

© О.О. Бойко¹, Є.К. Воскобойник¹, Ю.І. Чеберячко¹, А.В. Бубліков¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ПЕРСПЕКТИВИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ КОМФОРТОМ

© O. Boyko¹, E. Voskoboinyk¹, Yu. Cheberiachko¹, A. Bublikov¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

PROSPECTS OF THERMAL COMFORT MANAGEMENT PROCESS AUTOMATION

Мета. Підвищення ефективності енергетичної системи будівлі шляхом урахування взаємозв'язку джерел енергії, теплового захисту, показників теплового комфорту і параметрів мікроклімату приміщень. Враховуючи зміни вимог Європейського союзу до температури у приміщенні та сучасні економічні виклики, основною метою є розробка системи автоматичного керування тепловим комфортом у заданому діапазоні температур з мінімізацією енергетичних витрат. На сьогодні вже існує багато встановлених систем опалення та охолодження повітря. Виходячи з цього перспективним є розробка універсального пристрою для підтримки теплового комфорту у приміщенні.

Методика. Провести аналіз розроблених підходів до підвищення ефективності енергетичної системи будівлі в умовах теплового комфорту, визначити особливості та можливості енергетичного аналізу теплоти та із врахуванням обмежень щодо теплового комфорту людини.

Результати. Запропонована структура регулятора теплового комфорту дозволить розробити універсальний регулятор який може бути використаний у системах опалення та охолодження повітря, або у комбінованих системах. Підвищення якості керування температурним режимом у приміщенні може бути досягнуто за рахунок керування безпосередньо тепловим комфортом на підставі прогнозованої середньої оцінки PMV та прогнозованого процента невдоволених PDD.

Наукова новизна. Типові підходи керування комфортом у приміщенні за температурою не враховують випромінювання, вологість, швидкість повітря, одяг та навантаження на користувача, що призводить як до створення некомфортних умов так і зайвого використання енергоресурсів. Уперше відповідно до ДСТУ Б EN ISO 7730:2011 запропоновано структуру системи керування тепловим комфортом, визначені її вхідні і вихідні параметри та шляхи отримання невимірюваних параметрів. Система керування на базі прогнозованої середньої оцінки PMV і прогнозованого проценту невдоволених PDD визначає рівень теплового комфорту у приміщенні та зменшує кількість невдоволених користувачів. Керування за прогнозованою середньою оцінкою PMV забезпечує зменшення використання енергоресурсів за підтримки мінімально допустимих показників теплового комфорту.

Практичне значення. Отримана структура може використовуватися при розробці нових систем керування тепловим комфортом. Враховуючи наявність великої кількості вже існуючих систем опалення та охолодження повітря запропоновано для підвищення якості їх функціонування використовувати регулятори теплового комфорту. Запропонований підхід за рахунок використання моделі теплового комфорту, дозволять визначити потреби на опалення при різних умовах комфортності, знизити енергоспоживання будівлі без шкоди здоров'ю людини, та оцінити можливість підвищення енергоефективності за рахунок зміни умов комфортності, параметрів теплового захисту та мікроклімату приміщень.

Ключові слова: *комфорт, регулятор, мікроклімат, SCADA, САК, тепловий об'єкт.*

Вступ. Починаючи з 2019 року на світовому ринку значно підвищилася волатильність цін на енергоносії, що пов'язано з декількома факторами: поява коронавірусної інфекції COVID-19 та запровадження карантину яке призвело до руйнування транспортно-промислових ланцюгів; перехід у 2022 році Європейського союзу на закупівлю скрапленого метану, природного та нафтового газу, що підвищило конкуренцію на світовому ринку серед традиційних азіатських покупців та як наслідок цін; перехід восени 2022 році Європейським союзом на танкерну доставку нафти який привів до зміни усталених маршрутів, перенавантаження світового флоту, збільшення конкуренції на ринку та транспортних витрат; тепла зима 2021 року в Європі була майже без опадів, що призвело у літку 2022 року до низького рівня води у річках, високих температур та відсутності значних вітрів, а це у свою чергу спричинило зменшення виробітку електричної енергії на гідро, сонячних і вітряних електростанціях та зменшення виробітку атомної електричної енергії у Франції. Більшість з цих факторів будуть впливати на ринки енергоносіїв також у 2023 році, крім того у Німеччині навесні були закриті останні три енергоблоки атомних електростанцій, що також підвищує нестачу електричної енергії у Європі та потребує збільшення імпорту енергоносіїв.

