із зображенням розташування датчика Snoostat.

2.2. Збір даних

У цьому розділі обговорюється реєстрація даних вимірювань у системі керування, а також розглядається процес збору даних про погоду від Норвезького метеорологічного інституту (MET) за допомогою API.

Реєстрація даних вимірювань

Оскільки система повністю контролюється та контролюється AS, інформація про контрольні сигнали та вимірювання доступна через той самий інтерфейс. Система сніготанення та інфраструктура благоустрою працюють на початку проекту, тому доступні деякі історичні дані щодо роботи з існуючою системою контролю. Дані зберігаються в журналах трендів і доступні для відображення безпосередньо в інтерфейсі AS, або їх можна експортувати у форматі .xls/.csv для використання в іншому програмному забезпеченні. Дані реєструються або за зміною вартості (COV), або через встановлені інтервали часу.

Якість даних залежить від датчиків. Огляд вимірювань і відповідну точність можна побачити в таблиці 1.1. На додаток до помилки в датчику є певна помилка в обладнанні, яке записує вимірювання. AS є цифровим реєстратором, і зареєстровані кроки зміни вимірювання є кінцевими, що створює певну похибку у вимірюванні.

Як згадувалося, журналювання може бути запущено для запису зразка журналу на основі інтервалу часу або COV. Обмеження COV визначає,

наскільки вимірювання мають відхилятися від попереднього зразка, щоб зберегти новий зразок. Для змінних типів, що відповідають системі сніготанення; температури та витрати, COV зазвичай встановлюється на 0,5 °C/0,5 м3/год. Це потенційно додасть похибку 1,0°C/1,0м3/год до логарифмічних точок, оскільки вимірювання допускається відхилятися на $\pm 0,5^{\circ}\text{C}/\pm 0,5\text{м3/год}$ перед записом нового зразка. Ілюстрацію цього випадку можна побачити на рис. 2.4.

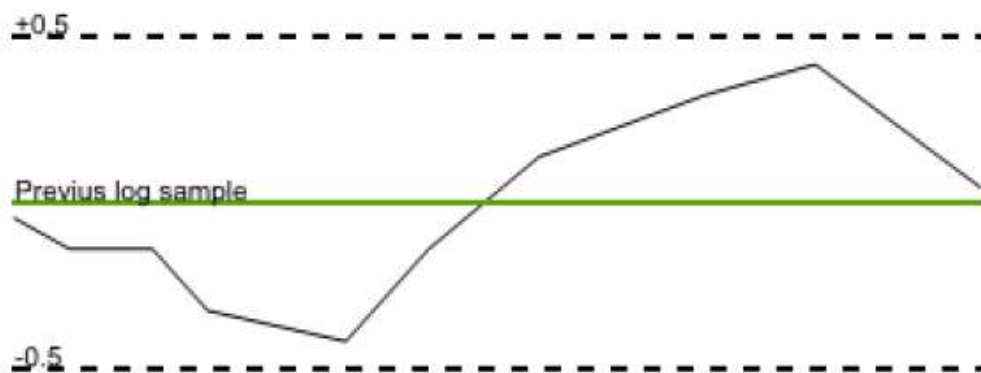


Рисунок 2.4 – Ілюстрація журналу, викликаного COV, і поведінка потенційного незареєстрованого вимірювання.

Дані про погоду

Прогнози погоди збираються від метеорологічного центру за допомогою рішення API. ES керує інтерфейсом між системою керування та погодою джерело прогнозованих даних. Як було сказано раніше, передбачення даються з інтервалом у 6 годин у майбутнє. Дані оновлюються кожні 15 хвилин, щоб перехопити можливі зміни в прогнозах.

Надійність прогнозів погоди залежить від використовуваних моделей і доступних даних вимірювань. Кажуть, що прогнозована погода має точність 80% для прогнозу на 7 днів і до 90% для прогнозу на 5 днів.

3 КОСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Дані вимірювань

В ідеалі отримання даних для пристосування моделі системи сніготанення водо-водяного теплообмінника до поведінки реальної системи було б здійснено шляхом пробних запусків в ідеальних умовах. Є дані для нормальної роботи, коли система контролюється встановленою системою керування. Це можна використовувати для ідентифікації динаміки системи, але дані забарвлені зворотним зв'язком у системі керування. Параметри в моделі FOPDT, які необхідно визначити, це коефіцієнт підсилення, мертвий час і постійна часу. Пробний запуск, який бажано провести, є кроком/відповіддю, коли система вручну переходить у стійкий стан перед тим, як керований вхід системи надає крокову зміну, і система контролюється, поки вона не досягне нового стійкого стану. Для конкретної системи потрібно оцінити, наскільки велика зміна на вході системи, у даному випадку системи керування клапаном, щоб дані показали зміни спостережуваної амплітуди. Зазвичай проводяться два випробування, в одному з яких сигнал керування клапаном збільшується на 10%, а в другому сигнал керування зменшується на 10%.

На жаль, під час дослідження не було можливості провести пробні запуски в ідеальних умовах. пробні запуски залежали від погоди, до того моменту, коли відповідна підготовка до проведення пробних запусків була завершена, відповідні дослідження та визначення, температура та снігові умови були відсутні.

На щастя, є доступні історичні дані для нормальної роботи системи сніготанення. Ці історичні дані не є такими «чистими», як дані з пробного запуску, щодо отримання мертвого часу, затримки часу та посилення, але даних буде достатньо для оцінки параметрів з метою подальших досліджень.

Історичні дані з нормальної роботи не мають чіткої дії та реакції, як крок/відповідь, але оскільки реалізована філософія керування має режими, які перемикаються між собою на основі погодних умов і вимірювань вологості, керування має поведінку, схожу на крокову поведінку в бажані задані значення.

Як приклад під час переходу між режимом Неактивний і Низький попередній нагрів. Системи лише з одним робочим режимом, який завжди активний і який використовує ПІД-регулювання, не матимуть такої ступінчастої реакції, яку можна знайти в історичних даних, якщо тільки задане значення раптово не змінюється на величину, яка спричиняє швидку зміну сигналу керування від стійкий стан до іншого. Якщо ПІД-регулятор для таких систем регулює лише помилки в системі, а не змінює задане значення, неможливо буде визначити час затримки, час затримки та посилення для системи.

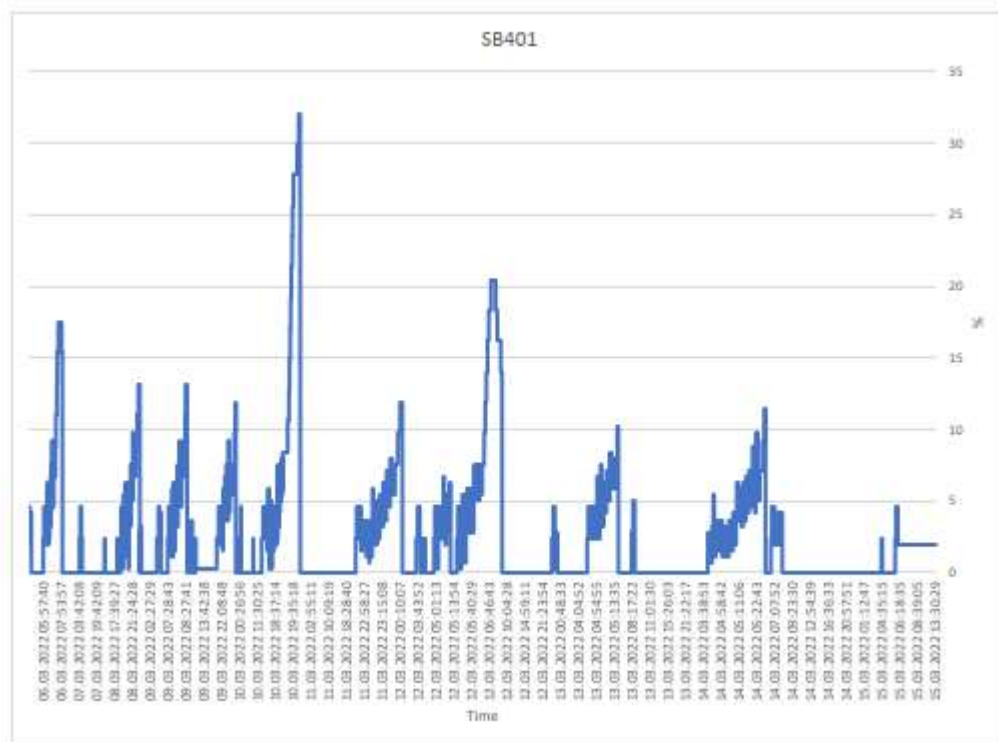


Рисунок 3.1 - Історичні дані сигналу керування для SB401

Розглянемо ближче один із описаних періодів, починаючи приблизно з 12.03.2022 05:10:00 до 12.03.2022 23:59:00 (показано на рис. 3.2) поведінку керуючого сигналу до SB401 можна розглянути більш детально. Цей сигнал підлягає управлінню ПІД-регулятором в існуючій системі керування і тому дещо коливається. В ідеалі аналіз поведінки керуючого сигналу був би кроком, але оскільки дані походять із нормальної роботи, вони недоступні. Однак, розглядаючи сигнал керування для SB401 і температуру поверхні тротуару, вимірювану RT902, взаємозв'язок можна проаналізувати приблизно. Дві змінні можна побачити разом на рис. 3.3.

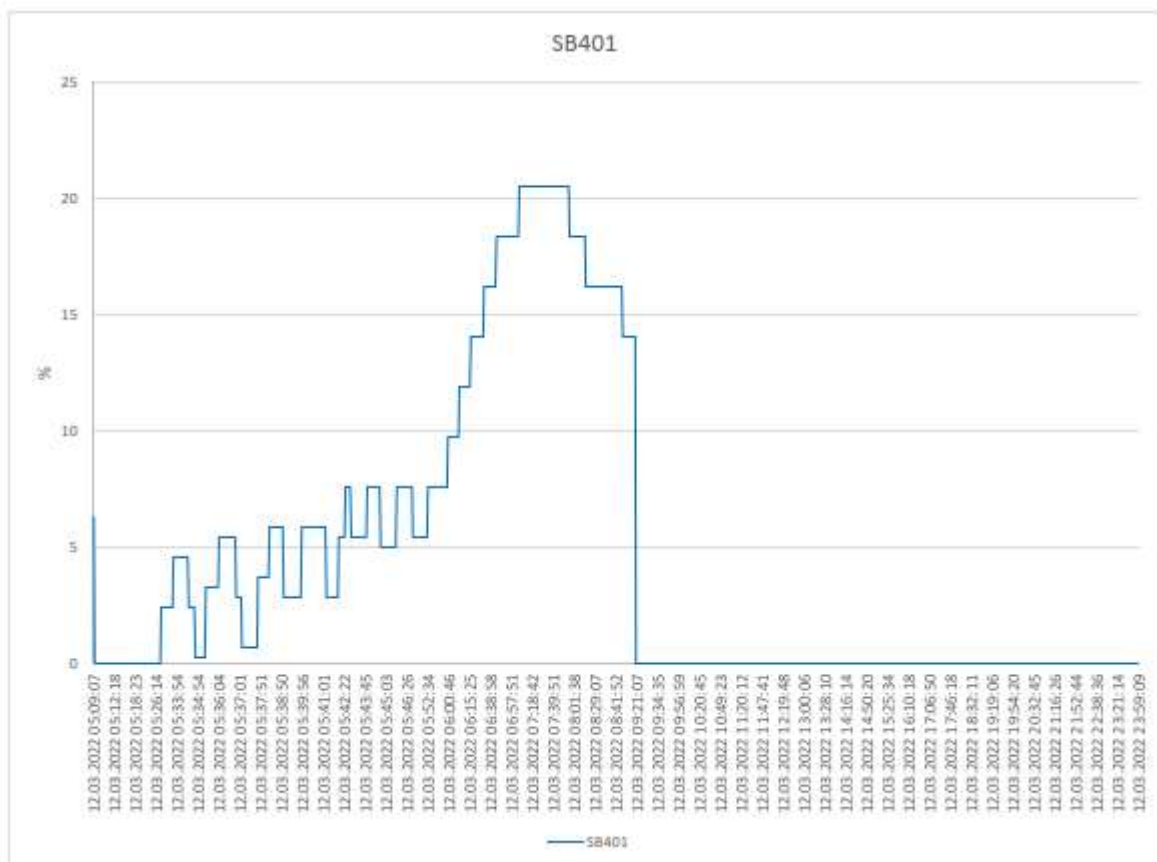


Рисунок 3.2 - Історичні дані керуючого сигналу для SB401 за період, що відображає зміну режиму роботи.

Історичних даних вимірювань недостатньо для опису поведінки первинної сторони системи танення снігу. Тому було проведено тест крок/відповідь. Випробування проводилося в умовах, коли снігопад не був

вірогідним з огляду на температуру повітря, але результатів випробування достатньо, щоб описати поведінку системи, яку неможливо отримати з історичних даних.

Дані, які тут обговорюються, будуть розглянуті більш детально під час підгонки моделі до поведінки системи танення снігу.

