

Автоматизація
технологічних процесів

УДК 681.536.55

**ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗНИЖЕННЯ
ЕНЕРГОВИТРАТ ЗА РАХУНОК КЕРУВАННЯ СИСТЕМОЮ
ОПАЛЕННЯ НА ПІДСТАВІ ТЕПЛОВОГО КОМФОРТУ****Є.К. Воскобойник¹, О.О. Бойко¹, Д.В. Славінський¹, Ю.І. Чеберячко²**¹ Department of Cyberphysical and Information-Measuring Systems, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine² Department of Labor Protection and Civil Security, Dnipro University of Technology, Dnipro, UkraineE-mail: voskoboinyk.ye.k@nmu.one**АНОТАЦІЯ**

На фоні одночасної зміни впливу декількох негативних чинників на енергетичний ринок, а також ціни на енергоносії в Європейському Союзі одним з найменш коштовних шляхів підвищення енергоефективності системи опалення будівлі є використання новітніх підходів до керування. Перспективним напрямом у цьому питанні є заміна традиційного керування температурою у приміщенні на керування тепловим комфортом за комплексним показником PMV.

Мета – провести порівняльний аналіз енерговитрат на опалення у разі традиційного підходу та з використанням комплексного показника теплового комфорту на підставі удосконаленої моделі приміщення; розробити модель для дослідження можливості зниження енерговитрат за рахунок керування системою опалення на підставі теплового комфорту.

Отримана модель дозволяє досліджувати процес керування тепловим комфортом. Провівши низку експериментів, встановлено, що система керування тепловим комфортом у приміщенні під час роботи впливає на кількість витрачених енергоресурсів, на відміну від традиційної. Таким чином, керування тепловим комфортом у приміщенні може забезпечувати зниження енерговитрат за рахунок використання як дійсного значення зворотного зв'язку комплексного показника PMV замість температури.

Запропонована система керування температурою, на відміну від традиційної у приміщенні, не має постійних енерговитрат. Зважаючи на зміну параметрів теплового комфорту, що здебільшого призводить до ефективного використання енергоресурсів та ресурсів самої системи. Водночас за тих самих умов система керування тепловим комфортом у приміщенні знаходиться у режимі очікування, не вмикаючи опалення, що забезпечує зменшення енерговитрат. Таким чином, така система за відсутності обмежень на енерговитрати забезпечує більш якісне опалення порівняно з традиційною.

Ключові слова: тепловий комфорт, PMV, PDD, мікроклімат, регулятор, замкнута система керування.

Вступ

Початок зими 2024/2025 років характеризується одночасним впливом декількох негативних чинників на енергетичний ринок Європейського Союзу. Після двох відносно теплих зим поточна почалася більш низькими температурами [1]. Окрім того, за прогнозами найбільші холоди ще попереду, це пов'язано з відтягуванням струменевих потоків на північ, найбільш холодним місяцем вірогідно стане лютий 2025 року [2]. Своєю чергою за даними ENTSO-E протягом листопада та початку грудня 2024 року вироблення електроенергії на вітроелектростанціях Федеративної Республіки Німеччина вже декілька

разів змінювалося від максимального до мінімального значення протягом доби [3]. Так, 29 листопада ФРН експортувала 3 ГВт-год. електроенергії з атомних електростанцій Французької Республіки у зв'язку з падінням продуктивності ВЕС з 46,6 ГВт до 5,0 ГВт [3, 4], що своєю чергою призвело до зміни ціни з 119,99 €/МВт-год. до 130,25 €/МВт-год [5]. Взагалі падіння продуктивності ВЕС у ФРН протягом жовтня-листопада на 25% порівняно з попереднім роком спричинило збільшення вироблення електроенергії газовими електростанціями у листопаді на 79% [6].

Наведені зміни у структурі вироблення електроенергії ФРН протягом листопада

є загальноєвропейськими. Вони з урахуванням більш низьких температур позначилися на відборі з підземних газових сховищ по усьому Європейському Союзу. Так, на 1 грудня ПХГ ЄС заповнені на 85,5%, що на 10% менше ніж у попередньому році [7]. У зв'язку з цим ціна газу на біржі TTF становить більше 500 € за тис. м³, що на 100 € більше ніж роком раніше та на 150 € більше ніж протягом весни та початку літа 2024 року [8]. Таким чином, ціни на енергоносії в Європейському Союзі схильні до високої волатильності, що є однією з ознак продовження енергетичної кризи, яка відображається на конкурентоздатності економіки та матеріальному навантаженні приватних домогосподарств.

