

## ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 658.264

### Потужність генератора тепла автономної системи опалення у переривчастому режимі

Г. А. Баласанян<sup>1✉</sup>, А. А. Семеній<sup>2</sup><sup>1,2</sup>Національний університет «Одеська політехніка», просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна✉ e-mail: <sup>1</sup>balasanyan@op.edu.uaORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-3689-7409>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0003-2443-1852>

В роботі розглянуто систему теплозабезпечення будівлі навчального корпусу Національного університету «Одеська політехніка» у переривчастому режимі. Режим переривчастого опалення досить широко використовується задля економії витрат переважно для автономних систем опалення будівель. Розглянуто застосування принципу максимуму Понтрягіна щодо розв'язання задачі оптимального навантаження системи опалення під час ранкового натопу приміщення. При цьому також додається відповідний критерій оптимальності. Щодо режиму переривчастого опалення, задача оптимального управління формулюється як визначення оптимального керуючого впливу у період ранкового натопу для досягнення комфортної температури повітря у приміщенні  $t_k$ . Визначено критерії щодо дослідження ефективності режимів навантаження автономної системи опалення у переривчастому режимі. Сформульовано задачу щодо оптимізації режимів навантаження системи опалення. За результатами розв'язання задачі оптимізації на математичній моделі отримано оптимальні за енергоефективністю відповідні добові графіки навантаження системи опалення. Досліджено вплив обмежень теплової потужності системи опалення на ефективність ранкового натопу приміщення в режимі переривчастого опалення. Дослідження виконано за максимальним середньодобовим навантаженням системи опалення при розрахунковій температурі зовнішнього повітря  $-15$  °С. Розглянуто варіанти застосування теплової ізоляції щодо підвищення ефективності ранкового натопу приміщення. Запропоновано використання комбінованої теплоізоляції будівлі (зовнішньої та внутрішньої) як шлях щодо підвищення ефективності режиму переривчастого опалення при обмеженні теплової потужності системи опалення. Виконано оцінку економії енергоресурсів та ефективності режиму переривчастого опалення в порівнянні з цілодобовим опаленням.

**Ключові слова:** Переривчасте опалення; Теплова потужність; Теплова ізоляція; Математичне моделювання; Натоп приміщення.

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v60i2.2823>

© The Author(s) 2024. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



#### 1. Вступ

Режим переривчастого опалення (РПО) досить широко використовується задля економії витрат переважно для автономних систем опалення будівель [1,2]. Особливу актуальність РПО набуває

для офісних, адміністративних, учбових будівель, тощо, режим роботи яких зазвичай обмежено у часі ранковими та денними годинами. У інший період доби та вихідні дні застосовується зниження температури приміщень нижче нормативного значення шляхом вимкнення або суттєвого зниження

потужності системи опалення.

Ефективність застосування РПО визначає один з його основних етапів – ранковий натоп приміщення, під час якого необхідно досягти комфортної температури у приміщенні  $t_k$  за мінімальний час з мінімальною витратою тепла. Розв’язання такого завдання здійснюється за використанням теорії оптимального управління, за принципом максимуму Понтрягіна [3].

## 2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми.

У теорії оптимального управління принцип максимуму Понтрягіна широко застосовується для розв’язання задач щодо визначення оптимальної траєкторії переходу системи з одного стану до іншого [4]. При цьому також додається відповідний критерій оптимальності. Щодо режиму переривчастого опалення, задача оптимального управління формулюється як визначення оптимального керуючого впливу у період ранкового натопу для досягнення комфортної температури повітря у приміщенні  $t_k$ .

В роботі [5] автор наводить результати експериментальних досліджень щодо залежності часу натопу та відповідної економії енергоресурсів від потужності джерела тепла. Автор приходить до висновку, що зменшення тривалості натопу у 10 разів забезпечує економію енергоресурсів на здійснення натопу на рівні 10 % при відповідному збільшенні потужності джерела тепла у 5 разів, що підтверджує принцип максимуму Понтрягіна. Проте, в роботі відсутні дослідження щодо впливу обмежень потужності джерела тепла на ефективність натопу.

В роботі [6] авторами проаналізовано різні підходи щодо розрахунку навантаження на систему опалення приміщення на базі вітчизняних і європейських стандартів та програми для динамічного моделювання будівель. Досліджено також питому надбавку до теплового навантаження на систему у зв’язку з переривчастими режимами опалення. В роботі також відсутні дослідження щодо ефективності режиму переривчастого опалення при технічних обмеженнях потужності системи опалення.