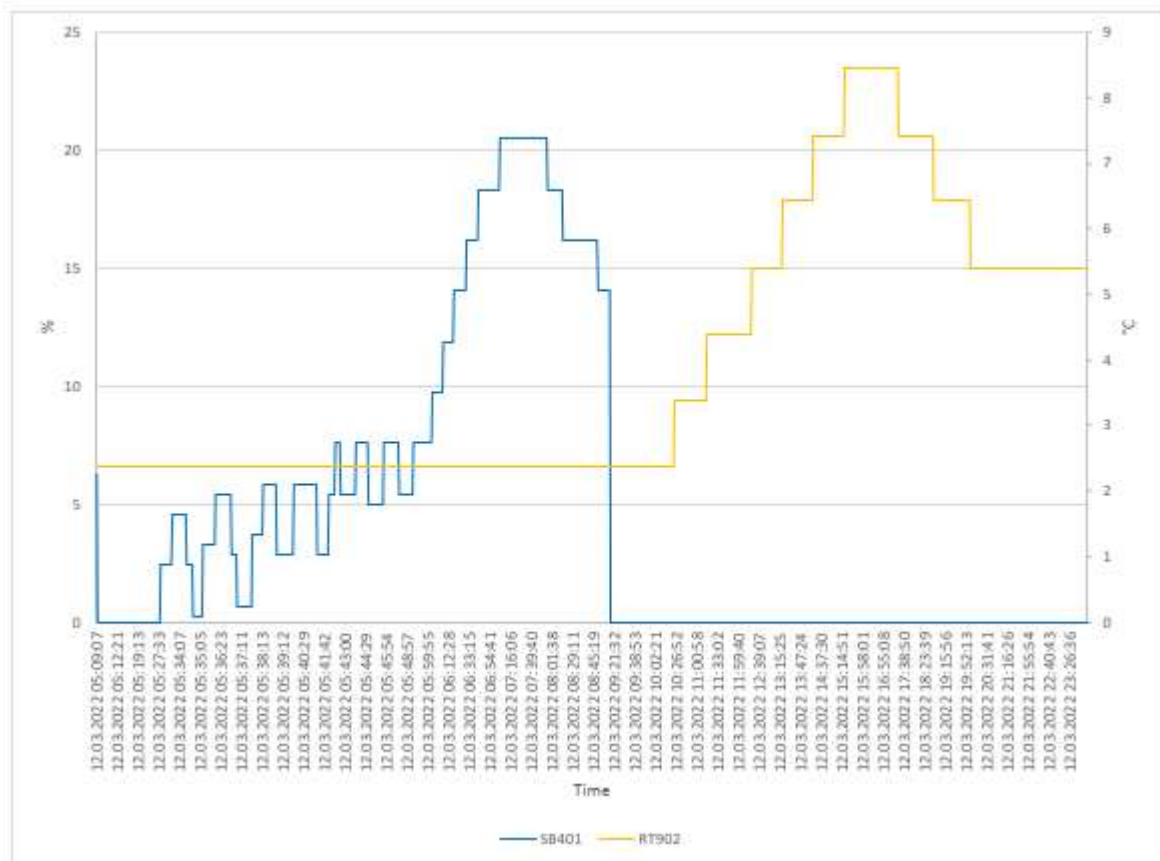


Рисунок 3.3 - Історичні дані керуючого сигналу для SB401 і температур T2 і RT902 за період, що відображає зміну режиму роботи

3.2 Синтез моделі прогностного контролю

Визначити необхідну складність контролера MPC, а потім знову складність моделі потрібен аналіз входів, станів і виходів системи. У розділі наведено огляд існуючих приладів системи сніготанення, але немає впевненості, що доступні на даний момент вимірювання є достатніми для MPC.

По-перше, важливо визначити, які змінні потрібно оптимізувати. У випадку систем сніготанення для комерційних будівель основними факторами є вартість і комфорт. Комфорт у цьому випадку полягає в тому, щоб на тротуарі не було снігу та льоду, і це можна підтримувати шляхом нагрівання тротуару для підтримки певної температури, коли ось-ось випаде сніг або є умови для конденсації води з повітря. Можна сказати, що комфорт досягається максимально за рахунок мінімізації часу, протягом якого поверхня тротуару покривається снігом або льодом. З точки зору доступних вимірювань, це коли виявляється вологість на поверхні тротуару, а температура поверхні нижче нуля. Щоб уточнити, температура може бути нижче нуля, поки тротуар сухий. Для розробки МРС увага приділяється снігопаду, а не конденсату, тому мірою комфорту буде забезпечення підігріву тротуару під час прогнозованого снігопаду.

Вартісний аспект - це в основному вартість енергії, яка використовується для підігріву тротуару. Експлуатація насоса та приводів системи пов'язана з деякими витратами, але вони незначні, і ними можна знехтувати для цього аналізу. Тоді витрати можна мінімізувати шляхом мінімізації споживання енергії. Споживання енергії системою сніготанення відбувається у вигляді теплової енергії, що постачається тепловим насосом, як описано в гл.1. Цю теплову енергію можна розрахувати за допомогою вимірювань температури первинної сторони подачі, температури зворотної лінії та потоку. Оскільки потік і температура подаються з іншої частини системи, яка призначена для доставки необхідної енергії, ці параметри можна, за бажання, вважати постійними. Це означає, що споживання енергії змінюється лише залежно від температури зворотної лінії на первинній стороні.

Слід підкреслити, що змінними, які слід включити в систему керування, можуть бути температура поверхні тротуару, температура ґрунту тротуару, визначення вологості тротуару для моніторингу комфорту, а

температура зворотної лінії первинної сторони для моніторингу енергії. Вибір змінних залежить від обраної моделі.

Для цього проекту MPC слід розглянути для заміни режимів існуючої системи керування, яка називається «Неактивна», «Попереднє нагрівання низьке», «Попереднє нагрівання високе» та «Танення».

Режим «Захист від замерзання роси» залишається для початкової системи керування або для подальшого дослідження пізніше. При необхідності режим «Танення» також можна вважати залишеним для оригінальної системи керування. Причина цього полягає в тому, що режим «Танення» визначається безпосередньо визначенням вологості на «Snostat» і температури, незалежно від прогнозу погоди. Це означає, що немає майбутніх даних, які можна використовувати в MPC для оптимізації часу запуску та зупинки режиму «плавлення». Спосіб додати деяку інформацію до системи, яка може допомогти передбачити, коли активувати режим «Танення», може полягати в додаванні датчика, який виявляє снігопад і дощ окремо від тротуару. Цей датчик мав би виявляти сніг/дощ без затримки, якій підвладний датчик у Snostat. Таким чином можна визначити, коли сніг/дощ припиниться, і можна передбачити, як довго має бути активним режим «Танення». Режим «Захист від замерзання роси» також залишено для впровадження в MPC на інший час. Оскільки цей режим визначається лише передбаченнями та відсутністю локальних датчиків, існуючий контроль залежить лише від уже передбачених значень.

3.3 Опис першого варіанту реалізації

Система може бути описана моделлю, що складається з рівнянь FOPDT (First Order Plus Dead Time) для кожної з контрольованих змінних. Визначення рівнянь FOPDT з керуючим сигналом як входом і змінними як виходом. Для контролера MPC, що замінює всю існуючу систему керування,

це формулювання моделі було б можливою альтернативою, оскільки вхідні та вихідні дані моделі відображають змінні, що контролюються ПІД-контролерами в існуючій системі керування.

Модель, що складається з рівнянь FOPDT, виводиться наступним чином. Загальна форма FOPDT:

$$\tau_p \frac{dy(t)}{dt} = -y(t) + K_p u(t - \theta_p) \quad (3.1)$$

Виділення похідної та написання моделі FOPDT для кожної змінної:

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{-y(t) + K_p u(t - \theta)}{\tau_p} \quad (3.2)$$

$$\frac{dy_{T1}(t)}{dt} = \frac{-y_{T1}(t) + K_{T1} u_{SB401}(t - \theta_{T1})}{\tau_{T1}} \quad (3.3)$$

$$\frac{dy_{T2}(t)}{dt} = \frac{-y_{T2}(t) + K_{T2} u_{SB401}(t - \theta_{T2})}{\tau_{T2}} \quad (3.4)$$

$$\frac{dy_{RT401}(t)}{dt} = \frac{-y_{RT401}(t) + K_{RT401} u_{SB401}(t - \theta_{RT401})}{\tau_{RT401}} \quad (3.5)$$

$$\frac{dy_{RT501}(t)}{dt} = \frac{-y_{RT501}(t) + K_{RT501} u_{SB401}(t - \theta_{RT501})}{\tau_{RT501}} \quad (3.6)$$

$$\frac{dy_{RT902}(t)}{dt} = \frac{-y_{RT902}(t) + K_{RT902} u_{SB401}(t - \theta_{RT902})}{\tau_{RT902}} \quad (3.7)$$

Таблиця 3.1 - Список параметрів для моделі FOPDT без спрощень

	Посилення	Мертвий час	Постійність часу
T1	K_{T1}	θ_{T1}	τ_{T1}
T2	K_{T2}	θ_{T2}	τ_{T2}
RT401	K_{RT401}	θ_{RT401}	τ_{RT401}
RT501	K_{RT501}	θ_{RT501}	τ_{RT501}
RT901	K_{RT901}	θ_{RT901}	τ_{RT901}
RT902	K_{RT902}	θ_{RT902}	τ_{RT902}
RT903	K_{RT903}	θ_{RT903}	τ_{RT903}
RT904	K_{RT904}	θ_{RT904}	τ_{RT904}
OE501	K_{OE501}	θ_{OE501}	τ_{OE501}
JP401	K_{JP401}	θ_{JP401}	τ_{JP401}

$$\frac{dy_{RT903}(t)}{dt} = \frac{-y_{RT903}(t) + K_{RT903}u_{SB401}(t - \theta_{RT903})}{\tau_{RT903}} \quad (3.8)$$

$$\frac{dy_{OE501}(t)}{dt} = \frac{-y_{OE501}(t) + K_{OE501}u_{SB401}(t - \theta_{OE501})}{\tau_{OE501}} \quad (3.9)$$

$$\frac{dy_{JP401}(t)}{dt} = \frac{-y_{JP401}(t) + K_{JP401}u_{SB401}(t - \theta_{JP401})}{\tau_{JP401}} \quad (3.10)$$

Знайдена модель описує всі контрольовані змінні в системі сніготанення, складаючи модельний комплекс. Модель складається зі змінних з однаковою динамічною поведінкою, але з великою різницею в швидкості процесів. Наприклад, температура на зворотному трубопроводі на

вторинній стороні, RT501, буде змінюватися швидше і з більшою амплітудою, ніж температура в тротуарі, RT903.

Таблиця 3.2 - Список параметрів для моделі FOPDT з деякими спрощеннями

	Посилення	Мертвий час	Постійна часу
T2	K_{T2}	θ_{T2}	τ_{T2}
RT401	K_{RT401}	θ_{RT401}	τ_{RT401}
RT501	K_{RT501}	θ_{RT501}	τ_{RT501}
RT902	K_{RT902}	θ_{RT902}	τ_{RT902}

3.4 Опис другого варіанту реалізації

Для спрощення моделі та MPC можна виключити змінні, які або не стосуються контролю, або надлишкові. Потік на первинній стороні, заданий JP401, можна виключити, оскільки він встановлений постійним. Існують невеликі варіації потоку через шум і похибку керування, але для цілей MPC можна вважати його постійним і помилку ігнорувати. Потік на первинній стороні, заданий OE501, і температуру подачі на первинній стороні можна виключити з моделі та вважати постійними, оскільки джерело нагрітої води розроблено для забезпечення необхідної температури та витрати. Важливо зауважити, що під час увімкнення або вимкнення системи сніготанення відбуватимуться деякі порушення температури, але не настільки, щоб це вплинуло на роботу системи сніготанення. Оскільки температура поверхні є важливим фактором танення снігу та льоду, температуру землі можна виключити з моделі.

Ці спрощення призводять до рівнянь, що описують рівняння моделі, змінні приведені в таблиці 3.2. Ескіз описаної структури MPC можна побачити на рис. 3.1.

$$\frac{dy_{T2}(t)}{dt} = \frac{-y_{T2}(t) + K_{T2}u_{SB401}(t - \theta_{T2})}{\tau_{T2}} \quad (3.11)$$

$$\frac{dy_{RT401}(t)}{dt} = \frac{-y_{RT401}(t) + K_{RT401}u_{SB401}(t - \theta_{RT401})}{\tau_{RT401}} \quad (3.12)$$

$$\frac{dy_{RT501}(t)}{dt} = \frac{-y_{RT501}(t) + K_{RT501}u_{SB401}(t - \theta_{RT501})}{\tau_{RT501}} \quad (3.13)$$

$$\frac{dy_{RT902}(t)}{dt} = \frac{-y_{RT902}(t) + K_{RT902}u_{SB401}(t - \theta_{RT902})}{\tau_{RT902}} \quad (3.14)$$

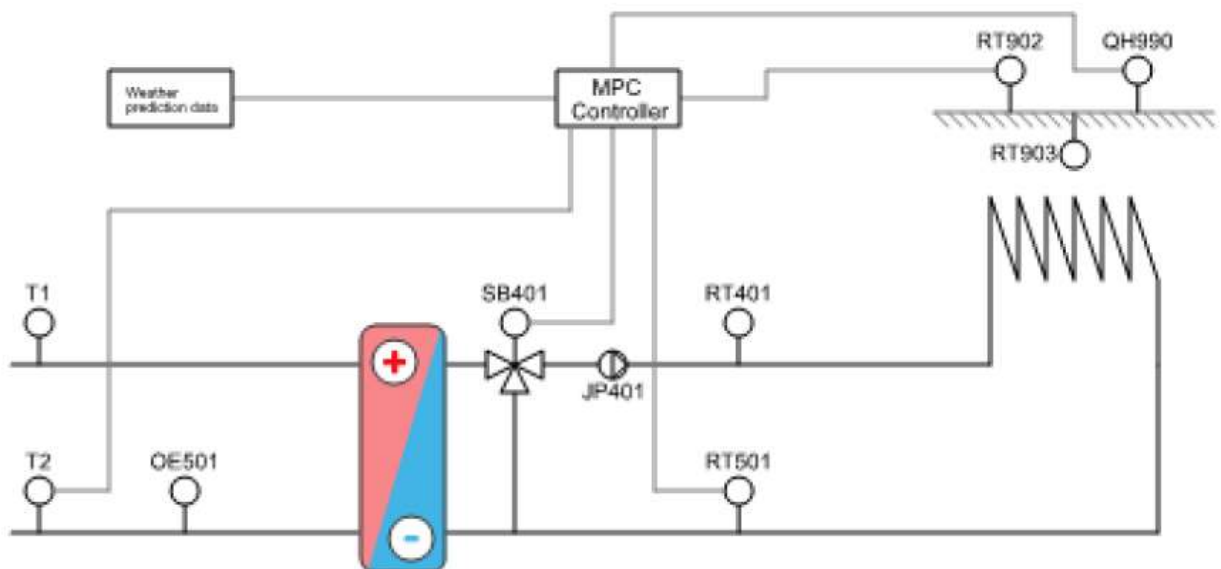


Рисунок 3.1 - Ескіз системи повного керування MPC сніготанення

3.5 Опис третього варіанту реалізації

Додатковим способом спрощення моделі та наступного MPC є обмеження того, що MPC має контролювати. Замість заміни всієї існуючої системи керування, що складається з логіки для вибору опорного значення головного ПІД, головного ПІД та підлеглого ПІД, MPC може замінити лише логіку та головний ПІД-регулятор. Перешкоди, викликані змінами погоди, які впливають на систему і які необхідно контролювати для прогнозованого контролю, головним чином впливають на температуру поверхні тротуару. Ця температура підлягає управлінню головним контролером, а еталон для тієї самої температури визначається логікою. Температура зворотної лінії на первинній стороні, що контролюється підлеглим ПІД, є, як описано, відносно швидким процесом. ПІД-регулювання добре справляється з контролем цієї температури. Визначивши контролер MPC для заміни логіки та головного PID і зберігши підлеглий PID, можна зменшити складність моделі. Підлеглий ПІД-регулятор, який контролює температуру, тоді потрібно визначити як процес другого порядку плюс мертвий час (SOPDT), оскільки контролер додає інший вимір до процесу, таким чином повторно вводячи певну складність. Ескіз описаної структури MPC можна побачити на рис 3.2.

