

УДК 681.536.55

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2026-6-3>

МЕТОДИКА КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ КОМФОРТОМ У ПРИМІЩЕННІ НА БАЗІ ДВОПОЗИЦІЙНОГО РЕГУЛЯТОРА

Воскобойник Євген Костянтинович,

асистент кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем

Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

ORCID ID: 0000-0002-7653-2607

У статті розглянуто проблему забезпечення теплового комфорту в приміщеннях шляхом застосування адаптивних систем керування на базі двопозиційних регуляторів. Метою роботи є розробка та дослідження системи, яка забезпечує автоматичне налаштування параметрів регулятора та сприяє зменшенню енерговитрат. Запропоновано методику керування тепловим комфортом із можливістю зміни налаштувань відповідно до вимог користувача, а також алгоритм уточнення параметрів двопозиційного регулятора з урахуванням типу зсуву уставки. На основі розробленого алгоритму створено модель процесу керування тепловим комфортом у приміщенні з автоматичним налаштуванням, результати моделювання якої підтвердили ефективність запропонованого рішення. Система забезпечує автоматичне визначення рівнів помилки керування, за якими здійснюється вмикання та вимикання опалення, а відхилення параметрів не перевищує 10 % від встановлених обмежень. Використання удосконаленого принципу розрахунку кроку зміни рівня помилки підвищує якість функціонування системи, хоча й збільшує кількість ітерацій та час налаштування. Наукова новизна роботи полягає у створенні адаптивної системи керування тепловим комфортом, яка уточнює початкові параметри регулятора та корегує їх у процесі роботи. Практичне значення полягає у можливості використання системи для підвищення енергоефективності та інтеграції результатів моделювання у навчальний процес підготовки фахівців з автоматизації та енергоменеджменту. Подальший розвиток дослідження передбачає перехід до безперервного керування тепловим комфортом із застосуванням пропорційно інтегрально диференціального закону регулювання та автоматичним визначенням параметрів регулятора.

Ключові слова: тепловий комфорт, двопозиційний регулятор, адаптивна система, автоматичне керування, енергоефективність, моделювання, ідентифікація, дослідження.

Voskoboinyk Yevhen. Methodology for controlling thermal comfort in a room based on a two-position regulator

The article discusses the problem of ensuring thermal comfort in rooms through the use of adaptive control systems based on two-position regulators. The aim of the work is to develop and study a system that provides automatic adjustment of the regulator parameters and contributes to a reduction in energy costs. A method for controlling thermal comfort with the ability to change settings according to user requirements is proposed, as well as an algorithm for refining the parameters of a two-position controller, taking into account the type of setpoint shift. Based on the developed algorithm, a model of the thermal comfort control process in a room with automatic adjustment was created, the simulation results of which confirmed the effectiveness of the proposed solution. The system provides automatic determination of control error levels, according to which the heating is switched on and off, and the deviation of the parameters does not exceed 10% of the set limits. The use of an improved principle for calculating the error level change step improves the quality of the system's operation, although it increases the number of iterations and the adjustment time. The scientific novelty of the work lies in the creation of an adaptive thermal comfort control system that refines the initial parameters of the controller and adjusts them during operation. The practical significance lies in the possibility of using the system to improve energy efficiency and integrate the results of modelling into the training process for specialists in automation and energy management. Further development of the research involves the transition to continuous thermal comfort control using a proportional-integral-derivative control law and automatic determination of the controller parameters.

Key words: thermal comfort, two-position controller, adaptive system, automatic control, energy efficiency, modeling, identification, research.

Вступ. За даними AleaSoft Energy Forecasting тижневі ціни на електроенергію у більшості країн Європейському союзу у грудні перевищили 120 € за МВт·год. Ціни у північних країнах регіону утримувалися на рівні 45 € за МВт·год. Такий розбаланс пов'язаний із низькою вітряністю на півдні та у центрі Європи. У свою чергу

ціни на газ були вище 430 € за тис. м³ у зв'язку з збільшеним попитом електростанцій та нижчою температурою у порівнянні з останніми двома роками [1].

Зважаючи на високі ціни електроенергії очевидним рішенням є використання альтернативних джерел у домогосподарствах. За даними

Maxbo Solar Energy ціна сонячної електростанції під ключ потужністю 10 кВт становить від 2500 € до 4600 €, а строк окупності від 3 до 5 років [2]. Відповідно до інших джерел строк окупності побутових сонячних панелей складає біля 10 років [3].