Дослідження у роботі [7] спрямовано на різні варіанти переривчастого опалення у неробочі години та визначення економічного ефекту від впровадження регулювання системи опалення. Автори приходять до висновку, що форсування системи

опалення потребує значного запасу потужності системи опалення, тому рівень зниження температури в неробочі години має ряд обмежень. Проте не досліджено зворотною задачу – вплив обмежень щодо потужності системи опалення при відсутності обмежень по температурі у приміщенні.

Таким чином у вітчизняних та зарубіжних виданнях є доволі багато досліджень щодо переривчастого режиму опалення будівель, проте відсутні змістовні дослідження ефективності цього режиму в залежності від потужності джерела тепла.

## 3. Мета та задачі дослідження.

Мета дослідження – визначення впливу щодо обмежень теплової потужності системи опалення на ефективність РПО.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні завдання:

- визначити критерії щодо оптимізації режимів навантаження системи опалення у переривчастому режимі;
- дослідити вплив обмежень теплової потужності системи опалення на ефективність РПО на математичній моделі;
- визначити шляхи щодо підвищення ефективності РПО при обмеженні теплової потужності системи опалення.

## 4. Матеріали та методи досліджень.

Об’єктом дослідження є система опалення, що функціонує за принципом РПО, будівлі навчального корпусу національного університету «Одеська політехніка».

Основні технічні характеристики будівлі:

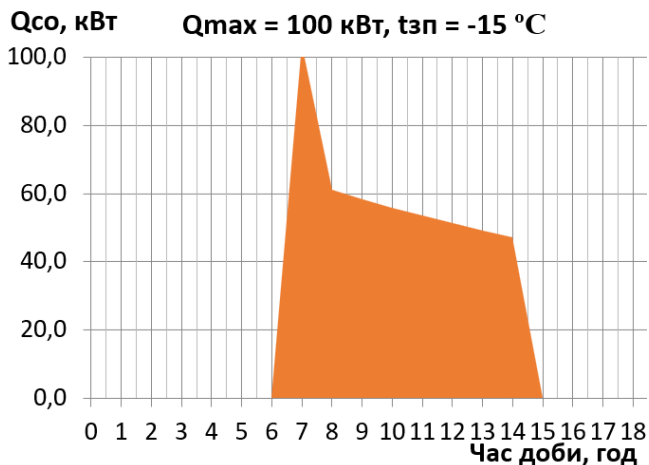
- 4-х поверхова будівля з червоної цегли споруди 50-х років;
- товщина стін – 0,6 м, площа зовнішніх стін – 1500 м<sup>2</sup>, об’єм будівлі – 4800 м<sup>3</sup>, опалювальна площа – 1200 м<sup>2</sup>;
- термомодернізація будівлі – зовнішня теплоізоляція з пінополістиролу, товщиною 0,1 м, також теплоізоляція усіх внутрішніх стін задля підвищення ефективності РПО, товщиною 0,02 м.

Система опалення водотрубна з індивідуальним тепловим пунктом фірми Данфосс, регулювання температури води з корекцією за температурою внутрішнього повітря. Теплова потужність системи опалення при розрахунковій температурі зовнішнього повітря – 70 кВт.



ності системи опалення під час натопу до середнього значення теплового навантаження у робочі години після досягнення заданої комфортної температури у приміщенні. Значення  $K_{\text{нат}}$  при цьому склало відповідно 1,89.

Оцінювання переваги РПО в порівнянні з цілодобовим режимом опалення виконано, відповідно, за економією тепла на опалення за добу  $\Delta E$ , що склало за заданих умов  $\Delta E = 16,8\%$ .



**Рисунки 1** – Добовий графік навантаження системи опалення без обмежень потужності генератора тепла.

На рис.2 представлено графік навантаження системи опалення з максимально можливими обмеженнями потужності генератора тепла за попередніми зовнішніми умовами. Максимальне значення теплової потужності системи опалення за цими умовами відповідно склало 45 кВт, тривалість натопу – 6 годин, видаток тепла на здійснення натопу також є мінімальним, тобто усі умови розв'язання задачі оптимізації виконано.

