

ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 658.264

Сучасні методи регулювання міських систем теплопостачання в умовах дефіциту енергоресурсів

Г. А. Баласанян¹✉, В. І. Ляшенко²¹⁻²Національний університет «Одеська політехніка», просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна✉ e-mail: ¹balasanyan@op.edu.uaORCID: ¹<http://orcid.org/0000-0002-3689-7409>; ²<http://orcid.org/0009-0006-2546-0419>

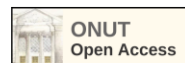
Питання надійності та стабільності систем теплопостачання в Україні набуває особливої актуальності в умовах сучасних геополітичних викликів та обмеження доступу до природного газу. Залежність від російських енергоресурсів створює ризики як для побутових, так і для промислових споживачів, зокрема у містах із розвинутою тепловою інфраструктурою. Вирішення цієї проблеми потребує застосування сучасних технічних засобів, здатних забезпечити ефективний розподіл теплової енергії навіть в умовах дефіциту. Проведено огляд технічних методів регулювання систем теплопостачання, серед яких ключову роль відіграють автоматизовані системи балансування та регулювання гідравлічних параметрів. Окремо відзначено роль організаційно-економічних заходів, проте акцент зроблено саме на технічних рішеннях, які дозволяють швидко реагувати на зміну умов постачання. Значну увагу приділено регулювальним клапанам Danfoss AFQMP 2 та електроприводам АМЕі 6 iNET, що завдяки своїм характеристикам дозволяють реалізувати алгоритм пріоритетного розподілу теплових потоків між споживачами. Наведено постановку задачі та принципову блок-схему алгоритму, який забезпечує збереження теплового комфорту для критичних споживачів у кризових умовах, водночас раціонально розподіляючи ресурси серед інших користувачів. Підкреслено важливість впровадження автоматизованих систем у практику теплопостачальних підприємств, що дозволить підвищити енергетичну безпеку, зменшити ризики відключень та оптимізувати роботу теплових мереж. Запропоновано алгоритм пріоритетного розподілу тепла щодо формування методологічної основи для інтеграції адаптивних технологій регулювання, якій дозволяє перейти від хаотичного чи формально статичного управління до системного прогнозованого розподілу теплової енергії. Перспективним напрямом розвитку є комбінування адаптивного регулювання із когенераційними установками, які можуть зменшити залежність від централізованого газопостачання та підвищити ефективність енергосистем. Отримані результати можуть бути використані як базова методологія для подальших наукових досліджень та практичних впроваджень у сфері теплової енергетики.

Ключові слова: Теплопостачання; Енергетична безпека; Дефіцит газу; Розумні теплові мережі; Пріоритетний розподіл тепла

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v6i13.3213>

© The Author(s) 2025. 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

Системи централізованого теплопостачання відіграють ключову роль у забезпеченні комфорт-

них умов життя в містах України. Однак сьогодні вони стикаються з низкою серйозних викликів, серед яких на першому місці стоїть питання енергетичної безпеки. Значна залежність від імпортова-

ного природного газу, насамперед російського походження, створює високі ризики для стабільності роботи теплових мереж [1-3]. У сучасних умовах енергетичної кризи та можливого подальшого обмеження, або навіть повного припинення постачання газу постає нагальна потреба в адаптації систем теплопостачання до роботи за умов дефіциту енергоресурсів [4,5].

Більшість існуючих міських тепломереж в Україні функціонують за статичними принципами, що майже не враховують змін у реальному споживанні тепла та залишаються індивідуальними до потреб окремих категорій споживачів [2]. Таке «грубе» регулювання призводить до перевитрат енергоресурсів та погіршення якості теплопостачання. Яскравим прикладом є місто Чорноморськ Одеської області, де жителі неодноразово скаржилися на низький рівень комфорту в опалювальний сезон [10]. Саме тому міська адміністрація звернулася до проєктних організацій із проханням розробити заходи з оптимізації регулювання теплових мереж.

У цьому контексті особливого значення набуває пошук сучасних технічних рішень, які дозволяють перейти від застарілого підходу до системного та гнучкого управління теплопостачанням [6, 19]. Одним із перспективних напрямів є застосування алгоритмів пріоритетного розподілу теплової енергії, здатних забезпечити ефективніше використання обмежених ресурсів та підвищити стійкість міських тепломереж у кризових умовах [7,11].

