

**Карпенко Д.С.**

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

**Євтухова Т.О.**

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

**Новосельцев О.В.**

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

**Тесленко О.І.**

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

## **РИНКОВІ ОСОБЛИВОСТІ ВНЕСКУ ВИРОБНИКІВ ТЕПЛОЇ ЕНЕРГІЇ У ВТРАТИ В МЕРЕЖАХ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ**

*Дослідження стосується критичних аспектів справедливого розподілу втрат теплової енергії між її виробниками на ринку в системах централізованого теплопостачання. Виконано огляд існуючих підходів до алокації внеску виробників в рівень втрат енергії та визначено їх особливості по відношенню до систем централізованого теплопостачання, що працюють в ринкових умовах. Встановлено підхід до визначення сумарного споживання теплової енергії в системі за рік. Визначено методологічну базу для оцінювання втрат теплової енергії в мережах. Серед критеріїв для визначення внеску кожного виробника в рівень втрат теплової енергії в системі визначено відстань виробника до зваженого центроїда системи об'єктів споживання теплової енергії, обсяг споживання теплової енергії виробленої виробником та нерівномірність шляхів транспортування та постачання теплової енергії по відношенню до відстані до центроїда в системі об'єктів споживання теплової енергії для виробника. Запропоновані критерії можуть бути використані для оцінювання розподілу втрат між виробниками і врахуванню їх вартості в ціні на теплову енергію, яка формується функцією повних витрат виробників. Визначені критерії отримали відповідні вагові коефіцієнти, які підлягають оптимізації в рамках цільової функції з мінімізації середньозваженої ціни на теплову енергію на ринку в системі централізованого теплопостачання. Дослідження проведено із застосуванням багатофакторних оптимізаційних методів. Об'єднання технічних, економічних та нормативних факторів в методах розподілу втрат забезпечить стимулювання інноваційного технологічного оновлення та операційного вдосконалення серед виробників. Наголошено на необхідності справедливого ціноутворення на теплову енергію для споживачів як ефективному засобу підвищення конкурентоспроможності на ринку теплопостачання.*

**Ключові слова:** централізована система теплопостачання, ринок теплової енергії, алокація втрат в теплових мережах.

**Постановка проблеми.** Системи централізованого теплопостачання (СЦТ) є одним з видів міського енергопостачання, що використовують централізоване виробництво та розподіл тепла для обслуговування кількох житлових районів або комплексів. На конкурентному ринку обґрунтований розподіл втрат тепла забезпечує справедливе ціноутворення та стимулює підвищення ефективності системи, де кілька виробників тепла можуть постачати енергію в спільну систему [1]. В умовах монопольного становища в системі, всі втрати та пов'язані витрати на транспортування однозначно

можуть бути визначені та віднесені до основного виробника теплової енергії. Однак, при функціонуванні ринку теплової енергії в СЦТ, постає актуальна задача справедливої алокації внеску кожного виробника теплової енергії в структуру втрат теплової енергії при транспортуванні, оскільки це безпосередньо впливає на визначення рівня ціни на товар при його відпуску в СЦТ. Ефективний і справедливий розподіл втрат тепла в цих мережах між кількома виробниками теплової енергії має вирішальне значення для оптимізації операційної ефективності, економічної ефективності та

конкурентоспроможності. Цей аспект має велике значення на дерегульованих енергетичних ринках, де різні виробники конкурують на основі ефективності та ціноутворення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Підходи до розподілу втрат енергії на ринках набули розвитку, зокрема на ринках електроенергії. Так, ряд дослідників розглядають та пропонують різні методи оцінювання, такі як: пропорційний розподіл [2], граничний розподіл [3], метод Аумана-Шеплі на основі теорії ігор [4] та Z-Bus [5]. Ці методи враховують специфіку транспортування електричної енергії, способи її передачі та характер мереж, але не завжди здатні надавати комплексну оцінку, не враховуючи, наприклад, топологію мереж. При цьому, більшість ідей цих методів можуть бути лише частково застосовані до мереж СЦТ внаслідок різних технічних властивостей таких систем.