Для вирішення проблеми нестачі енергоносіїв Європейська комісія та Європейського союзу розробили вимоги, які у майбутньому можуть бути також поширені і на України: примусове зменшення витрат енергоносіїв, єдині правила їх закупівлі, збільшення виробітку енергії з відновлювальних джерел, зменшення температури у приміщеннях, обмеження використання населенням води та інші. Як показала зима 2022 року основним інструментом підвищення енергоефективності який використовували країни Європейського союзу стало зменшення витрат енергоносіїв, що підтверджується рішенням Європейської комісії о продовженні його використання у 2023 році. За результатами аналізу звітів Європейської комісії встановлено, що зменшення витрат енергоносіїв було досягнуто природним шляхом: більшість підприємств хімічної промисловості не працювали через великі ціни на газ – це робило їх продукцію не конкурентно спроможною; у державних приміщеннях підтримувалася мінімально допустима температура повітря відповідно до рішення уряду конкретної країни; у приватних домогосподарствах температура повітря обмежувалася користувачами самостійно, або домовласником, але не повинна була перевищувати урядових норм. Таким чином із розглянутих інструментів підвищення енергоефективності на які можливо впливати головними є температура у приміщенні та ефективність роботи обладнання для її підтримки.

Узимку для підтримки температури на заданому рівні використовуються: газові, електричні та пілетні котли, теплові насоси, електричні нагрівачі та інші типи обладнання. Ефективність більшості з них складає біля 95 %, а їх подальше вдосконалення призводить до збільшення ціни та експлуатаційних витрат без суттєвого підвищення економії, що видно з аналізу лінійок атмосферних, турбованих та конденсаційних газових котлів. Крім того як показують останні тенденції у країнах Європейського союзу найближчим часом почнеться заборона на встановлення та використання газового опалення. Такі обмеження вже обговорюються в уряді Німеччини та можуть вступити у силу з 2024 року. Враховуючи це та проголошений Європейським союзом декарбонізований напрямок розвитку економіки перспективи вдосконалення такого обладнання відсутні. Таким чином

єдиним напрямком науково-технічного вдосконалення обладнання для підтримки температури у приміщенні є розвиток систем керування ним.

На сьогодні більшість систем опалення та охолодження повітря у приміщенні змінюють потужність виконавчого пристрою для підтримки температури на заданому рівні. Однак ще у 2005 році було прийнято Європейський стандарт EN ISO 7730:2005 який знайшов своє відображення у ДСТУ Б EN ISO 7730:2011. Цим стандартом визначаються не температура у приміщенні, а тепловий комфорт який є більш багатофакторним показником. На сьогодні даний стандарт використовується для розрахунків будівель та обладнання, але він також передбачає можливість безпосереднього керування тепловим комфортом. Враховуючи розглянуті зміни вимог Європейського союзу до температури у приміщенні та сучасні економічні виклики автоматизація процесу керування тепловим комфортом у заданому діапазоні температур з мінімізацією енергетичних витрат є актуальним питанням.

Основна частина. Параметри мікроклімату у приміщеннях та комфортність умов в Україні визначають на основі таких документів:

1. ДСТУ Б EN ISO 7730: 2011. Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту [1], 2. ДСТУ Б EN 15251:2011 Розрахункові параметри мікроклімату приміщень для проектування та оцінки енергетичних характеристик будівель по відношенню до якості повітря, теплового комфорту, освітлення та акустики будівель [3]. 3. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування [2], 4. ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Енергетична ефективність будівель. Національний метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні та гарячому водопостачанні (2016) [4].

Аналіз ДСТУ Б EN ISO 7730:2011 показав, що основними індикаторами комфорту є прогнозована середня оцінка PMV та прогнозований процент невдоволених PDD [1], які розраховуються на підставі температури повітря, середньої температури випромінювання, відносної швидкості повітря, відносної вологості, парціального тиску водяної пари, одягу, швидкості обміну речовин та зовнішньої роботи, на базі яких визначаються три зони комфортності (А, В і С) [5]. Отримане значення прогнозованої середньої оцінки PMV трактується за семибальною шкалою чутливості до температури (табл. 1) [1].

