

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Сумський державний університет

Класичний фаховий коледж

(повна назва інституту/факультету)

Електронні інформаційні системи

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

_____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавр

(бакалавр / магістр)

зі спеціальності 171Електроніка

(код та назва)

освітньо-професійної

(освітньо-професійної / освітньо-наукової)

програми Електронні інформаційні системи

(назва програми)

на тему: **Керування системою теплопостачання широтно-імпульсним способом**

Здобувача (ки) групи ЕІс3-91к Гороновича Богдана Васильовича

(шифр групи)

(прізвище, ім'я, по батькові)

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Богдан Горонович

(підпис)

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

Консультант¹⁾ _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є широтно-імпульсна модуляцією, способи управління системою, побудови таких систем.

Предмет дослідження є системи теплопостачання з управління широтно-імпульсним способом.

Обґрунтуванням актуальності теми використання ШІМ є сучасним технологічним вирішенням багатьох складних задач.

Метою цієї статті є запропонувати простий, але оптимальний контролер для систем HVAC, який інтегрує прогноз погоди та зайнятості для економії енергії в будівлях.

Відповідно до мети, вирішувалися такі задачі:

- використання ШІМ для управління температурою;
- види управління.

У документі пропонується простий енергозберігаючий контролер для систем опалення (HVAC), який поєднує інформацію про заселеність і погоду з прогнозованим керуванням для економії енергії в будівлях. Контролер використовує стратегію широтно-імпульсної модуляції та вмикає та вимикає систему HVAC на основі оптимальних рішень модельного прогнозного контролера. Пропонований контролер є простим, але оптимальним (у певному сенсі), і тому підходить для житлових і невеликих комерційних будівель, де вартість контролера є ключовим фактором. Ефективність запропонованої схеми проілюстровано моделюванням, а модель термодинаміки будівлі визначено на основі даних експериментів.

Робота викладена на 36 сторінках, у тому числі включає 19 рисунків, список цитованої літератури із 28 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ, КОНТРОЛЕР, УВІМКНЕННЯ ТА ВИМКНЕННЯ, HVAC, ПРОГНОЗНЕ КЕРУВАННЯ МОДЕЛЛЮ

ЗМІСТ

стор.

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1 ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ	5
1.1 Опис широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).....	5
1.2 Принцип роботи ШІМ	6
1.3 Сигнал ШІМ	8
1.4 Несуча частота та робочий цикл ШІМ.....	9
1.5 Пристрої генерації ШІМ.....	10
РОЗДІЛ 2. ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ ТА СИСТЕМА HVAC	11
2.1 Принцип роботи ШІМ на основі регулювання температурою.....	11
2.2 Використання ШІМ для керування живленням, що подається в систему теплопостачання	12
2.3 Система HVAC	16
2.4 Система ОВК	17
2.5 Модель теплодинаміки будівлі	19
2.6 Оцінка параметрів моделі	19
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ	23
3.1 Прогнозування температури	23
3.2 Прогноз зайнятості	25
3.3 Інтелектуальний термостат з контролем на основі ШІМ.....	26
3.4 Отриманий результат.....	28
ВИСНОВКИ	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	33

ВСТУП

Оптимальне споживання енергії в будівлях допомагає зменшити витрати на енергію та вуглецевий слід. Нещодавні дослідження довели, що інформацію про кліматичні прогнози, кількість людей, витрати на енергію та зберігання тепла можна використовувати в управлінні опаленням (HVAC) для підвищення енергоефективності та зниження витрат.

Наскільки відомо авторам, перша спроба використання кліматичних прогнозів для підвищення ефективності споживання енергії в системі HVAC була розглянута в [1] для інтегрованих систем автоматизації будівель. Промислове впровадження керування системою опалення з попередньою інформацією можна простежити до контролерів на основі правил від Siemens Automation [2].

Доступні результати керування HVAC можна згрупувати у дві категорії: проактивні контролери, які використовують попередню інформацію на клімат, заповненість, умови будівлі та зберігання, і реактивні контролери, які використовують вимірювання з будівлі. Прогностичний контролер моделі (MPC) є широко використовуваним програмованим контролером.

Найпростішим програмованим контролером є інтелектуальний термостат (ST), який використовує прогнози заповнюваності для зменшення споживання енергії в житлових будинках.

Нещодавно з'явився простий контролер, який вмикає та вимикає залежно від мінімальної похибки між середньою температурою та бажаною температурою, мінімального відхилення температури від бажаної температури та мінімальної кількості запусків компресора.

Такі контролери потрібні для житлових і невеликих комерційних будівель, де вартість контролера є ключовим фактором. Представлений контролер містить в собі функції MPC і техніку широтно-імпульсної модуляції (ШИМ) для розробки простого контролера вмикання та вимкнення для системи ОВК в будівлях.

РОЗДІЛ 1

ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ

1.1 Опис широтно-імпульсної модуляції (ШІМ)

Широтно-імпульсна модуляція (ШІМ) — це чудова техніка керування струмом, яка дає змогу контролювати швидкість двигунів, теплову потужність нагрівачів.

Пристрої навантаження призначені для ефективної роботи та виконання своїх відповідних завдань за певної напруги, споживаючи певну кількість струму.

Щоб змінити параметри навантаження, напругу можна знизити, але це часто матиме негативні наслідки, такі як зменшення крутного моменту двигуна або зниження напруги нижче рівня прямого зсуву транзистора або серії світлодіодів. Щоб забезпечити змінний контроль без шкоди для операційної здатності, потрібен був інший метод.

ШІМ або сигнал «широтно-імпульсної модуляції» використовується для зменшення електричної потужності, що подається на електричний пристрій, шляхом увімкнення та вимикання сигналу на високій частоті. Із збільшенням або зменшенням відносного часу увімкнення сигналу зростає і середня напруга сигналу.

Ця середня напруга забезпечує еквівалентну меншу потужність, зберігаючи при цьому повну напругу протягом увімкненого стану тривалості імпульсу. Два ключових параметра контролюють ШІМ-сигнал - частоту перемикання та відносну тривалість увімкнення, що називається «робочим циклом».

1.2 Принцип роботи ШІМ

ШІМ працює шляхом пульсації постійного струму та зміни кількості часу, протягом якого кожен імпульс залишається «увімкненим», щоб контролювати величину струму, що надходить до такого пристрою, як світлодіод. ШІМ є цифровим, що означає, що він має два стани: увімкнено та вимкнено (які відповідають 1 та 0 у бінарному контексті, що стане більш актуальним для вас, якщо ви використовуєте мікроконтролери).

Розглянемо на прикладі управлінні яскравості світіння світлодіодом. Чим довше триває кожен імпульс, тим яскравішим буде світлодіод. Через те, що інтервал між імпульсами такий короткий, світлодіод фактично не вимикається. Іншими словами, джерело живлення світлодіода вмикається та вимикається так швидко (тисячі разів на секунду), що світлодіод фактично залишається світитися без мерехтіння. Це називається ШІМ-диммером, а така схема просто називається схемою ШІМ-диммера.

Квадрати на зображенні ШІМ нижче — це імпульси, які представляють час «увімкнення», а зони з натисненням — час, протягом якого живлення «вимкнено». І квадрати, і западини мають однакову «ширину», тому робочий цикл становить 50%. ШІМ-сигнали зазвичай є прямокутними, як на рисунку 1.1

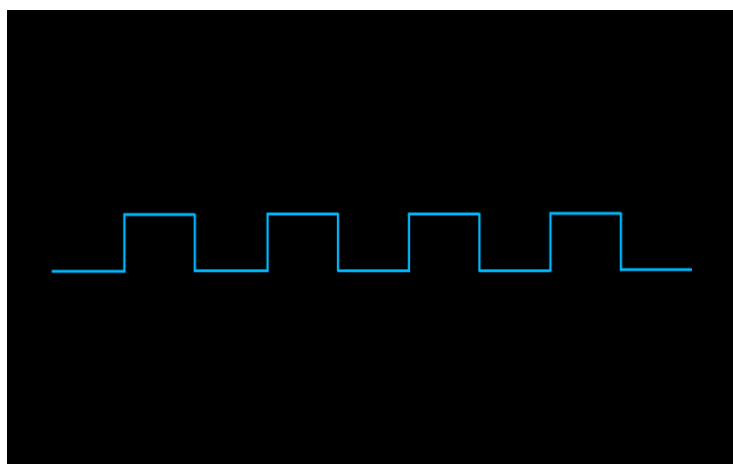


Рис.1.1 Сигнал ШІМ (квадратна хвиля) з робочим циклом 50% [3]

Якщо шпаруватість джерела живлення з ШІМ встановлено на 70%, то імпульс увімкнений протягом 70% часу, а він вимкнений 30% часу. Робочий цикл означає кількість часу, протягом якого він працює. При робочому циклі 70% яскравість світлодіода повинна бути близько 70%. Кореляція між робочим циклом і яскравістю не є 100% лінійною, оскільки ефективність світлодіодів змінюється залежно від величини струму, що подається.

Якби робочий цикл становив 0%, весь сигнал був би плоским, як показано нижче. Робочий цикл ШІМ 0% означає, що живлення вимкнено. У такому стані світлодіод не працюватиме. Він би просто був вимкнений. Графік ШІМ наведено на рисунку 1.2.