Найбільшим споживачем енергоресурсів у приватному домогосподарстві є система опалення. Одним зі шляхів зменшення енерговитрат на опалення є підвищення енергоефективності будівлі. Однак, як показують дослідження Eurocities Monitor, 75% будівель Європейського Союзу вважаються енергонеєфективними, а кожна четверта родина у Європі не може дозволити собі адекватне опалення [9]. Ціна установки сучасної підлогової системи опалення для приміщення розміром до 100 м² у ФРН становить 9000 € [10].

Виходячи з цього, одним з найменш коштовних шляхів підвищення енергоефективності системи опалення будівлі є використання новітніх підходів до керування нею. Перспективним напрямом у цьому питанні є заміна традиційного керування температурою у приміщенні на керування тепловим комфортом за комплексним показником PMV (прогнозована середня оцінка), описаним у стандарті ДСТУ Б EN ISO 7730: 2011 [11].

Створення системи керування опаленням на підставі теплового комфорту потребує визначення можливостей з керування енерговитратами за цим показником, що є метою цього дослідження.

Мета та задачі дослідження

Дослідження можливості зниження енерговитрат за рахунок керування системою опалення на підставі теплового комфорту проводилися з використанням удосконаленої моделі приміщення для дослідження процесу керування тепловим комфортом. Структурна схема моделі наведена на рисунку 1.

Визначення показників теплового комфорту прогнозованої середньої оцінки PMV та прогнозованого процента невдоволених PDD виконувалося за допомогою програмної моделі, розробленої відповідно до стандарту [11]. Її вхідні та вихідні параметри наведені на рисунку 2.

Для виконання порівняльного аналізу енерговитрат на опалення у разі традиційного підходу та з використанням комплексного показника теплового комфорту на підставі удосконаленої моделі приміщення (рис. 1) розроблена модель замкнутої системи керування температурою у приміщенні на базі двопозиційного регулятора, структурна схема якої наведена на рисунку 3.

На підставі удосконаленої моделі приміщення (рис. 1) та програмної моделі розрахунку параметрів теплового комфорту (рис. 2) розроблена модель замкнутої системи керування тепловим комфортом у приміщенні на базі двопозиційного регулятора, структурна схема якої наведена на рисунку 4.

Використовуючи отримані моделі, у математичному пакеті MATLAB розроблена модель для дослідження можливості зниження енерговитрат за рахунок керування системою опалення на підставі теплового комфорту (рис. 5).

Матеріали та методи досліджень

За початкову температуру у приміщенні вибрано мінімальне допустиме значення 16°C; у якості уставки температури 18°C; тип одягу – труси, сорочки, брюки, куртки, шкарпетки, черевики – 1,0 кло [11]; швидкість обміну речовин – сидяча робота (офіс, вдома,



Рис. 1. Структурна схема удосконаленої моделі приміщення для дослідження процесу керування тепловим комфортом



Рис. 2. Вхідні та вихідні параметри програмної моделі розрахунку параметрів теплового комфорту



Рис. 3. Структурна схема моделі системи керування температурою у приміщенні на базі двопозиційного регулятора



Рис. 4. Структурна схема моделі системи керування тепловим комфортом у приміщенні на базі двопозиційного регулятора

у школі, лабораторії) – 1,2 мет [11]; середня температура випромінювання – 25°C; відносна швидкість повітря – 0,1 м/с; початкова відносна вологість – 40%. За результатами моделювання для таких умов як уставку прогнозованої середньої оцінки PMV вибрано -0,2, що можна трактувати як «Нейтрально». Оцінка витраченої електроенергії виконана за інтегралом потужності, значення якого приводиться до кВт·год.

Система керування опаленням за температурою налаштована таким чином, щоб температура в установленому режимі змінювалася у діапазоні від 17°C до 18°C, рівень помилки включення нагрівача становить 1°C, а виключення – 0,85°C. Система керування опаленням за тепловим комфортом налаштована на

аналогічну зміну температури, рівень помилки включення нагрівача становить 0,096, а виключення – 0,077. Перевірка результатів моделювання (рис. 6) за нормованим середньоквадратичним відхиленням показала, що відповідність між системами за температурою та прогнозованою середньою оцінкою PMV становить 96%. Розбіжність між ними за витраченою електроенергією становить 9575 Дж, або 2,66 Вт·год. У разі загальних витрат 0,39 кВт·год. Таким чином, налаштування систем забезпечує їх однакове функціонування.