Важливо відмітити, що підходи та методи до оцінювання втрат енергії дозволяють моделювати та планувати оптимальні схеми функціонування енергетичних систем, окрім лише тільки оцінювання цього розподілу, з метою підвищення рівня їх ефективності, оскільки транспортні втрати суттєво впливають на загальну ефективність, а мінімізація цих втрат за допомогою оптимального розташування та розміру об'єктів може призвести до значної економії коштів [6]. Однак, існує дефіцит методологій, які оцінюють втрати та їх розподіл саме з перспективи функціонування ринку в системі. В дослідженні [7] пропонується методологія оптимізації розподілу навантаження в СЦТ з кількома джерелами, але без явного вирішення розподілу теплових втрат між різними виробниками в конкурентних умовах.

Існує ряд досліджень, які пропонують інструменти для визначення рівня втрат. Наприклад, дослідження [8] показує, що комп'ютерна бібліотека PyDHN, яка призначена для моделювання теплових мереж показує задовільну узгодженість із даними моніторингу, незважаючи на деякі розбіжності на підстанціях через високу температуру або градієнти масової витрати. Ряд програмних продуктів, таких як Modelica, Apros, IDA-ICE та Simulink, також дозволяють проводити моделювання розподілу та споживання теплової енергії в СЦТ, однак мають певні розбіжності в результатах, тому для підвищення точності оцінювання потребують більш простих моделей [9].

Масштабування СЦТ призводить до підвищення рівня ефективності функціонування сис-

теми [10]. В рамках дослідження [11] отримано оцінку концепції надрегіональних мереж СЦТ, аналогічних мережам передачі електроенергії, призначених для з'єднання багатьох джерел енергії та споживачів на більш широкій території, потенційно діючи як магістраль сталої енергетичної системи, що безумовно здатне знизити питомі витрати на виробництво енергії через дію ефекту від масштабу, однак питання визначення принципу розподілу втрат енергії стає вкрай важливим в цьому контексті. Також, особливої уваги набувають системи "Power-to-Heat", що дозволяють використовувати енергію відновлювальних джерел енергії для потреб опалення та гарячого водопостачання. Такі системи дозволяють масштабувати СЦТ та робити їх більш гнучкими, що обумовлює синергетичний ефект внаслідок поєднання ринків електричної та теплової енергій. Так, аналіз у дослідженнях [12–14] показує, що інтеграція систем "Power-to-Heat" зменшує залежність від викопного палива взимку та забезпечує більш стабільну роботу як СЦТ, так і систем електропостачання.

Рівень втрат енергії в СЦТ є великим відносно енергетичних систем іншого типу, тому необхідність акцентування на аналізі цієї складової має своє підґрунтя [15–17]. Саме тому, підвищення енергетичної ефективності транспортування теплової енергії в системі відіграє важливу роль при формуванні ринкових умов. Так, ряд досліджень [18–21] пропонують підходи та моделі до визначення схем дизайну теплових мереж, які полягають у визначенні оптимальних характеристик трубопроводів, температури та тиску теплоносія, наполягаючи на тому, що відхилення від оптимального рішення може призводити до нелінійного характеру зниження рівня ефективності транспортування теплової енергії. Варто відзначити, що економічні оцінки таких рішень вказують на вищі початкові інвестиції в трубопровідні мережі, але нижчі експлуатаційні витрати [22–24]. При цьому, важливим є врахування щільності споживання теплової енергії в системі, що може безпосередньо впливати на дисконтовані терміни окупності вкладених інвестицій в переобладнання мереж [25]. Тому, застосування систем енергоменеджменту створює додаткові можливості по контролю та координуванню таких інвестицій з метою забезпечення їх ефективного використання в підсистемі транспортування теплової енергії [26]. Також, одним з методів зниження втрат