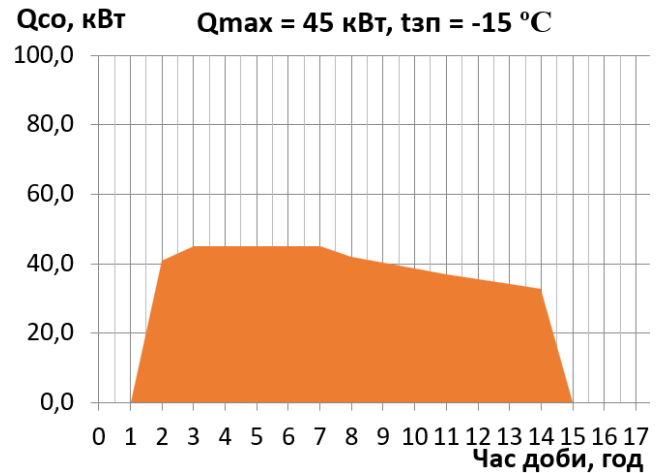
Значення  $K_{\text{нат}}$  склало, відповідно, 1,2, але в порівнянні з цілодобовим режимом опалення, економія тепла на опалення за добу склало всього, за заданих умов,  $\Delta E = 10,2\%$ .

Таким чином, обмеження щодо форсування потужності системи опалення під час натопу значно впливають на ефективність РПО, хоча, одночасно, дозволяють суттєво знизити номінальну теплову потужність генератора тепла  $Q_{\text{гт}}$ .

Як відомо, використання теплової ізоляції є доволі ефективним засобом щодо економії енергоресурсів на опалення будівель [9,10], та, відповідно, дозволяє суттєво зменшити теплову потужність генератора тепла.

У роботі виконано дослідження щодо викори-

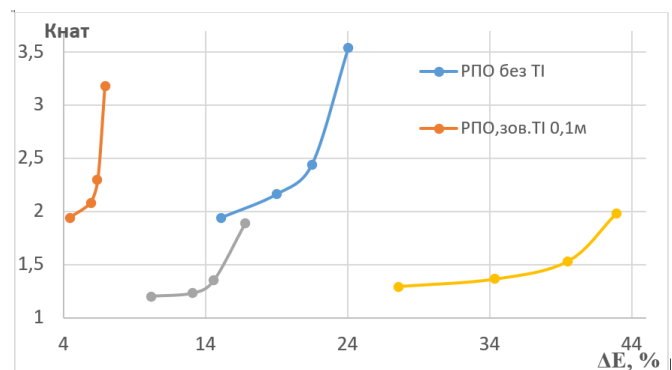
стання теплової ізоляції будівлі, як шляху щодо підвищення ефективності РПО при обмеженні теплової потужності системи опалення. Наявність теплової ізоляції дозволяє здійснити відповідне форсування потужності системи опалення під час натопу (підвищити значення  $K_{\text{нат}}$ ), та, одночасно, використовувати генератор тепла меншої потужності.



**Рисунки 2** – Добовий графік навантаження системи опалення з обмеженням потужності генератора тепла.

На рис. 3 наведено результати досліджень щодо ефективності РПО при форсуванні натопу та застосуванні теплоізоляції будівлі у різних комбінаціях:

1. базовий варіант – без теплоізоляції;
2. зовнішня теплоізоляція (пінополістирол), товщиною 0,1 м;
3. зовнішня теплоізоляція товщиною 0,1 м та одночасно внутрішня товщиною 0,02 м.
4. тільки внутрішня теплоізоляція товщиною 0,02 м.



**Рисунки 3** – Залежність ефективності РПО від форсування натопу

Аналіз рис. 3 показує, що найвища ефективність

РПО (за відносною економією  $\Delta E$  в порівнянні з цілодобовим опаленням) при одночасно помірно-му значенні коефіцієнту натопу  $K_{\text{нат}}$  відповідає застосуванню внутрішньої теплоізоляції. Проте застосування тільки внутрішньої теплоізоляції, як відомо, за певних умов, може сприяти досягненню «точки роси» на внутрішній поверхні зовнішніх стін будівлі, тому цей варіант має певні обмеження.