Дослідження можливості зниження енерговитрат за рахунок керування системою опалення на підставі теплового комфорту виконано шляхом варіювання вхідних параметрів теплового комфорту у межах норм

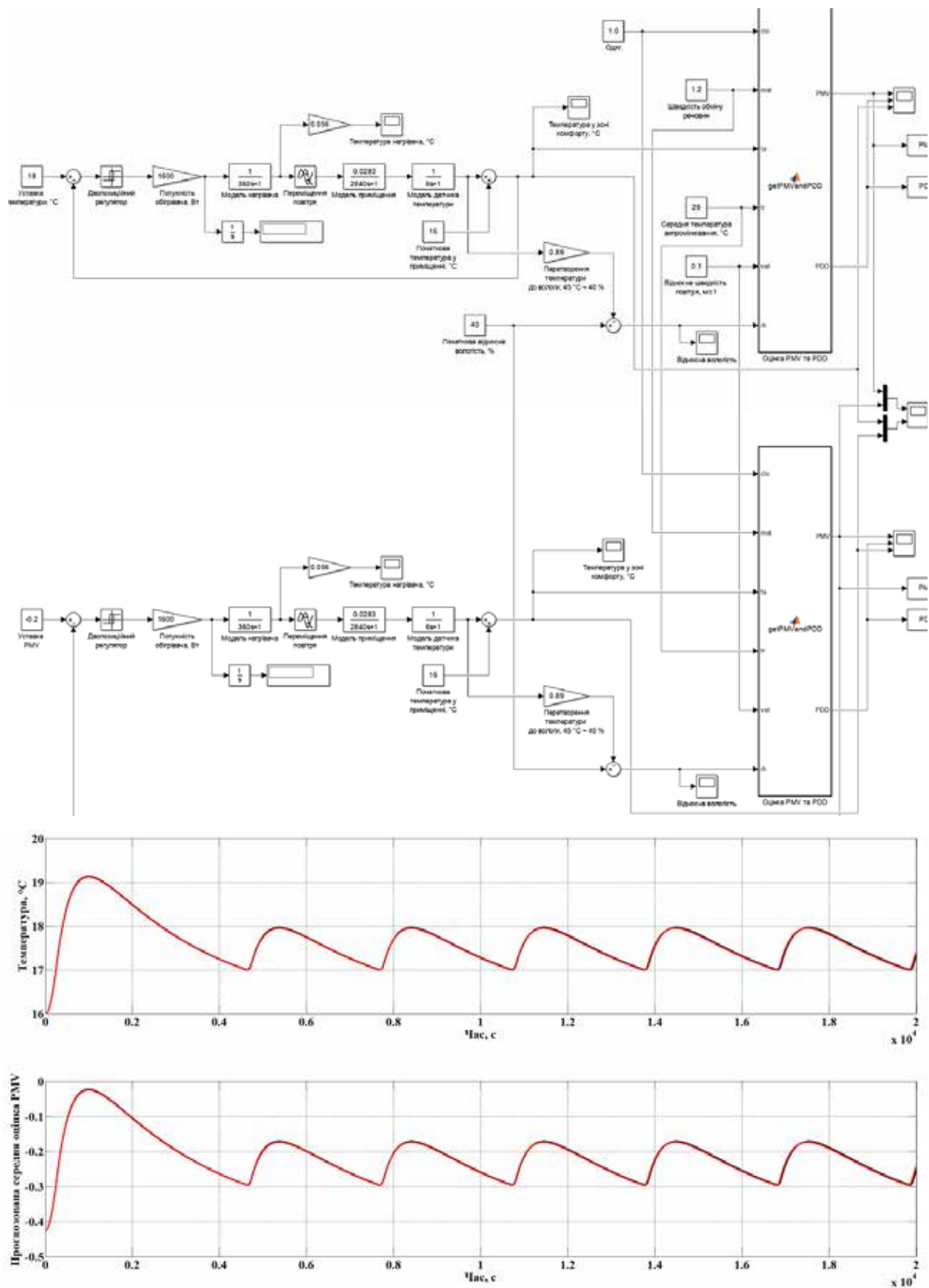


Рис. 6. Результат моделювання налаштованих систем

Табл. 1. Результати дослідження можливості зниження енерговитрат за рахунок керування системою опалення на підставі теплового комфорту