теплової енергії, пропонується зниження попиту в існуючих системах через реконструкцію будівель [27], однак, такий підхід потенційно може призводити до дисбалансу в системі, тому такі заходи потребують комплексного врегулювання. Мають місце емпіричні підходи до розрахунку втрат з метою визначення втрат теплової енергії в магістральних трубопроводах. Зокрема, у дослідженні [28] оцінюються можливості термоаерофотозйомки для виявлення дефектів у діючих трубопроводах. Автори виступають за використання БПЛА як практичного рішення для безперервного та детального моніторингу, ефективного для швидкого виявлення розривів трубопроводів або витоків теплоносія.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розроблення методологічного підходу до оцінювання внеску кожного виробника теплової енергії у втрати в мережах при функціонуванні СЦТ в ринкових умовах в залежності від його географічного розташування та інфраструктурних особливостей.

Для досягнення даної мети, необхідно виконати наступні задачі:

1. Визначити методологічну базу для оцінювання втрат в СЦТ.
2. Обґрунтувати вибір критеріїв справедливого розподілу втрат теплової енергії між виробниками в ринкових умовах.
3. Запропонувати підходи до включення визначених критеріїв в цільову функцію середньозваженої ціни на теплову енергію.

**Виклад основного матеріалу.** Точне визначення втрат теплової енергії є дуже актуальним питанням в різних аспектах аналізу функціонування систем централізованого тепlopостачання. Ці втрати при транспортуванні в системі можуть бути визначені аналітичним шляхом та шляхом вимірювання, і можуть бути взаємно підтверджуваними в процесі оцінювання втрат. Важливо відмітити, що порядок оцінювання втрат теплової енергії в системі в Україні регулюється відповідними нормативно-правовими документами [29, 30]. Однак, СЦТ має розглядатись у комплексі, враховуючи характеристики як споживачів теплової енергії, так і виробників.

Загалом споживачі теплової енергії характеризуються річним споживанням теплової енергії. Агрегування цього показника по всіх споживачах становить загальний обсяг теплової енергії, спожитої в системі тепlopостачання, і визначається за наступною формулою:

$$Q^{cn} = \sum_{i=1}^n Q_i^{cn}, \quad (1)$$

де  $Q^{cn}$  – обсяг річного споживання теплової енергії усіма споживачами в системі, що аналізується, Гкал;

$Q_i^{cn}$  – обсяг річного споживання теплової енергії  $i$ -тим споживачем, Гкал;

$n$  – кількість споживачів теплової енергії в системі.

Відповідальність за транспортування та постачання теплової енергії в першу чергу лежить на транспортуючій організації в системі. Важливо стежити за станом тепломереж і вчасно проводити ремонтно-профілактичне обслуговування окремих ділянок для збереження ефективності. Для досягнення цього необхідно забезпечити певні стимули для забезпечення того, щоб відсоток втрат у тепломережі залишався в нормативно допустимих межах під час функціонування ринку теплової енергії.

Кожна ділянка теплової мережі, що складається з подавального і зворотного трубопроводу, характеризується такими параметрами, як внутрішній діаметр трубопроводу, спосіб прокладки (надземний, підземний, каналний або безканалний), тип та товщина ізоляції тощо. Ці параметри використовуються для розрахунку теплових і гідравлічних втрат в тепловій мережі, тим самим оцінюючи вплив просторового розташування компонентів СЦТ.

Теплові втрати в теплових мережах визначаються як сума втрат теплової енергії з витоків води з трубопроводів та втрат теплової енергії за рахунок охолодження теплоносія в трубопроводах:

$$Q^{emp} = Q^{sum} + \sum_{j=1}^n q_j^{\circ} \cdot l_j, \quad (2)$$

де  $Q^{sum}$  – кількість втрат теплової енергії з витоків води з трубопроводів, Гкал,

$q_j^{\circ}$  – лінійні втрати теплової енергії за рахунок охолодження теплоносія в  $j$ -тій ділянці трубопроводу, Гкал.

$l_j$  – довжина  $j$ -тої ділянки трубопроводу, м.