Таблиця 1

Семибальна шкала чутливості до температури

Прогнозована середня оцінка PMV	Трактування оцінки
+3	Спекотно
+2	Тепло
+1	Трохи тепло
0	Нейтрально
-1	Трохи прохолодно
-2	Прохолодно
-3	Холодно

Показники прогнозованої середньої оцінки PMV та прогнозованого проценту недоволених PDD можуть бути використані тільки при виконанні обмежень наведених у таблиці 2.

Таблиця 2

Обмеження для використання показників PMV та PDD

Параметр	Обмеження
Прогнозована середня оцінка PMV	від -2 до +2
Температура повітря	від 10 °С до 30 °С
Середня температура випромінювання	від 10 °С до 40 °С
Відносна швидкість повітря	від 0 м/с до 1 м/с
Парціальний тиск водяної пари	від 0 Па до 2700 Па
Одяг	від 0 м ² ·К/Вт до 0,31 м ² ·К/Вт
Швидкість обміну речовин	від 46 Вт/м ² до 232 Вт/м ²

Аналіз обмежень показав, що вони є більш широкими ніж Державні санітарні норми України і таким чином не впливають на визначення показників прогнозованої середньої оцінки PMV та прогнозованого проценту недоволених PDD для більшості типів приміщень.

За результатами аналізу ДСТУ Б EN ISO 7730:2011 були визначені вхідні та вихідні параметри приміщення у якому необхідно підтримувати тепловий комфорт. До вхідних параметрів відносяться: потужність нагрівача, або охолоджувача. До вихідних параметрів за якими виконується розрахунок показників відносяться: температура повітря, відносна вологість, відносна швидкість повітря, парціальний тиск водяної пари, середня температура випромінювання, одяг, швидкість обміну речовин та зовнішня робота [1]. Відповідно до проведеного аналізу створена структура об'єкта керування, яка складається з приміщення та розрахунку показників (рис. 1).

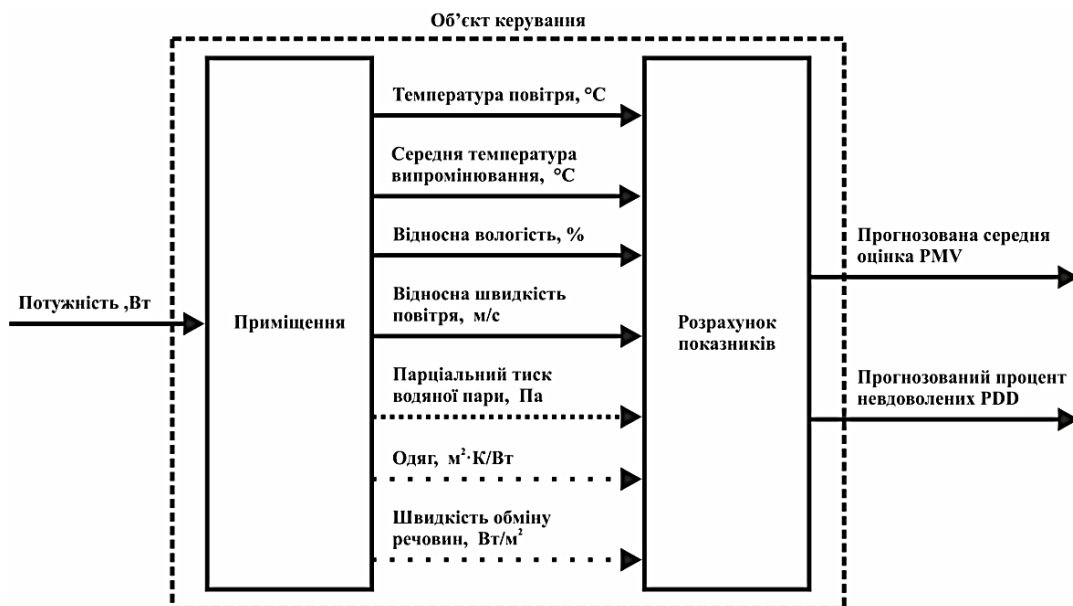


Рис. 1. Структура об'єкта керування

Вхідними параметрами об'єкта керування є потужність нагрівача, або охолоджувача, вихідними параметрами є: прогнозована середня оцінка PMV та прогнозований процент невдоволених PDD. Ряд внутрішніх параметрів може бути визначений за рахунок використання датчиків: температура повітря, середня температура випромінювання, відносна вологість та відносна швидкість повітря. Парціальний тиск водяної пари розраховується як:

$$\rho_a = RH \cdot 10 \cdot e^{16,6536 - 4030,183 / (t_a + 235)}, \quad (1)$$

де ρ_a – парціальний тиск водяної пари, Па; RH – відносна вологість, %; t_a – температура повітря, °С.

Значення параметрів одягу та швидкості обміну речовин обираються за відповідними таблицями ДСТУ Б EN ISO 7730:2011 наведеними у додатках С та В відповідно, або за стандартами ISO 9920 та ISO 8996 [2]. Враховуючи сучасний розвиток технологій ці параметри можуть визначатися автоматично за порою року, зовнішньою температурою повітря та прогнозом погоди, або користувачем за допомогою мобільного додатку.

Згідно до отриманої структури об'єкта керування її вхідних та вихідних параметрів враховуючи обмеження розроблена загальна структура датчика теплового комфорту (рис. 2).

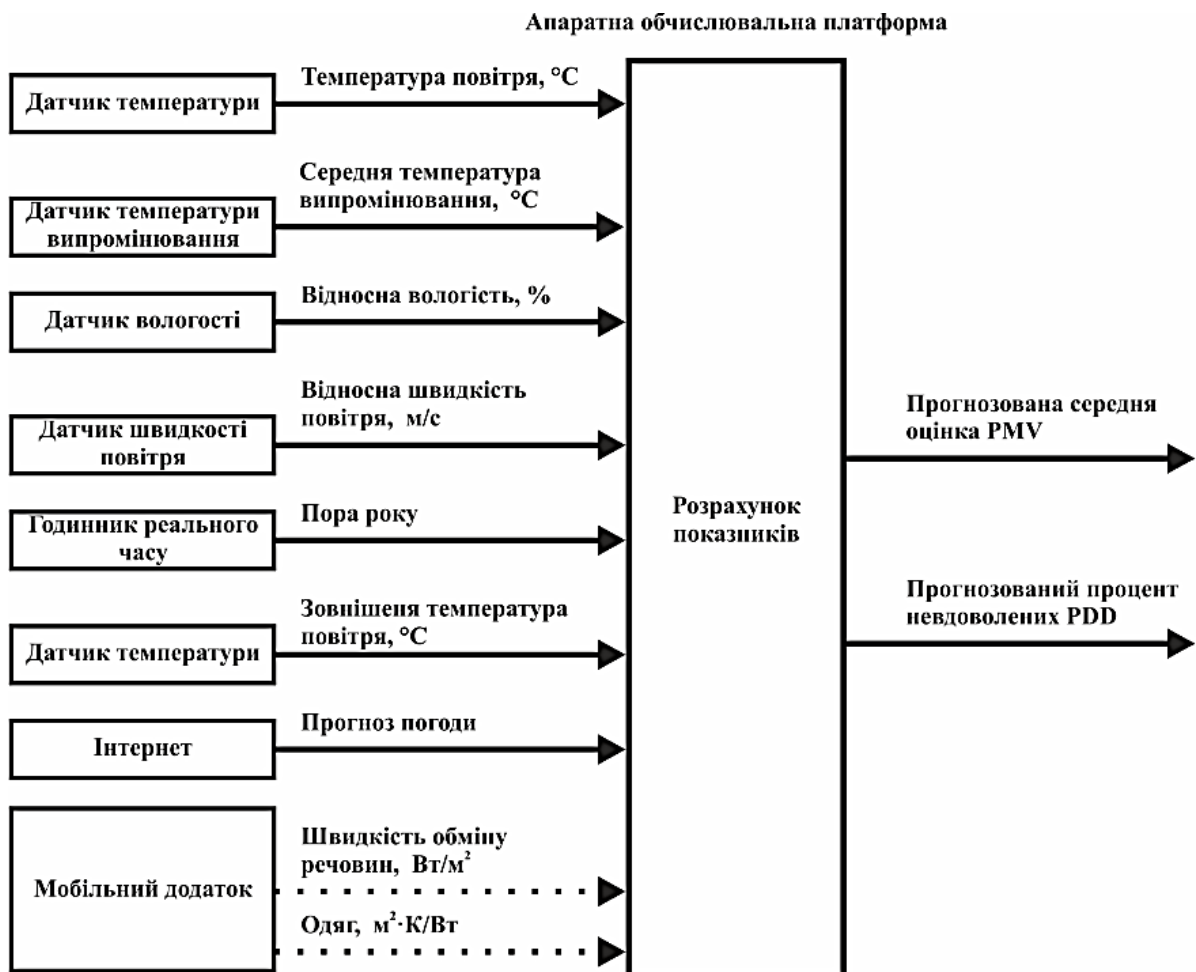


Рис. 2. Загальна структура датчика теплового комфорту

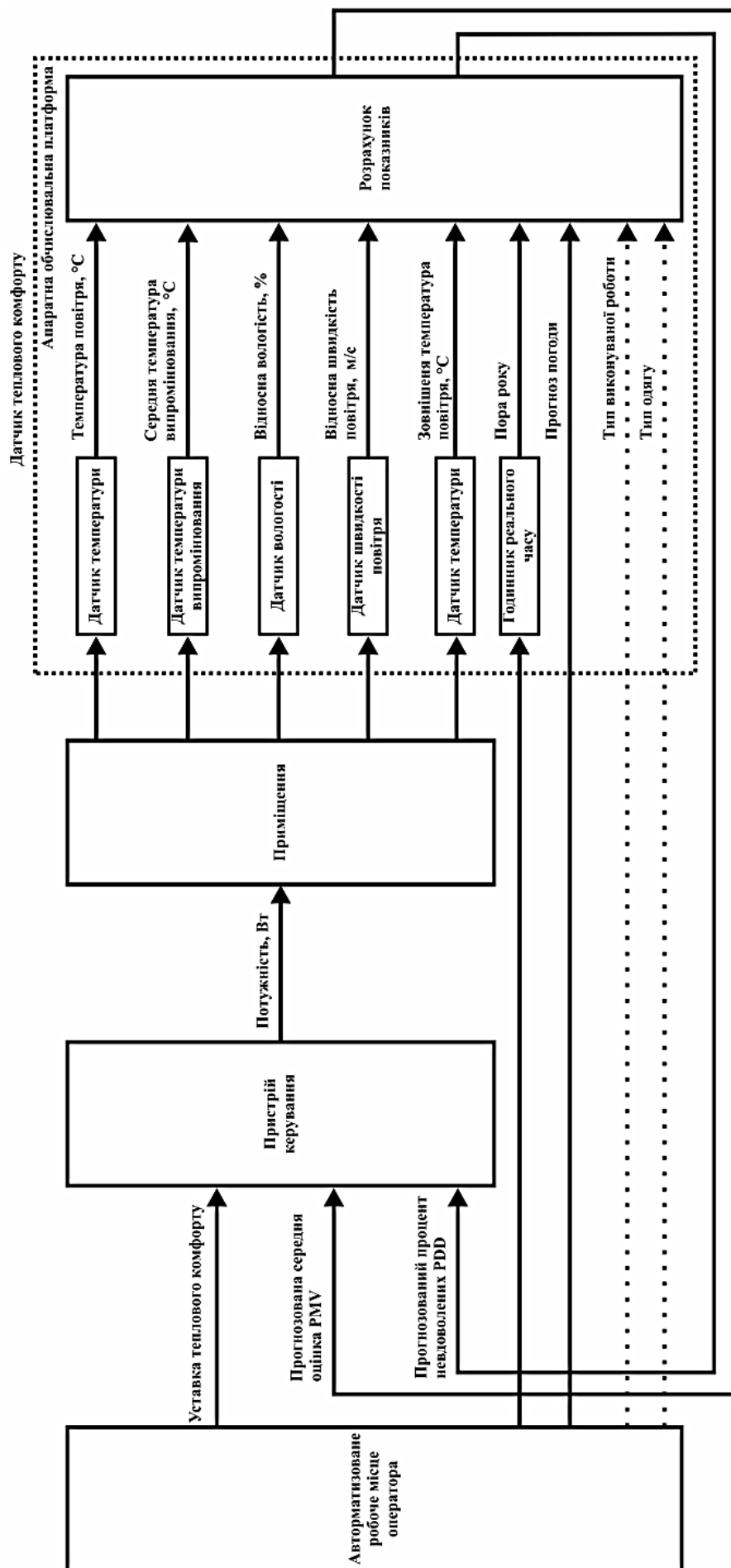


Рис. 3. Загальна структура системи керування тепловим комфортом

Отримана структура може бути використана як для створення датчика теплового комфорту так і для апаратно-програмної реалізації у складі системи керування. За результатами аналізу ДСТУ Б EN ISO 7730:2011 визначено, що найбільший вплив на показники теплового комфорту здійснюють температура повітря та відносна вологість. Таким чином до складу мінімальної структури датчика теплового комфорту повинні входити датчик температури, датчик вологості та апаратна обчислювальна платформа.