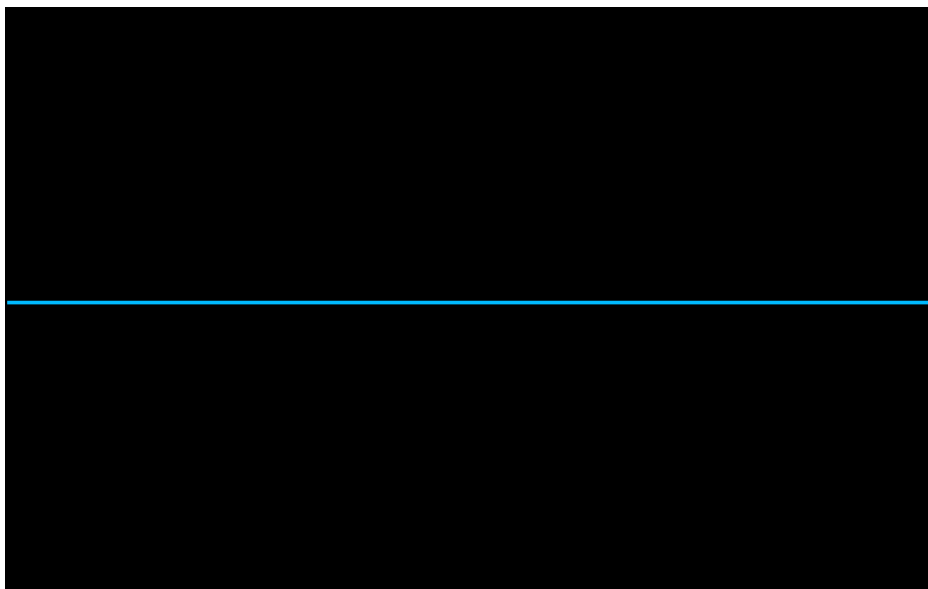


Рис. 1.2 Сигнал ШІМ (квадратна хвиля) із шпаруватістю 0%, це означає, що живлення вимкнено [4]

Основна причина, чому схеми ШІМ такі ефективні, полягає в тому, що вони не намагаються частково обмежити потік струму за допомогою опору. Вони повністю включають і повністю вимикають струм. Вони просто змінюють кількість часу, протягом якого він увімкнений.

1.3 Сигнал ШІМ

Створення ШІМ-сигналу повністю залежатиме від пристрою, який створює сигнал. Якщо використовується ПЛК із призначеною вихідною платою ШІМ, вам потрібно буде надати платі значення частоти та робочого циклу через вибрану технологію польової шини. Деякі ПЛК можуть мати функціональні блоки, надані постачальником, які матимуть параметри, які необхідно встановити перед початком роботи.

Деякі контролери двигунів приймають аналогове значення у вигляді 0-10 вольт або 4-20 мА, яке буде масштабовано для виведення робочого циклу в діапазоні від 0-100%. Мікроконтролери, такі як Arduino, використовують свої цифрові виходи для надання сигналів ШІМ, просто записуючи вихідну команду з аргументом від 0 до 255, який представляє повний діапазон робочого циклу.

Щоб розібратися далі, з ШІМ-схеми зазвичай включають дуже маленьке джерело живлення та велике. Маленьке джерело живлення керує великим за допомогою силових транзисторів.

Маленький генерує сигнал, а « потужність », яка є великим струмом і напругою, які фактично живлять світлодіод, контролюється вищезгаданими транзисторами. Цим крихітним джерелом живлення може бути контакт GPIO мікроконтролера, такий як контакт введення та виведення Arduino, вихідний контакт таймера 555, серед інших.

Встановлення шпаруватості сигналу на 30% також призведе до шпаруватості 30% для потужності, оскільки великий струм є лише посиленою копією крихітного струму (яким є сигнал).

Ця концепція дозволяє високоскладним мікроконтролерам (часто їх називають MCU) та іншим комп'ютерам контролювати дуже великі струми за розумну ціну. Мікроконтролер MCU генерує сигнал, а потім цей сигнал керує силовим транзистором.

1.4 Несуча частота та робочий цикл ШІМ

Швидкість перемикання або частота імпульсу залежить від пристрою навантаження, який використовує сигнал. Для електричного нагрівача або двигуна частота може бути досить низькою, можливо, від десятків до сотень Гц. Але для твердотільного пристрою, такого як реле або світлодіод, частота може бути набагато вищою - можливо, десятки тисяч герц. Ключовим визначальним фактором є швидкість відгуку навантажувального пристрою.

Робочий цикл сигналу ШІМ – це відносна кількість часу, протягом якого сигнал буде увімкнено, і виражається у відсотках. Якщо шпаруватість становить 100%, сигнал буде увімкнено весь час. Якщо його знизити до 50%, сигнал буде увімкнено протягом половини імпульсу та вимкнено протягом іншої половини. Під час керування двигунами чи нагрівачами ми використовуємо робочий цикл, щоб диктувати потужність. Якщо наш ШІМ-контролер видає напругу 12 вольт постійного струму, то робочий цикл 50% забезпечить еквівалент 6 вольт постійного струму для живлення навантаження. На рисунку 1.3 показано сигнали ШІМ, що відображає різні робочі цикли

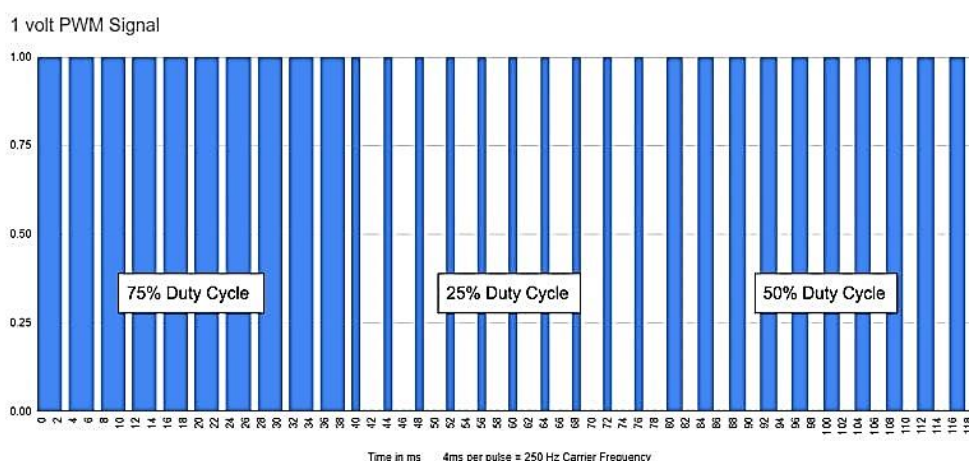


Рис1.3. Сигнал ШІМ, що показує різні робочі цикли на несучій частоті 250 Гц [5]

1.5 Пристрої генерації ШІМ

На ринку є багато пристроїв, які можуть створювати ШІМ-сигнал або управляти пристроями, використовуючи ШІМ-сигнал з мінімальним входом. Для промислового застосування існують автономні пристрої, які мають циферблат або аналоговий вхід для регулювання швидкості. Для установки потрібно лише подати живлення та двигун, все інше міститься всередині корпусу.

Деякі виробники ПЛК мають виходи, які можна налаштувати як виходи ШІМ, хоча зауважте, що релейні виходи не мають швидкості чи терміну служби, щоб підтримувати виходи ШІМ. Зазвичай ці виходи не можуть керувати великими навантаженнями напряму, але вони можуть керувати твердотілими реле.

Більшість мікроконтролерів містять кілька виходів ШІМ, які можна запрограмувати з внутрішніми функціями, що вимагають лише робочого циклу та забезпечують вихід 3,3-12 вольт для керування транзисторами або твердотілими реле для підсилення.

РОЗДІЛ 2. ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ ТА СИСТЕМА HVAC

2.1 Принцип роботи ШІМ на основі регулювання температурою

Нанопрограмований логічний контролер (ПЛК) можна використовувати для керування електричною потужністю, що подається на електричний нагрівач у печі, за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

У систему подається змінний імпульс повної потужності. Чим більша різниця між заданим значенням і зворотним зв'язком від пристрою, тим довший відсоток часу буде увімкненим. Коли імпульси сумуються, на нагрівач подається середня потужність. Графік широтно-імпульсного методу контролю температури наведено на рисунку 2.1

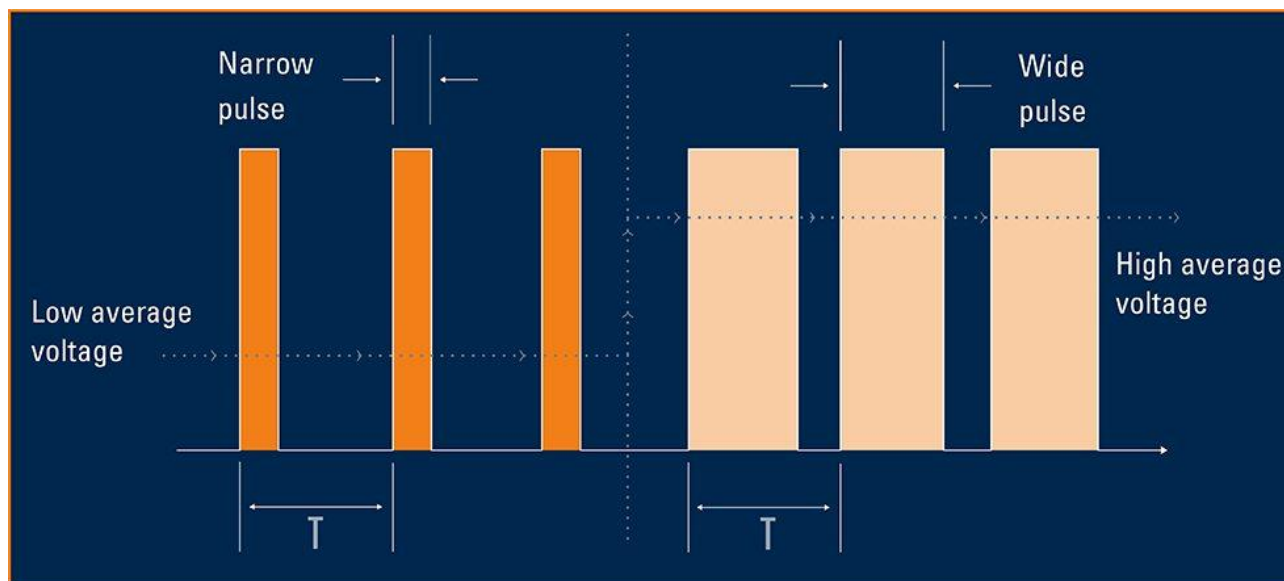


Рис.2.1 Широтно-імпульсний метод контролю температури [6]

ШІМ — це замкнутий алгоритм керування, який використовується для створення усередненого за часом сигналу шляхом поєднання окремих імпульсів різної ширини.

Тривалість імпульсів різниться протягом періоду часу залежно від різниці між заданим значенням і температурним зворотним зв'язком від пристрою.