Таким чином, сумарна кількість теплової енергії, яка буде вироблена в системі за рік буде являти собою суму теплових втрат в мережі системи тепlopостачання та обсягу річного споживання теплової енергії споживачами:

$$Q_{\Sigma} = Q^{cn} + Q^{emp}. \quad (3)$$

В рамках цільової функції, яка визначається в даному дослідженні, мінімізації підлягає середньозважена ціна за одиницю теплової енергії

в результаті функціонування локального ринку теплової енергії (ЛРТЕ) в системі, а оптимізації підлягають обсяги теплової енергії  $Q_k$  для кожного  $k$ -того виробника:

$$T_{зв.}^M = f(Q_1, \dots, Q_m) \rightarrow \min, \quad (4)$$

де  $T_{зв.}^M$  – середньозважена ціна за одиницю теплової енергії в результаті функціонування ЛРТЕ, грн/Гкал;

$m$  – кількість виробників теплової енергії в системі теплопостачання.

Загальні втрати теплової енергії в системі можна поділити на 2 умовні частини: власні втрати для кожного виробника та втрати в системі віднесені до кожного виробника. Тому, загальні втрати теплової енергії в системі, будуть визначатись за наступною формулою:

$$Q^{emp} = \sum_{k=1}^m Q_k^{emp} = \sum_{k=1}^m (Q_k^{emp.g} + Q_k^{emp.c}), \quad (5)$$

де  $Q_k^{emp}$  – сумарні втрати теплової енергії  $k$ -того виробника за рік, Гкал;

$Q_k^{emp.g}$  – власні втрати теплової енергії  $k$ -того виробника за рік, Гкал;

$Q_k^{emp.c}$  – втрати теплової енергії в системі віднесені до  $k$ -того виробника за рік, Гкал.

Кожний виробник теплової енергії після підключення до теплової мережі буде мати визначений відрізок теплових мереж для відпуску теплової енергії в систему теплопостачання. В процесі передачі теплової енергії, будуть мати місце втрати в цих мережах. Також, внаслідок технологічних особливостей процесу виробництва теплової енергії, об'єкти її виробництва будуть мати втрати теплової енергії на власні потреби. Таким чином, ці втрати, можна закріпити за конкретним об'єктом виробництва теплової енергії, тому, такі втрати можна вважати визначеними. Власні втрати для  $k$ -того виробника теплової енергії будуть визначатись за формулою:

$$Q_k^{emp.g} = Q_k^{gl.n.} + C_k^{emp} \cdot Q_k, \quad (6)$$

де  $Q_k^{gl.n.}$  – втрати теплової енергії на власні потреби об'єкта теплогенерації за рік, Гкал;

$C_k^{emp}$  – коефіцієнт, який характеризує частку втрат теплової енергії від загального обсягу відпущеної теплової енергії власними тепловими мережами.

Інтеграція незалежних виробників в СЦТ на ринкових умовах також створює невизначеність щодо справедливого розподілу втрат теплової енергії. Точне та обґрунтоване віднесення вартості втрат тепла до різних виробників є складним, але важливим для економічної справедливості. Сис-

тема повинна враховувати різні структури витрат на різні джерела енергії та наслідки для ціноутворення та конкурентоспроможності. Якщо система розподілу теплових втрат не враховує належним чином частку кожного окремого виробника, стимули для виробників інвестувати в підвищення ефективності або передові технології можуть бути зменшені, оскільки економічні вигоди від таких інвестицій не отримують належної винагороди. З цим пов'язано ряд технологічних передумов, а саме:

1. Невизначеність походження товару відносно споживача теплової енергії, оскільки в системі функціонує теплопостачальна організація, яка забирає відпущену теплову енергію виробниками і транспортує її трубопроводами, в яких вже неможливо провести диференціацію виробника.

2. Ефективність виробництва теплової енергії може суттєво відрізнятись залежно від різних джерел енергії та технологій, що використовуються незалежними виробниками. Ця мінливість ускладнює оцінку та розподіл втрат тепла, оскільки система повинна враховувати різний внесок у загальний виробничий обсяг (пул).