№	Clo	Met	Tr, °C	Vel, м/с	Rh, %	Керування за температурою			Керування за PMV		
						Е, кВт·год.	PMV	PDD	Е, кВт·год.	PMV	PDD
1	1,00	1,20	25,0	0,10	40,0	0,39	-0,23	6,13	0,39	-0,23	6,14
2	0,30	1,20	25,0	0,10	40,0	0,39	-1,99	76,34	2,28	-0,25	6,37
3	1,08	1,20	25,0	0,10	40,0	0,39	-0,12	5,31	0,09	-0,26	6,43
4	2,55	1,20	25,0	0,10	40,0	0,39	0,97	24,77	0,00	0,84	20,04
5	1,00	0,80	25,0	0,10	40,0	0,39	-1,98	75,62	2,47	-0,26	6,41
6	1,00	1,26	25,0	0,10	40,0	0,39	0,11	5,29	0,08	-0,26	6,44
7	1,00	2,00	25,0	0,10	40,0	0,39	0,77	17,66	0,00	0,65	13,86
8	1,00	1,20	16,0	0,10	40,0	0,39	-1,07	29,13	0,39	-0,26	6,41
9	1,00	1,20	26,3	0,10	40,0	0,39	-0,11	5,27	0,09	-0,26	6,42
10	1,00	1,20	35,0	0,10	40,0	0,39	0,75	16,88	0,00	0,55	11,29
11	1,00	1,20	25,0	0,10	40,0	0,39	-0,23	6,13	0,39	-0,23	6,14
12	1,00	1,20	25,0	0,30	40,0	0,39	-0,69	15,10	1,06	-0,24	6,19
13	1,00	1,20	25,0	0,10	20,0	0,39	-0,32	7,14	0,55	-0,23	6,14
14	1,00	1,20	25,0	0,10	60,0	0,39	-0,14	5,45	0,20	-0,23	6,16

відповідно до [11]. Результати дослідження наведені у таблиці 1, де Clo – тип одягу, Met – швидкість обміну речовин, Tr – середня температура випромінювання, Vel – відносна швидкість повітря, Rh – початкова відносна волога, Е – кількість споживаної електроенергії, PMV – середнє значення прогнозованої середньої оцінки, PDD – середнє значення прогнозованого процента невдоволених.

Система керування опаленням за температурою забезпечує підтримку температури та витрат електроенергії на постійному рівні, незважаючи на зміну одягу, тип діяльності людини, середню температуру випромінювання, відносну швидкість повітря та відносну вологість. Зрозуміло, що останні три показники у реальних умовах будуть мати деякий вплив на температуру у приміщенні, що компенсується системою керування. Більш важливим є те, що підтримка постійної температури у приміщенні не забезпечує тепловий комфорт (рис. 7).

Протягом 2–4 експериментів досліджено вплив зміни одягу на витрати електроенергії. Показники 0,3 кло відповідають «труси, футболки, шорти, світлі шкарпетки, сандалі» [11]. Зрозуміло, що за температури 16°C у приміщенні людині у такому одязі буде «Прохолодно». Система керування тепловим комфортом у приміщенні (далі – друга система) для забезпечення комфортних умов витрачає 2,28 кВт·год, що у 5,8 раза більше за систему керування температурою у приміщенні (далі – перша система). За 1,08 кло «труси, панчохи, блузки, довгі спідниці, піджаки, туфлі» [11] витрати становлять 0,09 кВт, а за більшого значення до 2,55 кло «нижня білизна

з довгими рукавами, термopіджаки та брюки, термокомбінезони, шкарпетки, взуття, шапки, рукавички» [11] друга система не працює, витрати відсутні. Таким чином, діапазон зміни витрат електроенергії становить від 0,00 кВт·год до 2,28 кВт·год (табл. 2).

Протягом 5–7 експериментів досліджено вплив зміни рухливої активності людини. Показники 0,8 мет відповідає «напівлежачі». Друга система для забезпечення комфортних умов витрачає 2,47 кВт·год. У разі 1,26 мет «сидяча робота» (офіс, вдома, у школі, лабораторії) витрати становлять 0,08 кВт·год., а у разі більшого значення до 2,00 мет середня «активність руху, робота стоячи (продавець, механічна робота, ...)» [11] витрати відсутні.