На підставі проведених досліджень розроблена загальна структура системи керування тепловим комфортом (див. рис. 3). У якості автоматизованого робочого місця оператора може виступати комп'ютер із SCADA системою, браузер, або мобільний додаток. З нього задаються налаштування уставки теплового комфорту, уточнюється час годинника, надається доступ до прогнозу погоди у Інтернеті, тип виконуваної роботи та тип одягу. Пристрій керування на підставі уставки прогнозованої середньої оцінки PMV та прогнозованого проценту невдоволених PDD розраховує керуючий сигнал який подається на виконавчий пристрій. Виконавчий пристрій впливає на температуру та вологість у приміщенні. Датчик теплового комфорту визначає поточні параметри прогнозованої середньої оцінки PMV та прогнозованого проценту невдоволених PDD.

Отримана структура може використовуватися при розробці нових систем керування тепловим комфортом. Однак на сьогодні вже існує багато встановлених систем опалення та охолодження повітря. Виходячи з цього перспективним є розробка універсального пристрою для підтримки теплового комфорту у приміщенні.

На сьогодні найбільш ефективним засобом підтримки температури у заданому просторі є терморегулятори. Дані пристрої встановлюються безпосередньо у зоні де потрібно підтримувати комфортні умови, або біля неї. Вони обладнані датчиками температури та контактами які дозволяють комутувати відповідні пристрої керування. Більшість газових котлів та систем приточної вентиляції мають можливість підключення до терморегуляторів, або вже використовуються з ними. Виходячи з аналізу рішень прийнятих у Європейському союзі за останні роки та рішень які наразі розглядаються (див. Вступ) перспективним є створення регулятора теплового комфорту на заміну існуючих терморегуляторів.

Враховуючи вище означене розроблена загальна структура регулятора теплового комфорту (рис. 4). До структури системи керування додано пульт керування який дозволяє задавати налаштування уставки теплового комфорту, годинника реального часу, тип виконуваної роботи та тип одягу. Регулятор має можливість приєднуватися до Інтернету для отримання прогнозу погоди. Також передбачена можливість підключення до регулятора із мобільного додатку.

Враховуючи різноманітність приладів опалення та охолодження повітря при розробці регулятора теплового комфорту існують декілька варіантів формування керуючого впливу: комутація сигнальних ліній, комутація однофазного навантаження до 16 А, або до 25 А, комутація трьохфазного навантаження та безперервне керування навантаженням. У випадках коли регулятор теплового комфорту безпосередньо керує електричним навантаженням доцільним є вимірювання споживаної потужності.