3. Фізична інфраструктура мереж СЦТ, включаючи довжину та стан розподільних труб, впливає на втрати тепла. Розбіжності в інфраструктурі, пов'язаній з різними виробниками, можуть призвести до труднощів у справедливому розподілі витрат, пов'язаних із цими втратами.

4. Залучення відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), які можуть мати стохастичну та менш передбачувану потужність, додає складності в управлінні та розподілі втрат тепла, особливо з точки зору тимчасової мінливості та потреби в резервних системах.

Частка втрат віднесена до конкретного виробника буде включатись в обсяги виробництва теплової і буде визначати рівень повних витрат на виробництво визначених обсягів на ринку. При цьому, втрати теплової енергії в СЦТ можуть визначатись як розрахунковим шляхом, так і за допомогою лічильників теплової енергії на вводах об'єктів теплогенерації та споживання, визначаючи енергетичний баланс в системі для розподілу втрат теплової енергії між виробниками постфактум.

Для вирішення задачі справедливого розподілу втрат, в рамках дослідження, пропонується визначити ряд критеріїв, за якими буде відбуватись оцінювання обсягів теплової енергії як частка від втрат у теплових мережах  $Q_{emp}$  по відношенню до кожного виробника теплової енергії. Серед критеріїв визначаються наступні:

1. Вага відстані  $k$ -того виробника до зваженого центроїда системи об'єктів споживання теплової енергії. Цей показник характеризує відносне наближення об'єктів виробників теплоенергії до споживачів теплової енергії, враховуючи їх обсяги споживання, окрім їх місцеположення, по відношенню до інших виробників.

Щоб обчислити зважений центроїд такої системи, які мають різні значення споживання теплової енергії, необхідно використати середньозважене значення координат кожного об'єкта, взявши значення їх споживання енергії як вагу.

Формули для зваженого центроїда  $C_x, C_y$  набору точок задаються так:

$$C_x = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i \cdot Q_i^{cn})}{\sum_{i=1}^n Q_i^{cn}}, \quad (7)$$

$$C_y = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i \cdot Q_i^{cn})}{\sum_{i=1}^n Q_i^{cn}}, \quad (8)$$

де  $x_i, y_i$  – координати  $i$ -го об'єкта споживання теплової енергії.

Визначення відстані  $k$ -того виробника до зваженого центроїда відбувається за наступною формулою:

$$l_k = \sqrt{(C_x - x_k)^2 + (C_y - y_k)^2} \quad (9)$$

де  $x_k, y_k$  – координати  $i$ -го об'єкта виробництва теплової енергії.

Визначивши відстань кожного виробника до центроїда, стає можливим визначити вагу відстані  $k$ -того виробника:

$$\varphi_k = \frac{l_k}{\sum_{k=1}^m l_k}, \quad (10)$$

де  $\varphi_k$  – вага відстані  $k$ -того виробника теплової енергії до зваженого центроїда об'єктів споживання теплової енергії в СЦТ, за умови  $\sum_{k=1}^m \varphi_k = 1$ .

На рис. 1 зображений умовний приклад СЦТ з об'єктами виробництва теплової енергії споживання та транспортування, на основі якої, може бути розраховано значення критерію ваги відстані  $k$ -того виробника до зваженого центроїда системи об'єктів споживання теплової енергії.

2. Вага обсягу споживання теплової енергії виробленої  $k$ -тим виробником. Цей показник характеризує кількість виробленої та спожитої теплової енергії від об'єктів виробника теплоенергії в системі по відношенню до інших виробників.