Чим більша помилка, тим більший відсоток часу імпульс увімкнений порівняно з вимкненим, також відомий як робочий цикл. Оскільки робочий цикл змінюється швидко порівняно з часом реакції системи, ця функція допомагає запобігти перерегулюванню та недорозбору. Есереднення імпульсів у часі зображено на рисунку 2.2

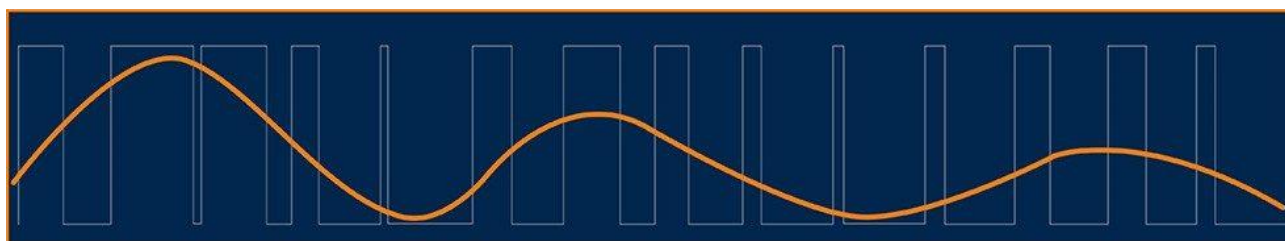


Рис.2.2 Теорія широтно-імпульсної модуляції, що зображує усереднення імпульсів у часі [7]

2.2 Використання ШІМ для керування живленням, що подається в систему теплопостачання

Програмований логічний контролер (ПЛК) easyE4 напо можна використовувати для впровадження ШІМ для керування потужністю, що подається на електричні нагрівачі.

Задані значення можна вводити безпосередньо на передній панелі, встановлювати через горщики або надсилати на easy з іншого ПЛК через Modbus TCP.

Подібним чином, зворотний зв'язок по температурі від пристрою, такого як детектор температури опору (RTD), може бути підключений до ПЛК через блок розширення температури.

Чим холодніший зворотний зв'язок від заданого значення, тим довше триватиме електричний імпульс до нагрівача.

Таким чином, середня потужність, що подається до нагрівача, буде більшою, що призведе до підвищення температури, доки вона не досягне бажаного заданого значення. Широтно-імпульсна модуляція для контролю температури наведено на рисунку 2.3

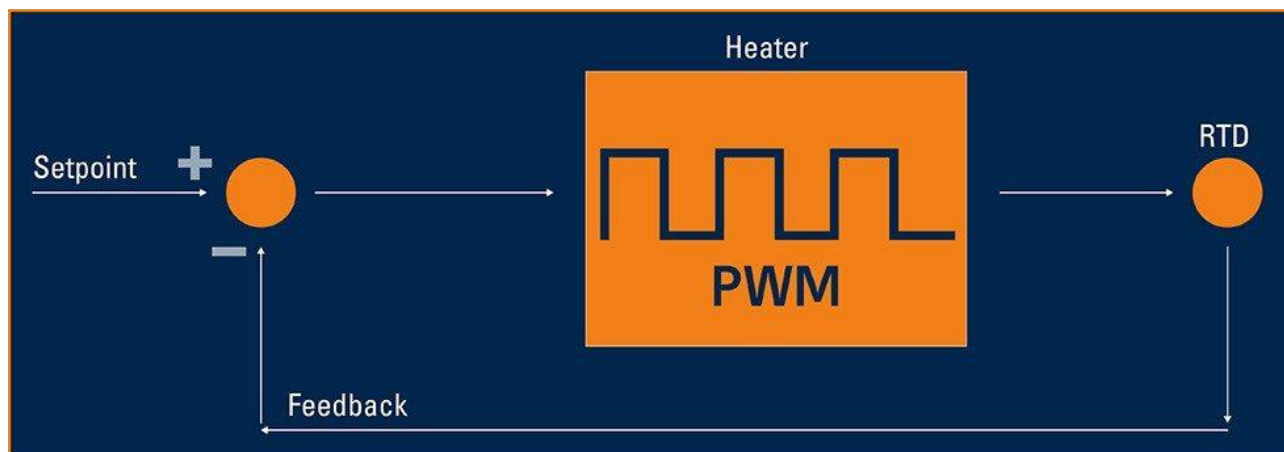


Рис.2.3 Широтно-імпульсна модуляція для контролю температури [8]

Одночасне керування двома виходами з широтно-імпульсною модуляцією ПЛК easyE4 nano може керувати двома виходами з широтно-імпульсною модуляцією одночасно.

Також важливо відзначити, що функція ШІМ може використовуватися лише на перших двох виходах базового блоку, тому вибір правильного продукту є важливим, оскільки транзисторний вихідний блок потрібен для швидшого часу перемикання [9]

Однак більшості обігрівачів потрібен деякий час, щоб теплово реагувати на зміну потужності, тому релейний модуль працює ідеально. У наступному прикладі ми демонструємо, як створити функцію ШІМ із часовою базою 10 секунд.

Ось логіка створення ШІМ-функції з часовою базою 10 секунд і мінімальною тривалістю 0,5 секунди. Відсоток часу, протягом якого вихід увімкнено, контролюється коефіцієнтом підсилення зрізу. ШІМ-функція з часовою базою зображено на рисунку 2.4

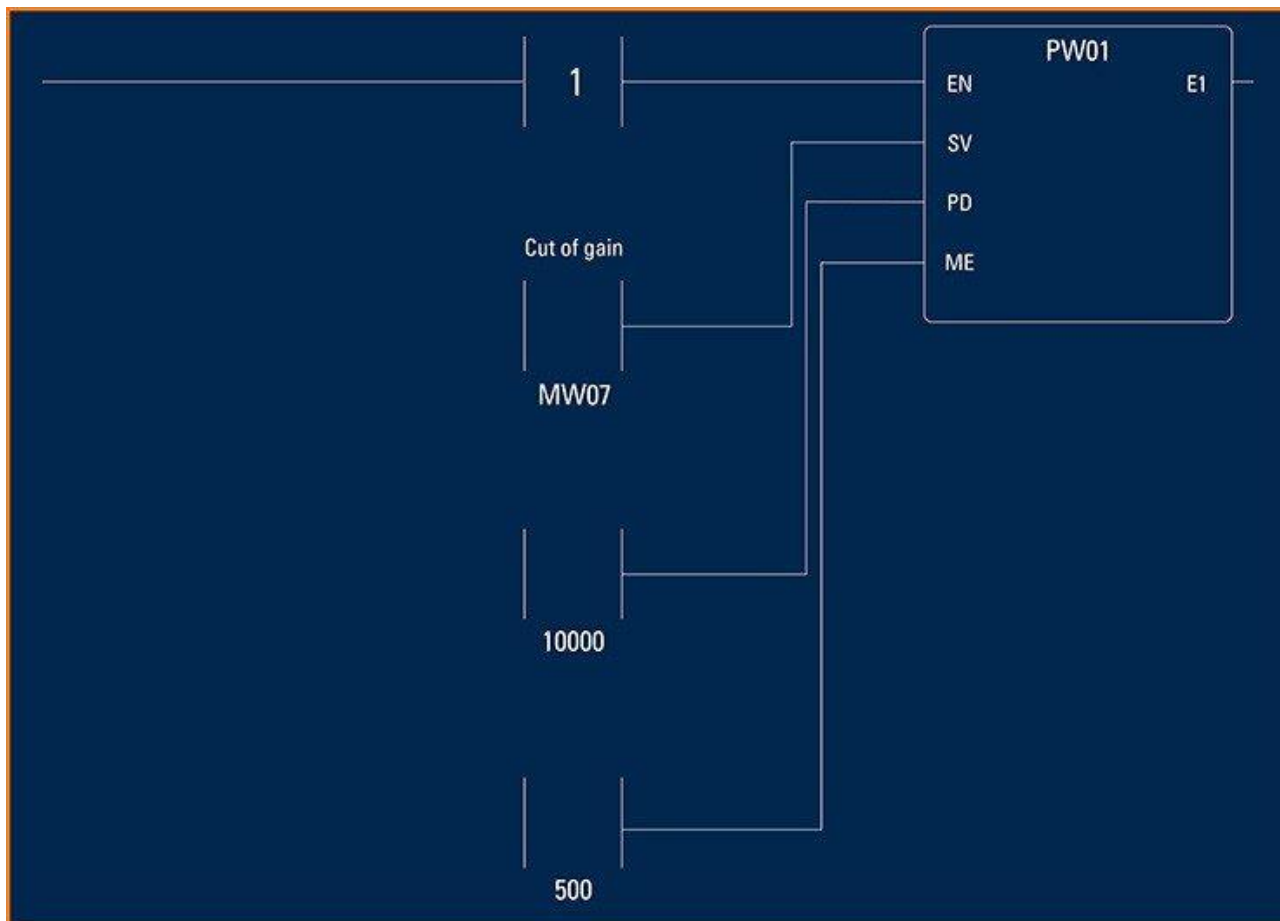


Рис.2.4 ШІМ-функція з часовою базою 10 секунд і мінімальною тривалістю 0,5 секунди [10]

Коефіцієнт посилення відсічення по суті вибирається таким, щоб бути скалярним кратним похибці – або пропорційним коефіцієнтом посилення, коли задане значення перевищує температурний зворотний зв'язок [11]

Якщо зворотний зв'язок по температурі від системи вище встановленого значення, посилення відсікання встановлюється на нуль. У цьому прикладі задане значення температури та зворотний зв'язок встановлюються та зчитуються через аналогові пристрої введення. На рисунку 2.5 та 2.6 наведено приклад ШІМ для двох різних мікросхем.