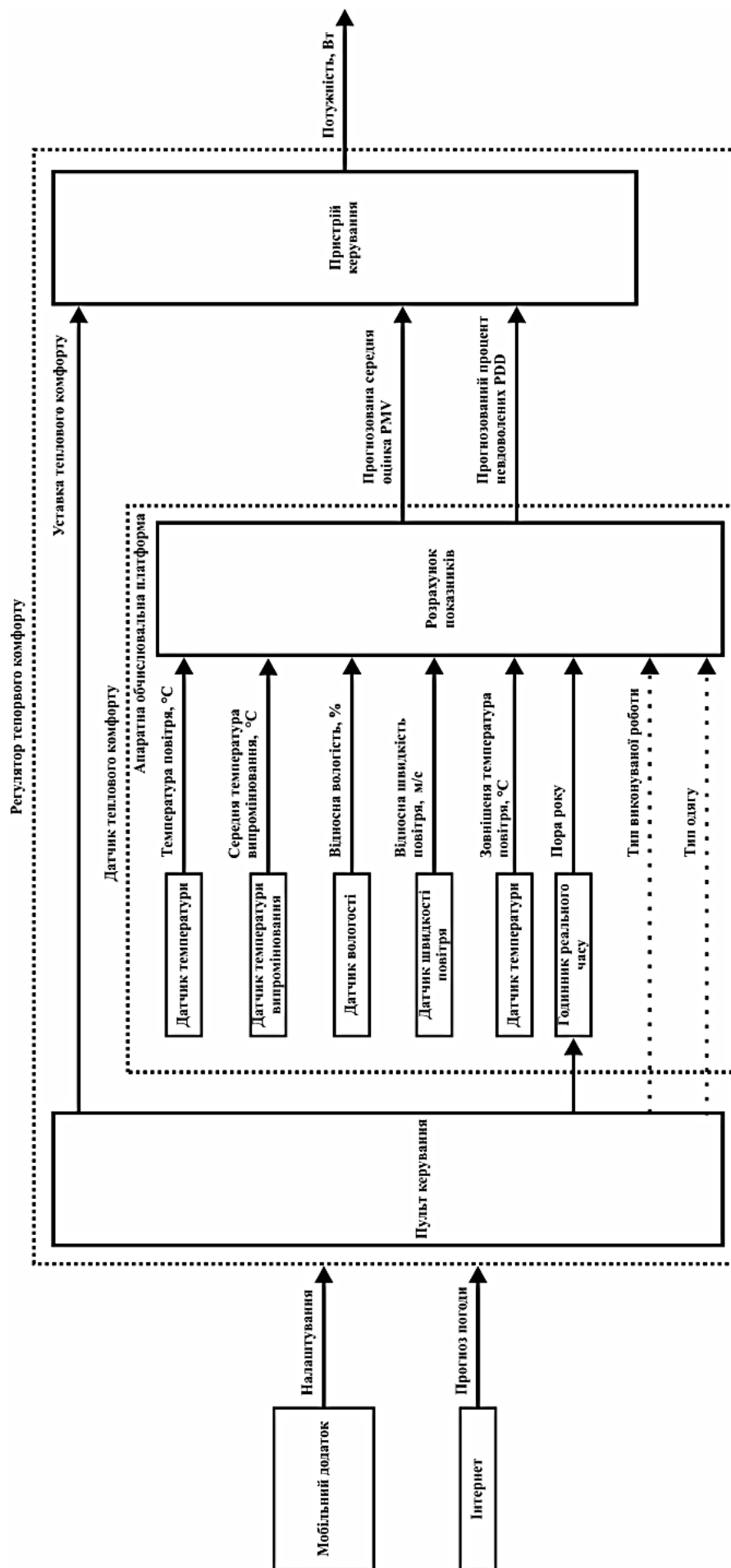


Рис. 4. Загальна структура регулятора теплового комфорту

Запропонована структура регулятора теплового комфорту дозволяє розробити універсальні регулятори які можуть бути використані у системах опалення та охолодження повітря, або у комбінованих системах.

Висновки.

1. Аналіз змін споживання енергоресурсів у Європейському союзі показав тенденцію до підвищення енергоефективності, шляхом зменшення їх споживання системами опалення та охолодження повітря. Основним шляхом досягнення цього є зміна вимог до температури у приміщенні: збільшення улітку та зменшення узимку.

2. На сьогодні системи керування температурою у приміщеннях не враховують показники теплового комфорту. Підвищення якості керування температурним режимом у приміщенні може бути досягнуто за рахунок керування безпосередньо тепловим комфортом на підставі прогнозованої середньої оцінки PMV та прогнозованого процента невдоволених PDD які визначаються ДСТУ Б EN ISO 7730:2011.