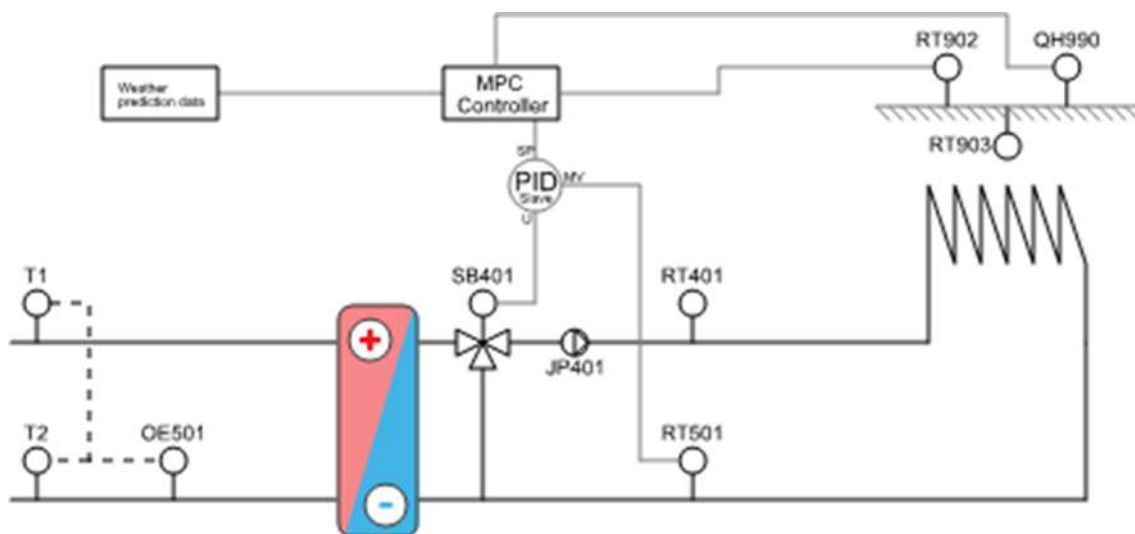


Рисунок 3.2 - Ескіз системи сніготанення з частковим керуванням MPC.

3.6 Опис четвертого варіанту реалізації

Альтернативне формулювання MPC полягає в тому, щоб розглянути режими існуючої філософії управління та оцінити, які режими слід замінити на MPC.

Передбачувані дані з прогнозу погоди використовуються, щоб визначити, коли починати низький і високий попередній нагрів. Захист від замерзання також залежить від погодних даних, але не повинен бути включений у MPC.

Режим Танення залежить лише від поточної температури зовнішнього повітря та детекції вологості на Snøstat і не залежить від погодних даних. Цей режим можна виключити з MPC на тій підставі, що немає ніякої переваги в отриманні прогнозованих даних у спосіб прямої подачі. ПІД-контроль є ефективним у регулюванні температури, коли похибка є відносно низькою, тому, коли тротуар був попередньо нагрітий за допомогою режимів попереднього нагріву низького та попереднього нагрівання високого, ПІД-регулювання достатньо для підтримки стабільної температури в тротуарі. Деякі наслідки використання ПІД-регулювання з раптовою зміною опорного значення обговорюються в наступному розділі.

Обговорювані спрощення обсягу для MPC скорочують модель до включення лише двох змінних, T_2 і $RT902$. Тоді модель задана формулою 3.15 і 3.16, вільні змінні для налаштування представлені в табл. 3.3 і ескіз системи керування можна побачити на рис. 3.3.

$$\frac{dy_{T2}(t)}{dt} = \frac{-y_{T2}(t) + K_{T2}u_{SB401}(t - \theta_{T2})}{\tau_{T2}} \quad (3.15)$$

$$\frac{dy_{RT902}(t)}{dt} = \frac{-y_{RT902}(t) + K_{RT902}u_{SB401}(t - \theta_{RT902})}{\tau_{RT902}} \quad (3.16)$$

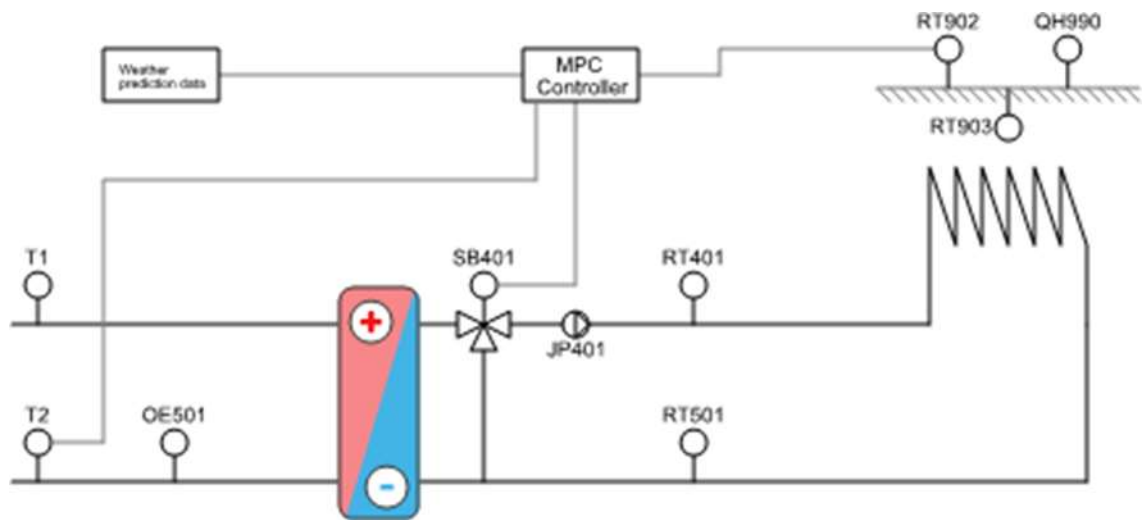


Рисунок 3.3 - Ескіз системи сніготанення з MPC для керування попереднім підігрівом.

Таблиця 3.3 - Список параметрів для моделі FOPDT з деякими спрощеннями

	Посилення	Мертвий час	Постійна часу
T2	K_{T2}	θ_{T2}	τ_{T2}
RT902	K_{RT902}	θ_{RT902}	τ_{RT902}

Як обговорювалося в попередньо змінних, які потрібно оптимізувати, є температура поверхні обпікання температура зворотної лінії первинної сторони. У всіх представлених моделях ці змінні наявні, а тому доцільні для використання в МСР. Питання в тому, яка модель є достатньою для створення MPC для керування системою сніготанення, зберігаючи при цьому мінімальну складність розробки та потенційної реалізації.

Представлена модель в першому варіанті дає детальний опис системи, моделюючи майже всі змінні, виміряні в системі керування. Модель також є математично простою, оскільки вона представляє всі змінні як лінійні відносно вхідних даних. Недоліком є те, що обчислювальна потужність,

необхідна для моделювання моделі, зростає зі збільшенням кількості змінних.

Представлена модель варіанті два є спрощенням першого у тому сенсі, що змінні, які є надлишковими, нерелевантними або вважаються постійними, виключаються, але все ще покривають необхідний обсяг для заміни всієї існуючої системи контролю.

Представлена модель третьому варіанті обмежує сферу застосування моделі, перевизначаючи вхідні дані в систему як уставку контролера, а не як прямий виконавчий механізм системи. Це обмежує змінні, що моделюються, але вводить нелінійний зв'язок між входами та виходами системи. Це ускладнює математичну реалізацію моделі.

Нарешті модель, представлена четвертому варіанті є подальшим спрощенням варіанту два, з додатковим налаштуванням є можливість для МРС, що ще більше зменшує складність. Ця модель містить достатньо інформації для керування системою за бажанням, але містить лише лінійні зв'язки.

Усі моделі мають недоліки щодо представлення системи, оскільки були зроблені припущення щодо поведінки системи, наприклад зовнішні змінні, які не включені в моделі. Як буде обговорюватися більш детально пізніше, кількість змінних у моделі сильно впливає на обчислювальну потужність, необхідну для моделювання системи, і це є важливим фактором у виконанні МРС. Тому кількість змінних у моделі вплинула на вибір моделі для подальшої роботи. Це, разом із бажанням представити систему лише з лінійним відношенням і тим фактом, що використання прогнозованих даних є фокусом МРС, модель для подальшого використання в розробці МРС представлена в четвертому варіанті.

4 НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

4.1 Постановка задачі оптимізації

Формулювання задачі оптимізації (ОР) можна розглядати як опис оптимального виходу керування. Для цього ОР враховуються два фактори: вартість експлуатації системи та комфорт утримання поверхні без льоду та снігу.

Розпочніть із розгляду цілей вартості та комфорту окремо, щоб визначити, як обробляти їх як ОР. Вартість експлуатації системи сніготанення визначена у розділах вище як похибка між температурою зворотної лінії на первинній стороні T2 і температурою подачі на первинній стороні T1. Тоді ОР для вартості є проблемою мінімізації, коли мінімізується сума помилок за горизонт прогнозування.

Комфорт визначається як підтримання температури поверхні дорожнього покриття RT902 вище певної межі під час прогнозованого снігопаду. Це можна розглядати як проблему відстеження заданого значення, де ОР полягає в мінімізації похибки між еталонним значенням і значенням вимірювання для RT902. Однак це, ймовірно, призведе до послідовності керування, де помилка температури для RT902 є від'ємною протягом деякого часу після зміни еталонного значення, що призведе до відставання бажаної температури на поверхні тротуару. Ілюстрація цієї припущеної поведінки показана на малюнку 8.1. Така поведінка підходить для проблеми відстеження заданого значення, але для системи сніготанення еталонним показником для RT902 є нижня межа, і помилка на негативній стороні цієї межі є небажаною. Тому опорне значення для RT902 можна розглядати як нижню межу для стану RT902 у формулюванні ОР для T2, замість окремого ОР з відстеженням заданого значення для RT902 як основної мети. Таким чином дві цілі вирішуються в одному ОР.

Існують способи розв'язання задач багатоцільової оптимізації (MOOP) без визначення одного з посилок як обмеження, але для цього випадку це не обов'язково. Подальші дослідження MOOP залишаються читачам і не розглядаються тут.

Детальний висновок цільової функції та її перехід у формулу стандартного квадратичного програмування (SQPF) можна знайти додатковій літературі. Тут представлені головні фактори формулювання.

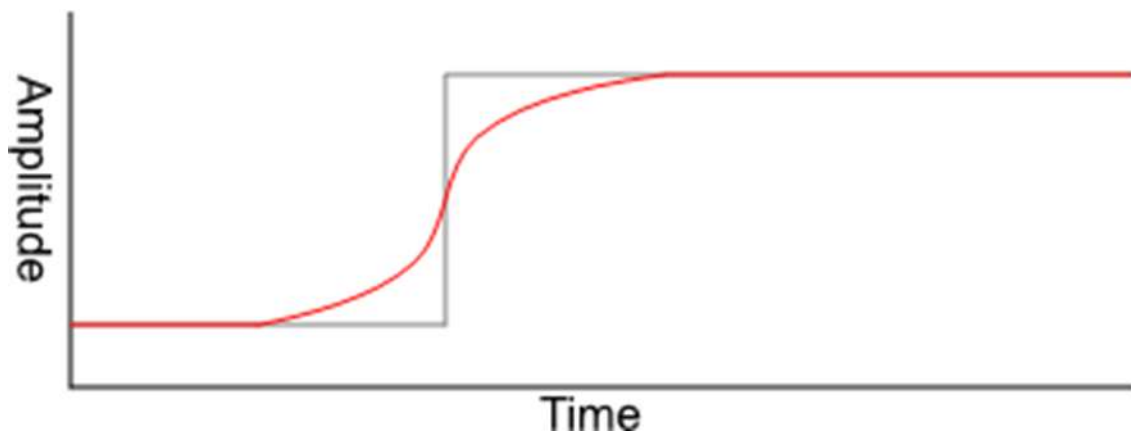


Рисунок 4.1 - Діаграма, що показує очікувану поведінку ОР для відстеження заданого значення. Червона лінія ілюструє оптимальне рішення, тоді як сіра лінія є еталонним значенням.

4.2 Цільова функція

Цільова функція (OF) — це представлення бажаної функції для оптимізації. Це може бути функція мінімізації або максимізації цілі, яку потрібно досягти [8, 26, 27]. Загальне представлення OF виражається як

$$\begin{matrix} \min/\max \\ (x) \end{matrix} J = f(x) \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} h_i(x) &= 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ g_i(x) &\leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, r \\ x_L &\leq x \leq x_U \end{aligned} \quad (4.2)$$

Де $h_i(x)$ – обмеження рівності, $g_i(x)$ – обмеження нерівності, а x_L і x_U – нижня та верхня межі.

ОФ, отриманий для описаної проблеми, виражається як

$$\min_{(u)} J = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N (e_k^T Q_k e_k + u_{k-1}^T P_{k-1} u_{k-1}) \quad (4.3)$$

$$\begin{aligned} e_k &= Tz_k - y_{T1} \\ x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k \\ y_k &= Cx_k \\ u_L &\leq u_k \leq u_U \\ x_L &\leq x_k \leq x_U \end{aligned} \quad (4.4)$$

де Q_k — вагова матриця для помилки, а P_k — вагова матриця для контролюсигнал. u_L нижня межа для входів і u_U верхня межа для входів. x_L нижня межа для штатів і x_U верхня межа для штатів. Основна мета тут представлена $e_k = Tz_k - y_{T1}$, що описує вартість експлуатації системи.