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Регулювання систем теплопостачання є одним із ключових напрямів підвищення ефективності роботи міських теплових мереж [8, 9]. У сучасних умовах дефіциту енергоресурсів і необхідності зменшення залежності від імпортованого природного газу особливого значення набуває застосування технічних рішень, що дозволяють забезпечити стабільне та економічне постачання теплової енергії кінцевим споживачам [12].

До класичних методів відносять ручне або статичне регулювання за допомогою балансувальних вентилів та дросельних пристроїв [1,2]. Перевагою є їхня простота та низькі капітальні витрати. Водночас такі системи не враховують динамічних змін теплового навантаження, залишаються індиві-

дуальними до категорій споживачів і призводять до значних втрат енергії. У результаті, окремі будівлі споживають зайве, а інші – недоотримувати тепло.

Розвиток технологій дозволяє впровадити автоматизовані клапани та регулятори з електроприводами (наприклад, Danfoss). Вони забезпечують точне регулювання витрати теплоносія відповідно до поточних потреб [6]. Такі пристрої знижують гідравлічний дисбаланс, підвищують надійність роботи мережі та комфорт споживачів. Головною перевагою є можливість їх інтеграції в сучасні системи диспетчеризації та дистанційного управління [19].

Наступним етапом розвитку стали «розумні теплові мережі» (Smart heat networks), які використовують цифрові датчики, алгоритми прогнозування та IoT-рішення [13,14]. Такі системи дають змогу у режимі реального часу аналізувати попит на тепло, враховувати погодні умови та коригувати подачу енергії [15]. Це дозволяє уникати перевитрат палива й оптимізувати використання наявних ресурсів [17].

Важливим напрямом є також застосування когенераційних газопоршневих установок, що забезпечують комбіноване виробництво теплової та електричної енергії [16]. Їхня інтеграція у міські теплові мережі дозволяє знизити споживання газу, підвищити загальний ККД системи та створити резервні джерела тепла [18]. Поєднання когенерації з адаптивним регулюванням дає змогу значно підвищити стійкість систем теплопостачання [12,13].

Аналіз показує, що найменш ефективними залишаються статичні методи, тоді як автоматизовані та інтелектуальні системи демонструють значний потенціал у підвищенні енергоефективності [11,14]. Найбільш перспективним є комплексний підхід, що передбачає використання сучасних регуляторів, систем диспетчеризації та локальних джерел на базі когенерації [8,16].

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є розробка технічного рішення щодо підвищення ефективності та надійності роботи теплової мережі, забезпечення пріоритетного розподілу теплової енергії для критичних споживачів (лікарні, дитячі садки, навчальні заклади та інші соціально важливі об'єкти), створення передумов для інтеграції сучасних засобів автоматизації та «розумних» систем управління у систему теп-

теплопостачання міста.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити низку завдань:

- Розробити математичну модель роботи теплової мережі з урахуванням обмеженого обсягу енергоресурсів.

- Сформулювати алгоритм пріоритетного розподілу теплової енергії, що дозволяє забезпечити необхідні параметри теплоносія для критичних споживачів навіть у випадку дефіциту.

- Провести апробацію алгоритму на прикладі міста Чорноморськ, використовуючи наявні вихідні дані та технічні характеристики існуючого обладнання.

Таким чином, постановка задачі полягає у пошуку комплексного технічного рішення, яке поєднує класичні методи регулювання теплопостачання з сучасними інструментами автоматизації та пріоритетного управління, що в сукупності дозволить підвищити ефективність системи теплопостачання міста [7;11;13].

4. Матеріали та методи досліджень

Методика ґрунтується на введенні класів пріоритетів (А-Е): від критичної інфраструктури (лікарні, школи) до промисловості. Кожному класу присвоюється ваговий коефіцієнт (W_{class}), який формалізує його соціальну значущість.

Додатково вводиться інтегральний показник пріоритетності (S_i) який дозволяє порівнювати споживачів і визначати черговість обмежень:

$$S_i = W_{class(i)} \cdot K_{time,i} \cdot K_{topo,i}, \quad (1)$$

де $K_{time,i}$ – часовий множник (робота у пікові чи непікові години); $K_{topo,i}$ – топологічний множник, що враховує особливості гідравліки мережі; $W_{class(i)}$ – ваговий коефіцієнт класу; i – індекс споживача або групи споживачів для яких проводиться розрахунок.