Однак останні події у Федеративній Республіці Німеччина показують, що довгострокові вкладення у відновлювані джерела енергії можуть ніколи не окупитись. Ця країна може створити прецедент коли усі виробники відновлювальної енергії потужністю від 7 кВт будуть зобов'язані встановити обладнання для дистанційного відключення або зменшення вихідної потужності. Якщо це рішення буде прийняте з 1 січня 2025 року керування відновлювальними джерелами буде передано до відомства операторів електричної мережі [4] не зважаючи на закони Європейського Союзу про анбандлінг які прямо говорять про поділ повноважень між виробниками та постачальниками енергоресурсів.

Зменшення енерговитрат побутовим споживачем може бути досягнуто за рахунок модернізації свого житла. Як відомо найбільші витрати енергії у побуті приходяться на систему опалення. Однак в цьому напрямі є свої обмеження, 8 серпня 2023 року Німеччина прийняла закон направлений проти установки систем опалення з використанням викопного палива [5]. Альтернатива газовим котлам є теплові насоси, котрі більш коштовні за рахунок ціни установки [6], споживають значні обсяги енергії, що потребує підводу окремої електричної мережі і не мають суттєвих переваг над першими.

Таким чином найдешевшим шляхом зменшення енерговитрат у домогосподарстві системою опалення є зміна принципу керування нею. Перспективним шляхом у цьому напрямі є використання замість традиційного методу керування температурою у приміщенні керування тепловим комфортом на підставі прогнозованої середньої оцінки PMV.

Методи та методики дослідження. За результатами дослідження процесу керування тепловим комфортом у приміщенні на базі двопозиційного регулятора розроблена відповідна методика.

На початку обираються параметри процесу керування:

1. Тип зсуву дійсного значення прогнозованої середньої оцінки PMV:

– нижче уставки – в усталеному режимі максимальне дійсне значення наближено до рівня уставки;

– на рівні уставки – в усталеному режимі середина коливань дійсного значення наближена до рівня уставки;

– вище уставки – в усталеному режимі мінімальне дійсне значення наближено до рівня уставки.

2. Значення уставки прогнозованої середньої оцінки $PMV_{уст}$:

– $-1,0 \div 0,0$ – прохолодно / трохи прохолодно;

– $0,0$ – нейтрально;

– $0,0 \div 1,0$ – трохи тепло / тепло.

3. Обмеження амплітуди коливань прогнозованої середньої оцінки в усталеному режимі $\varnothing PMV_{ур}$.

4. Допустиме відхилення прогнозованої середньої оцінки від уставки в усталеному режимі $\varnothing PMV_{ур_відх}$.

5. Початковий рівень помилки керування за яким включається обігрівач $\varnothing PMV_{вкл_об}$.

6. Початковий рівень помилки керування за яким виключається обігрівач $\varnothing PMV_{викл_об}$.

Процес уточнення параметрів двопозиційного регулятора починається з очікування досягнення усталеного режиму:

7. Перше коливання виконується згідно з обраними значеннями уставки та початкових рівнів помилки керування відповідних включенню / виключенню обігрівача. За одне коливання вважається інтервал часу між двома включеннями нагрівача.

8. Друге коливання виконується аналогічно до першого при цьому визначається мінімальне $PMV_{ур_мін}$ та максимальне $PMV_{ур_макс}$ значення прогнозованої оцінки в усталеному режимі.

9. По закінченню другого коливання розраховуються уточнені параметри двопозиційного регулятора $\varnothing PMV_{вкл_об}$, $\varnothing PMV_{викл_об}$ для обраного типу зсуву. Пункти 8 та 9 повторюється доки не будуть виконані відповідні умови (1, 2; 1, 10; 1, 13). При виконанні усіх ітерацій після першої замість $\varnothing PMV_{вкл_об}$, $\varnothing PMV_{викл_об}$ використовуються уточнені параметри регулятора $\varnothing PMV_{вкл_об}$, $\varnothing PMV_{викл_об}$.

9.1. Нижче уставки.