4.3 Стандартна формула квадратичного програмування

Розв'язувач, який потрібно використовувати для розв'язання ОР, вимагає, щоб ОФ відповідав стандартній формулі квадратичного програмування (SQPF), тому представлений ОФ потрібно переформулювати. SQPF — це спосіб вираження проблеми за допомогою добре побудованих матриць, отриманих за допомогою продукту Кронекера.

$$\min_{(z)} J = \frac{1}{2} z^T H z + c^T z \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} A_e z &= b_e \\ A_i z &\leq b_i \\ z_L &\leq z \leq z_U \end{aligned} \quad (4.6)$$

де,

$$z = \begin{bmatrix} u \\ x \\ e \\ y \end{bmatrix} \quad u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_N \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} \quad e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_N \end{bmatrix} \quad y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$H_{11} = \begin{bmatrix} P & 0 & \dots & 0 \\ 0 & P & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & P \end{bmatrix} \quad H_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$$H_{33} = \begin{bmatrix} Q & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Q & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Q \end{bmatrix} \quad H_{44} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$H = \begin{bmatrix} H_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & H_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & H_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & H_{44} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$c^T = \begin{bmatrix} 0_{N \cdot n_u} \\ 0_{N \cdot n_x} \\ 0_{N \cdot n_e} \\ 0_{N \cdot n_y} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$A_{\varepsilon} = \begin{bmatrix} -I_N \otimes B & I_{N \cdot n_x} - (I_{N-1} \otimes A) & 0_{(N \cdot n_x \times N \cdot n_y)} & 0_{(N \cdot n_x \times N \cdot n_y)} \\ 0_{(N \cdot n_y \times N \cdot n_u)} & -I_N \otimes C & 0_{(N \cdot n_y \times N \cdot n_y)} & I_{N \cdot n_y} \\ 0_{(N \cdot n_y \times N \cdot n_u)} & 0_{(N \cdot n_y \times N \cdot n_x)} & I_{N \cdot n_y} & I_{N \cdot n_y} \end{bmatrix} \quad B_{\varepsilon} = \begin{bmatrix} Ax_0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ r_1 \\ r_2 \\ \vdots \\ r_N \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$x_L = \begin{bmatrix} -\infty \\ -\infty \\ \vdots \\ -\infty \\ RT902_{k_L} \\ -\infty \\ \vdots \\ -\infty \end{bmatrix} \quad x_U = \begin{bmatrix} \infty \\ \infty \\ \vdots \\ \infty \\ \infty \\ \infty \\ \vdots \\ \infty \end{bmatrix} \quad u_L = 0\% \quad u_U = 100\% \quad z_L = \begin{pmatrix} 1_{N \times 1} \otimes u_L \\ 1_{N \times 1} \otimes x_L \\ -\infty_{(n_e) \times 1} \\ -\infty_{(n_y) \times 1} \end{pmatrix} \quad z_U = \begin{pmatrix} 1_{N \times 1} \otimes u_U \\ 1_{N \times 1} \otimes x_U \\ \infty_{(n_e) \times 1} \\ \infty_{(n_y) \times 1} \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

Неважливі аспекти, які тут потрібно розглянути, для розуміння того, як цілі представлені в SQPF, це $r_1, r_2, \dots, r_k$ і $RT\ 902_{kL}$. $r_1, r_2, \dots, r_k$ представляє опорне значення для похибки між $T1$ і $T2$, яке, як описано раніше, представляє вартість експлуатації системи сніготанення. Посилання визначається як нуль для кожного кроку часу k , як мета полягає в тому, щоб мінімізувати витрати, таким чином утримуючи витрати якомога ближче до

нуля. N є змінною по відношенню до горизонту прогнозування і буде обговорюватися більш детально пізніше.

RT_{902kL} представляє раніше обговорену нижню межу температури поверхні тротуару для кожного моменту k .

Оскільки нижня межа температури поверхні (RT_{902}) залежить відпрогнозованого снігопаду, ми можемо сказати, що коли прогнозованого снігу немає, нижня межа дорівнює негативній нескінченності, а якщо прогнозований снігопад, задане значення дорівнює 4°C . Якщо прогнозується снігопад протягом наступних 6 годин, нижню межу температури поверхні тротуару встановлюють на рівні 4°C .

4.4 Горизонт прогнозування

Щоб зрозуміти, як $RT_{902_{kL}}$ має бути визначений, необхідно звернути увагу на Horizon прогнозування. Горизонт передбачення – це те, наскільки далеко в майбутньому система має бути змодельована. Оптимальне управління передбачено для N часових кроків вперед у часі відносно поточного часу. Потім N визначає горизонт прогнозування. Потім визначається $RT_{902_{kL}}$ для $k = 0$ до $k = N$ на основі прогнозованого снігопаду. Як приклад можна сказати, що горизонт прогнозування встановлено на $N = 24$, а часовий крок встановлено на 1 годину. Синоптики прогнозують, що сніг випаде від 6 до 12 години. Тоді $RT_{902_{kL}}$ становитиме 4°C для $k = 6 - 12$ і $-\infty^{\circ}\text{C}$ для $k = 0 - 6$ і $k = 12 - 24$. Тут ми припускаємо, що прогноз погоди не зміниться протягом горизонту прогнозування. Ілюстрацію цього прикладу можна побачити на рис. 4.2. А тепер уявіть, що минуло 6 годин, а прогноз погоди залишився таким самим, тож протягом наступних 6 годин очікується снігопад. Тоді RT_{902kL} становитиме 4°C для $k = 0 - 6$ та $-\infty^{\circ}\text{C}$ для $k = 6 - 24$. Ілюстрацію цього прикладу можна побачити на рис. 4.3.

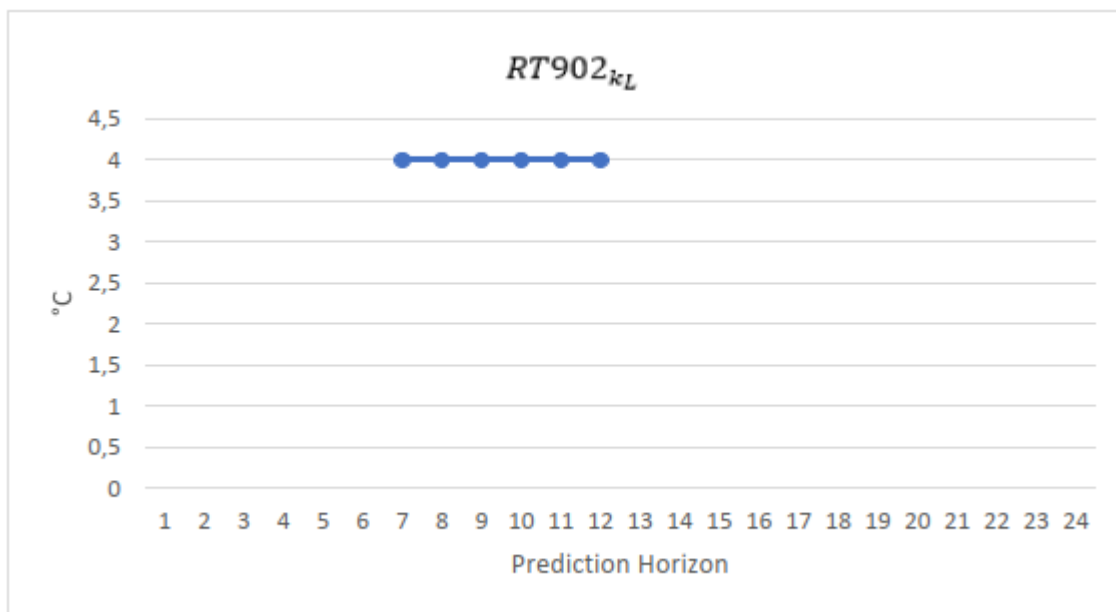


Рисунок 4.2 – Приклад $RT902_{k_L}$ для снігу, прогнозованого між 6 та 12 годинами в майбутньому.

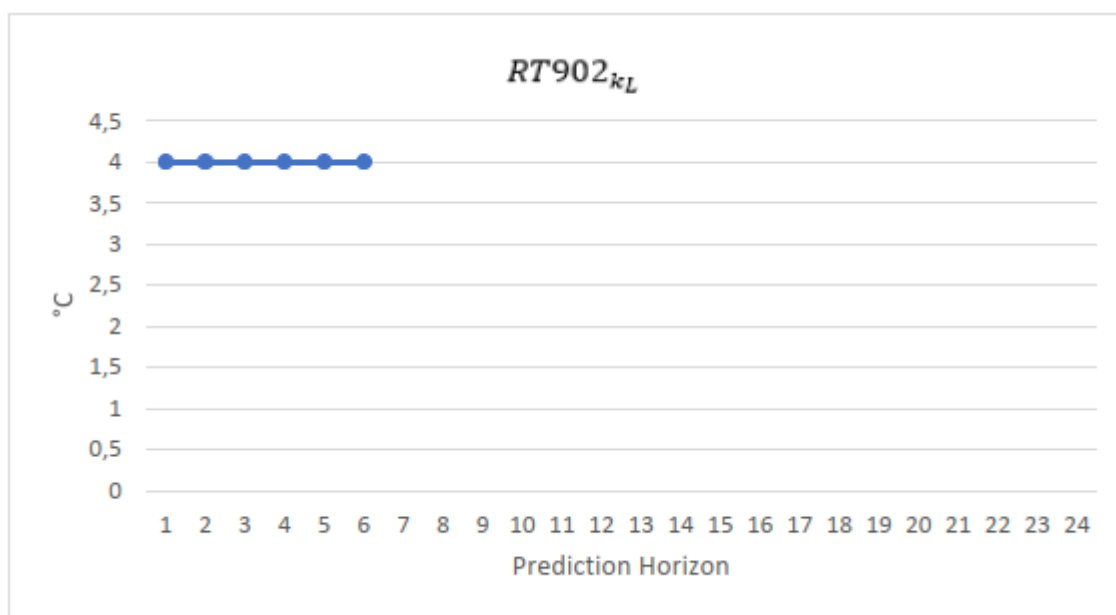


Рисунок 4.3 – Приклад $RT902_{k_L}$ для снігу, прогнозованого від 0 до 6 годин у майбутньому.

5 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

5.1. Впровадження моделі та розвиток MPC в Simulink

Тепер, коли задачу оптимізації визначено та виражено у формі, сумісній із розв'язувачем, її можна реалізувати у відповідному програмному забезпеченні. У цій главі представлена програма Simulink, розроблена для вирішення задачі оптимізації. Представлено розв'язувач, який використовується в програмі. Обговорюється, як застосовуються програми, розроблені з MPC, і як це рішення може бути реалізовано для постійного контролю системи сніготанення. Концепція Moving Horizon розглядається стосовно постійного контролю.

Програма Simulink

Програмне забезпечення для вирішення задачі оптимізації розроблено з використанням Simulink, програми, наданої MathWorks і розробленої спеціально для модельно-орієнтованого проектування, і тому є оптимальним для розробки MPC. Крім того, розв'язувач, який потрібно використовувати в цьому MPC, розв'язувач qpOASES, доступний для використання з Simulink.

Розроблений ГДК складається з чотирьох основних частин. Програма Block, у якій з'єднуються деталі та виконує креслення. Сценарій для ініціалізації моделі та горизонту прогнозування, а також обробки деякої симуляції ПІД-регулювання для використання під час тестування. Сценарій розв'язувача та, нарешті, сценарій для отримання результатів із розв'язника.

Програму блокування можна побачити на рис. 5.1.

Права частина, більш детально зображена на рис. 5.2, обробляє вхідні дані сценарію ініціалізації, сценарію розв'язувача та сценарію для отримання результатів.

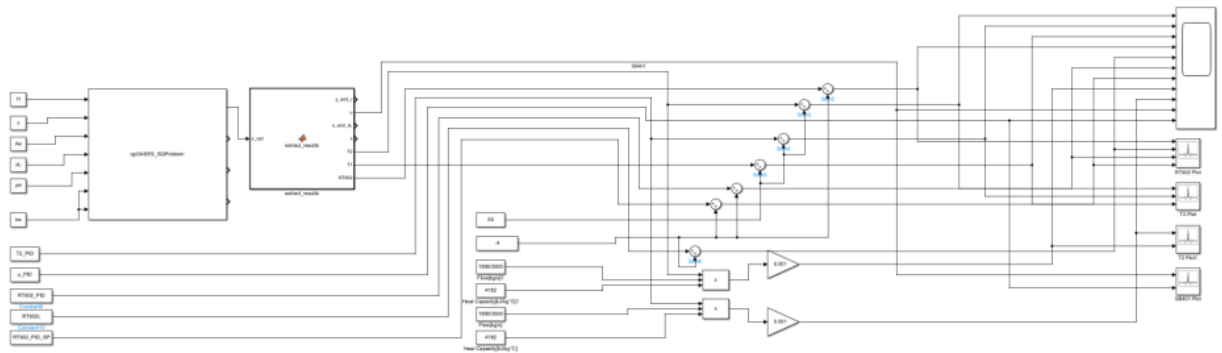


Рисунок 5.1 - Програма Simulink Block для реалізації MPC для керування системою сніготанення

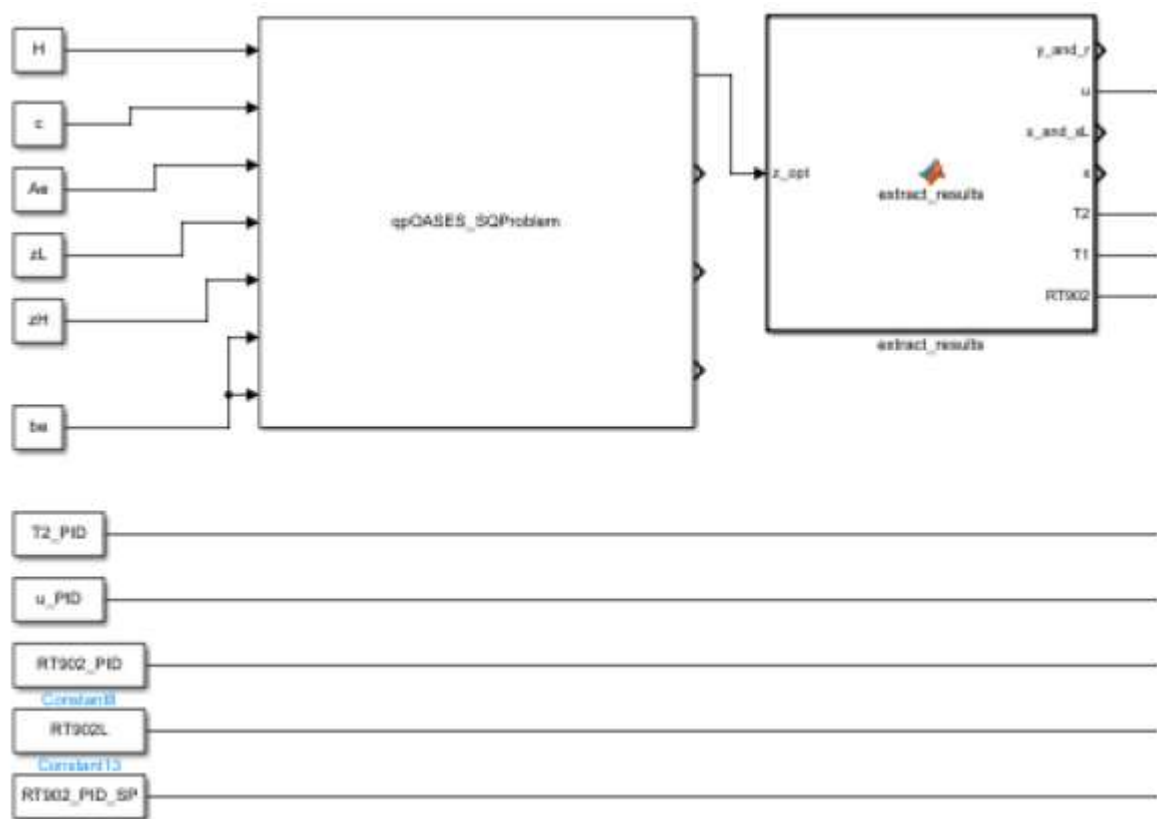


Рисунок 5.2 - Частина блокової програми Simulink, яка обробляє вхідні дані зі сценарію ініціалізації, запускає розв'язувач і витягує результати.