Щоб уникнути ситуації, коли більший споживач із низьким пріоритетом витісняє десятки менших, вводиться модератор навантаження (L_i):

$$L_i = \left(\frac{Q_{ref}}{Q_{ref} + Q_i} \right)^\gamma, \quad (2)$$

де Q_i – теплове навантаження; Q_{ref} – опорне навантаження (≈ 1000 кВт); γ – коефіцієнт чутливості (0,5...1).

Коригований пріоритет розраховується як:

$$S'_i = S_i \cdot L_i, \quad (3)$$

де S_i – інтегральний показник пріоритетності; L_i – модератор навантаження.

Це дозволяє балансувати вплив більших та менших споживачів. Для зручності показники нормалізуються у межах ЦТП, що дає єдину шкалу від 0 до 1:

$$N'_i = \frac{S'_i}{\max(S'_j)}, \quad (4)$$

де S'_i – розраховане (проміжне) значення пріоритетної функції для споживача i ; $\max(S'_j)$ – максимальне значення пріоритетної функції серед усіх споживачів j .

Передбачено чотири сценарії: 0%, 10%, 20% і 30% дефіциту тепла (Табл. 1). Для кожного класу визначається коефіцієнт обмеження $K_{def,class(i)}$:

Таблиця 1 – Присвоєння коефіцієнту обмеження відповідному класу

Клас	0%	10%	20%	30%
А (медицина, ДНЗ, школи)	1,00	1,00	0,95	0,90
В (ВНЗ, адмін. критичні)	1,00	0,95	0,90	0,80
С (житловий фонд)	1,00	0,90	0,80	0,65
Д (офіси, комерція)	1,00	0,80	0,65	0,50
Е (промисловість)	1,00	0,70	0,50	0,30

Фінальний коефіцієнт для кожного споживача визначається як:

$$K_{final,i} = K_{def,class(i)} \cdot N'_i, \quad (5)$$

де $K_{def,class(i)}$ – базовий коефіцієнт дефіциту для класу споживачів i (відповідає пріоритетності забезпечення теплом певної категорії споживачів); N'_i – нормалізоване значення пріоритету для споживача (класу) i .

Цей підхід дозволяє зберегти справедливий баланс між класами та окремими об'єктами.

Щоб дотриматися санітарно-гігієнічних норм (наприклад, не нижче +12°C у житлі, +16°C у школах, +18°C у лікарнях), для кожного класу вводяться мінімальні коефіцієнти $K_{min,class(i)}$:

А $\rightarrow$ 0,70; В $\rightarrow$ 0,60; С $\rightarrow$ 0,50; Д $\rightarrow$ 0,40; Е $\rightarrow$ 0,30

Коригуюча формула:

$$K_{final,i} = \max(K_{def,class(i)} \cdot N'_i; K_{min,class(i)}) \quad (6)$$

де $K_{min,class(i)}$ – мінімально допустиме значення коефіцієнта забезпечення теплом для класу споживачів (визначається як гранична межа, нижче якої забезпечення стає неприйнятним).

Це створює «страхувальну сітку», що унеможливує повне відключення будь-якого класу.

Блок-схема алгоритму реалізації методики регулювання теплопостачання (рис.1) наочно демонструє алгоритм регулювання теплопостачання в умовах дефіциту газу. На першому етапі вводяться вхідні дані: перелік споживачів, їх класи за пріоритетністю та величини теплового навантаження. Далі розраховується інтегральний показник пріоритетності (S_i), який уточнюється за рахунок коефіцієнта модератора навантаження (L_i) та процедури нормалізації. Після цього для кожного споживача застосовуються коефіцієнти сценаріїв дефіциту (K_{def}), що відображають рівень скорочення теплопостачання залежно від ситуації на ринку газу. Завершальним етапом є перевірка мінімально допустимих рівнів забезпечення теплом (K_{min}) відповідно до санітарних та соціальних норм. У результаті формується фінальний коефіцієнт розподілу (K_{final}), який визначає пропорції подачі теплової енергії для кожного класу споживачів.



Рисунок 1 – Алгоритм реалізації методики регулювання теплопостачання за умов дефіциту газу

5. Результати досліджень

Запропонована методика регулювання теплопостачання в умовах дефіциту газу дозволяє сформувати більш справедливий та технічно обґрунтований підхід до розподілу теплових ресурсів. На відміну від традиційних схем, де скорочення потужності відбувається пропорційно для всіх споживачів, запропонований алгоритм враховує пріоритетність об'єктів (критична інфраструктура, соціальні заклади, житловий фонд, промисловість тощо) та їх реальне навантаження.