9.1.1. Перевіряється відповідність перехідного процесу в усталеному режимі до налаштувань:

– амплітуда коливань прогнозованої середньої оцінки PMV менша або дорівнює налаштуванню:

$$(PMV_{ур_макс} - PMV_{ур_мін}) \leq \Delta PMV_{ур}. \quad (1)$$

– максимальне значення прогнозованої середньої оцінки PMV знаходиться на рівні уставки з урахуванням обмежень:

$$PMV_{уст} - \Delta PMV_{ур_відх} \leq PMV_{ур_макс} \leq PMV_{уст} + \Delta PMV_{ур_відх}. \quad (2)$$

Якщо умови (1, 2) виконуються уточнення параметрів двопозиційного регулятора завершується.

9.1.2. У випадку коли амплітуда коливань прогнозованої середньої оцінки PMV більша за налаштування:

$$(PMV_{ур_макс} - PMV_{ур_мін}) > \Delta PMV_{ур}, \quad (3)$$

рівень помилки керування за яким виключається обігрівач збільшується:

$$\Delta PMV_{викл_об} = \Delta PMV_{викл_об} + \Delta PMV_{крок_об}, \quad (4)$$

крок зміни рівня помилки керування відповідає половині діапазону нечутливості двопозиційного регулятора:

$$\Delta PMV_{крок_об} = (\Delta PMV_{викл_об} - \Delta PMV_{викл_об}) / 2, \quad (5)$$

поточна ітерація завершується.

9.1.3. У випадку коли максимальне значення прогнозованої середньої оцінки PMV менше за значення уставки з урахуванням обмеження:

$$PMV_{ур_макс} < PMV_{уст} - \Delta PMV_{ур_відх}, \quad (6)$$

діапазон нечутливості двопозиційного регулятора зсувається униз:

$$\Delta PMV_{вкл_об} = \Delta PMV_{вкл_об} - \Delta PMV_{крок_об},$$

$$\Delta PMV_{викл_об} = \Delta PMV_{викл_об} - \Delta PMV_{крок_об}, \quad (7)$$

поточна ітерація завершується.

9.1.4. У випадку коли максимальне значення прогнозованої середньої оцінки PMV більше за значення уставки з урахуванням обмеження:

$$PMV_{ур_макс} > PMV_{уст} + \Delta PMV_{ур_відх}, \quad (8)$$

діапазон нечутливості двопозиційного регулятора зсувається вгору:

$$\Delta PMV_{вкл_об} = \Delta PMV_{вкл_об} + \Delta PMV_{крок_об},$$

$$\Delta PMV_{викл_об} = \Delta PMV_{викл_об} + \Delta PMV_{крок_об}, \quad (9)$$

поточна ітерація завершується.

9.2. На рівні уставки.

9.2.1. Перевіряється відповідність перехідного процесу в усталеному режимі до налаштувань:

– амплітуда коливань прогнозованої середньої оцінки PMV менша або дорівнює налаштуванню (1);

– максимальне значення прогнозованої середньої оцінки PMV знаходиться вище уставки на половину діапазону його зміни:

$$PMV_{уст} - \Delta PMV_{ур_відх} \leq PMV_{ур_макс} + (PMV_{ур_мін} - PMV_{ур_макс}) / 2$$

$$PMV_{ур_макс} + (PMV_{ур_мін} - PMV_{ур_макс}) / 2 \leq PMV_{уст} + \Delta PMV_{ур_відх}. \quad (10)$$

Якщо умови (1, 10) виконуються уточнення параметрів двопозиційного регулятора завершується.

9.2.1. Відповідає пункту 9.1.2.

9.2.3. У випадку коли максимальне значення прогнозованої середньої оцінки PMV зсунуте відносно уставки на половину діапазону менше за її значення з урахуванням обмеження:

$$PMV_{ур_макс} + (PMV_{ур_мін} - PMV_{ур_макс}) / 2 < PMV_{уст} - \Delta PMV_{ур_відх}, \quad (11)$$

діапазон нечутливості двопозиційного регулятора зсувається униз (7), поточна ітерація завершується.

9.2.4. У випадку коли максимальне значення прогнозованої середньої оцінки PMV зсунуте відносно уставки на половину діапазону більше за її значення з урахуванням обмеження:

$$PMV_{ур_макс} + (PMV_{ур_мін} - PMV_{ур_макс}) / 2 > PMV_{уст} + \Delta PMV_{ур_відх}, \quad (12)$$

діапазон нечутливості двопозиційного регулятора зсувається вгору (9), поточна ітерація завершується.

9.3. Вище уставки.