Визначення кількості спожитої теплової енергії від  $k$ -того виробника визначається за формулою:

$$Q_k^{cn} = Q_k - Q_k^{emp}. \quad (11)$$

Вага обсягу споживання теплової енергії виробленої  $k$ -тим виробником визначається за наступною формулою:

$$\alpha_k = \frac{Q_k^{cn}}{\sum_{k=1}^m Q_k^{cn}}, \quad (12)$$

де  $\alpha_k$  – вага обсягу споживання теплової енергії виробленої  $k$ -тим виробником, за умови  $\sum_{k=1}^m \alpha_k = 1$ .

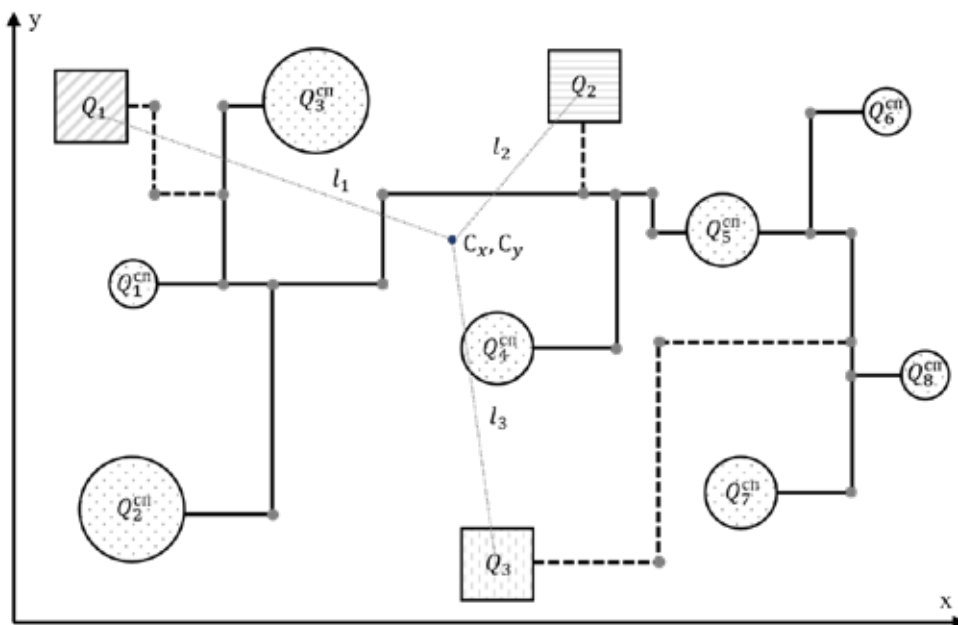


Рис. 1. Умовний приклад системи тепlopостачання для розрахунку значення критерію ваги відстані  $k$ -того виробника до зваженого центроїда системи об'єктів споживання теплової енергії