Протягом 8–10 експериментів досліджено вплив зміни середньої температури випромінювання. За температури 16,0°C витрати обох систем становлять 0,39 кВт·год., своєю чергою за 26,3°C витрати другої системи становлять 0,09 кВт·год., а у разі вищої температури до 35°C витрати відсутні.

Експерименти 10–14 відповідають зміні відносної швидкості та вологості повітря. Вони не потребують окремих коментарів. З їх результатами можна ознайомитися у таблицях 1, 2.

Результати досліджень

За результатами аналізу експериментальних даних встановлено, що система керування тепловим комфортом у приміщенні під час роботи впливає на кількість витрачених енергоресурсів, на відміну від традиційної. У деяких випадках система не вмикає опалення. Таким чином, керування

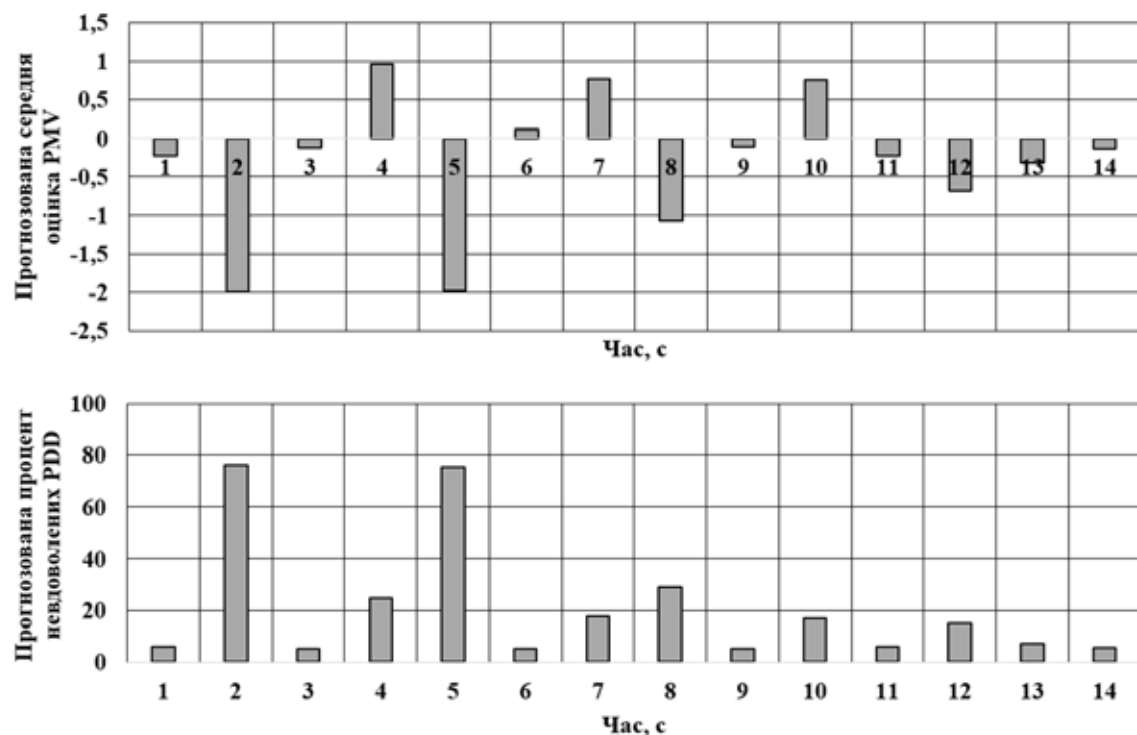


Рис. 7. Параметри теплового комфорту, сформовані системою керування температурою у приміщенні

Табл. 2. Діапазон зміни витрат електроенергії системи керування тепловим комфортом у приміщенні

	Clo	Met	Tr, °C	Vel, м/с	Rh, %
Е, кВт·год.	0,00÷2,28	0,00÷2,47	0,00÷0,39	0,39÷1,06	0,20÷0,55

тепловим комфортом у приміщенні може забезпечувати зниження енерговитрат за рахунок використання як дійсного значення зворотного зв'язку комплексного показника PMV замість температури. При цьому ця система потребує створення такого механізму обмеження, щоб у найгіршому випадку енерговитрати не перевищували витрат традиційної системи.