9.3.1. Перевіряється відповідність перехідного процесу в усталеному режимі до налаштувань:

– амплітуда коливань прогнозованої середньої оцінки PMV менша або дорівнює налаштуванню (1);

– мінімальне значення прогнозованої середньої оцінки PMV знаходиться на рівні уставки з урахуванням обмежень:

$$PMV_{уст} - \Delta PMV_{ур_відх} \leq PMV_{ур_мін} \leq PMV_{уст} + \Delta PMV_{ур_відх}. \quad (13)$$

Якщо умови (1, 13) виконуються уточнення параметрів двопозиційного регулятора завершується.

9.3.2. У випадку коли амплітуда коливань прогнозованої середньої оцінки PMV більша за налаштування (3), рівень помилки керування за яким включається обігрівач зменшується:

$$\Delta PMV_{вкл_об} = \Delta PMV_{вкл_об} - \Delta PMV_{крок_об}, \quad (14)$$

поточна ітерація завершується.

9.3.3. У випадку коли мінімальне значення прогнозованої середньої оцінки PMV менше за значення уставки з урахуванням обмеження:

$$PMV_{ур_мін} < PMV_{уст} - \Delta PMV_{ур_відх}, \quad (15)$$

діапазон нечутливості двопозиційного регулятора зсувається униз (7), поточна ітерація завершується.

9.4.4. У випадку коли мінімальне значення прогнозованої середньої оцінки PMV більше за значення уставки з урахуванням обмеження:

$$PMV_{ур_мін} > PMV_{уст} + \Delta PMV_{ур_відх}, \quad (16)$$

діапазон нечутливості двопозиційного регулятора зсувається вгору (9), поточна ітерація завершується.

По закінченню уточнення параметрів дво-позиційного регулятора система переходить до функціонування у звичайному режимі.

На підставі пункту 9 розроблено алгоритм уточнення параметрів двопозиційного регулятора. Частина відповідна до типу зсуву нижче уставки наведеної на рисунку 1.

Відповідно до запропонованих методики та алгоритму розроблено двопозиційний регулятор вхідні та вихідні параметри якого наведені на рисунку 2.

Використовуючи отриманий двопозиційний регулятор у графічному середовищі імітаційного

моделювання Simulink математичного пакету MATLAB розроблена модель для дослідження процесу керування тепловим комфортом з його використанням (рис. 3).

Результат моделювання за вирівнюванням нижче уставки -0,2, обмеженням амплітуди 0,1, допустимим відхиленням 0,01, початковим рівнем включення обігрівача 0,01 та виключення -0,01 наведеної на рисунку 4. Результати моделювання за автоматично отриманими налаштуваннями двопозиційного регулятора для усіх типів зсувів наведені у таблиці 1.