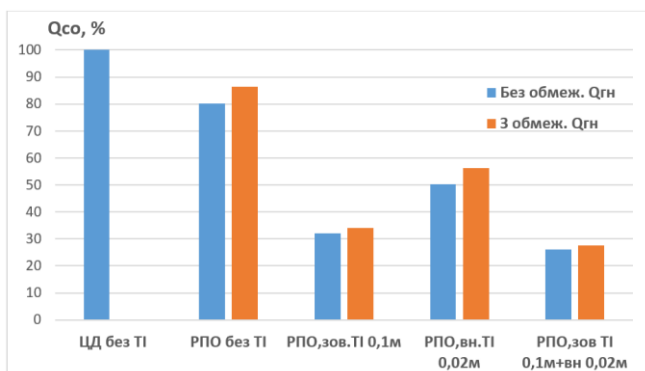
Варіант застосування зовнішньої теплоізоляції товщиною 0,1 м показує найнищу відносну економію енергоресурсів та доволі високе значення коефіцієнту натопу  $K_{\text{нат}}$ , тобто основним чинником енергоефективності за цим варіантом є наявність зовнішньої теплоізоляції, а не застосування РПО.

Найбільш сприятливим варіантом щодо обмежень потужності системи опалення та підвищення ефективності РПО можна вважати застосування зовнішньої теплоізоляції товщиною 0,1 м та, одночасно, внутрішньої – товщиною 0,02 м.

Наведені результати у більшій мірі характеризують вплив відносної потужності системи опалення (через коефіцієнт натопу  $K_{\text{нат}}$ ) на ефективність РПО. Проте, важливо мати також результати щодо співвідношення номінальної потужності системи опалення в залежності від ступеня термомодернізації будівлі.

На рис. 4 наведено результати дослідження залежності номінальної потужності системи опалення від ступеня термомодернізації будівлі та обмеження потужності генератора тепла при застосуванні РПО.

За базовий (100 % номінальної потужності системи опалення  $Q_{\text{со}}$ ) прийнято варіант цілодобового опалення без використання теплоізоляції. Наступні 4 варіанти щодо дослідження РПО було надано вище.



**Рисунок 4** – Співвідношення номінальної потужності системи опалення в залежності від ступеня термомодернізації будівлі

Аналіз наведених результатів показує, що на зниження номінальної потужності системи опалення, в основному, впливає ступінь термомодернізації будівлі. Проте застосування РПО, за даних умов (варіант без теплоізоляції), дозволяє знизити номінальну потужність генератора тепла на 20 % без обмежень потужності під час натопу, та на 13 % – при наявності обмежень. Зазначений ефект спостерігається при будь-яких варіантах термомодернізації будівлі, проте найбільш суттєве зниження номінальної потужності системи опалення відповідає варіанту застосування одночасно зовнішньої та внутрішньої теплоізоляції в режимі переривчастого опалення.

## 6. Висновки

Визначено критерії щодо дослідження ефективності режимів навантаження автономної системи опалення у переривчастому режимі.

Досліджено вплив обмежень теплової потужності системи опалення на ефективність ранкового натопу приміщення в режимі переривчастого опалення.

Запропоновано використання комбінованої теплоізоляції будівлі (зовнішньої та внутрішньої) як шлях щодо підвищення ефективності РПО при обмеженні теплової потужності системи опалення.

## Особистий внесок авторів CRediТ

**Баласанян Г.А.:** концептуалізація, методологія, формальний аналіз; **Семеній А.А.:** аналіз та узагальнення даних; обробка даних.

## Література

1. Кутний Б.А., Борисюк А.О. Економія енергоресурсів при програмному відпуску теплоти // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – № 3/8 (63). – С. 18-20.
2. Lechowska A., Guzik E. Intermittent heating // Energy and Buildings. – 2014. – No 76. – P. 55-63.
3. Товажнянський В. Алгоритмічне та програмне забезпечення оптимального управління переривчастим тепловим режимом будівель // Вісник національного технічного університету «ХПІ». серія: системний аналіз, управління та інформаційні технології. – 2021. – № 1 (5). – С. 42-46.

4. Lawrence C. Evans. An Introduction to Mathematical Optimal Control Theory. – USA: University of California, Berkeley, 2017. – 300 p.
5. Мирська С.Ю., Сидельников В.І. Економічне обігрів приміщення як завдання оптимального управління // Техніко-технологічні проблеми сервісу. – 2014. – № 4 (30). – С. 75-78.
6. Дешко В.І., Суходуб І.О., Яценко О.І. Дослідження підходів до визначення теплового навантаження системи опалення // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2017. – № 2. – С. 52-59.
7. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Моделювання режимів опалення приміщень // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2016. – № 3. – С. 97-103.
8. Баласанян Г.А., Клімчук О.А., Міняйло М.Б. Моделювання режиму переривчастого опалення комбінованої системи теплопостачання з тепловим насосом // Вісник НТУ. – 2015. – № 17. – С. 35-42.
9. Чулков О.А. Вивчення теплозахисних характеристик двошарових зовнішніх стін будівель з переривчастим опаленням // Містобудування та архітектура. – 2018 – Т. 8. – № 4. – С. 15-18.
10. Швець В.В., Максименко М.А. Аналіз існуючих способів захисту будівель від тепловтрат // Науково-технічний збірник «Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві». – 2008. – С. 41-47.