Висновки

1. Для порівняльного аналізу енерговитрат традиційного підходу до керування системою опалення та з використанням комплексного параметра PMV (прогнозована середня оцінка) на базі удосконаленої моделі приміщення для дослідження процесу керування тепловим комфортом створено дві моделі: системи керування температурою у приміщенні на базі двопозиційного регулятора та системи керування тепловим комфортом у приміщенні на базі двопозиційного регулятора.

2. Використовуючи отримані моделі систем керування, у математичному пакеті MATLAB розроблена модель для дослідження можливості зниження

енерговитрат за рахунок керування системою опалення на підставі теплового комфорту.

3. Налаштування дослідницької моделі виконано таким чином, щоб системи керування за тих самих умов мали однакові форми перехідних процесів та енерговитрати. За результатами моделювання встановлено, що за нормованим середньоквадратичним відхиленням відповідність між системами за температурою та прогнозованою середньою оцінкою PMV становить 96%, своєю чергою розбіжність за витраченою електроенергією не перевищує 1%. Таким чином, отримані системи дослідницької моделі забезпечують однакову якість керування опаленням у приміщенні.

4. У процесі дослідження можливості зниження енерговитрат за рахунок керування системою опалення на підставі теплового комфорту визначено вплив типу одягу, швидкості обміну речовин, середньої температури випромінювання, відносної швидкості та вологості повітря на витрати електроенергії. За отриманими результатами встановлено, що така система забезпечує зниження енерговитрат за рахунок використання як дійсного значення зворотного зв'язку комплексного показника PMV.

5. Традиційна система керування температурою у приміщенні має постійні енерговитрати, незважаючи на зміну параметрів теплового комфорту, що здебільшого призводить до неефективного використання енергоресурсів та ресурсів самої системи. Водночас за тих самих умов система керування тепловим комфортом у приміщенні знаходиться у режимі очікування, не вмикаючи опалення, що забезпечує зменшення енерговитрат.

6. Система керування тепловим комфортом у приміщенні за тих самих налаштувань забезпечує підтримку теплового комфорту на постійному рівні у всьому діапазоні зміни його параметрів. Таким чином, ця система за відсутності обмежень на енерговитрати забезпечує більш якісне опалення порівняно з традиційною.

7. Система керування тепловим комфортом у приміщенні потребує розробки та дослідження механізму обмеження для випадку погіршення умов теплового комфорту, щоб енерговитрати не перевищували витрати традиційної системи. Це питання є перспективним напрямом продовження такої роботи.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно цього дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені у цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] After two warm winters, Europe should prepare for colder temperatures: Oxford. Anadolu Ajansi. Дата звернення: 06 грудня 2024 [Онлайн]. URL: <https://is.gd/V4LFzh>.
- [2] Winter 2024/2025 Europe Forecast: A good start followed by a slowdown, with more potential again for February. Severe Weather Europe. Дата звернення: 06 грудня 2024 [Онлайн]. URL: <https://is.gd/h3WzMm>.
- [3] ENTSO-E Transparency Platform. ENTSO-E. Дата звернення: 06 грудня 2024 [Онлайн]. URL: <https://is.gd/BHOOh7>.
- [4] Germany Turns to French Nuclear Power as Wind Generation Falls. Bloomberg. Дата звернення: 06 грудня 2024 [Онлайн]. URL: <https://is.gd/zxdqMW>.
- [5] Electricity prices Germany. EUENERGY. Дата звернення: 06 грудня 2024 [Онлайн]. URL: <https://is.gd/wyZ8qT>.
- [6] Germany's weak winds trigger record surge in gas-fired power. Reuters. Дата звернення: 06 грудня 2024 [Онлайн]. URL: <https://is.gd/IIRCgH>.
- [7] Gas price shock set to add to Europe's industrial pain. Reuters. Дата звернення: 06 грудня 2024 [Онлайн]. URL: <https://is.gd/OyX4kc>.
- [8] EU Natural Gas TTF. TRADING ECONOMICS. Дата звернення: 06 грудня 2024 [Онлайн]. URL: <https://is.gd/J7DX3c>.
- [9] Cities taking on the energy crisis. Eurocities Monitor. Дата звернення: 06 грудня 2024 [Онлайн]. URL: <https://is.gd/a9XGdJ>.
- [10] Fußbodenheizung Kosten & Preise pro m². Wir verlegen Estrich. Дата звернення: 06 грудня 2024 [Онлайн]. URL: <https://is.gd/TZCrVo>.
- [11] Ергономіка теплового середовища. Аналітичне визначення та інтерпретація теплового комфорту на основі розрахунків показників PMV і PPD і критеріїв локального теплового комфорту (2012). ДСТУ Б EN ISO 7730: 2011. [Чинний від 2013-01-01]. Київ: Мінрегіон України.