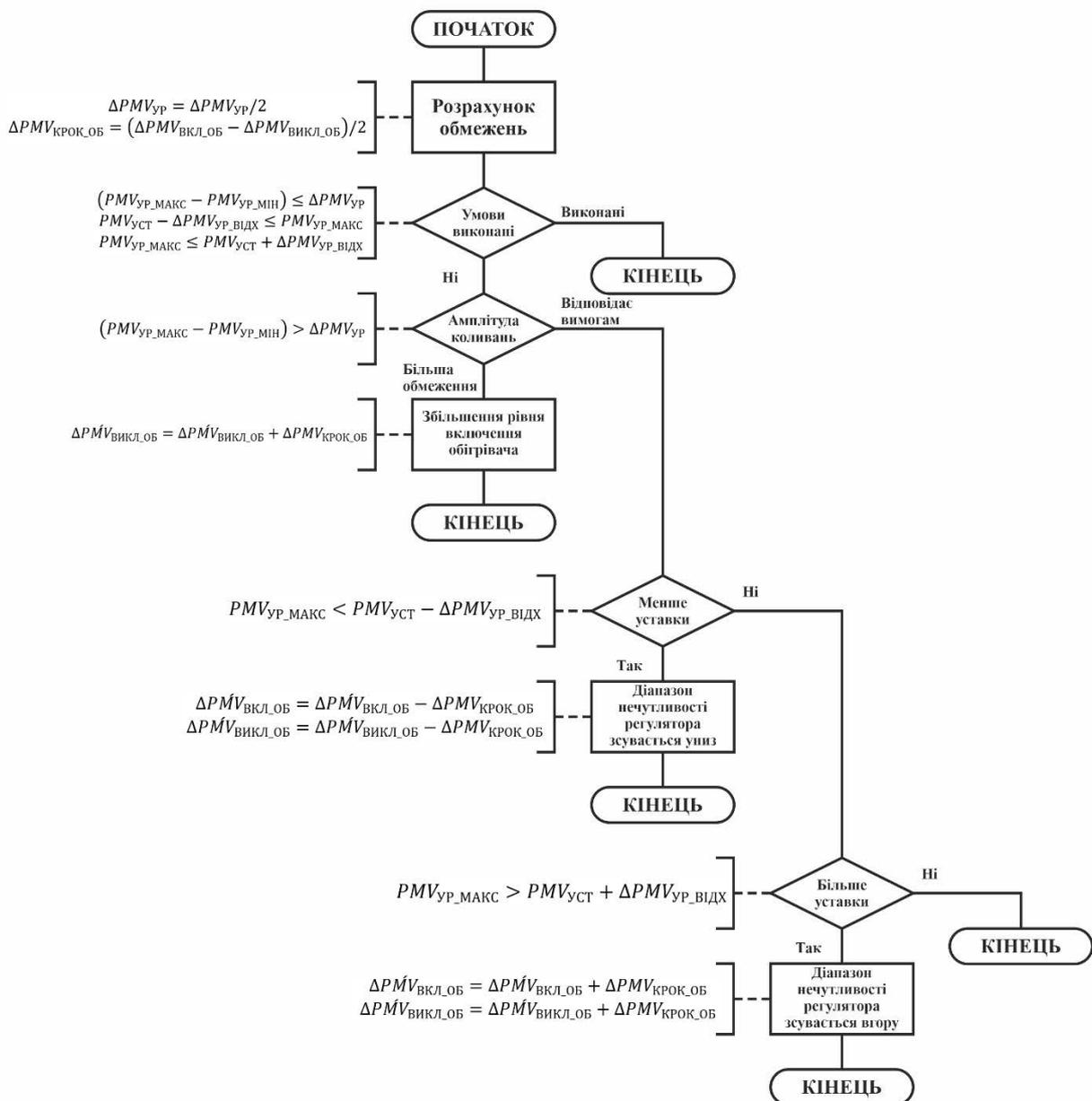


Рис. 1. Частина алгоритму уточнення параметрів двопозиційного регулятора відповідна до типу зсуву нижче уставки



Рис. 2. Вхідні та вихідні параметри двопозиційного регулятора з автоматичним налаштуванням для системи керування тепловим комфортом у приміщенні

Аналіз отриманих результатів показав, що запропонована методика забезпечує автоматичне налаштування двопозиційного регулятора системи керування тепловим комфортом відповідно вимогам для усіх розглянутих типів зсувів.

Дослідження показали, що помилка керування зсуву відносна уставки може бути зменшена за допомогою удосконалення принципу розрахунку відповідного кроку:

– нижче уставки та на рівні уставки:

$$\Delta PMV_{\text{КРОК_ОБ}} = \left| (PMV_{\text{УСТ}} - PMV_{\text{УР_МАКС}}) / PMV_{\text{УСТ}} \right| \Delta K, \quad (17)$$

де K – коефіцієнт кроку який розраховується по досягненню усталеного режиму як:

$$K = \Delta PMV_{\text{КРОК_ОБ}} / \left| (PMV_{\text{УСТ}} - PMV_{\text{УР_МАКС}}) / PMV_{\text{УСТ}} \right|. \quad (18)$$

– вище уставки:

$$\Delta PMV_{\text{КРОК_ОБ}} = \left| (PMV_{\text{УСТ}} - PMV_{\text{УР_МИН}}) / PMV_{\text{УСТ}} \right| \Delta K, \quad (19)$$

де K – коефіцієнт кроку який розраховується по досягненню усталеного режиму як:

$$K = \Delta PMV_{\text{КРОК_ОБ}} / \left| (PMV_{\text{УСТ}} - PMV_{\text{УР_МИН}}) / PMV_{\text{УСТ}} \right|. \quad (20)$$

Використання (17-20) у загальному випадку призводить до збільшення кількості ітерацій пошуку налаштувань двопозиційного регулятора, однак комбінація запропонованої методики з удосконаленим принципом розрахунку кроку зміни рівня помилки керування дозволяє створити на базі двопозиційного регулятора з автоматичним налаштуванням адаптивну систему керування тепловим комфортом у приміщенні.