Використання модератора навантаження усуває проблему, коли великі споживачі з низьким пріоритетом здатні «витіснити» десятки дрібних. Це особливо важливо для міських тепломереж із високим рівнем концентрації житлових будівель та комунальних об'єктів.

Очікувані результати впровадження методики:

- Підвищення надійності теплопостачання у закладах соціальної сфери (лікарні, школи, дитячі садки).
- Зменшення соціальної напруги за рахунок прозорого механізму розподілу тепла.
- Оптимізація роботи котельних і теплових пунктів завдяки сценарному підходу (0%, 10%, 20%, 30% дефіциту).
- Енергетична безпека на місцевому рівні, оскільки навіть у разі відключення чи обмеження газопостачання зберігається контрольований алгоритм подачі тепла.

Таким чином, нинішня практика регулювання теплопостачання здебільшого має статичний характер, залишається індиферентною до потреб конкретного споживача та виступає грубим інструментом балансування системи. Запропонований алгоритм, натомість, відкриває можливість застосування адаптивного регулювання, яке функціонує як інструмент тонкого налаштування, забезпечуючи більш гнучкий, адресний та прогнозований розподіл теплових ресурсів у кризових умовах.

На графіку (рис.2) порівнюється вплив дефіциту теплопостачання (30%) на різні класи споживачів у випадку рівномірного скорочення та застосування розумного регулювання. Видно, що без регулювання всі споживачі втрачають однакову частку тепла, що ставить під загрозу роботу критичної інфраструктури. У той час як методика пріоритетного розподілу дозволяє забезпечити лікарні, школи та житловий фонд (класи А-С) ви-

щим рівнем теплопостачання, водночас більше обмежуючи комерційних та промислових споживачів (класи D-E).

Це підтверджує ефективність алгоритму у зменшенні соціальних ризиків і підвищенні надійності системи.

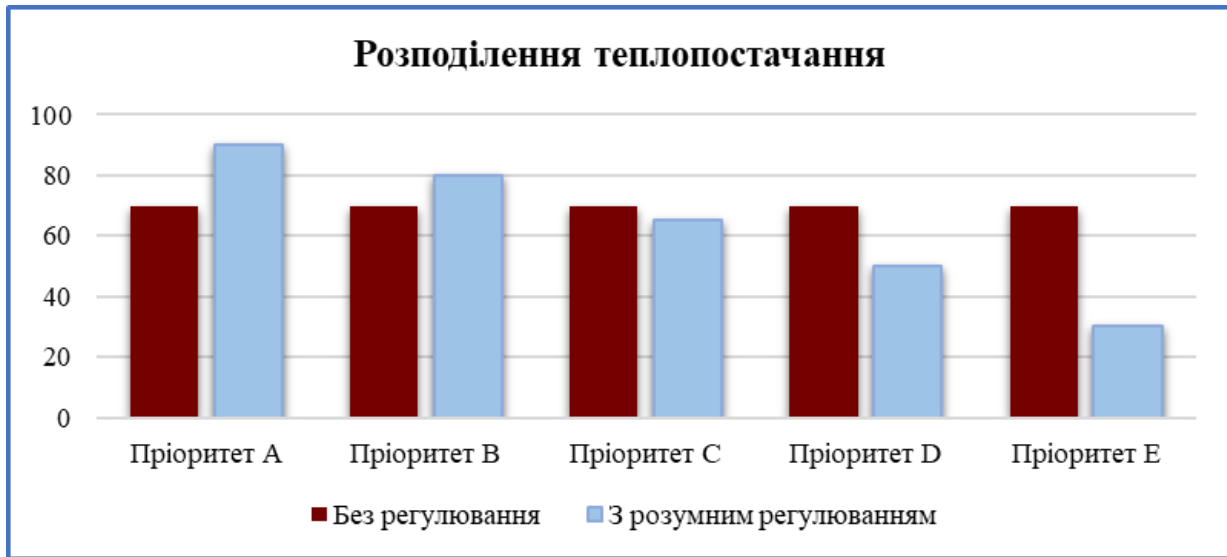


Рисунок 2 – Порівняння впливу дефіциту теплопостачання (30%) на різні класи споживачів

6. Висновки

В роботі було розглянуто проблему регулювання теплопостачання в умовах дефіциту газу та запропоновано методику пріоритетного розподілу теплових ресурсів. На основі аналізу існуючих підходів і технічних рішень сформовано алгоритм, який поєднує використання коефіцієнтів дефіциту, модераторів навантаження та перевірку мінімальних рівнів забезпечення теплом.