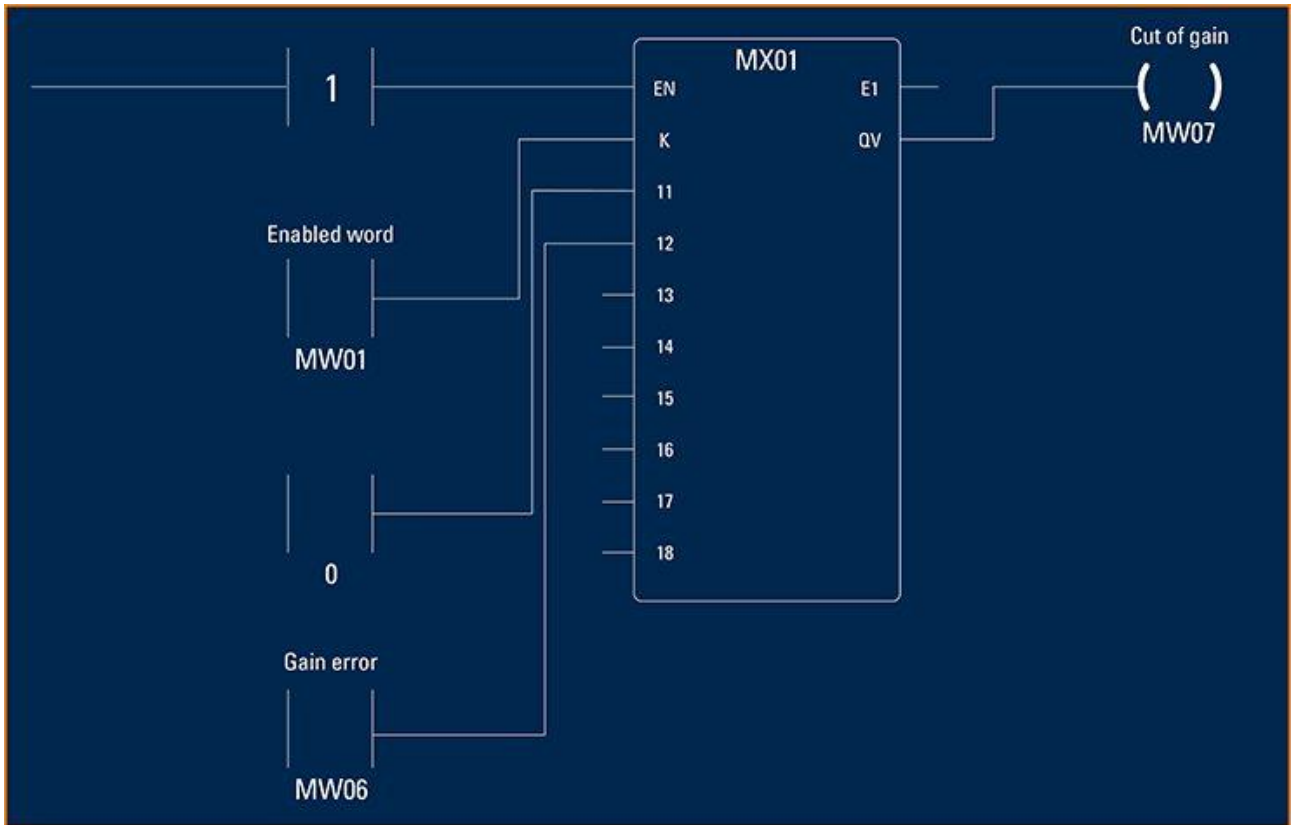


Рис.2.5 ШІМ скорочення посилення MW07 [12]

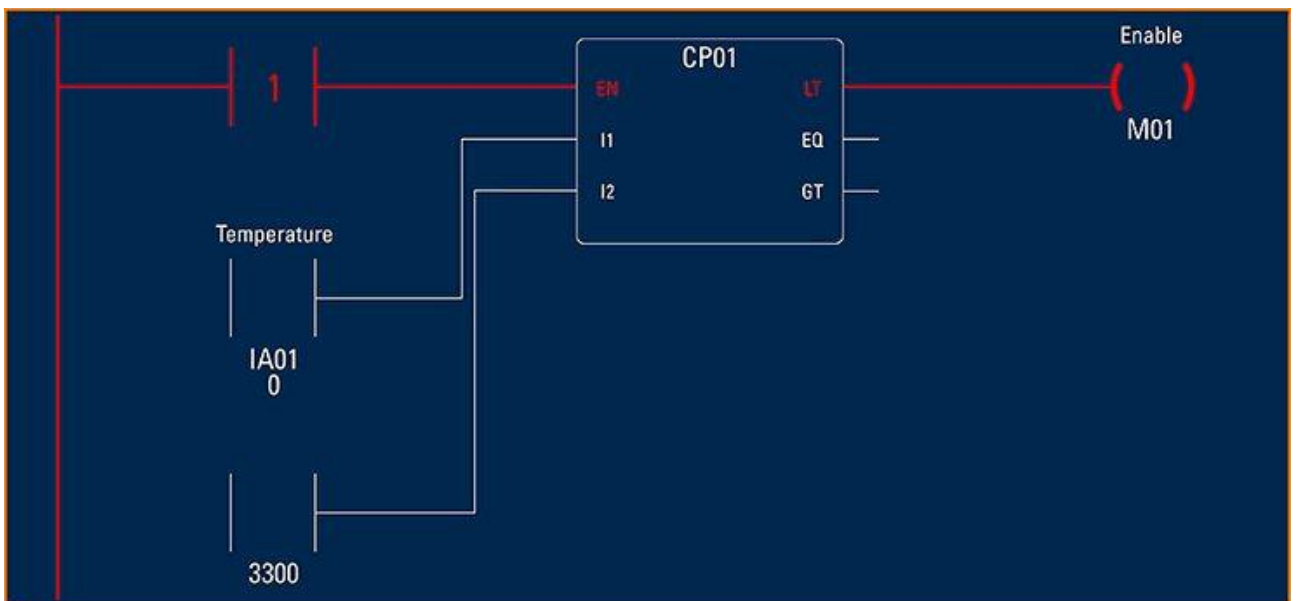


Рис 2.6 ШІМ скорочення посилення MW01 [13]

2.3 Система HVAC

Пропонується простий контролер енергозбереження для систем опалення (HVAC), який поєднує інформацію про зайнятість і погоду з прогнозним керуванням для економії енергії в будівлях. Контролер використовує стратегію широтно-імпульсної модуляції та вмикає та вимикає систему HVAC на основі оптимальних рішень модельного прогнозного контролера [14]

Пропонований контролер є простим, але оптимальним (у певному сенсі), і тому підходить для житлових і невеликих комерційних будівель, де вартість контролера є ключовим фактором. Ефективність запропонованої схеми проілюстровано моделюванням, а модель термодинаміки будівлі визначено на основі даних експериментів.

Оптимальне споживання енергії в будівлях допомагає зменшити витрати на енергію та вуглецевий слід. Нещодавні дослідження довели, що інформацію про кліматичні прогнози, кількість людей, витрати на енергію та зберігання тепла можна використовувати в управлінні опаленням, вентиляцією та кондиціонуванням повітря (HVAC) для підвищення енергоефективності та зниження витрат [15].

Наскільки відомо авторам, перша спроба використання кліматичних прогнозів для підвищення ефективності споживання енергії в системі HVAC була розглянута в [16] для інтегрованих систем автоматизації будівель. Промислове впровадження керування HVAC з попередньою інформацією можна простежити до контролерів на основі правил від Siemens Automation [16].

Доступні результати керування HVAC можна згрупувати у дві категорії: проактивні контролери, які використовують попередню інформацію про клімат, заповненість, умови будівлі та зберігання, і реактивні контролери, які використовують вимірювання з будівлі [17]

Прогностичний контролер моделі (MPC) є широко використовуваним проактивним контролером. Найпростішим проактивним контролером є

інтелектуальний термостат (ST), запропонований у [17], який використовує передбачення зайнятості для зменшення споживання енергії в житлових будинках. Хоча результати показують значне зниження споживання енергії, оптимальність рішення не гарантується. Нещодавно з'явився простий контролер, який вмикає та вимикає залежно від мінімальної похибки між середньою температурою та бажаною температурою, мінімальне відхилення температури від бажаної температури та мінімальна кількість запусків компресора на годину для системи ОВК запропоновано в [18].

Цей підхід вирішив задачу багатоцільової оптимізації для обчислення часу перемикання. Отримані результати показали, що шляхом правильного вибору стратегії ввімкнення та вимкнення можна створити дешевий і оптимальний контролер, який може заощаджувати енергію в будівлях. Незважаючи на те, що запропонований контролер поєднує в собі такі бажані характеристики, як оптимальність і простота, метод не враховує інформацію про прогнозовані показники заповненості та температури навколишнього середовища, що, як було доведено, зменшує споживання енергії.

Крім того, контролеру бракує можливостей прогнозування, які є важливими для боротьби з непередбаченими порушеннями. Насправді в літературі не було описано жодного контролера, який поєднує стратегію ввімкнення та вимкнення, MPC і прогнозування погоди та зайнятості.

2.4 Система ОВК

Система HVAC складається з нагрівача та повітря кондиціонер з одношвидкісним компресором, який споживає повну потужність під час увімкнення та не потребує електроенергії в іншому випадку.

Зовнішній блок містить котушки компресора та конденсатора, а також внутрішній блок має повітрорудку. Щоб спростити аналіз, ігнорується потужність, яку споживає повітрорудка, оскільки енергія, що надходить до кондиціонера, в основному використовується компресор. Кондиціонер

управляється за допомогою термостата. Для уникнення частих перемикачів в термостаті передбачена невелика мертва зона. Термостат є найдешевший контролер HVAC, і наша мета — це змінити. На рисунку 2.7 представлено блок – схему управління системою ОВК.



Рис.2.7 Керування ШІМ системи ОВК [19]

Простий контролер таким чином, розроблений щоб враховувати прогнози клімату та заповнюваності у своїй конструкції. Це досягається модифікаціями що показано на рисунку 2.7. Контрольний комп'ютер вмикається і вимикається компресора за допомогою релейної схеми та термостата використовується для підтримки температури в комфортному діапазоні, визначеному споживачем. Відстріли дверей і датчик температури використовується для вимірювання зайнятості та температура, відповідно, і база даних (БД) зберігає історична інформація про зайнятість і погоду інформація з Інтернету.