3. Запропонована структура датчика теплового комфорту, яка дозволяє вимірювати температуру повітря, середню температуру випромінювання, відносну вологість, відносну швидкість повітря, зовнішню температуру повітря, враховувати прогноз погоди та задавати швидкість обміну речовин та показник одягу.

4. На підставі запропонованої структури датчика теплового комфорту розроблена відповідна структура системи керування, яка може використовуватися при створенні нових систем опалення та охолодження повітря.

5. Враховуючи наявність великої кількості вже існуючих систем опалення та охолодження повітря запропоновано для підвищення якості їх функціонування використовувати регулятори теплового комфорту. Відповідно до цього розроблена загальна структура регулятора теплового комфорту.

6. Подальшим розвитком роботи є розробка моделі системи керування тепловим комфортом у приміщенні на підставі ДСТУ Б EN ISO 7730:2011. Порівняння якості її функціонування з традиційними методами керування температурою у приміщенні на базі двохпозиційних, ПД-регуляторах та інших. Аналіз енергоефективності системи керування тепловим комфортом у порівнянні з традиційними системами.

Перелік посилань

1. ДСТУ Б EN ISO 7730: 2011. *Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі роз-рахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту* (2012). [Чинний від 2013-01-01]. Мінрегіон України.
2. ДБН В.2.5-67:2013. *Опалення, вентиляція та кондиціонування* (2013). [Чинний від 01.01.2014]. Укрархбуд-інформ.
3. ДСТУ Б EN 15261: 2012. *Розрахунок параметрів мікроклімату* (2012). [Чинний від 2013-01-01]. Мінрегіон України.
4. ДСТУ Б А.2.2-12:2015. *Енергетична ефективність будівель. Національний метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні та гарячому водопостачанні* (2016). Міністерство регіонального розвитку будівництва та житлово-комунального господарства України.

5. Orosa, J. (2009). Research on General Thermal Comfort Models. *European Journal of Scientific Research*, 27. 217–227.

ABSTRACT

Purpose. Increasing the efficiency of the building's energy system by taking into account the inter-relationship of energy sources, thermal protection, indicators of thermal comfort and microclimate parameters of the premises. Taking into account the changes in the requirements of the European Union for indoor temperature and modern economic challenges, the main goal is to develop a system for automatic control of thermal comfort in a given temperature range with minimization of energy costs. Today, there are already many installed heating and cooling air systems. Based on this, the development of a universal device for maintaining thermal comfort in the room is promising.

The methods. To conduct an analysis of the developed approaches to increase the efficiency of the energy system of the building in terms of thermal comfort, to determine the features and possibilities of the energy analysis of heat and taking into account the limitations of human thermal comfort.

Findings. The proposed structure of the thermal comfort regulator will make it possible to develop a universal regulator that can be used in heating and air cooling systems, or in combined systems. Improving the quality of indoor temperature control can be achieved by directly managing thermal comfort based on the predicted average PMV score and the predicted percentage of dissatisfied PDD.

The originality. Typical approaches to managing indoor comfort based on temperature do not take into account radiation, humidity, air speed, clothing and user load, which leads to both the creation of uncomfortable conditions and excessive use of energy resources. For the first time, in accordance with DSTU B EN ISO 7730:2011, the structure of the thermal comfort control system was proposed, its input and output parameters and ways of obtaining non-measurable parameters were defined. The control system based on the predicted average PMV score and the predicted percentage of dissatisfied PDD determines the level of thermal comfort in the room and reduces the number of dissatisfied users. Management based on the predicted average PMV score ensures a reduction in the use of energy resources while maintaining the minimum acceptable thermal comfort indicators.

Practical implementation. The resulting structure can be used in the development of new thermal comfort control systems. Taking into account the presence of a large number of already existing heating and air cooling systems, it is proposed to use thermal comfort regulators to improve the quality of their functioning. The proposed approach through the use of the thermal comfort model will make it possible to determine the heating needs under different comfort conditions, reduce the energy consumption of the building without harming human health, and assess the possibility of increasing energy efficiency by changing the comfort conditions, thermal protection parameters and the microclimate of the premises.

Keywords: *comfort, regulator, microclimate, SCADA, automation, thermal facility.*