Середня частина блокової програми обробляє зміщення для правильних значень для робочої точки симуляції та обчислення енергії на основі змодельованих значень і констант.

Ліва частина Block Program керує побудовою та збереженням даних. Дані можна аналізувати за допомогою графіків у Simulink або відкривати за допомогою Microsoft Excel.

Сценарій ініціалізації.

Сценарій ініціалізації MPC можна побачити в додаткуС. Цей сценарій потрібно виконати перед тим, як можна буде запустити симулюючу програму блоку. Сценарій обробляє налаштування параметрів моделі, визначає матриці моделі простору станів, встановлює стандартну задачу квадратичного програмування, визначає контрольні значення та межі та імітує керування системою за допомогою ПД-регулювання для порівняння з MPC.

Розв'язування оптимального рішення

Сценарій qpOASES_SQProblem — це розв'язувач, який використовується для пошуку оптимального розв'язку цільової функції. qpOASES — це реалізація онлайнової стратегії активного набору на C++ з відкритим вихідним кодом для вирішення проблем оптимізації формулювання квадратичного програмування (QP). [17, 28, 29].

Вилучення результатів

Сценарій для отримання результатів із розв'язувача в MPC можна побачити в лістингу.

Цей сценарій витягує отримане оптимальне рішення з розв'язувача та організовує дані для побудови та зберігання. Це необхідно, оскільки дані з розв'язувача містяться в одному довгому векторі, що містить усі входи, виходи та стани.

5.2 Реалізація на існуючих керуючих засобах

До впровадження розробленого ГДК можна підійти різними способами. Як описано в гл3 система управління складається з декількох рівнів апаратного забезпечення. Двома альтернативами для впровадження є

Enterprise Server і Automation Server. Для оптимальної автономності системи реалізація повинна бути реалізована на AS, щоб мати MPC найближче до датчиків і виконавчих механізмів, і щоб усунути потенційний ризик непрацездатності контролера, якщо мережа між AS і ES не працює.

Лістинг 5.1 - Код, що витягує результати з Solver

```

1 function [y_and_r,u, x_and_xL, x, T2, T1,RT902]...
2     = extract_results(z_opt, RT902L, r)
3 N = 96; %prediction horizon length
4 nx = 14; nu = 1; ny = 1; %no. of states, inputs and outputs
5 %extract results
6 Ua = z_opt(1+N*(0) :N*(nu),1); %control inputs
7 Xa = z_opt(1+N*(nu) :N*(nu+nx),:); %states
8 Ea = z_opt(1+N*(nu+nx) :N*(nu+nx+ny),:); %error in tracking
9 Ya = z_opt(1+N*(nu+nx+ny) :N*(nu+nx+ny+ny),:); %outputs
10 %we use the reshape function to rearrange the data
11 y_temp = reshape(Ya,ny,N);%arranged outputs(rows as
12                                     %signals, columns as data)
13 x_temp = reshape(Xa,nx,N);
14 x = x_temp';
15
16 %r = zeros(N,1);
17 T1=r';
18 %RT902L = [zeros(N/2,1); 1*ones(N/4,1); zeros(N/4,1)];
19 %RT902L = zeros(N,1);
20 T2=y_temp';
21 RT902 = x_temp(4,:)';
22 %Put it as the third column (for r1) and fourth column (for r2).
23 y_and_r = [T2,T1];
24 x_and_xL = [RT902,RT902L'];
25 u_temp = reshape(Ua,nu,N); %arranged input(row as signals, columns as data)
26 u = u_temp';

```

Оскільки контролер використовує зовнішні прогнози погоди для обчислення сигналу керування, існує потенційний ризик того, що контролер не працюватиме через проблеми з мережею між AS та ES. Впровадження MPC на AS є складним, оскільки доступні інструменти програмування обмежені власними рішеннями, наданими Schneider Electric, ці інструменти

спочатку не розроблені для обробки обчислень у формі, яка використовується в MPC.

Альтернативним рішенням є впровадження MPC на ES. Недоліком цього рішення є потенційний ризик проблем з мережею між ES і AS, але, як обговорювалося, ця проблема також обмежить дані прогнозу погоди, які передаються до AS. ES має ті самі засоби програмування, що й AS. Оскільки ES — це програмне забезпечення, встановлене на сервері, на цьому ж сервері можна інсталиувати інше програмне забезпечення, наприклад Simulink. Потім MPC можна реалізувати за допомогою Simulink, а також збирати та передавати дані до ES за допомогою певного протоколу зв'язку, такого як MQTT або API. Керуюча інформація передається між ES і AS за наявним власним рішенням. Тому для подальшого розвитку MPC рекомендується впровадження на ES.

Рухомий горизонт

Горизонт прогнозування, як згадувалося раніше, означає, наскільки далеко в майбутньому буде змодельовано вихід системи та знайдено оптимальне рішення. Для постійного керування системою цей горизонт передбачення повинен рухатися разом з реальним часом, тут вводиться рухомий горизонт. Якщо час першої ініціалізації MPC позначається як t_0 , тоді передбачення горизонт змінюється від t_0 до t_0+N , де N — кількість часових кроків у горизонті прогнозування. Тепер розраховується оптимальне рішення для рішення за MPC для знайденого горизонту прогнозу. Тепер для реалізації переміщення горизонту використовується тільки перший оптимальний вхід в систему, знайдений MPC.

Замість розгляду проблеми відносно початкового моменту часу t_0 , наступним часовим кроком вважається початковий момент часу t_1 . Таким чином, пересуваючи горизонт вперед на один часовий крок, щоб горизонт прогнозу став від t_1 до t_1+N . Тепер MPC розраховує абсолютно нове

оптимальне рішення для системи з новими вимірюваннями для початкових станів системи.

Ця концепція не реалізована в розробленому MPC, але її необхідно розглянути для впровадження, коли вона буде використовуватися для постійного контролю. Для тестування здійсненності MPC ця функція не є важливою, оскільки немає зворотного зв'язку від системи. Під відсутністю зворотного зв'язку мається на увазі, що не існує реальної або змодельованої системи, яка може дати реакцію на дію керуючого сигналу, знайденого MPC, і, отже, немає нової інформації про стани системи, яка може бути використана після переміщення горизонт на крок вперед.

Цей відгук може надходити від вторинної моделі системи з метою тестування, але цей варіант тут не розглядається. Впровадження Moving Horizon необхідне для подальшого розвитку MPC і перед розглядом впровадження в реальній системі. Одним із потенційних недоліків MPC, який поставляється з Moving Horizon, є статична помилка системи. Статичну помилку можна усунути шляхом впровадження інтегратора, який зміщує контрольний сигнал, щоб усунути помилку. Статична похибка викликана помилкою в моделі, що описує систему, яка використовується для розробки MPC, а також похибкою вимірювання та роздільною здатністю.

Обговорення

Розробка MPC за допомогою Simulink є гарним рішенням для тестування концепції та порівняння з ПД-регулюванням. Рішення частково переноситься на захоплююче апаратне забезпечення системи керування, тому подальше впровадження можливе на основі розроблених програм. Одним з аспектів MPC, який має потенціал для вдосконалення, є вибір розв'язувача, оскільки альтернативні розв'язувачі можуть дати простір для більшої ефективності пам'яті, а отже, дати можливість додавати більше станів. Концепцію Moving Horizon потрібно буде ввести в MPC для постійного контролю, але для тестування достатньо розробленої MPC.

5.3 Підгонка моделювання моделі до даних пробних прогонів

Розглянемо підгонку параметрів моделі. Як обговорювалося попередньо, які будуть використані, базуються на історичних вимірюваннях системи сніготанення та пробних запусків. Параметрами моделі, які потрібно знайти, є вільні змінні рівнянь FOPDT, коефіцієнт підсилення процесу, постійна часу процесу та затримка часу процесу для кожного з двох вихідних сигналів, T2 і RT902, обраної константи моделі. Спочатку визначаються параметри, що описують взаємозв'язок між керуючим сигналом на клапан SB401 і температурою поверхні тротуару RT902, потім визначаються параметри для опису зв'язку між керуючим сигналом на клапан SB401 і температурою T2 зворотної лінії первинної сторони. Нарешті обговорюється якість знайдених параметрів моделі.

Сигнал керування клапаном VS температура поверхні тротуару.

Оскільки можливість виконання пробних запусків системи сніготанення, поки погодні умови, що призвели до снігопаду, не підвищилися, ідеальні дані для отримання параметрів приросту процесу, постійної часу процесу та затримки часу процесу недоступні. Тому параметри слід оцінювати на основі історичних даних нормальної роботи системи. У цих даних є недоліки, оскільки вони не містять поведінки крок/відповідь, яку могли б дати дані пробного запуску.

На рис. 5.3 дані для SB401 і RT902 за період, розглянутий у розділі 4, відображається. На додаток до даних додаються деякі напрямні лінії, які допомагають зчитувати параметри.

З графіка ми можемо опосередковано прочитати підсилення процесу KT2. Коефіцієнт посилення процесу KT2 можна розрахувати шляхом ділення кроку на вході, тут керуючого сигналу для клапана SB401, на крок на виході, тут температура подачі тротуару T2. Крок введення потрібно приблизно визначити, оскільки в доступних даних немає чіткого кроку. Крок визначено

приблизно 12.03.2022 06:30:00 і матиме амплітуду 21%. Це приблизно посередині кривої найкрутішого зростання керуючого сигналу, і це найкраще наближення доступного кроку. Відповідь у вихідних даних спочатку можна побачити 12.03.2022 10:30:00, але вона не досягне стабільного стану приблизно до 12.03.2022 15:30:00. Ось стабільний стан температури походить від другого від'ємного кроку вхідних даних. Таким чином, амплітуда відповіді RT902 становить приблизно 6,3°C. Потім можна розрахувати коефіцієнт посилення процесу КТ2.

$$K_{RT902} = \frac{6.3^{\circ}\text{C}}{21\%} = 0,3\%/^{\circ}\text{C} \quad (5.1)$$

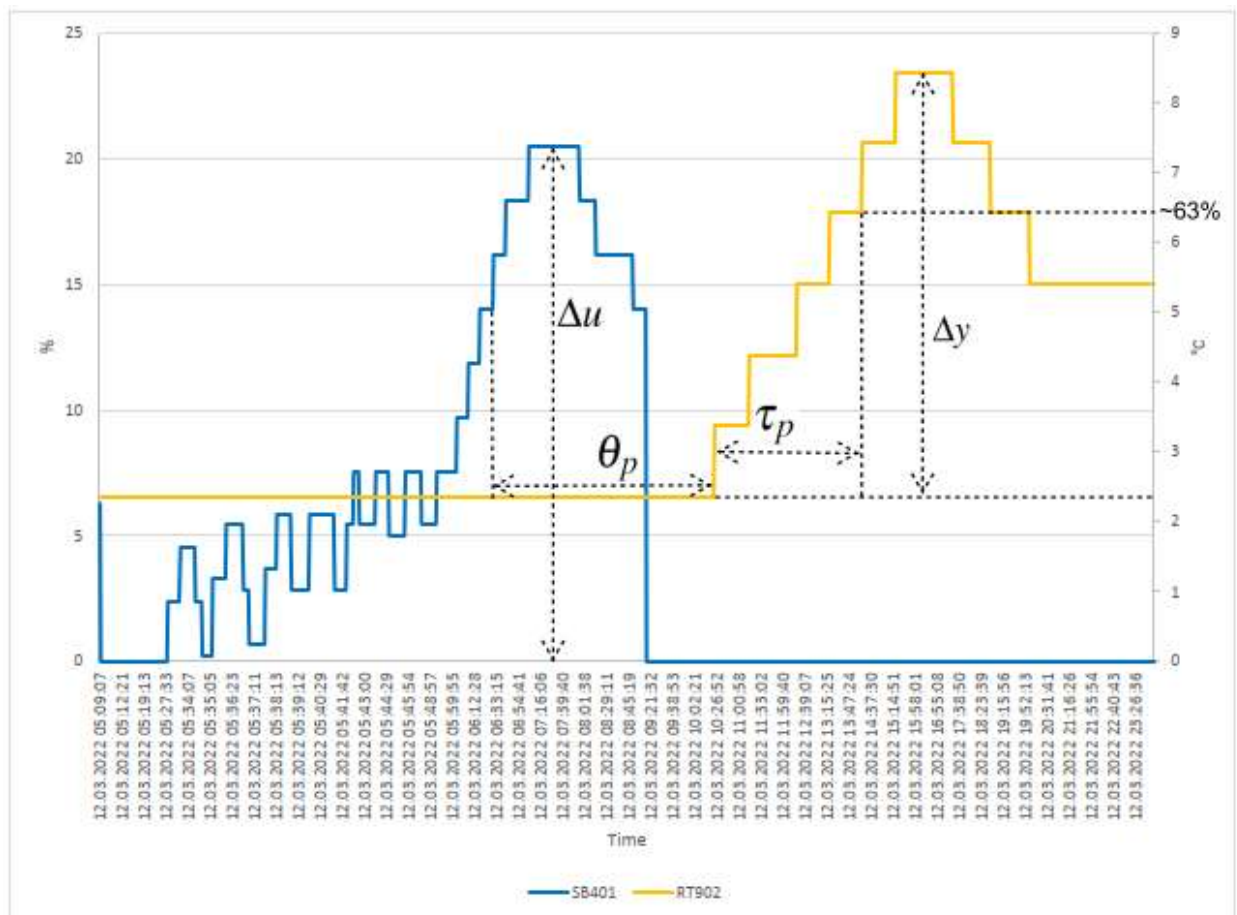


Рисунок 5.1 - Графік даних, зібраних від SB401 і RT902 під час нормальної роботи, коли система переходить з неактивного режиму. Виділено параметри для опису процесу в термінах FOPDT.