2.5 Модель теплодинаміки будівлі

У аналізі використовували лінеаризовані вибіркові дані модель системи ОВК, запропонована в [5,20].

$$x(k+1) = ax(k) - bu(k) + k_1w(k) + k_2v(k) \quad (2.1)$$

де k - вказує на дискретний момент часу;

$x(k)$ - температура будівлі в момент часу k в градусах за Цельсієм.

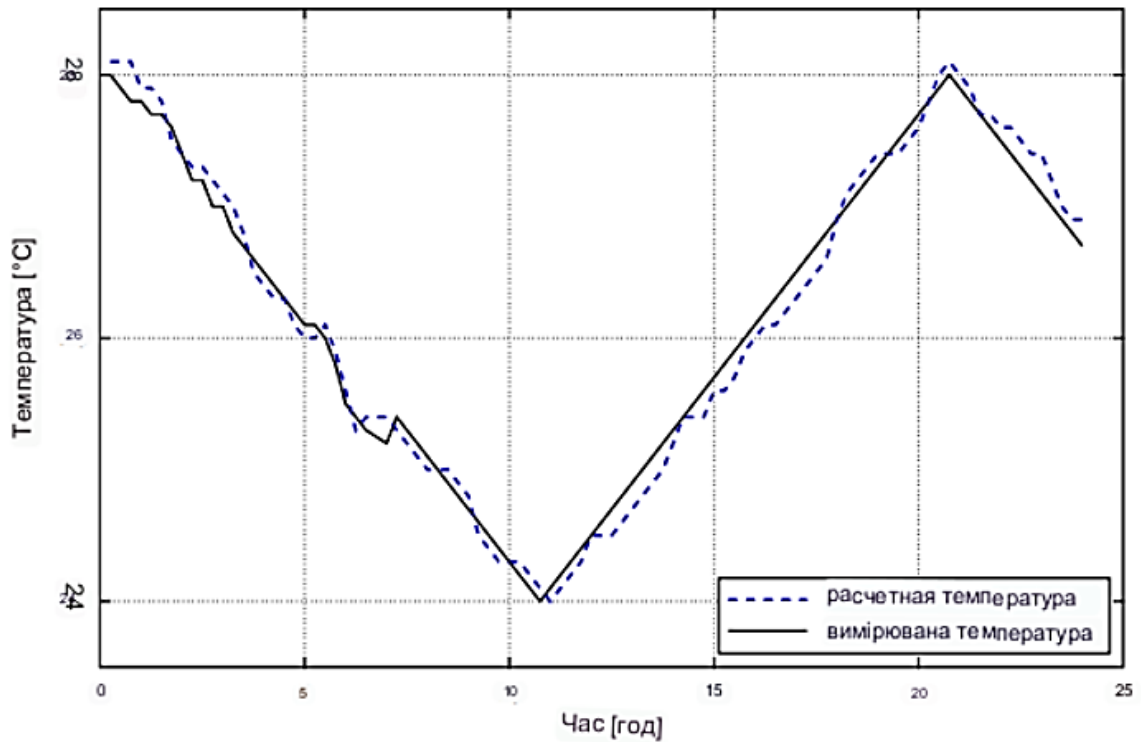
Використовувалося час вибірки $T = 15$ хв. Параметр $a > 0$ позначає теплову постійну часу будівлі, параметр b позначає зміну температури протягом періоду T через керуючий вхід $u(k)$, тобто моделює вплив контрольного входу на температуру будівлі, в параметри k_1 і k_2 відображають вплив погоди та розміщення на температуру будівлі, змінні $w(k)$ і $v(k)$ моделюють вплив нагріву погоди та перебування на теплову модель будівлі, відповідно [20].

Модель описує теплову динаміку будівлі слідуючи закону охолодження Ньютона. Схожа модель використовувалася для керування HVAC.

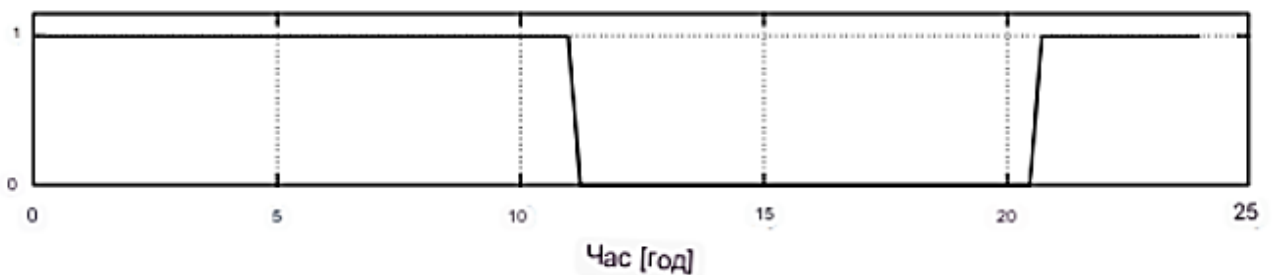
2.6 Оцінка параметрів моделі

Щоб оцінити параметри моделі будівлі, дані були зібрані з лабораторного корпусу за понад 12 різних робочих днів з 8:30 до 22:00. шляхом розміщення датчиків у чотирьох кутах будівлі. Рівень наповнюваності змінювався в робочий час і ввечері, також були зібрані дані про різні дні тижня, щоб зафіксувати можливі сценарії. Лабораторія активно використовується студентами в звичайний робочий час, після чого в кімнаті буде менше студентів без особливого помітна зміна температури.

Щоб змоделювати систему, введення псевдовипадкової двійкової послідовності, згенероване з MATLAB, використовувався як функція перемикачів та HVAC вмикався та вимикався вручну залежно від згенерована послідовність для запису значень температури, це наведено на рисунку 2.8 для типового періоду 24 години та 28°C як задане значення.



а) фактична і розрахункова температура

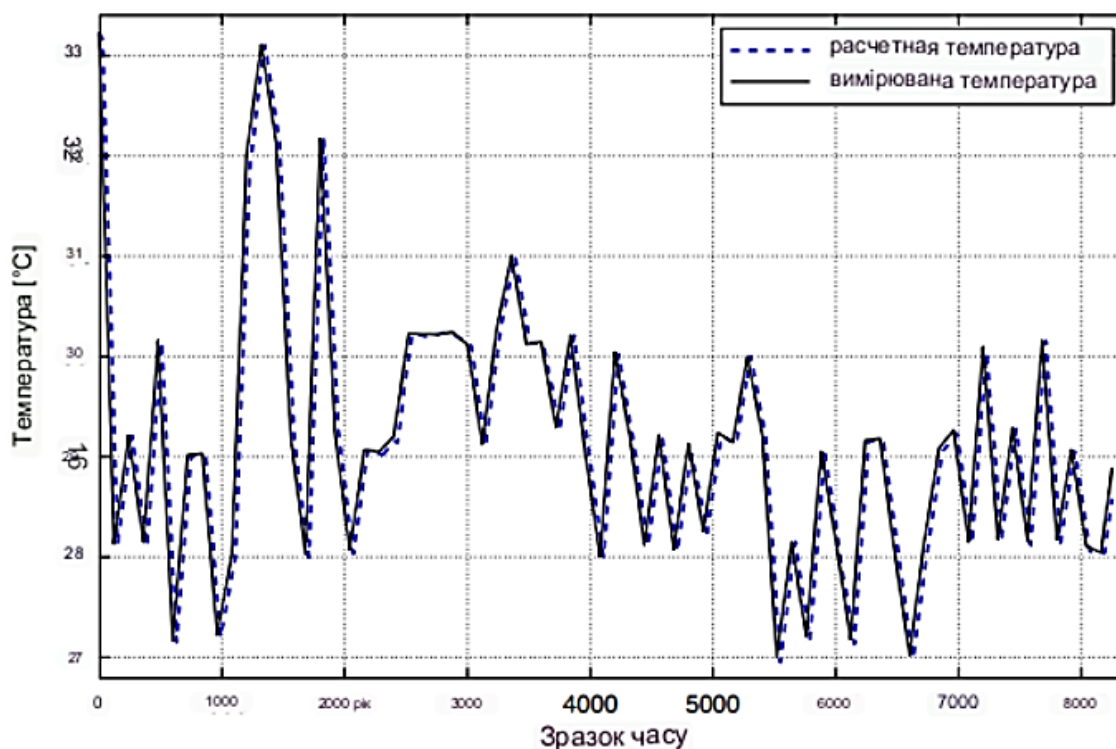


б) контрольний вхід

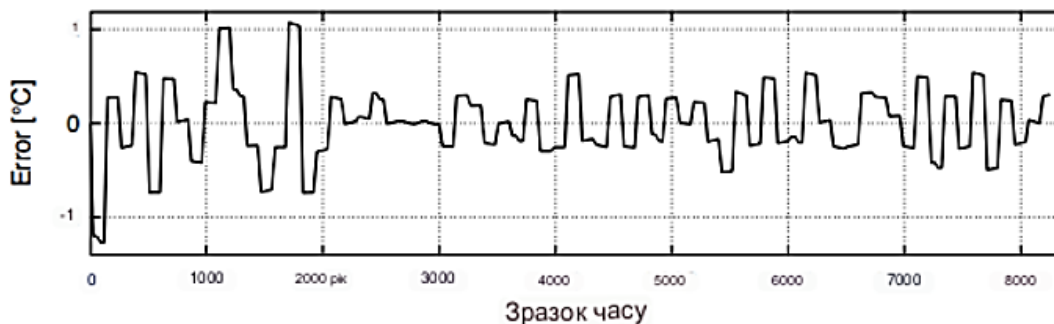
Рис. 2.8 Реакція кімнатної температури на HVAC [21].

Зверніть увагу, що лише змінні x , w і u вимірні або відомі, і модель є лінійною відносно до параметрів a , b , k_1 . Термін порушення v моделює опалення через людей та інше обладнання в будівлі. Хоча $v(k)$ змінюється нелінійно з часом нелінійна модель ускладнить застосування MPC.

Тому спочатку оцінюємо параметри a , b і k_1 за найменшою абсолютною усадкою та оператор вибору (LASSO). Тоді різниця між фактичною (вимірюваною) і оціненою температурами дає $v(k)$. На рисунку 2.9 наведені розрахункові та фактичні температура будівлі разом з похибкою моделі.