При першому запуску система керування функціонує у режимі налаштування, крок зміни рівня помилки керування відповідає (5). По закінченню уточнення параметрів регулятора система переходить до функціонування у режимі адаптивної, крок розраховується відповідно до (17-20). Результат моделювання

адаптивної системи керування тепловим комфортом наведений на рисунку 5.

Дослідження показали, що розроблена адаптивна система керування тепловим комфортом у приміщенні на базі двопозиційного регулятора забезпечує ефективність використання енергоресурсів відповідно до. Автоматичне визначення налаштувань параметрів двопозиційного регулятора компенсує її головний недолік – незручність використання у побуті. Функціонування системи у адаптивному режимі дозволяє підлаштовуватись до параметрів приміщення.

Висновки. За результатами досліджень запропонована методика керування тепловим комфортом у приміщенні на базі двопозиційного регулятора. Методика враховує можливість зміни налаштувань системи керування відповідно до вимог користувача та забезпечення зменшення енерговитрат.

На підставі запропонованої методики розроблено алгоритм уточнення параметрів двопозиційного регулятора, що враховує тип зсуву уставки. Відповідно до алгоритму створено двопозиційний регулятор тепловим комфортом з автоматичним налаштуванням.

Використовуючи отриманий двопозиційний регулятор розроблена модель для дослідження процесу керування тепловим комфортом у приміщенні з автоматичним налаштуванням.

Результати моделювання показали, що розроблений регулятор відповідає вимогам та дозволяє автоматично визначати рівні помилки керування за якими включається / виключається опалення. Після налаштування система працює відповідно до вимог, відхилення її параметрів не перевищує 10 % від обмежень.

Використання удосконаленого принципу розрахунку кроку зміни рівня помилки керування

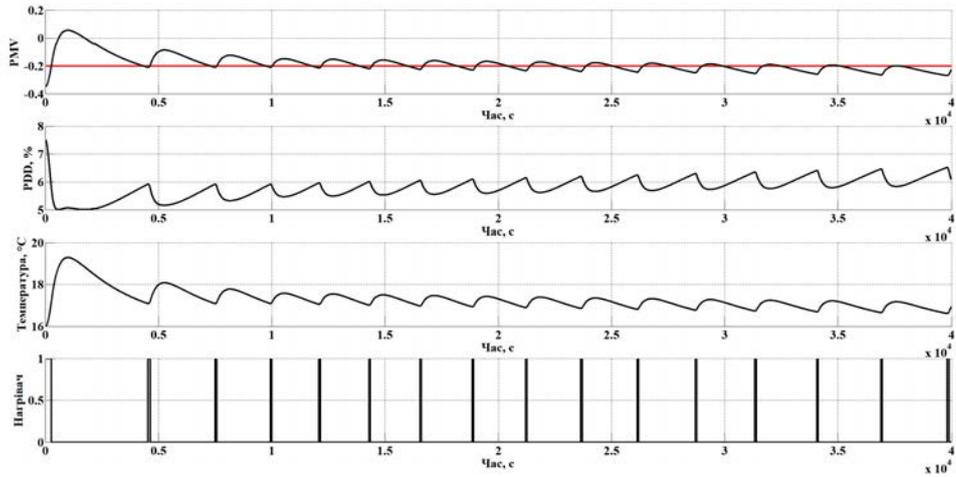


Рис. 4. Результат моделювання автоматичного налаштування двопозиційного регулятора зі зсувом нижче уставки

Таблиця 1

Результати моделювання за автоматично отриманими налаштуваннями двопозиційного регулятора

| Тип зсуву | Нижче уставки | На рівні уставки | Вище уставки |
|------------------------------|---------------|------------------|--------------|
| $\varnothing PMV_{ВКЛ_ОБ}$ | 0,070 | 0,030 | -0,005 |
| $\varnothing PMV_{Викл_ОБ}$ | 0,060 | 0,020 | -0,010 |
| Середня РМВ | -0,22 | -0,17 | -0,14 |
| РМВмін. | -0,27 | -0,23 | -0,20 |
| РМВмакс. | -0,19 | -0,12 | -0,11 |
| Діапазон РМВ | 0,08 | 0,11 | 0,09 |
| Відхилення РМВ | 0,07 | 0,08 | 0,11 |
| Середній РДД, % | 6,04 | 5,61 | 5,41 |
| Тмін., °С | 17,30 | 17,64 | 17,93 |
| Тмакс., °С | 18,00 | 18,32 | 18,40 |
| Середня Т, °С | 17,71 | 18,04 | 18,21 |
| ΔЕ, кВт·год. | 0,43 | 0,50 | 0,55 |