Системи теплопостачання України залишаються критично залежними від природного газу, що створює ризики як для енергетичної безпеки держави в цілому, так і для стабільності роботи міських теплових мереж. Приклад Чорноморська показує, що проблема низької ефективності регулювання теплопостачання має як технічний, так і соціальний вимір.

Традиційні методи регулювання (балансувальні вентилі, дроселювання) забезпечують лише статичний розподіл тепла і є «грубим інструментом», індиферентним до потреб споживача. Це призводить до перевитрат енергоресурсів та погіршення умов комфорту.

Сучасні технічні рішення (автоматизовані клапани, системи диспетчеризації, Smart Heat Networks) створюють передумови для переходу до адаптивного, споживчо-орієнтованого регулювання. Це дозволяє застосовувати «тонке налаштування» теплових потоків залежно від пріоритет-

ності споживачів, що особливо важливо в умовах дефіциту газу.

Алгоритм пріоритетного розподілу тепла формує методологічну основу для інтеграції адаптивних технологій регулювання. Він дозволяє перейти від хаотичного чи формально статичного управління до системного прогнозованого розподілу теплової енергії.

Перспективним напрямом розвитку є комбінування адаптивного регулювання із когенераційними установками, які можуть зменшити залежність від централізованого газопостачання та підвищити ефективність енергосистем.

Особистий внесок авторів CRedit

Баласанян Г. А.: наукове керівництво дослідженням, постановка завдань, наукова координація дослідження. **Ляшенко В. І.:** постановка наукової проблеми, розробка підходу до регулювання теплопостачання в умовах дефіциту газу, формування алгоритму.

Література

- ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2013. – 142 с.
- ДБН В.2.5-39:2008. Теплові мережі. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. – 180 с.

3. Закон України «Про теплопостачання» від 02.06.2005 № 2633-IV.
4. Energy Strategy of Ukraine until 2035: Security, Energy Efficiency, Competitiveness. – Київ: КМУ, 2017.
5. IEA. Ukraine Energy Profile 2022. – Paris: International Energy Agency, 2022.
6. Danfoss. Automatic balancing and control valves AFQ, AFQM, AFQMP. Technical documentation. – Danfoss Heating Segment, 2020.
7. European Commission. Energy efficiency directive 2012/27/EU. – Brussel, 2012.
8. Кулік М.М. Оптимізація режимів роботи міських теплових мереж. – Київ: Наукова думка, 2018. – 216 с.
9. Баран Є.М., Кондратюк О.І. Автоматизація систем теплопостачання. – Львів: Видавництво ЛНУ, 2020. – 312 с.
10. Міністерство енергетики України. Офіційний сайт. – URL: <https://mev.gov.ua> (дата звернення: 04.08.2025).
11. Lund H., Werner S., Wiltshire R. et al. 4th Generation District Heating (4GDH) // Energy. – 2014. – Vol. 68. – P. 1-11.
12. Frederiksen S., Werner S. District Heating and Cooling. – Studentlitteratur, 2013. – 380 p.
13. Lund H., Østergaard P.A., Connolly D. et al. Smart energy and smart energy systems // Energy. – 2017. – Vol. 137. – P. 556-565.
14. Brand L., Calvén A., Englund J. et al. Smart District Heating Networks // Energy Procedia. – 2014. – Vol. 61. – P. 117-120.
15. UNDP in Ukraine. District heating modernization projects. – URL: <https://www.undp.org/ukraine> (дата звернення: 04.08.2025).
16. Persson U., Werner S. Heat distribution and the future competitiveness of district heating // Applied Energy, 2011. – Vol. 88. – P. 568-576.
17. World Bank. Ukraine District Heating Modernization Project. – URL: <https://projects.worldbank.org> (дата звернення: 04.08.2025).
18. Connolly D., Lund H., Mathiesen B.V. Smart Energy Europe // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016. – Vol. 60. – P. 1634-1653.
19. Danfoss. AME, AMEi electronic actuators. Technical documentation. – Danfoss Heating Segment, 2021

Отримана в редакції 05.08.2025, прийнята до друку 29.08.2025

Modern methods of regulating urban district heating systems under energy resource deficiency