Далі затримку процесу можна оцінити за допомогою того самого графіка. Час затримки – це час від етапу введення до зміни виходу, який можна побачити на виході. Визначено, що етап введення відбудеться приблизно 12.03.2022 06:30:00, а наступну відповідь можна побачити приблизно 12.03.2022 10:30:00. Тоді затримка процесу становить 4 години.

$$\theta_{RT902} = 12.03.2022 10 : 30 : 00 - 12.03.2022 06 : 30 : 00 = 4h \quad (5.2)$$

Можна точно оцінити постійну часу. Постійна часу процесу — це час, який потрібен від того, як зміна вихідних сигналів досягне 63% від загальної зміни амплітуди відносно нового стаціонарного стану. Значення виходу RT 902 становить 2,3°C і раніше встановлено, що зміна відповіді становить 6,3 °C. Вихід досягає 63% цієї зміни приблизно 12.03.2022 14:30:00. Тоді постійну часу можна розрахувати як

$$\tau_{RT902} = 12.03.2022 14 : 30 : 00 - 12.03.2022 10 : 30 : 00 = 4h \quad (5.3)$$

5.4 Сигнал керування клапаном проти температури зворотної лінії первинної сторони

Історичні дані не містили достатньої інформації для визначення параметрів посилення процесу, постійної часу процесу та затримки часу процесу для співвідношення між вхід процесу SB401 і вихід T2. Тому для отримання цієї інформації в системі було виконано тест крок/відповідь. Тест проводився не в ідеальних умовах, враховуючи, що він проводився в теплий весняний день, але земля була прохолодною, тому відповідь системи була очікуваною та достатньою для отримання бажаної інформації. Причина, по якій ці дані не можуть бути використані для аналізу поведінки між вхідним сигналом процесу SB401 і вихідним сигналом RT902, полягає в тому, що

температура на поверхні тротуару сильно залежить від температури повітря та сонця, тому відгук цього вимірювання не можна порівняти з тим, що очікується в зимовий час. На рис. 5.2 дані тесту крок/відповідь можна побачити на графіку разом з деякими орієнтовними індикаторами, які допоможуть визначити параметри процесу FOPDT.

Дотримуючись тієї ж процедури, що й раніше, виявлено, що вхідний крок процесу становить 71%, а вихідний відгук має амплітуду -5°C . Коефіцієнт підсилення процесу тоді визначається як

$$K_{T2} = \frac{-5^{\circ}\text{C}}{71\%} = -0,07\%/^{\circ}\text{C} \quad (5.4)$$

Встановлено, що затримка часу дорівнює нулю, оскільки відгук на виході відбувається настільки близько до зміни вхідного сигналу, що ним можна знехтувати. Тому час затримки визначається як

$$\theta_{T2} = 0h \quad (5.5)$$

Вихід досягає 63% зміни амплітуди приблизно 19.04.2022 14:30:00. Зміна на виході вперше зареєстровано приблизно 19.04.2022 14:00:00. Тоді постійна часу визначається як

$$\tau_{T2} = 19.04.2022 14 : 00 : 00 - 19.04.2022 14 : 30 : 00 = 0,5h \quad (5.6)$$

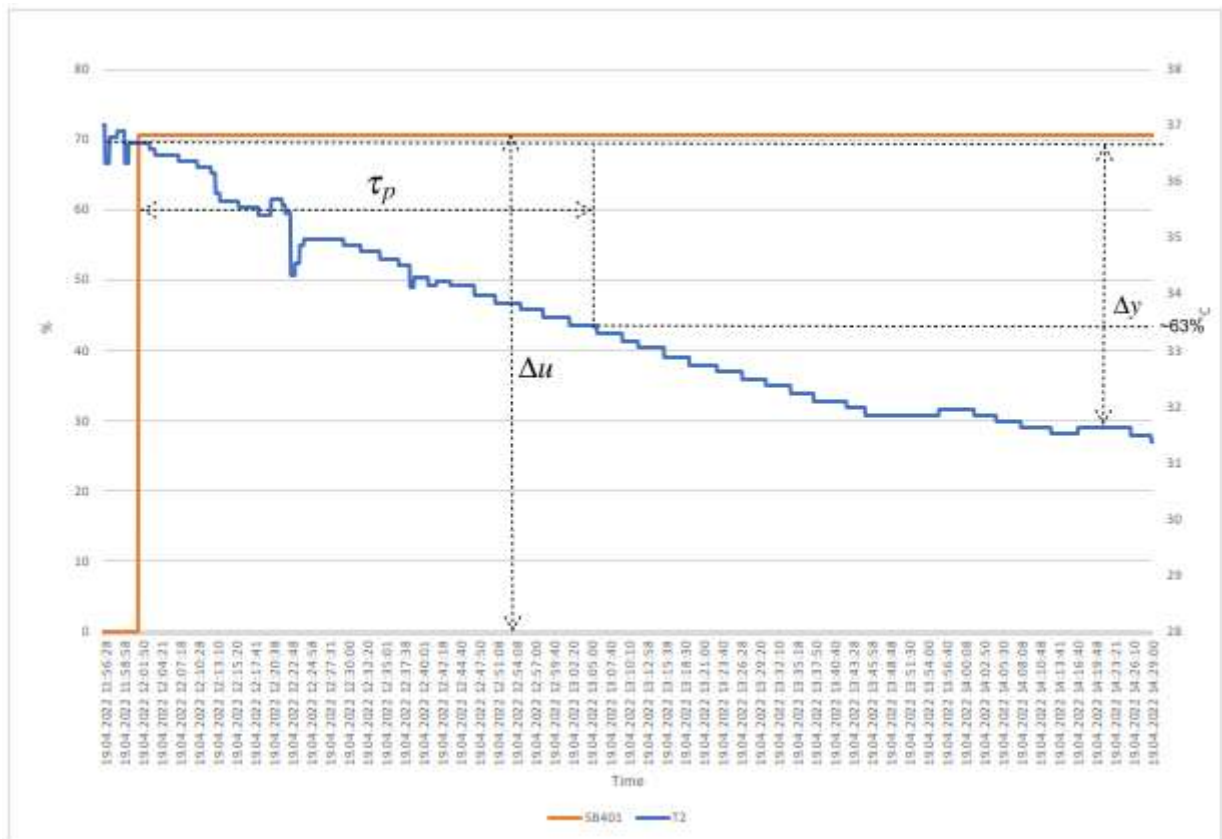


Рисунок 5.2 - Діаграма даних, зібраних від SB401 і T2 під час тесту крок/відповідь. Виділено параметри для опису процесу в термінах FOPDT.

Отримані параметри налаштування для двох описаних моделей FOPDT, які використовуються в MPC для системи сніготанення, можна побачити в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 - Список параметрів для моделі FOPDT з деякими спрощеннями

	Gain	Dead time	Time constant
T2	$-0,07\%/^{\circ}\text{C}$	0h	0,5h
RT902	$0,3\%/^{\circ}\text{C}$	4h	4h

Коефіцієнт підсилення процесу, постійна часу процесу та знайдені затримки часу процесу є достатніми для подальшого використання при

тестуванні МРС. Існує певна невизначеність у параметрах, оскільки дані, які використовуються для їх визначення, зібрані не в оптимальний спосіб. Для взаємозв'язку між SB401 і RT902 дані отримані не з тесту крок/відповідь, а з історичних даних, а для зв'язку між SB401 і T2 дані отримані з тесту крок/відповідь, але тест проводився не в ідеальних умовах для снігу. плавлення. Для подальшого налаштування параметрів у майбутньому рекомендується виконати один або більше тестів на крок/відповідь за умов, коли снігопад вірогідний.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

6.1 Вимоги охорони праці під час роботи з електроустаткуванням

Загальні положення

Інструкція з охорони праці для електрика при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування розроблена відповідно до Закону України «Про охорону праці» (Постанова ВР України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ) в редакції від 20.01.2018 р, на основі «Положення про розробку інструкцій з охорони праці», затвердженого Наказом Комітету по нагляду за охороною праці Міністерства праці та соціальної політики України від 29 січня 1998 року № 9 в редакції від 01 вересня 2017 року, з урахуванням «Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів», затвердженими наказом Міністерства палива та енергетики 25.07.2006 р. № 258 (у редакції наказу Міністерства енергетики та вугільної промисловості України 13.02.2012 р. №91, «Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів», затверджених наказом Держнаглядохоронпраці України 09.01.1998 р. № 4.

Всі положення даної інструкції з охорони праці поширюються на електриків освітньої установи, які виконують роботи з ремонту та обслуговування електроустаткування.

До самостійного виконання робіт з ремонту та обслуговування електричного обладнання допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли навчання за фахом, а також:

- медичний огляд і не мають протипоказань за станом здоров'я до виконання даної роботи;

- вступний і первинний на робочому місці інструктажі з охорони праці;

- навчання безпечним методам і прийомам праці;

перевірку знань правил улаштування електроустановок, правил безпеки при експлуатації електроустановок, вимог охорони праці;

при ремонті і обслуговуванні електрообладнання напругою до 1000В мають групу з електробезпеки не нижче III, а понад 1000В - не нижче IV.

Електрику необхідно знати і виконувати вимоги інструкції з охорони праці при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування, інструкцій по роботі з ручним інструментом, електричним інструментом і драбинами.

Електрику при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування слід дотримуватися вимог Правил безпечної експлуатації електричних установок споживачів і Правил технічної експлуатації електричних установок споживачів, і мати відповідну групу з електробезпеки згідно з вимогами цих Правил.

Виконуючи роботи з ремонту та обслуговування електричного обладнання, може спостерігатися вплив нижчеперелічених шкідливих і небезпечних виробничих факторів:

- падіння з висоти;
- ураження електричним струмом;
- підвищена напруженість електричного поля;
- підвищена запиленість повітря робочої зони;
- підвищений рівень вібрації;
- недостатня освітленість робочої зони;
- фізичні перевантаження;
- нервово-психічні перевантаження.

Електрику при виконанні ремонту і обслуговування електроустаткування необхідно використовувати наведені нижче ЗІЗ:

- напівкомбінезон бавовняний - на 12 місяців;
- рукавички на - 3 місяці;

черевики шкіряні на - 24 місяці;
калоші діелектричні - чергові;
рукавиці діелектричні - чергові;
килимки діелектричні - чергові.

Електрик при ремонті і обслуговуванні електрообладнання зобов'язаний:

тримати у чистоті і порядку своє робоче місце;
дотримуватися Правил внутрішнього трудового розпорядку;
вміти застосовувати засоби індивідуального, колективного захисту, засоби пожежогасіння;

вміти надавати першу допомогу потерпілим від нещасних випадків;

знати і виконувати всі вимоги нормативних актів з охорони праці, правил протипожежного захисту та виробничої санітарії.

негайно повідомляти своєму безпосередньому керівнику про будь-який нещасний випадок, що трапився на виробництві, про ознаки професійного захворювання, а також про ситуацію, яка створює загрозу життю і здоров'ю людей;

знати терміни випробування захисних засобів і пристосувань, правила експлуатації, догляду та користування ними. Не дозволяється використовувати захисні засоби і пристосування з простроченим терміном перевірки;

виконувати тільки доручену роботу;

дотримуватися вимог інструкцій з експлуатації обладнання;

знати, де знаходяться засоби надання допомоги, первинні засоби пожежогасіння, головний і запасні виходи, шляхи евакуації в разі аварії або пожежі;

знати номери телефонів медичної установи (103) і пожежної охорони (101).

Електрик може відмовитися від виконання дорученої йому роботи, якщо виникла виробнича ситуація, яка становить загрозу для його життя і здоров'я оточуючих, або для навколишнього середовища, і доповісти про це своєму прямому керівнику.

На робочому місці заборонено курити, вживати алкогольні напої та інші речовини, які надають наркотичну дію на організм людини.

З метою запобігання отримання травм і виникнення травмонебезпечних ситуацій слід дотримуватися нижчеперелічених вимог: не можна залучати до роботи сторонніх осіб;

не починати роботу в разі відсутності умов для її безпечного виконання;

виконувати роботу тільки на справному обладнанні, зі справними пристроями та інструментом;

виявивши несправність терміново доповісти безпосередньому керівнику або усунути їх власними силами, якщо це відноситься до посадових обов'язків;

не торкатися неізольованих або пошкоджених проводів;

не виконувати роботу, яка не входить до професійних обов'язків.

Вміти надавати першу допомогу при кровотечах, переломах, опіках, ураженнях електричним струмом, раптовому захворюванні або отруєнні.

Дотримуватися правил особистої гігієни:

верхній одяг, головний убір і інші особисті речі слід залишати в гардеробі;

працювати в чистому спецодязі;

приймати їжу в призначеному для цього місці.

Вміти правильно користуватися ЗІЗ та засобами колективного захисту, первинними засобами пожежогасіння, протипожежним інвентарем, знати, де вони знаходяться.

Особи, які порушили цю інструкцію з охорони праці для електрика при виконанні робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування, несуть дисциплінарну, адміністративну, матеріальну і кримінальну відповідальність відповідно до чинного законодавства України.

Вимоги безпеки перед початком роботи

Одягти спецодяг, провести огляд і підготовку робочого місця, прибрати зайві предмети.

Видалити із зони проведення робіт сторонніх осіб і звільнити робоче місце від сторонніх матеріалів та інших предметів, обгородити робочу зону і встановити знаки безпеки.

Переконалися в достатньому освітленні робочого місця, відсутність електричної напруги на відремонтованому обладнанні.

Оглянути на справність вимикачі, розетки електричної мережі, електровілок, електричних проводів, з'єднувальних кабелів, переконалися в наявності і справності ЗІЗ (засобів індивідуального захисту) і попереджувальних пристроїв (рукавичок діелектричних, окулярів захисних, калош, килимків і т. п.).

Виконуючи роботи з інструментом необхідно упевнитися в його справності, в відсутності механічних пошкоджень ізоляційного покриття і в своєчасності проходження випробувань інструменту.