а) фактична і розрахункова температура



б) помилка

Рис.2.9 Оцінка кімнатної температури за допомогою LASSO [22].

На рисунку 2.9 б можна побачити, що похибка з оцінюваною моделлю будівлі LASSO знаходиться в межах $\pm 1^{\circ}\text{C}$, що є розумною оцінкою з огляду на робочу температуру будівля.

Термін помилки потім використовується як вимірювання v для визначення параметра k_2 в моделі. Оскільки збурювальний член v поводиться нелінійно в часі, тому оцінити параметр k_2 непросто. Аналіз даних, отриманих в результаті експерименту в буд і зміна ваг у зважених найменших квадратах припустив існування порогових значень параметрів k_1 і k_2 , нижче яких лінійна теплова модель будівлі забезпечує розумну похибку прогнозування.

У результаті це модифікувало оцінки параметрів a і b так само. Важливим результатом цієї модифікації є те що лінійна модель може бути використана в MPC, таким чином значно зменшуючи складність обчислень. Крім того, за допомогою лінійної моделі можна обчислити MPC спрощується шляхом обчислення матриць прогнозування в автономному режимі.

LASSO — це метод регресійного аналізу, який виконує регуляризацію для підвищення точності оцінки шляхом скорочення великих коефіцієнтів регресії для зменшення переобладнання. Оцінка LASSO моделі будівлі параметрів можна сформулювати як задачу оптимізації

$$\min_z \frac{1}{N} \|Az - \beta\|^2 \tag{2.2}$$

$$|a| + |b| + |k_1| \leq t, \tag{2.3}$$

де t — попередньо заданий вільний параметр, який визначає величина регуляризації,

$z = (a, b, k_1)^T$ є вектором параметрів;

A — матриця регресії $N \times 3$;

β — вектор вимірювання.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Прогнозування температури

Контролеру потрібна оцінка температури $w_{(k)}$ для обчислення керуючого входу $u_{(k)}$. Одновимірний фільтр Калмана виявився хорошим інструментом який справиться з цією задачею.

Кальман фільтр насправді працює на нижчій частоті, оскільки зовнішня температура не очікується значно змінюватися протягом однієї години або, принаймні, не впливати на теплову динаміку будівлі. Крім того, в семплер Метрополіса–Гастингса (МН) дискретний час кроку 12 годин. Припускаємо, що динаміка температури є випадковою, отже система і рівняння спостережень (вимірювань) виходять як

$$w(k) = w(k-1) + \varepsilon(k) \quad (3.1)$$

$$y(k) = w(k) + \mu(k) \quad (3.2)$$

Фільтр Калмана рекурсивно оцінює невідома змінна $w(k)$, заснована на спостереженнях y до момент часу k . Прогнозні рівняння одновимірного алгоритму Калмана мають вигляд

$$\hat{w}(k | k-1) = \hat{w}(k-1) \quad (3.3)$$

$$|\mathcal{P}(k | k-1) = \mathcal{P}(k-1) + s_{\varepsilon(k)}^2. \quad (3.4)$$

Рівняння оновлення подано як:

$$\hat{w}(k) = \hat{w}(k | k-1) + \alpha(k) [y(k) - \hat{w}(k | k-1)] \quad (3.5)$$

$$\alpha(k) = \frac{\mathcal{P}(k | k-1)}{\mathcal{P}(k | k-1) + s_{\mu(k)}^2} \quad (3.6)$$

$$\mathcal{P}(k) = [1 - \alpha(k)] \mathcal{P}(k | k-1) \quad (3.7)$$

Зауважимо, що дисперсії $\varepsilon(k)$ і $\mu(k)$, тобто $s^2 \varepsilon(k)$ і $s^2 \mu(k)$, суттєво впливають на результат алгоритму Калмана, тоді як вибір початкового значення $w(0)$ і $P(0)$ не має. Дані оновлювалися відхиленням кожні 12 годин, використовуючи 72-годинний клімат прогноз, тобто обчислення $s^2 \varepsilon(k)$ і $s^2 \mu(k)$ базується на вибірках 7 значень ε та μ відповідно.

Потім ці значення використовуються в рівняннях (3.5) і (3.6) до тих пір, поки наступне оновлення. Щоб отримати зразки ε і μ , покладаємося на МН семплер. Програма МН sampler — це алгоритм, який генерує випадкову вибірку з розподіл, для якого пряма вибірка складна. Оцінка температури на основі MODKF наведено на рисунку 3.1

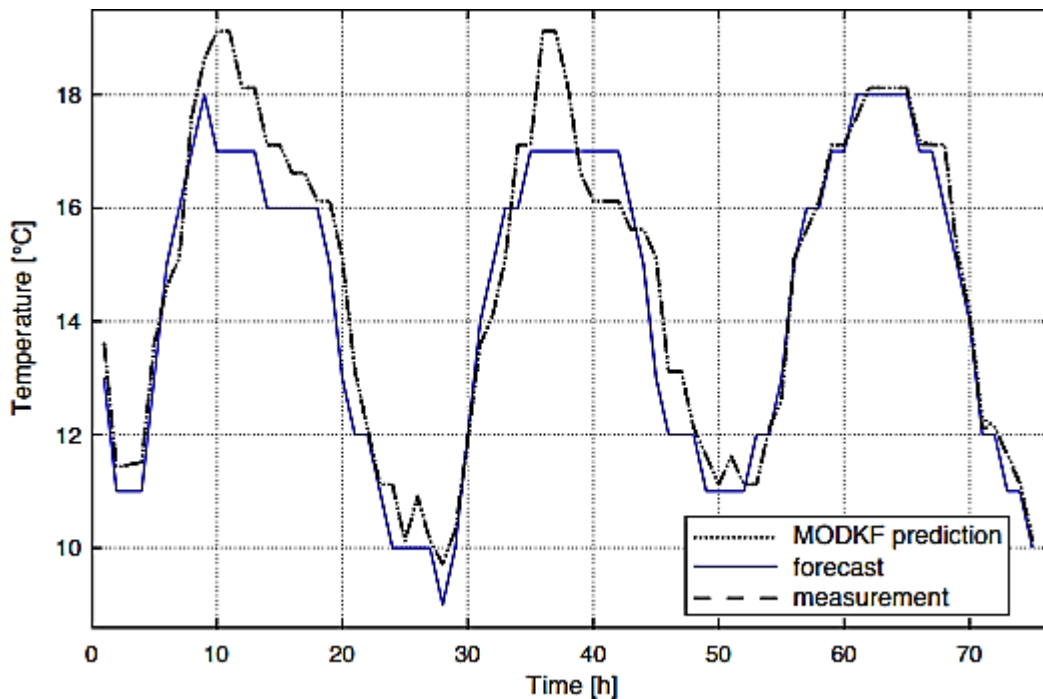


Рис 3.1 Оцінка температури на основі MODKF [23]

Ключова ідея полягає в тому, щоб побудувати ланцюг Маркова, який сходиться до заданій цільовий розподіл (у нашому випадку гаусівський), починаючи з моделювання вибірки «кандидата» з пропозиції розподіл (в нашому випадку рівномірний).

Фільтр Калмана в поєднанні з пробовідбірником МН називають модифікованим фільтром Калмана (MODKF). Щоб проілюструвати точність MODKF, температурні профілі отримані з прогнозу, прогноз MODKF та вимірювання протягом трьох днів як показано на рисунку 3.1.

3.2. Прогноз зайнятості

Ще одна необхідна оцінка – це заповнюваність, позначено $v(k)$ у (1). Нещодавно НММ, вперше запропонований, став перспективним інструментом для моделювання зайнятості. Для цього використовується прямий метод НММ.

У цьому дослідженні використовуємо зворотний метод НММ для обчислення ймовірності заповнюваність, що знаходиться в низькому, середньому та високому рівнях за спостереженнями (спрацьовування дверей, історичні показники зайнятості, тип робочого дня, час доби з 6-годинним вікном тощо).

НММ описується триплетом:

$$\Pi = \{T_{tr}, X, Y\} \quad (3.8)$$

де T_{tr} - позначає матрицю ймовірностей переходу;

X - позначає спостереження;

Y - стани.

На період одного дня використали наступні дані

$$T_{tr} = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.7 & 0 \\ 0.2 & 0.3 & 0.5 \\ 0.1 & 0.2 & 0.7 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$X = \begin{bmatrix} low & low & medium & high & high \\ high & high & high & high & medium \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Враховуючи НММ і послідовність спостереження, найбільше обчислюється ймовірний стан зайнятості. Спостережуваний змінними є тип робочого дня (класифікується як жирний, нормальний, вільний і вільний на основі історичної інформації), вимірювання часу доби, типу дня та зайнятості через двері.

3.3 Інтелектуальний термостат з контролем на основі ШІМ

Поєднуємо MPC і ШІМ і називаємо отриманий контролер інтелектуальним контролером термостата з прогнозуванням (PSTC). В принципі, PSTC є контролером чиї рішення про ввімкнення та вимкнення обчислюються на основі вирішення задачі оптимізації. Крім того, контролер інтегрує прогнози зовнішньої температури та прогноз заповнюваності від MODKF і НММ, відповідно. PSTC схематично показано на рисунку 3.2.

