

## Чисельне моделювання зміни температурних режимів теплових мереж в умовах коливань добових температур

Олександр Погосов, канд. техн. наук, доц. <sup>1</sup> (ORCID: 0000-0003-2158-8897), Крістіна Габа, канд. техн. наук, доц. <sup>1</sup> (ORCID: 0000-0003-2201-1408), Богдан Козячина, аспірант <sup>1</sup> (ORCID: 0000-0009-0000-6972-3862)

<sup>1</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

### АНОТАЦІЯ

Робота присвячена керуванню мережами централізованого теплопостачання для підвищення їх реакції на змінні навантаження та методам їх кількісної оцінки. Досліджено температурні затримки, спричинені гідравлічними характеристиками та протяжністю трубопроводів. Запропоновано методіку комп'ютерного моделювання з використанням усереднених погодних даних і синусоїдальної апроксимації добових коливань температури. Розроблена програма дозволяє прогнозувати часові затримки та оптимізувати режими роботи теплових мереж.

*Ключові слова: теплові мережі, оптимізація, температурні затримки; гідравлічні режими; комп'ютерне моделювання.*

### 1. ВСТУП

Питання централізованого виробництва та розподілу теплової енергії охоплює застосування різних джерел генерації, мережі трубопроводів та власне системи розподілу.

### 2. СТАН ПРОБЛЕМИ ТА НАУКОВІ ПІДХОДИ

У контексті затримки температури, книга [1] розглядає гідравлічні аспекти мереж, включаючи швидкість потоку води та транспортні затримки, які впливають на доставку тепла до абонентів, пропонуючи рекомендації щодо геометричної оптимізації систем для мінімізації таких затримок як при якісному так і при кількісному регулюванні. Але в книзі не приводяться алгоритми коригування таких затримок, особливо в розрізі значних по протяжності мереж централізованого теплопостачання.

Робота [2] аналізує річні дані вимірювань теплового навантаження з 141 підстанції у двох розосереджених мережах централізованого теплопостачання, ідентифікуючи чотири основні патерни теплового навантаження та два описові параметри. У контексті затримки температури, пов'язаної з транспортом води в трубах (як у якісному регулюванні в Україні), стаття підкреслює, як динамічні патерни навантаження призводять до нестабільності в мережах, посилюючи затримки через варіації в споживанні, що вимагає кращого моніторингу для прогнозування та мінімізації невідповідностей між змінами зовнішньої температури та доставкою тепла до абонентів.

Актуальним напрямком досліджень є керування мережами централізованого теплопостачання для підвищення їх реакції на змінні навантаження, визначаючи джерела гнучкості (наприклад, теплові накопичувачі та будівлі) та методи їх кількісної оцінки. Щодо затримки температури в системах централізованого теплопостачання, автори [3] обговорюють виклики, пов'язані з затримками поширення теплової енергії, що фактично переноситься теплоносієм в трубопроводах, і пропонують вдосконалені алгоритми керування, такі як модельно-прогнозує керування, для компенсації цих затримок, особливо в умовах інтермітуючої генерації, подібно до якісного регулювання в

Україні, де зміни температури зовнішнього повітря викликають невідповідності в доставці тепла віддаленим абонентам.

Стаття [4] аналізує параметри, що впливають на часові затримки в мережах централізованого теплопостачання, використовуючи CFD (Computational Fluid Dynamics – обчислювальна гідродинаміка) для моделювання динамічної температури води. Стаття фокусується на впливі швидкості потоку, довжини трубопроводів та ізоляції на транспортні затримки, подібно до проблем в українських централізованих системах теплопостачання, де затримка зростає з відстанню, призводячи до невідповідності температури теплоносія в абонентів поточним погодним умовам. Дослідження застосовує метод функцій для точного моделювання динамічної температури в мережах, аналізуючи вплив ключових параметрів на затримки, і рекомендує CFD для прогнозування та оптимізації гідравлічних режимів.

Схожі питання піднімаються в працях [5-8], в яких автори розглядають методи корекції якісного графіку системи теплопостачання та контроль систем теплопостачання з урахуванням затримок в зміні температурного графіку безпосередньо у абонента. Пропонуються алгоритми для компенсації цих затримок, що допомагає уникнути ситуацій, коли абоненти отримують неактуальну температуру через відстань і швидкість руху води. Ці праці презентують фізичні моделі мереж теплопостачання, що враховують флуктуації вхідної температури та транспортні затримки. Статті демонструють, як затримки впливають на загальну динаміку системи, пропонуючи рішення для моделювання реальних сценаріїв з змінними гідравлічними режимами. При цьому моделі не враховують вплив розосереджених джерел генерації, включно з тепловими просьюмерами, на що ставлять акцент автори [9].

### 3. ОСНОВНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

Впливовим фактором є довжина ділянки теплової мережі від джерела до кінцевого споживача гідравлічного кільця. З метою подальшого динамічного моделювання методами SciLAB щодо затримок температур у споживачів, пов'язаних з добовою амплітудою коливань, було спочатку отримано масив даних щодо температур зовнішнього середовища. Для

імітації добового коливання було проаналізовано масив температур за січень 2023 року, отримані з вільних джерел архівів погоди [10].

Для отримання середньої температури для кожної години доби за весь місяць спостереження, температури для кожної конкретної години по всіх днях січня усереднювалися. Наприклад, для отримання середньої температури о 00:00, усереднювалися температури, зафіксовані о 00:00 1 січня, 2 січня і так далі, до 31 січня. Такий підхід було застосовано для кожної години доби одного дослідного місяця.