Провести перевірку робочого місця на відповідність вимогам пожежної безпеки, на достатність освітлення робочого місця.

Виявивши недоліки і порушення з питань електричної і пожежної безпеки, негайно доповісти своєму безпосередньому керівнику.

6.2 Вимоги безпеки під час виконання робіт

Виконуючи посадові обов'язки, електрик зобов'язаний мати при собі посвідчення перевірки знань з питань охорони праці. За відсутності посвідчення або наявності посвідчення з терміном перевірки, працівник не отримує допуск до роботи.

Роботи в електричних установках щодо заходів безпеки поділяються на 3 категорії:

- зі зняттям напруги;
- без зняття напруги на струмопровідних частинах або біля них;
- без зняття напруги віддалік від струмопровідних частин, що перебувають під напругою.

Працівники, які виконують спеціальні види робіт, до яких висуваються додаткові вимоги безпеки, повинні бути навчені безпечному проведенню таких робіт і мати про це відповідний запис в посвідченні про перевірку знань.

Працівникові, який обслуговує закріплені за ним електричні установки напругою до 1000 В одноосібно, необхідно мати III групу з електробезпеки.

Виконуючи роботи в електричних установках потрібно проводити організаційні заходи, що забезпечують безпеку робіт:

- оформляти роботи нарядом-допуском, розпорядженням відповідно до переліку робіт, що виконуються в порядку поточної експлуатації;
- проводити підготовку робочих місць;
- допуск до роботи;
- здійснювати контроль над виконанням робіт;
- переводити на інше робоче місце;
- установлювати перерви в роботі та її закінчення.

Для підготовки робочого місця до роботи, яка вимагає зняття напруги, необхідно застосувати, в певному порядку, наведені нижче технічні заходи:

виконати необхідні відключення і вжити всіх заходів, що виключають помилкове або самовільне включення комутаційної апаратури;

розвісити заборонні плакати на приводах ручного і на ключах дистанційного керування комутаційною апаратурою;

провести перевірку на відсутність напруги на струмопровідних частинах, які повинні бути заземлені для захисту людей від ураження електричним струмом;

встановити заземлення (включити заземлюючі ножі, застосувати переносні заземлення);

встановити огорожі, якщо необхідно, близько робочих місць або струмоведучих частин, що залишилися під напругою, а також вивісити на даних огорожах плакати безпеки.

в залежності від місцевих умов, струмовідні частини обгородити до чи після їх заземлення.

Працювати без зняття напруги на струмопровідних частинах або поблизу них слід як мінімум двом працівникам, одному з них, керівнику робіт, необхідно мати групу IV; іншим групу III з обов'язковим оформленням роботи нарядом-допуском або розпорядженням.

При знятті і встановленні запобіжників під напругою в електроустановках напругою до 1000 В слід заздалегідь відключити всі навантаження, які підключені до зазначених запобіжників; використовувати при цьому ізолюючі кліщі або діелектричні рукавички, а якщо є відкриті плавкі вставки, то і захисні окуляри.

Роботу з використанням драбин потрібно проводити вдвох, один з працівників повинен перебувати знизу. Стояти на ящиках або інших предметах забороняється. При установці приставних драбин на балках,

елементах металевих конструкцій і т. п. слід надійно закріпити верхню і нижню частину драбини на конструкціях.

Під час обслуговування та ремонту електричних установок користуватися металевими драбинами забороняється.

6.3 Вимоги безпеки після закінчення робіт з ремонту та обслуговування електроустаткування

Відключити (від'єднати) необхідне електрообладнання, електроінструмент від мережі.

Навести порядок на робочому місці, прибрати в спеціальні місця деталі, матеріал, сміття і відходи.

Прибрати у відведене місце весь інструмент і пристосування.

Зняти і прибрати спецодяг, ЗІЗ, ретельно помити руки.

Провести огляд робочого місця на відповідність його всім вимогам протипожежного захисту.

Повідомити своєму безпосередньому керівнику про недоліки і несправності, які були під час виконання роботи. Зафіксувати це в оперативному журналі.

Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

У випадку пожежі:

вимкнути електричне обладнання, припливно-витяжну вентиляцію, якщо вона є;

повідомити в пожежну частину за телефоном 101 і доповісти про це своєму керівнику, а при його відсутності іншій посадовій особі;

приступити до ліквідації осередка загоряння, застосовуючи передбачені для цього засоби пожежогасіння. Виконувати гасіння електричного обладнання, що знаходиться під напругою, можна тільки

вуглекислотними вогнегасниками типу ОУ або піском. Гасити їх водою або пінним вогнегасником забороняється.

Електрик повинен пам'ятати, що при раптовому відключенні напруги, вона може бути подана знову без попередження.

Слід швидко відключити механізми і пристрої:

- в разі раптового відключення електроенергії,;
- якщо подальша їх робота загрожує безпеці працівників;
- в разі відчуття дії електричного струму при торканні металевих частин пускової апаратури;
- в разі іскріння;
- при найменших ознаках загоряння, появи диму, запаху гару;
- якщо з'явився незнайомий шум.

У разі короткого замикання в мережі електроживлення необхідно знеструмити обладнання і повідомити своєму прямому керівнику.

Якщо сталося ураження електричним струмом, слід звільнити потерпілого від дії електричного струму, для чого відключити електричну мережу або від'єднати потерпілого від струмопровідних частин за допомогою діелектричних захисних засобів та інших ізолюючих речей і предметів (сухий одяг, суха жердина, прогумований матеріал і т. п.), або перерізати (перерубати) провід будь-яким інструментом з ізолюючою рукояткою, обережно, без додаткового нанесення травм потерпілому. До прибуття медпрацівника необхідно надати потерпілому першу допомогу.

При нещасних випадках (травмуванні людини) негайно повідомити про це безпосереднього керівника.

6.4 Розрахунок захисного заземлення

Захисне заземлення забезпечує зниження напруги дотику при замиканні на корпус до відносно безпечних значень шляхом зменшення потенціалу заземленого обладнання, вирівнювання потенціалів підвищенням потенціалів місця, на якому стоїть людина, до значень, що близькі до потенціалу заземлених конструктивних частин обладнання.

Розрахунок захисного заземлення має на меті визначення основних параметрів заземлення – кількість, розміри та порядок розміщення одиночних заземлювачів та заземлюючих провідників, при яких напруга дотику та кроку в період замикання фази на заземлений корпус не перевищує допустимих значень.

Розрахунок захисного заземлення здійснюється для випадку розташування заземлювача в однорідній землі. При цьому враховується опір верхнього шару землі (шар сезонних змін), який обумовлений замерзанням або засухою ґрунту. Розрахунок, який заснований на коефіцієнтах використання провідності заземлювача називається способом коефіцієнтів використання. Його виконують, як при простих, так і при складних конструкціях групових заземлювачів.

Загальні вимоги електробезпеки повинні відповідати ДСТУ 7237:2011. Для захисту від уражень електричним струмом використовують захисне заземлення. Воно повинно захищати людей від уражень електричним струмом у випадку дотику до металевих неструмопровідних частин, які можуть опинитись під напругою внаслідок пошкодження ізоляції, це досягається з'єднанням металевих частин електроустановок з землею, або її еквівалентом.

Згідно з класифікацією приміщень за ступенем небезпеки ураження електричним струмом (ПУЕ 1.1.6.), приміщення в якому проводяться всі роботи відноситься до першого класу (без підвищеної небезпеки). Під час

роботи використовуються електроустановки з напругою живлення 36 В, 220 В, та 360 В. Опір контура заземлення повинен мати не більше 4 Ом.

Розрахунок проводять за допомогою методу коефіцієнта використання (екранування) електродів. Коефіцієнт використання групового заземлювача η – це відношення діючої провідності цього заземлювача до найбільш можливої його провідності за нескінченно великих відстаней між його електродами.

При розрахунку заземлювачів в однорідній землі способом коефіцієнтів використання значення опору R захисного заземлення визначаємо в наступному порядку:

обчислюємо опір пристрою заземлення R_z . Згідно правил улаштування електроустановок (ПУЕ) найбільш припустимі значення R_z , складають для установок до 1000 В:

10 Ом при сумарній потужності генераторів або трансформаторів, що живлять дану мережу, не більше 100 кВА;

4 Ом у всіх інших випадках.

- визначаємо необхідний опір штучного заземлювача $R_{ш}$:

$$R_{ш} = \frac{R_e \cdot R_z}{R_e - R_z}, \quad (4.1)$$

де R_e – опір розтікання природного заземлювача, Ом; R_z – необхідний опір заземлюючого пристрою, Ом.

- обчислюємо кількість вертикальних і довжину горизонтальних електродів:

$$n = \frac{4 \cdot \sqrt{S}}{a'}, \quad (4.2)$$

де n – кількість вертикальних електродів, штук; S – площа цеху, м²; a' – задана відстань між електродами, м.

$$l_r = 2a + 2b, \quad (4.3)$$

де l_r – сумарна довжина горизонтальних електродів, м; a – ширина сторони цеху, м; b – довжина сторони цеху, м.

- розраховуємо опори розтікання вертикального R_v та горизонтального R_g електродів:

$$R_v = \frac{\rho_{роз,в}}{2 \cdot \pi \cdot l_v} \left(\ln \frac{2l_v}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t + l_v}{4t - l_v} \right), \quad (4.4)$$

де $\rho_{роз,в}$ – розрахунковий питомий опір землі для вертикального електрода, Ом·м;

l_v – довжина вертикальних стрижневих електродів, м; d – діаметр електрода, мм;

t – глибина занурення в землю верхнього кінця електрода, м;

$$R_g = \frac{\rho_{роз,г}}{2 \cdot \pi \cdot l_g} \cdot \ln \frac{2l_g}{0,5 \cdot b' \cdot t}, \quad (4.5)$$

де $\rho_{роз,г}$ – розрахунковий питомий опір для горизонтального електрода, Ом·м;

l_g – довжина горизонтальних електродів, м; b' – товщина горизонтального електрода, м.

- за даними таблиці 4.1 та таблиці 4.2 визначаємо коефіцієнти використання для вертикальних та горизонтальних електродів η_v та η_g та з їх врахуванням обчислюємо розрахунковий опір заземлювача за виразом:

$$R_z = \frac{R_v \cdot R_g}{R_v \cdot \eta_g + R_g \cdot \eta_v \cdot n}, \quad (4.6)$$

Для розрахунку заземлювача задаємось такими вихідними даними: виробничий цех площею $S=5000$ м² і з понижуючою підстанцією 10/0,4 кВ. Заземлювач передбачається виконати з вертикальних стрижневих електродів довжиною $l_v=5$ м, діаметром $d=12$ мм і відстанню між ними $a'=5$ м та горизонтальних електродів (сталева смуга перетином 440 мм) на глибині $t=0,8$ м. Розрахункова величина питомого опору ґрунту у місці спорудження захисного заземлення береться з таблиці 6.3 (для чорнозема $c=20$ Ом/м). Коефіцієнти вертикальної прокладки K_v і горизонтальної прокладки K_g приймаються з таблиці 6.4 (для третього кліматичного району $K_v=1,3$, $K_g=2,5$).

Талиця 6.1 – Коефіцієнт використання горизонтального стрічкового електрода, що з'єднує вертикальні електроди (труби, кутики і ін.) групового заземлювача

Відношення відстані між вертикальним і електродами до їх довжин	Число вертикальних електродів							
	2	4	6	10	20	40	60	100
Вертикальні електроди розміщені в ряд								
1.	0,8 5	0,7 7	0,7 2	0,6 2	0,4 2	-	-	-
2.	0,9 4	0,8 0	0,8 4	0,7 5	0,5	-	-	-
3.	0,9 6	0,9 2	0,8 8	0,8 2	0,6 8	-	-	-
Вертикальні електроди розміщені по контуру								
1.	-	0,4 5	0,4 0	0,3 4	0,2 7	0,2 2	0,2 0	0,1 9
2.	-	0,5 5	0,4 8	0,4 0	0,3 2	0,2 9	0,2 7	0,2 3
3.	-	0,7 0	0,6 4	0,5 6	0,4 5	0,3 9	0,3 6	0,3 3

Талиця 6.2 – Коефіцієнт використання вертикальних електродів групового заземлювача (труб, кутиків, і т. ін.) без урахування впливу стрічки зв'язку

Число заземлювачів	Число вертикальних електродів					
	1.	2.	3.	1.	2.	3.
	Електроди, розміщені в ряд			Електроди, розміщені по контуру		
2	0,85	0,91	0,94	-	-	-
4	0,73	0,83	0,89	0,69	0,78	0,85
6	0,65	0,77	0,85	0,61	0,73	0,80
10	0,59	0,74	0,81	0,56	0,68	0,76
20	0,48	0,67	0,76	0,47	0,63	0,71
40	-	-	-	0,41	0,58	0,66
60	-	-	-	0,39	0,55	0,64
100	-	-	-	0,36	0,52	0,62

Таблиця 6.3 – Розрахункові значення питомих електричних опорів ґрунтів

Ґрунт	Значення, які рекомендуються для розрахунків, Ом/м
Пісок	700
Супісок	300
Суглинок	100
Глина	40
Чорнозем	20
Торф	20

Таблиця 6.4 – Значення підвищувальних коефіцієнтів K_r , K_v за кліматичними зонами

Кліматична зона	Тип заземлювачів	
	Горизонтально прокладені заземлювачі (смугові та ін.) при глибині від поверхні ґрунту $t=0,8$ м, K_r	Стрижневі вертикально встановлені заземлювачі при глибині від поверхні землі $t=0,5-0,8$ м, K_v
I	4,5–7	1,8–2
II	3,5–4,5	1,6–1,8
III	2,5–4	1,4–1,6
IV	1,5–2	1,2–1,4

Розрахункові питомі опори ґрунту для вертикальних і горизонтальних заземлювачів визначаються відповідно так:

$$\rho_{роз.в} = K_v \cdot \rho, \text{ Ом/м}, \quad (6.7)$$

$$\rho_{роз.г} = K_r \cdot \rho, \text{ Ом/м} \quad (6.8)$$

Таким чином за формулами (6.7), (6.8), для чорнозему:

$$\rho_{роз.в} = 1,3 \cdot 20 = 26, \text{ Ом/м};$$

$$\rho_{роз.г} = 2,5 \cdot 20 = 50, \text{ Ом/м}.$$

У якості природного заземлювача використовуємо металеву технологічну конструкцію з опором розтікання природного заземлювача

$$R_e = 15 \text{ Ом}.$$

Здійснюємо розрахунок у відповідності з зазначеною послідовністю:

- згідно ПУЕ необхідний опір заземлюючого пристрою складає:

$$R_3 = 4 \text{ Ом};$$

за формулою (6.1) визначимо необхідний опір штучного заземлювача $R_{ш}$:

$$R_{ш} = \frac{15 \cdot 4}{15 - 4} = 5,5 \text{ Ом};$$

за формулами (4.2), (4.3) обчислюємо кількість вертикальних та довжин горизонтальних електродів:

$$n = \frac{4 \cdot \sqrt{5000}}{5} = 5 \text{ штук},$$

$$l_r = 2 \cdot 50 + 2 \cdot 100 = 300 \text{ м};$$

за формулами (4.4), (4.5) розраховуємо опори розтікання вертикального R_v та горизонтального R_h електродів:

$$R_v = \frac{26}{2 \cdot \pi \cdot 5} \left(\ln \frac{2 \cdot 5}{0,012} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 3,3 + 5}{4 \cdot 3,3 - 5} \right) = 5,7 \text{ Ом},$$

$$R_h = \frac{50}{2 \cdot \pi \cdot 300} \cdot \ln \frac{2 \cdot 300}{0,5 \cdot 0,04 \cdot 0,8} = 0,3 \text{ Ом};$$

за даними таблиць (4.10, (4.11) обираємо коефіцієнти використання для вертикальних та горизонтальних електродів $K_v=0,4$ та $K_h=0,21$;

обчислюємо розрахунковий опір заземлювача R за формулою (4.6):

$$R_r = \frac{5,7 \cdot 0,3}{5,7 \cdot 0,21 + 0,3 \cdot 0,4 \cdot 56} = 0,22 \text{ Ом}.$$

Таким чином, проєктований заземлювач є контурним, складається з 56 вертикальних стрижневих електродів довжиною 5 м і діаметром 12 мм та горизонтального електрода у вигляді сталеві смуги довжиною 300 м, перетином 440 мм^2 , занурених у землю на 0,8.