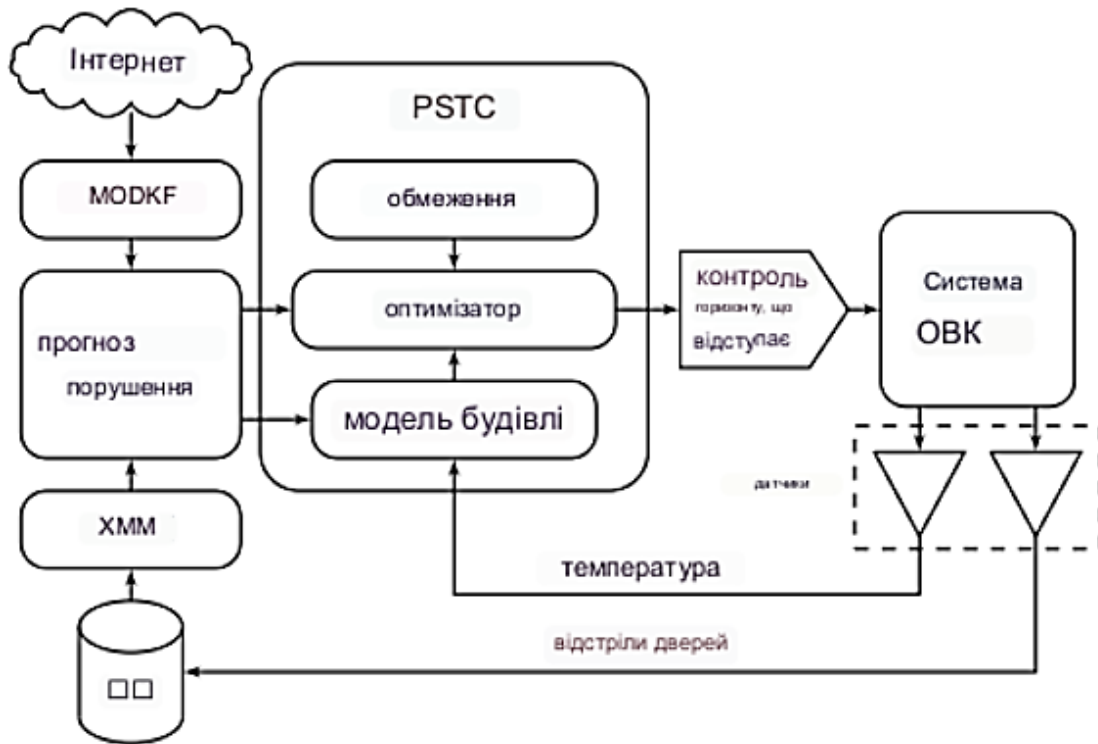


Рис.3.2 Інтелектуальний контролер термостата з прогнозуванням [24]

Вимірювання всередині температура і дверні запалювання, необхідні для заселення передбачення, отримані від датчиків у будівлі, в реалізація алгоритму PSTC складається з чотирьох кроків: вимірювати, оновлювати, обчислювати та застосовувати. Змінні $w(k)$ і $v(k)$ у моделі будівлі оновлюються за допомогою MODKF і HMM. MPC базується на моделі і прогнозах $\hat{w}(k)$ і $\hat{v}(k)$. Потім розв'язується задача оптимізації для заданого горизонту прогнозування за накладених обмежень на систему ОВК.

В принципі, PSTC (у реалізації) є ШІМ контролер, чий рішення про вмикання та вимкнення обчислюються з рішення задачі оптимізації. Таким чином, постановка оптимізаційної задачі визначає енергозберігаючу здатність ПСТС. З метою реалізації PSTC, спочатку визначається горизонт прогнозу N . MPC це стратегія управління, яка вирішує оптимальне керування в режимі онлайн проблема у відступаючий горизонт чином [25]

Контролер призводить, на жаль, до серйозних обчислень навантаження. Штрафний метод замінює задачу оптимізації з обмеженнями які виражені в формулах (3.7)–(3.9) серією задач оптимізації без обмежень, розв'язки яких (в

ідеалі) збігаються до вирішення вихідної задачі. Міра порушення не дорівнює нулю, коли обмеження порушуються і нуль в іншому випадку. Для цього штрафні функції (тобто спеціальні умови, що складаються з штрафного параметра, помноженого на мірою порушення обмеження) додаються $J_1(N, x(k), U)$.

3.4 Отриманий результат

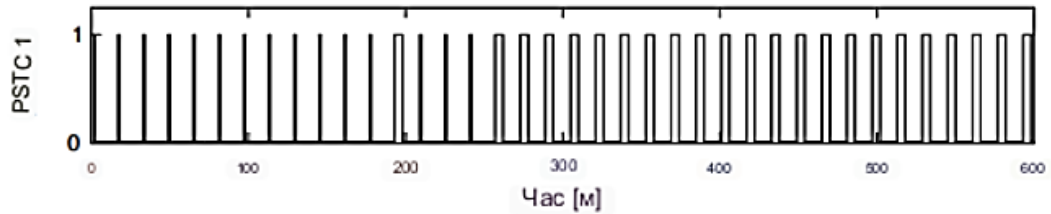
Ілюструючи запропонований підхід, для простоти враховувалися лише охолодження будівлі. Продуктивність контролерів PSTC1 і PSTC2 порівнювали зі звичайним контролером термостата на основі на моделюваннях MATLAB, а кліматичні прогнози були отримані з Інтернету. Прогнози були внесені до журнал даних комп'ютера і передається на керуючий комп'ютер.

Спрацьовування дверних датчиків використовувалося для визначення прогнозу, а вимірювання заповнюваності проводилися вручну шляхом підрахунку людей, які входять і виходять будівля. Використовувалась задана температура 22°C моделювання з верхнім запасом комфорту 25°C і нижня межа 20°C .

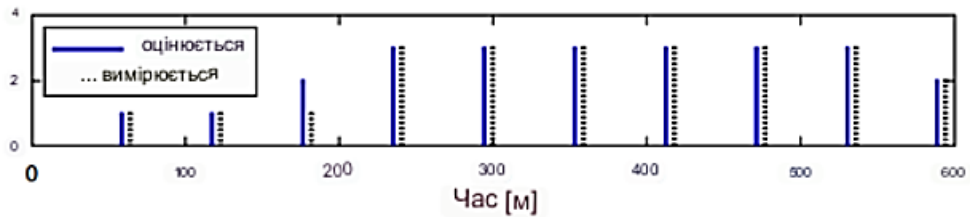
Продуктивність алгоритму PSTC 1 для 10 годин у звичайний день показано на рисунку 3.3.

Прогнозований і виміряна зайнятість показана на рисунку 3.3 б. Можна помітити, що зайнятість, передбачена НММ, є достатньо точною, і прогнози покращуються з часом, оскільки НММ використовує вимірювання зайнятості. Статус блок HVAC, показаний на рисунку 3.3 а, вказує, чи він увімкнений або вимкнено, цифра 1 відповідає включенню, а 0 – вимкненню [26]

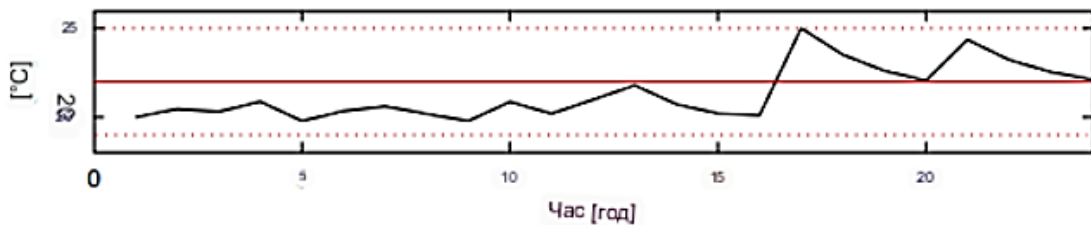
Коли як температура, так і заповненість будівлі низька, тривалість періоду охолодження Тон коротка, а як заповнюваність збільшується, його довжина збільшується. Це вказує енергозберігаюча продуктивність PSTC 1. Зміна температури в приміщенні з PSTC 1 протягом 24 годин показано на рисунку 3.3 в.



а) стан ОВК



б) розрахункова та виміряна наповнюваність



в) зміна температури протягом 24 годин

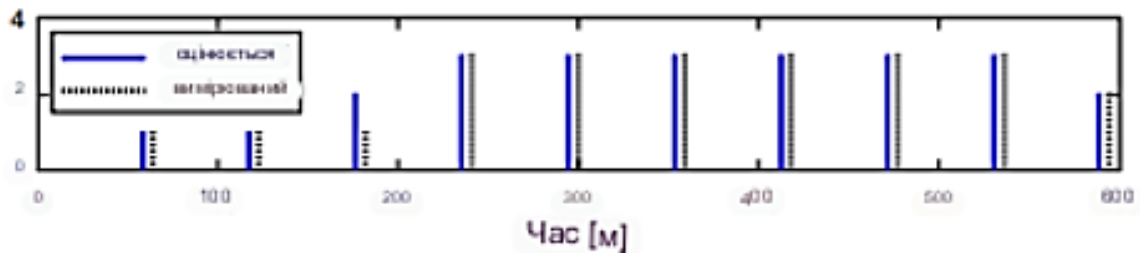
Рис.3.3 Продуктивність алгоритму PSTC 1 для звичайного дня [27]

Це свідчить про те, що PSTC 1 не тільки підтримує температуру в межах комфортної області, але також ефективно використовує його для мінімізації витрат на енергію, тобто. використовує нижній запас комфорту для охолодження будівлі на а низька зайнятість і використовує верхнє поле для високого рівня зайнятості.

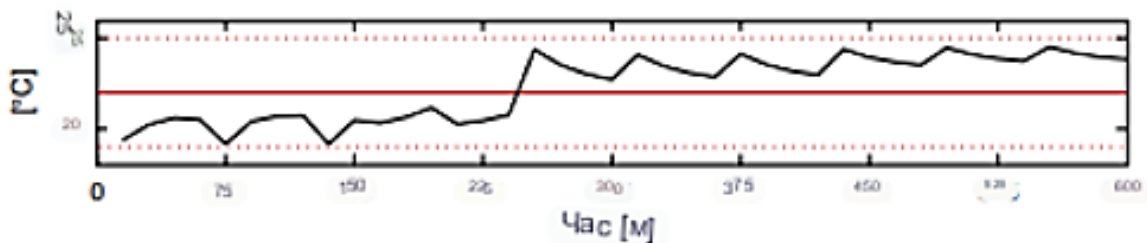
Продуктивність PSTC 2 протягом 10 годин на норм день показано на рисунку 3.4. Можна спостерігати економію енергії від стану системи ОВК, показаного на рисунку 3.4 а. Додатковий член комфорту в значно покращує профіль температури, як показано на рисунку 3.4 в



а) стан ОВК



б) розрахункова та виміряна наповненість



в) зміна температури протягом 10 годин

Рис. 3.4 Продуктивність алгоритму PSTC 2 для звичайного дня [28]

Моделювання вказує на той факт, що коли $\beta > \alpha$, енергозбереження та прогнозна продуктивність PSTC 2 кращі, ніж у PSTC 1. Це також може бути видно на рисунку 3.4 а, заповненість прогнозується середньою, і тому відбувається скорочення довжини тонни з PSTC 2, тоді як PSTC 1 продовжує застосовувати вхідні дані протягом цього періоду часу, як показано на рис. ба.