Отримана в редакції 11.05.2024, прийнята до друку 03.06.2024

## Power of the heat generator of the autonomous heating system in intermittent mode

Hennadii Balasanyan<sup>1✉</sup>, Andrii Semeyii<sup>2</sup>

<sup>1-2</sup>National University "Odesa Polytechnic", 1 Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine;

✉ e-mail: <sup>1</sup>balasanyan@op.edu.ua

ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-3689-7409>; <sup>2</sup><https://orcid.org/0000-0003-2443-1852>

*The paper examines the heat supply system of the building of the educational building of the National University "Odesa Polytechnic" in intermittent mode. Intermittent heating mode is quite widely used to save costs mainly for autonomous building heating systems. The application of Pontryagin's maximum principle to solving the problem of the optimal load of the heating system during the morning on-top of the room is considered. At the same time, a corresponding optimality criterion is also added. With regard to the intermittent-frequent heating mode, the task of optimal control is formulated as the determination of the optimal control effect during the period of morning heat to achieve a comfortable air temperature in the room  $t_k$ . The criteria for the study of the efficiency of the load modes of the autonomous heating system in intermittent mode have been determined. The task of optimizing the load modes of the heating system is formulated. Based on the results of solving the optimization problem on the mathematical model, the corresponding daily load schedules of the heating system optimal in terms of energy efficiency were obtained. The effect of limitations on the thermal power of the heating system on the effectiveness of the morning heating of the room in the intermittent heating mode was investigated. The study was performed based on the maximum average daily load of the heating system at a calculated outside air temperature of  $-15$  °C. Options for using thermal insulation to improve the efficiency of the morning heating of the room are considered. The use of combined thermal insulation of the building (external and internal) is proposed as a way to increase the efficiency of the intermittent heating mode while limiting the thermal power of the heating system. Energy savings and efficiency of the intermittent heating mode compared to round-the-clock heating were evaluated.*

**Keywords:** Intermittent heating; Heat capacity; Thermal insulation; Mathematical modeling; Room heating.

### References

1. Kutnyi, B.A., Borysyuk, A.O. (2013) Economy of energy resources with programmed release of heat. *East European journal of advanced technologies*, 3/8 (63), 18-20.
2. Lechowska, A., Guzik, E. (2014) Intermittent heating. *Energy and Buildings*, 76, 55-63.

3. **Tovazhnyanskyi, V.** (2021) Algorithmic and software support for optimal management of the intermittent thermal regime of buildings. *Bulletin of the KhPI National Technical University. series: system analysis, management and information technologies*, 1(5), 42-46.
4. **Lawrence, C. Evans.** (2017) An Introduction to Mathematical Optimal Control Theory. – USA: University of California, Berkeley, 300.
5. **Mirska, S.Yu., Sidelnikov, V.I.** (2014) Economic space heating as a task of optimal management. *Technical and technological problems of the service*, 4 (30), 75-78.
6. **Deshko, V.I., Sukhodub, I.O., Yatsenko, O.I.** (2017) Development of approaches to determining the heat load of the heating system. *Energy: economics, technologies, ecology*, 2, 52-59.
7. **Deshko, V.I., Bilous, I.Yu.** (2016) Modeling of room heating modes. *Energy: economics, technology, ecology*, 3, 97-103.
8. **Balasanyan, H.A., Klimchuk, O.A., Minyailo, M.B.** (2015) Modeling of the intermittent heating regime of a combined heat supply system with a heat pump. *Visnyk NTU*, 17, 35-42.
9. **Chulkov, O.A.** (2018) Study of heat-insulating characteristics of two-layer external walls of buildings with intermittent heating. *Urban development and architecture*, 8, 4, 15-18.
10. **Shvets, V.V., Maksymenko, M.A.** (2008) Analysis of existing methods of protecting buildings from heat loss. *Scientific and technical collection "Modern technologies, materials and structures in construction"*, 41-47.

---

Received 11 May 2024  
Approved 03 June 2024  
Available in Internet 30 June 2024