RESEARCH ON THE POSSIBILITY OF REDUCING ENERGY CONSUMPTION BY CONTROLLING THE HEATING SYSTEM BASED ON THERMAL COMFORT

Yevhen Voskoboinyk, Oleg Boyko, Dmytro Slavinskyi,
Yurii Cheberiachko

Against the backdrop of simultaneous changes in the impact of several negative factors on the energy market, as well as energy prices in the European Union, one of the least expensive ways to increase the energy efficiency of a building's heating system is to use the latest approaches to control. A promising direction in this matter is to replace traditional indoor temperature control with thermal comfort control using a complex PMV indicator.

To conduct a comparative analysis of energy consumption for heating using a traditional approach and using a complex thermal comfort indicator based on an improved room model. To develop a model to study the possibility of reducing energy consumption by controlling the heating system based on thermal comfort.

The resulting model allows you to study the process of thermal comfort control. After conducting several experiments, it was found that the thermal comfort control system in the room during operation affects the amount of energy resources consumed, unlike the traditional one. Thus, indoor thermal comfort control can provide energy savings by using the complex PMV indicator as the actual feedback value instead of temperature.

The proposed temperature control system, unlike the traditional one, does not have constant energy consumption in the room. Considering the change in thermal comfort parameters, which in some cases leads

to the effective use of energy resources and the resources of the system itself. At the same time, under the same conditions, the indoor thermal comfort control system is in standby mode without turning on the heating, which ensures a reduction in energy consumption. Thus, this system, in the absence of restrictions on energy consumption, provides better heating compared to the traditional one.

Keywords: *thermal comfort, PMV, PDD, microclimate, regulator, closed-loop control system.*

REFERENCES

- [1] After two warm winters, Europe should prepare for colder temperatures: Oxford. Anadolu Ajansi. Accessed: 06 December 2024 [Online]. URL: <https://is.gd/V4LFzh>.
- [2] Winter 2024/2025 Europe Forecast: A good start followed by a slowdown, with more potential again for February. Severe Weather Europe. Accessed: 06 December 2024 [Online]. URL: <https://is.gd/h3WzMm>.
- [3] ENTSO-E Transparency Platform. ENTSO-E. Accessed: 06 December 2024 [Online]. URL: <https://is.gd/BHOOH7>.
- [4] Germany Turns to French Nuclear Power as Wind Generation Falls. Bloomberg. Accessed: 06 December 2024 [Online]. URL: <https://is.gd/zxdqMW>.
- [5] Electricity prices Germany. EUENERGY. Accessed: 06 December 2024 [Online]. URL: <https://is.gd/wyZ8qT>.
- [6] Germany's weak winds trigger record surge in gas-fired power. Reuters. Accessed: 06 December 2024 [Online]. URL: <https://is.gd/IIRCgH>.
- [7] Gas price shock set to add to Europe's industrial pain. Reuters. Accessed: 06 December 2024 [Online]. URL: <https://is.gd/OyX4kc>.
- [8] EU Natural Gas TTF. TRADING ECONOMICS. Accessed: 06 December 2024 [Online]. URL: <https://is.gd/J7DX3c>.
- [9] Cities taking on the energy crisis. Eurocities Monitor. Accessed: 06 December 2024 [Online]. URL: <https://is.gd/a9XGdJ>.
- [10] Fußbodenheizung Kosten & Preise pro m². Wir verlegen Estrich. Date of access: 06 December 2024 [Online]. URL: <https://is.gd/TZCrVo>.
- [11] Ergonomics of the thermal environment. Analytical definition and interpretation of thermal comfort based on calculations of PMV and PPD indicators and criteria of local thermal comfort (2012). DSTU B EN ISO 7730: 2011. [Valid from 2013-01-01]. Kyiv: Minregion of Ukraine.