Порівняння керуючих входів PSTC 1 і PSTC 2 шляхом збільшення α в показано на рисунку 3.5.

Можна помітити, що енергозбереження та прогнозована поведінка PSTC 2 значно зменшуються. Це очікувана поведінка оскільки більший вплив рівня комфорту збільшує енергію споживання. Таким чином, вибір α визначає продуктивність PSTC 2.

Енергію, спожиту в системі ОВК, можна виразити за допомогою наступного рівняння:

$$E \approx E_{ss} + E_{tr} \quad (3.11)$$

де E_{ss} і E_{tr} представляють стаціонарний і перехідний режими споживання енергії в двигуні компресора, відповідно.

Система HVAC складається з водяного охолодження 10 потужність одношвидкісного компресора (тоннаж 10 т.р., 380–415 В, 50 Гц, 16 А, COP 3,15–3,35).

Позначаючи номінальна потужність (номінальна потужність) двигуна компресора за P , споживання енергії в усталеному режимі в кВт-год

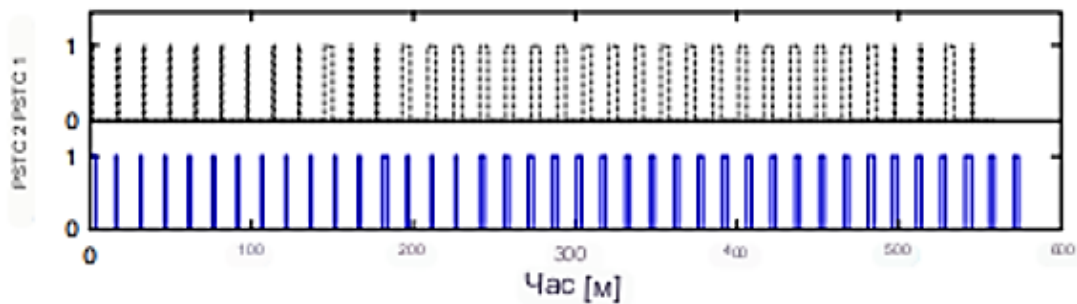


Рис.3.5 Порівняння входів PSTC1 і PSTC 2 [28]

ВИСНОВКИ

1. Показано, оптимальний контролер для керування системою опалення яке називається інтелектуальним інтелектуальним контролер термостата (PSTC). Цей контролер поєднує MPC з підходом ШІМ, що призводить до простого реалізація увімкнення та вимкнення. Крім того, він об'єднує інформацію про зайнятість і прогноз погоди для економії енергії. Контролер не потребує модифікації обладнання. Для отримання параметрів моделі будівлі дані були використані зібрані з тестової будівлі.

2. Було відображено дані, зібрані під час експериментів, показали, що внаслідок зайнятості нагрівання змінюється нелінійно в часі. Наявність порогових значень параметрів моделює збурення, нижче яких модель є лінійною. Для отримання лінійної моделі було вирішено завдання ідентифікації параметрів як задачу LASSO та розв'язується за допомогою підходу квадратичного програмування. Отримана модель показала прийнятну точність і була використана в MPC. Далі, оскільки виконання ГДК вимагає точні оцінки зовнішньої температури, тобто $w(k)$ in (1) модифікований одновимірний фільтр Калмана (MODKF) був розроблений для прогнозування зовнішньої температури за допомогою прогнози погоди. Результати нашого моделювання показали це MODKF призводить до значного поліпшення в точність чисельного прогнозу погоди.

3. В результаті був створений механізм оновлення інформації введені в прогноз зайнятості та запропоновані модель показала хорошу точність прогнозування зайнятості. Пропоновані контролери можна встановлювати в житлових будинках де вартість контролера є основною перешкодою для адаптації енергозберігаючих контролерів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Afram, A. and Janabi-Sharifi, F. Review of modeling methods for HVAC systems. *Appl. Therm. Eng.*, 2014, 67, 507–519.
2. Afram, A. and Janabi-Sharifi, F. Theory and applications of HVAC control systems – a review of model predictive control (MPC). *Build. Environ.*, 2014, 72, 343–355.
3. Aswani, A., Master, N., Taneja, J., Culler, D., and Tomlin, C. Reducing transient and steady state electricity consumption in HVAC using learning-based model predictive control. *Proc. IEEE*, 2012, 100, 240–253.
4. Bertsekas, D. P. *Constrained Optimization and Lagrange Multiplier Methods*. Athena Scientific, Belmont, MA, USA, 1996.
5. Burke, W. and Auslander, D. Low-frequency pulse width modulation design for HVAC compressors. In *The ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Vol. 3. ASME, San Diego, CA, USA, 2009, 291–297.
6. Dobbs, J. R. and Hincey, B. M. Model predictive HVAC control with online occupancy model. *Energ. Buildings*, 2014, 82, 675–684.
7. Dong, B. *Integrated Building Heating, Cooling and Ventilation Control*. PhD thesis, School of Architecture, Carnegie Mellon University, 2010.
8. Drgona, J. and Kvasnica, M. Comparison of MPC strategies for building control. In *The 19th International Conference on Process Control* (Fikar, M. and Kvasnica, M., eds). IEEE, Strbské Pleso, Slovakia, 2013, 401–406.
9. Erickson, V. L. and Cerpa, M. A. C.-P. A. E. OBSERVE: Occupancy-based system for efficient reduction of HVAC energy. In *The 10th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks*. IEEE, Chicago, IL, USA, 2011, 258–269.
10. Galanis, G. and Anadranistakis, M. A one-dimensional Kalman filter for the correction of near surface temperature forecasts. *Meteorol. Appl.*, 2002, 9, 437–441.
11. Galanis, G., Louka, P., Katsafados, P., Pytharoulis, I., and Kallos, G.

Applications of Kalman filters based on non-linear functions to numerical weather predictions. *Ann. Geophys.*, 2006, 24, 2451–2460.

12. Goodwin, G. C., Graebe, S. F., and Salgado, M. E. *Control System Design*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 2001.

13. Gyalistras, D. and Gwerder, M. Use of weather and occupancy forecasts for optimal building climate control (OptiControl): two years progress report. Technical report, Terrestrial Systems Ecology ETH Zurich, Switzerland and Building Technologies Division, Siemens Switzerland Ltd., Zug, Switzerland, 2010. http://www.opticontrol.ethz.ch/Lit/Gyal_10_Opt_iControl2YearsReport.pdf.

14. Haghighi, M. M. *Modeling and Optimal Control Algorithm Design for HVAC Systems in Energy Efficient Buildings*. Master's thesis, University of California, 2011.

15. Lu, J., Sookoor, T., Srinivasan, V., Gao, G., Holben, B., Stankovic, J., et al. The smart thermostat: using occupancy sensors to save energy in homes. In *The 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems* (Beutel, J., ed.). ACM, New York, NY, USA, Zurich, Switzerland, 2010, 211–224.

16. Ma, Y., Anderson, G., and Borrelli, F. A distributed predictive control approach to building temperature regulation. In *The American Control Conference*. IEEE, San Francisco, CA, USA, 2011, 2089–2094.

17. Ma, Y. and Borrelli, F. Fast stochastic predictive control for building temperature regulation. In *The American Control Conference*. IEEE, Montreal, Canada, 2012, 3075–3080.

18. Ma, Y., Borrelli, F., Hencsey, B., Coffey, B., Bengua, S., and Haves, P. Model predictive control for the operation of building cooling systems. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 2012, 20, 796–803.

19. Ma, Y., Kelman, A., Daly, A., and Borrelli, F. Predictive control for energy efficient buildings with thermal storage: modeling, simulation, and experiments. *IEEE Control Syst. Mag.*, 2012, 32(1), 44–64.

20. Mallikarjun, S., Gautam, A. R., Muniyasamy, K., Maharaja, M., Subathra, B., and Srinivasan, S. LASSO based building thermal model for heating, ventilation

and air-conditioning control. In The 1st IEEE International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies. IEEE, Coimbatore, India, 2015, 1–6

21. Morari, M., Gyalistras, D., and Schildbach, F. Weather forecasts enhance comfort and save energy. In Smart and Efficient Energy Council. Trento, Italy, 2009 (Talk).

22. Oldewurtel, F., Parisio, A., Jones, C. N., Gyalistras, D., Gwerder, M., Stauch, V., et al. Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control. *Energ. Buildings*, 2012, 45, 15–27.

23. Oldewurtel, F., Parisio, A., Jones, C. N., Morari, M., Gyalistras, D., Gwerder, M., et al. Energy efficient building climate control using Stochastic Model Predictive Control and weather predictions. In The American Control Conference. IEEE, Baltimore, MD, USA, 2010, 5100–5105.

24. Oldewurtel, F., Sturzenegger, D., and Morari, M. Importance of occupancy information for building climate control. *Appl. Energy*, 2013, 101, 521–532.

25. Oldewurtel, F., Ulbig, A., Parisio, A., Andersson, G., and Morari, M. Reducing peak electricity demand in building climate control using real-time pricing and model predictive control. In The 49th IEEE Conference on Decision and Control (Astolfi, A., ed.). IEEE, Atlanta, GA, USA, 2010, 1927–1932.

26. Schildbach, F., Gyalistras, D., Gwerder, M., Jones, C. N., Parisio, A., Stauch, V., et al. Increasing energy efficiency in building climate control using weather forecasts and model predictive control. In *Clima – RHEVA World Congress*. Antalya, Turkey, 2010.

27. Sirokšy, J., Oldewurtel, F., Cigler, J., and Právara, S. Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system. *Appl. Energy*, 2011, 88, 3079–3087.

28. Soleimani-Mohseni, M. Modelling and Intelligent Climate Control of Buildings. PhD thesis, Chalmers University of Technology, 2005.