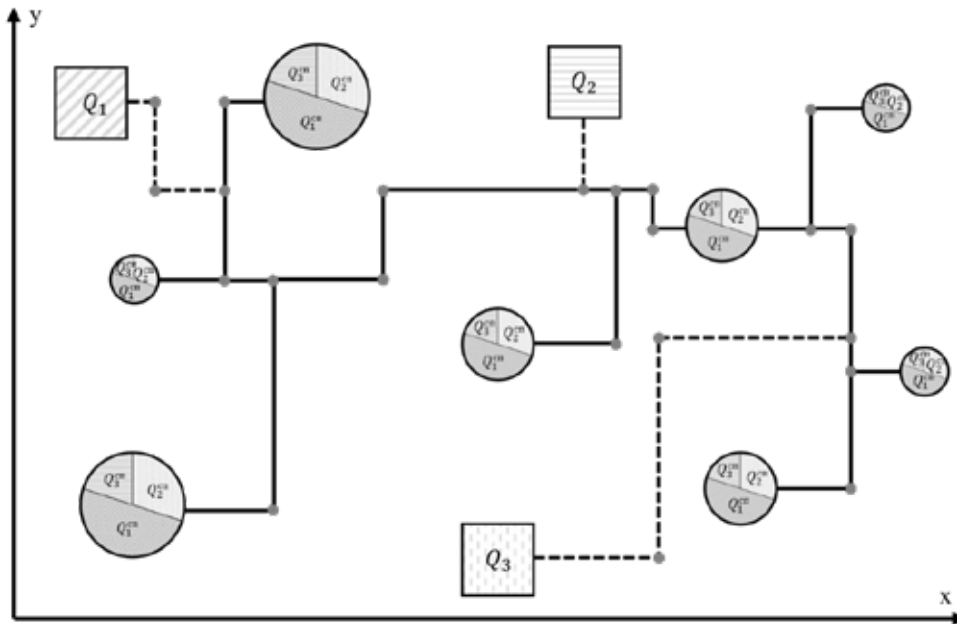


Рис. 2. Умовний приклад системи тепlopостачання для розрахунку значення критерію ваги обсягу споживання теплової енергії виробленої  $k$ -тим виробником

На рис. 2 зображено умовний приклад СЦТ, в якій можуть бути розраховані значення критерію ваги обсягу споживання теплової енергії виробленої  $k$ -тим виробником.

3. Вага нерівномірності шляхів транспортування та постачання теплової енергії по відношенню до відстані до центроїда в системі об'єктів споживання теплової енергії для  $k$ -того виробника теплової енергії.

Для визначення такого критерію, необхідно розрахувати показник для  $i$ -того споживача відносно  $k$ -того виробника, який характеризується співвідношенням суми добутків площі поперечного перерізу та довжини  $j$ -ої ділянки трубопроводу до обсягів споживання теплової енергії  $i$ -тим об'єктом споживання теплової енергії. При чому, кожна оцінювана ділянка теплової мережі для  $i$ -того споживача теплової енергії є складовою частиною в найкоротшому шляху постачання теплової енергії від  $k$ -того виробника теплової енергії. Результат суми всіх споживачів має бути віднесений до відстані до центроїда системи для  $k$ -того виробника теплової енергії. Отже, рівень нерівномірності шляхів транспортування та постачання теплової енергії буде визначатись за наступною формулою:

$$S_k = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^z \left( \frac{\pi \cdot D_j^2}{4} \cdot L_j \right)}{Q_i^{cn}}, \quad (13)$$

де  $D_j$  – діаметр  $j$ -тої ділянки трубопроводу, м<sup>2</sup>;  
 $L_j$  – довжина  $j$ -тої ділянки трубопроводу, м;

$z$  – кількість ділянок трубопроводів у найкоротшому шляху постачання теплової енергії від  $k$ -того виробника теплової енергії до  $i$ -того споживача.

Таким чином, вага нерівномірності шляху транспортування та постачання теплової енергії для  $k$ -того виробника буде визначатись за формулою:

$$\beta_k = \frac{S_k}{\sum_{k=1}^m S_k}, \quad (14)$$

На рис. 5 зображено умовний приклад СЦТ, в якій можуть бути розраховані значення критерію ваги нерівномірності шляхів транспортування та постачання теплової енергії по відношенню до відстані до центроїда в системі об'єктів споживання теплової енергії для  $k$ -того виробника теплової енергії.

Кожен з визначених критеріїв буде мати свою вагу в цільовій функції і будуть підлягати оптимізації в рамках визначеної системи. Таким чином, загальна форма цільової функції прийме наступний вигляд:

$$T_{зв.}^M = f(Q_1, \dots, Q_m, \omega_\phi, \omega_\alpha, \omega_\beta) \rightarrow \min, \quad (15)$$

де  $\omega_\phi$  – вага критерію  $\phi_k$  – відстані  $k$ -того виробника до зваженого центроїда системи об'єктів споживання теплової енергії;

$\omega_\alpha$  – вага критерію  $\alpha_k$  – обсягу споживання теплової енергії виробленої  $k$ -тим виробником;

$\omega_\beta$  – вага критерію  $\beta_k$  – нерівномірності шляхів транспортування та постачання теплової енергії по відношенню до відстані до центроїда в системі об'єктів споживання теплової енергії для  $k$ -того виробника теплової енергії.