Genadiy Balasanian^{1✉}, Vladyslav Liashenko²

¹⁻²National University "Odesa Polytechnic", 1 Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine

✉ e-mail: ¹balasanyan@op.edu.ua

ORCID: ¹<http://orcid.org/0000-0002-3689-7409>; ²<http://orcid.org/0009-0006-2546-0419>

The issue of reliability and stability of heat supply systems in Ukraine is becoming particularly relevant in the context of modern geopolitical challenges and limited access to natural gas. Dependence on Russian energy resources creates risks for both domestic and industrial consumers, in particular in cities with developed heat infrastructure. Solving this problem requires the use of modern technical means capable of ensuring effective distribution of heat energy even in conditions of deficit. A review of technical methods for regulating heat supply systems is conducted, among which automated balancing systems and regulation of hydraulic parameters play a key role. The role of organizational and economic measures is separately noted, but the emphasis is placed on technical solutions that allow for a quick response to changes in supply conditions. Considerable attention is paid to Danfoss AFQMP 2 control valves and AMEi 6 iNET electric actuators, which, due to their characteristics, allow for the implementation of an algorithm for priority distribution of heat flows between consumers. The problem statement and the basic block diagram of the algorithm that ensures the preservation of thermal comfort for critical consumers in crisis conditions are presented, while rationally distributing resources among other users. The importance of implementing automated systems in the practice of heat supply enterprises is emphasized, which will allow increasing energy security, reducing the risks of outages and optimizing the operation of heat networks. An algorithm for priority heat distribution is proposed to form a methodological basis for the integration of adaptive control technologies, which allows moving from chaotic or formally static

control to systematic predictive distribution of heat energy. A promising direction of development is the combination of adaptive control with cogeneration plants, which can reduce dependence on centralized gas supply and increase the efficiency of energy systems. The results obtained can be used as a basic methodology for further scientific research and practical implementation in the field of heat energy.

Keywords: District heating; Energy security; Gas deficit; Smart heat networks; Priority-based heat distribution.

References

1. (2013) DBN V.2.5-67:2013. Heating, Ventilation and Air Conditioning. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine.
2. (2008) DBN V.2.5-39:2008. Heat Networks. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine.
3. Law of Ukraine «On Heat Supply» from 02.06.2005 No. 2633-IV.
4. (2017) Energy Strategy of Ukraine until 2035: Security, Energy Efficiency, Competitiveness. Kyiv: Cabinet of Ministers of Ukraine.
5. (2022) IEA. Ukraine Energy Profile 2022. Paris: International Energy Agency.
6. (2020) Danfoss. Automatic balancing and control valves AFQ, AFQM, AFQMP. Technical documentation. Danfoss Heating Segment.
7. (2012) European Commission. Energy Efficiency Directive 2012/27/EU. Brussel.
8. Kulik, M. M. (2018). Optimization of Operating Modes of Urban Heat Networks. Kyiv: Naukova Dumka, 216.
9. Baran, Ye. M., & Kondratiuk, O. I. (2020). Automation of Heat Supply Systems. Lviv: LNU Publishing House, 312.
10. Ministry of Energy of Ukraine. Official website. Retrieved 04 August 2025 from <https://mev.gov.ua>.
11. Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R. et al. (2014). 4th Generation District Heating (4GDH). *Energy*, 68, 1-11.
12. Frederiksen, S., Werner, S. (2013). District Heating and Cooling. *Student literature*, 380
13. Lund, H., Østergaard, P. A., Connolly, D., et al. (2017). Smart energy and smart energy systems. *Energy*, 137, 556-565.
14. Brand, L., Calvén, A., Englund, J., et al. (2014). Smart District Heating Networks. *Energy Procedia*, 61, 117-120.
15. (2025) UNDP in Ukraine. District heating modernization projects. Retrieved 04 August 2025 from <https://www.undp.org/ukraine>.
16. Persson, U., & Werner, S. (2011). Heat distribution and the future competitiveness of district heating. *Applied Energy*, 88, 568-576.
17. (2025) World Bank. Ukraine District Heating Modernization Project. Retrieved 04 August 2025 from <https://projects.worldbank.org>
18. Connolly, D., Lund, H., & Mathiesen, B. V. (2016). Smart Energy Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1634-1653.
19. (2021) Danfoss. AME, AMEi electronic actuators. Technical documentation. Danfoss Heating Segment.

Received 04 August 2025

Approved 29 August 2025

Available in Internet 30 September 2025