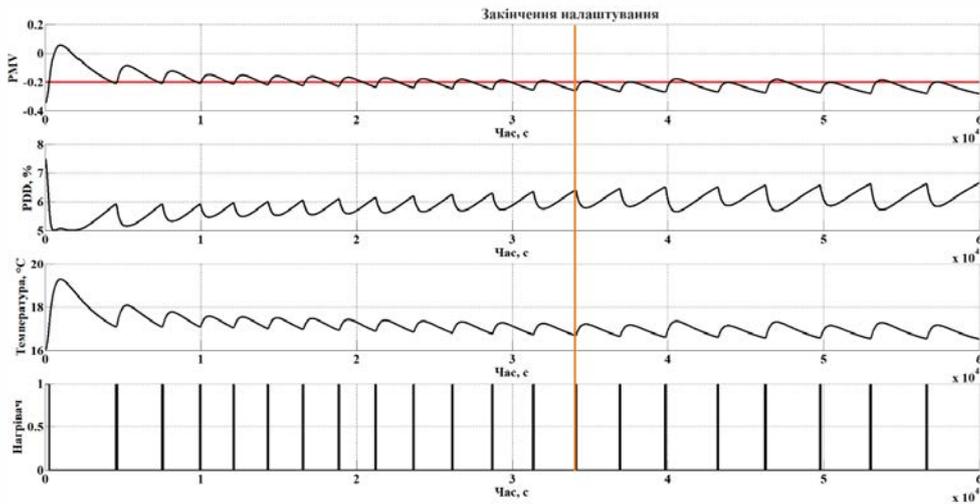


Рис. 5. Результат моделювання адаптивної системи керування тепловим комфортом у приміщенні на базі двопозиційного регулятора

підвищує показники якості функціонування системи керування однак збільшує кількість ітерацій для її налаштування та відповідно час налаштування.

За результатами дослідження запропонована адаптивна система керування тепловим комфортом у приміщенні на базі двопозиційного регулятора. Система забезпечує уточнення його початкових параметрів, після чого корегує

їх відповідно до змін у процесі керування опаленням.

Подальшим розвитком роботи є дослідження можливості безперервного керування тепловим комфортом на базі пропорційно-інтегрально-диференціального закону керування з можливістю автоматичного визначення параметрів регулятора.

ЛІТЕРАТУРА:

1. European electricity prices increase on winter demand / pv magazine. URL: <https://is.gd/SNI5cR>
2. 10 kW Solar Power Plant Cost: Guide for Europe / Shaanxi Maxbo New Energy. URL: <https://is.gd/qlcQq4>
3. Solar payback times in Europe on the slide – Otovo / Renewables Now. URL: <https://is.gd/98WR2B>
4. Germany Wants New PV Systems Equipped With Remote Off Button / Bloomberg. URL: <https://is.gd/mHhKeG>
5. Germany adopts watered-down fossil boiler ban for 2028 / Euractiv. URL: <https://is.gd/vYthXp>
6. Heat pumps: Why Germany's heating revolution is stalling / DW. URL: <https://is.gd/Hnn4e0>

REFERENCES:

1. European electricity prices increase on winter demand / pv magazine. Retrieved from <https://is.gd/SNI5cR>
2. 10 kW Solar Power Plant Cost: Guide for Europe / Shaanxi Maxbo New Energy. Retrieved from <https://is.gd/qlcQq4>
3. Solar payback times in Europe on the slide – Otovo / Renewables Now. Retrieved from <https://is.gd/98WR2B>
4. Germany Wants New PV Systems Equipped With Remote Off Button / Bloomberg. Retrieved from <https://is.gd/mHhKeG>
5. Germany adopts watered-down fossil boiler ban for 2028 / Euractiv. Retrieved from <https://is.gd/vYthXp>
6. Heat pumps: Why Germany's heating revolution is stalling / DW. Retrieved from <https://is.gd/Hnn4e0>



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Дата першого надходження статті до видання: 22.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.01.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 16.03.2026