Відповідно для комп'ютерної моделі варіацію температури можна наблизити за допомогою синусоїдальної функції. Це спрощення, але воно відображає загальну добову тенденцію і дозволить імітувати амплітуди добових температур при комп'ютерному моделюванні

$$e_i = e_0 - C_0 \cdot \ln\left(\frac{P}{P_0}\right), \quad (1)$$

$$T(t) = A \cdot \cos((2\pi/24) \cdot (t - t_0)) + T_{avg}, \quad (2)$$

де  $T(t)$  - температура в момент часу  $t$  (у годинах);  $A$  - амплітуда (половина різниці між максимальною та мінімальною середніми температурами); згідно з даними [10],  $A \approx 1.04$  °C;  $t$  - час у годинах (від 0 до 23);  $t_0$  - зсув фази (час максимальної температури), згідно з даними [10], максимальна температура припадає приблизно на 13:00, тому  $t_0 \approx 13$ ;  $T_{avg}$  - середня температура протягом доби, згідно з даними [10],  $T_{avg} \approx 1.65$  °C;

Отже, наближена формула, яку застосовували при моделюванні:

$$T(t) = 1,04 \cdot \cos((2\pi/24) \cdot (t - 13)) + 1,65 \quad (3)$$

За результатами роботи комп'ютерної моделі, яка на вхід приймала кількість споживачів, їх потужності, дистанції між ними та параметри роботи мережі (зокрема технологічну затримку котельні та температурний графік роботи мережі) вдалося апробувати методику розрахунку затримок і створити інженерну програму. Деякі результати роботи цієї програми наведені на рисунку 1. При цьому результат розрахунків при заданих вхідних даних (3 споживача, по 1000 кВт потужністю, відстань до останнього споживача 8000 км, температурний графік – 90/70 °C) дає фізичні значення мінімальної температури подачі: 55.00 °C о 14.33 год, мінімальної температури зворотки: 45.22 °C о 16.70 год і значення затримки на рівні 8520.00 секунд (2.37 годин).

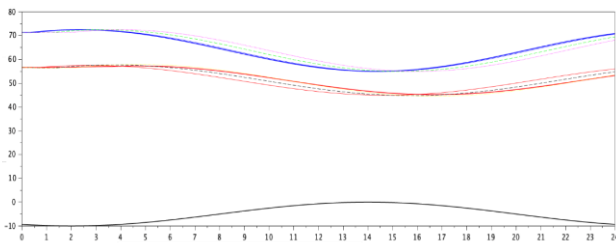


Рисунок 1. Коливання температур зовнішнього середовища (чорна крива), температури подавальної і зворотної магістралей джерела теплоти (синя і червона криві) і температур подавальної і зворотної магістралей споживачів (інші криві) в плинні доби (з імітацією амплітуди температури зовнішнього повітря)

## ВИСНОВКИ

За результатами проведених досліджень важливо зробити висновок про доцільність та необхідність прогнозування зміни температури теплових мереж з подальшою корекцією залежностей визначення температурного графіку при якісному регулюванні.

## Список літератури

- [1] Mackenzie-Kennedy C. District Heating. Thermal Generation and Distribution. A Practical guide to centralised generation and distribution of heat services. Pergamon PRESS, 2014. 198 с.
- [2] Gadd H., Werner S. Heat load patterns in district heating substations. *Applied energy*. 2013. no 108, P. 176-183. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.02.062>
- [3] Vandermeulen A., van der Heijde, B., Helsen, L. Controlling district heating and cooling networks to unlock flexibility: a review. *Energy*, 2018. 151, P. 103-115. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.034>
- [4] Zhao, J., Shan, Y. An Influencing parameters analysis of district heating network time delays based on the CFD method. *Energies*. 2019. 12(7), P. 1297. URL: <https://doi.org/10.3390/en12071297>
- [5] Sartor K., Dewalef P. Experimental validation of heat transport modelling in district heating networks. *Energy*. 2017. 137, P. 961-968. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.02.161>
- [6] Bendtsen, J., Val, J., Kallesøe, C., Krstic, M. (2017). Control of district heating system with flow-dependent delays. *IFAC-PapersOnLine*. 2017. 50(1), P. 13612-13617. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.2385>
- [7] Van der Heijde B., Fuchs M., Tugores C. R., Schweiger, G., Sartor, K., Basciotti, D., Helsen, L. Dynamic equation-based thermo-hydraulic pipe model for district heating and cooling systems. *Energy Conversion and Management*. 2017. 151, P. 158-169. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.072>
- [8] Skochko, V. I., Solonnikov, V. H., Pohosov, O. H., Haba, K. O., Kulinko, Y. O., Koziachnyna, B. I. Minimization of Heat Losses in District Heating Networks by Optimizing their Configuration. *Problems of the Regional Energetics*. 2024. 3, P. 182–195. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.3-63.15>
- [9] Баранчук К., Погосов О. Адаптація алгоритму heat recovery control для двонаправлених теплових пунктів та аналіз моделей енергетичного ринку. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2024.0 (107), P. 192-206. <https://doi.org/10.32347/0131-579X.2024.107.192-206>
- [10] Архів погоди Метеопост. Доступ за посиланням - <https://meteopost.com/weather/archive/>