ВИСНОВКИ

Встановлено доцільність використання моделі прогнозного контролю для керування системами сніготанення з використанням теплообмінників і нагрітої рідини для танення снігу. Були запропоновані різні моделі системи, одна з яких була обрана як основа для розробки MPC. Модель було розроблено з використанням Simulink як середовища моделювання, що забезпечує гнучкість на етапі тестування.

Прогнозований контроль було налаштовано на дані системи танення снігу, зібрані як з історичних даних, так і з тестів крок/відповідь, які дійсно дозволяють отримати інформацію про динаміку системи. Ці дані не є оптимальними для підгонки моделі та системи керування, але достатні для тестування.

Розроблену систему було протестовано в симульованому середовищі, де імітується прогноз опадів. Система порівнюється з моделюванням спрощеної версії існуючої системи керування. В 11 з 12 тестових випадків, де тестові випадки відрізняються за часом прогнозованого снігопаду та початковою температурою поверхні, модель приводить до меншого споживання енергії порівняно з ПІД-регулюванням. Різниця у споживанні енергії для 11 випадків, коли MPC перевершує PID, коливається від 8,6 кВт-год до 108,4 кВт-год, у середньому 38,3 кВт-год для всіх 12 тестових випадків.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Werner S. The Navigance Blogchemical process models – from first principle to hybrid models. 2020. URL: <https://blog.navigance.com/chemical-process-models> (дата звернення: 15.10.2024).
2. Johansson L., Moe. Temperature control and power monitoring of liquid cooling systems for mechanical manufacturing. 2019.
3. LLC M. Dynamics and Control first order plus dead time (fopdt). 2020. URL: <https://apmonitor.com/pdc/index.php/Main/FirstOrderSystems>(дата звернення: 15.10.2024).
4. Sharma R. Lecture notes for the course iia 4117: Model predictive control. 2019.
5. Understanding Model Predictive Control. 2022. URL: <https://se.mathworks.com/videos/series/understanding-model-predictive-control.html> (дата звернення: 15.10.2024).
6. NAROM temperature sensor (ntc). 2022. URL: <https://www.narom.no/undervisningsressurser/the-cansat-book/the-primary-mission/sensors-for-the-primary-mission/temperature-sensor-b-ntc/> (дата звернення: 15.10.2024).
7. Stp100, D-12-41, Schneider Electric, Aug. 2004.
8. Grundfos magna3. 2022. URL: <https://product-selection.grundfos.com/no/products/magna/magna3?tab=explore> (дата звернення: 15.10.2024).
9. Ferreau H., Kirches C., Potschka A., Bock H., Diehl M. qpOASES: A parametric active-set algorithm for quadratic programming. Mathematical Programming Computation. 2014, 6(4), 327–363.
10. Fortum. Priser og vilkår. 2022. URL: <https://www.fortum.no/bedrift/fjernvarme/priser-og-vilkar?vtab=accordion-item-5886> (дата звернення: 15.10.2024).

11. YR. Så mye snø kan du få i vinter. 2013. URL: <https://www.yr.no/artikkel/sa-mye-sno-kan-det-komme-i-vinter-1.11312139>(дата звернення: 15.10.2024).
12. Bi Q., Cai W.J., Lee E.L., Wang Q.G., Hang C.C., Zhang Y. Robust identification of first-order plus dead-time model from step response. *Control Engineering Practice*. 1999, 7(1), 71–77, issn: 0967-0661.
13. Kim M.S., Jang D.U., Hong J.S., Kim T. Thermal modeling of railroad with installed snow melting system. *Cold regions science and technology*. 2015, 109, 18–27, issn: 0165-232X.
14. Wigenstad T. Prosjektveileder forenklet anlegg for vannbåren oppvarming av boliger. 2009.
15. Diahovchenko I., Kolcun M., Čonka Z., Savkiv V., Mykhailyshyn R. Progress and challenges in smart grids: Distributed generation, smart metering, energy storage and smart loads. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, 2020. Vol. 44. P. 1319-1333. <https://doi.org/10.1007/S40998-020-00322-8>.
16. Palamar A., Pettai E., Beldjajev V. Control System for a Diesel Generator and UPS Based Microgrid. *Scientific Journal of Riga Technical University. Power and Electrical Engineering*. 2010. Vol. 27. P. 47-52.
17. Vasylykivskyi I., Ishchenko V., Pohrebennyk V., Palamar M., Palamar A. System of water objects pollution monitoring. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management (SGEM 2017)*, Vienna, Austria, November, 27–29, 2017. Vol. 17, No. 33. P. 355-362.
18. Wieclaw L.; Pasichnyk V.; Kunanets N.; Duda O.; Matsiuk O.; Falat P. Cloud computing technologies in “smart city” projects. In *Proceedings of the 2017 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*. Bucharest: Romania, 21–23 September 2017. pp. 339–342.

19. Yaskiv V. Using of High-Frequency Magnetic Amplifier in Switch Mode DC Power Supplies. Proceedings of the 35th Annual IEEE Power Electronic Specialists Conference (PESC'04), Aachen, 2004. P. 1658–1662.
20. Development of Digital Platform to Identify and Monitor the Digital Business Transformation Index, Strutynska, I., Dmytrotsa, L., Kozbur, H., Dudkin, P., Dudkina, O., International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies, 2020, 2, pp. 171–175, 9322016
21. Information technology to support the digital transformation of small and medium-sized businesses, Mosiy, L., Kozbur, H., Strutynska, I., Mosiy, O., Yatsyshyn, V. CEUR Workshop Proceedings, 2024, 3742, pp. 150–165
22. Analysis of the SMEs' Digitalization State Using HIT Index and Machine Learning Technique, Strutynska, I., Kozbur, H., Dmytrotsa, L., Kozbur, I., Gashchyn, N., Proceedings - International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT, 2023, pp. 332–337
23. Working-Out of Recommendation System to Increase the Digital Maturity Level of Enterprises, Strutynska, I., Dmytrotsa, L., Kozbur, H., Hlado, O., Sorokivska, O., 2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2020 - Proceedings, 2021, pp. 147–151, 9467978
24. The Unification of Approaches to Measuring the Digital Maturity of Business Structures (International and Domestic Approaches) / Strutynska, I., Dmytrotsa, L., Kozbur, H., Melnyk, L., Sherstiuk, R., CEUR Workshop Proceedings, 2021, 3013, pp. 10–23
25. Введення в комп'ютерну графіку та дизайн: Навчальний посібник для студентів спеціальності 174 "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка"/Укладачі: О.В. Тотосько, П.Д. Стухляк, А.Г. Микитишин, В.В. Левицький, Р.З. Золотий - Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023 - 304с. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/41166>.

26. Автоматизація виробничих процесів : навч. посіб. / Проць Я. І., Савків В. Б., Шкодзінський О. К., Ляшук О. Л. Тернопіль : ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. 344с.
27. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / укл.: Стручок В. С. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. 156 с.
28. Букетов А. В., Стухляк П. Д., Кальба Є. М. Фізико-хімічні процеси при формуванні епоксикомпозитних матеріалів. Тернопіль: Збруч, 2005. 182 с.
29. Драган Я.П., Яворський Б. І., Яворська Є. Б. Концепції і принципи побудови моделей для означення метрологічних характеристик ритміки кардіосигналів. Вісник нац. унів. "Львівська політехніка": зб. наук. пр. Львів: Національний університет "Львівська політехніка", 2002. № 443. С. 200-205.
30. Коваль В. П., Івасечко Р. Р., Козак К. М. Енергетична ефективність систем позиціонування плоских сонячних панелей. Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. 2015. № 3. С. 2-10.
31. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д. Телекомунікаційні системи та мережі. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. 384 с.
32. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп'ютерні мережі. Книга 1 [навчальний посібник]. Львів : «Магнолія 2006», 2013. 256 с.
33. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп'ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник]. Львів : "Магнолія 2006", 2014. 312 с.

34. Паламар М. І., Стрембіцький М. О., Паламар А. М. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ, 2019. 150 с.
35. Стухляк П.Д., Букетов А.В. Епоксикомпозитні матеріали, модифіковані ультрафіолетовим опроміненням. Тернопіль: Збруч, 2009. 237 с.
36. Ткачук Р., Яворський Б. Метод побудови біотехнічної системи для оцінювання електроретинограм з підвищеною вірогідністю та ефективністю. Вісник Тернопільського державного технічного університету. 2009. №3. С. 102-110.
37. Юзьків А. В., Яворський Б. І. Математичне моделювання електроретинографічних сигналів. Вісник ТДТУ. Тернопіль, 1997. № 2. С. 40-45.
38. Яворський Б. І. Математичні основи радіоелектроніки. Частина І. Тернопіль: ТПІ імені Івана Пулюя. 1996. 184 с.
39. Пилицець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилицець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42995>.
40. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший (бакалаврський)/ укл.: О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.
41. Платформа .NET та мова програмування C# 8.0: навчальний посібник / Коноваленко І.В., Марущак П.О. – Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2020 – 320 с.
42. Проектування мікропроцесорних систем керування: навчальний посібник / І.Р. Козбур, П.О. Марущак, В.Р. Медвідь, В.Б. Савків, В.П. Пісьціо. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2022. – 324 с.

43. Медвідь В.Р., Проектування мікропроцесорних систем керування: навчальний посібник / І.Р. Козбур, В.Р. Медвідь, В.П. Пісьціо. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2015. – 354 с., ISBN 978-966-305-045-4, <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/20504>.
44. Савків В.Б., Капаціла Ю.Б., Михайлишин Р.І. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2021. 50 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/35172>
45. Основи наукових досліджень і теорія експерименту : Навчальний посібник для здобувачів освітнього ступеня «Магістр» спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / укл. Ю. Б. Капаціла, П. О. Марущак, В. Б. Савків, О. П. Шовкун. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2023. 186 с.
46. Козбур І.Р., Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи «Дослідження частотних характеристик неперервних лінійних систем», по курсу «Теорія автоматичного управління», для студентів 3 курсу спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Авт.: Козбур І.Р., Козбур Г.В. Марущак П.О., Савків В.Б. – Тернопіль: ТНТУ, ФПТ, каф. АВ, – 2022. – с. 16. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39207>
47. Трембач Р.Б., Шовкун О.П. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Інформаційно – вимірювальні системи” Модуль І. «Вимірювальна техніка» – Тернопіль: ТНТУ., 2024. – 67 с.
48. Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка” Модуль 3. «Імпульсна техніка, вторинні джерела живлення, основи цифрової електроніки» – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 26с.

49. Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка” Модуль 4. «Мікросхемотехніка» – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 44с.
50. Розробка мікропроцесорної системи керування на основі мікропроцесорного комплекту КР580 та на основі ОМЕОМ К1816ВЕ51/ Методичні вказівки для виконання курсового проєкту з дисципліни "Електроніка і мікропроцесорна техніка" //Медвідь В.Р, Пісьціо В.П., Микулик П.М. Тернопіль: ТНТУ - 2016. 108 с.
51. Козбур І.Р., Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи «Дослідження часових характеристик неперервних лінійних систем», по курсу «Теорія автоматичного управління», для студентів 3 курсу спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології» / Авт.: Козбур І.Р., Козбур Г.В. Марущак П.О., Савків В.Б. – Тернопіль: ТНТУ, ФПТ, каф. АВ, – 2022. – 19 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39206>
52. Лабораторний практикум з проектування та моделювання роботи електропневматичних схем у середовищі програмного пакету «FluidSIM Pneumatics» з курсу «Технічні засоби автоматизації» / укл. : О.К. Шкодзінський. - Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2020. - 32 с.<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/31418>
53. Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. / Я.І. Проць, В.Б. Савків, О.К. Шкодзінський, О.Л. Ляшук. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 344 с.
54. Автоматизація виробничих процесів: Навчальний посібник / Я.Проць, О.Данилюк, В.Савків - ТДТУ. 2005. -264с.
55. Методичні вказівки з виконання курсової роботи з дисципліни «Основи наукових досліджень» для здобувачів освітнього ступеня «Магістр»

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / укл. : П.О. Марущак , Ю.Б. Капаціла , Р.І. Михайлишин. - Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2018. - 75 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/26145>

56. Методичні вказівки по роботі з програмним симулятором "AVR simulator IDE" з курсу "Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо. - Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2020. - 21 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/32136/>.
57. Методичні рекомендації для практичних занять з курсу «Засади провадження наукової діяльності» / укл. : Дмитрів Олена Романівна, Рогатинський Роман Михайлович. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2024. – 112 с., <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/44669>.