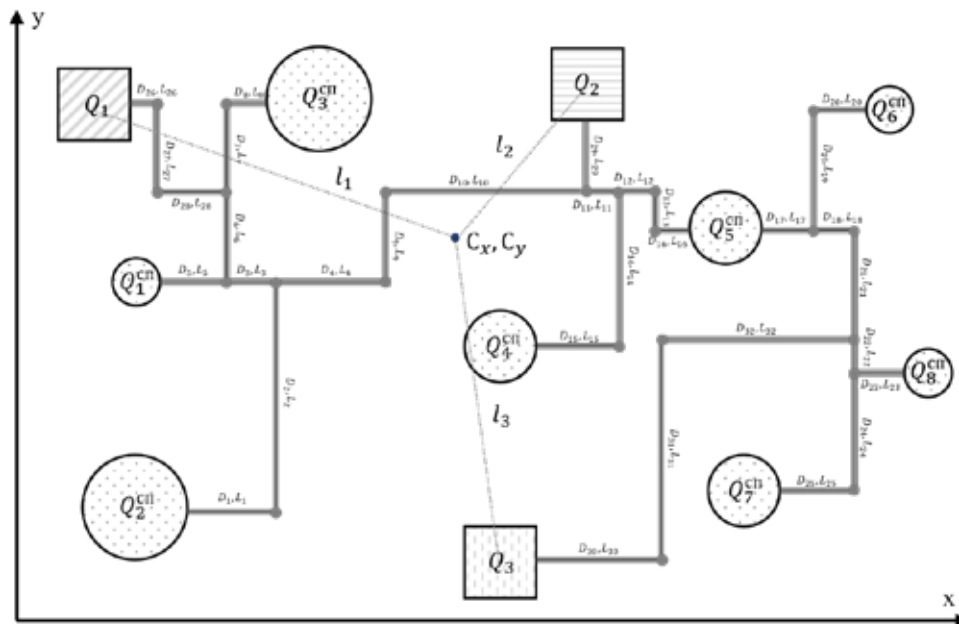


Рис. 3. Умовний приклад системи тепlopостачання для розрахунку значення критерію ваги нерівномірності шляхів транспортування та постачання теплової енергії по відношенню до відстані до центруда в системі об'єктів споживання теплової енергії для  $k$ -того виробника теплової енергії

Таким чином, додатковими обмеженнями для цільової функції будуть наступні вирази:

$$\omega_\phi + \omega_\alpha + \omega_\beta = 1, \quad (16)$$

$$p_\phi^{\min} < \omega_\phi < p_\phi^{\max}, \quad (17)$$

$$p_\alpha^{\min} < \omega_\alpha < p_\alpha^{\max}, \quad (18)$$

$$p_\beta^{\min} < \omega_\beta < p_\beta^{\max}, \quad (19)$$

де  $p_\phi^{\min}$ ,  $p_\alpha^{\min}$ ,  $p_\beta^{\min}$ ,  $p_\phi^{\max}$ ,  $p_\alpha^{\max}$ ,  $p_\beta^{\max}$  – мінімальні та максимальні значення критеріальних вагових коефіцієнтів, які підлягають індивідуальному визначенню в рамках системи тепlopостачання, яка розглядається, з метою справедливого врахування всіх критеріїв.

Отже, враховуючи вищенаведене, втрати теплової енергії в системі віднесені до  $k$ -того виробника будуть визначатись за формулою:

$$Q_k^{emp.c} = \left( Q^{emp} - \sum_{k=1}^m Q_k^{emp.s} \right) \cdot (\omega_\phi \cdot \phi_k + \omega_\alpha \cdot \alpha_k + \omega_\beta \cdot \beta_k) \quad (20)$$

Таким чином, визначені втрати, які розглядаються як внесок  $k$ -того виробника теплової енергії у загальні втрати в системі, дозволяють справедливо оцінювати ціну на теплову енергію цього виробника, яка постачається споживачам.

**Висновки.** В якості методологічної бази для визначення втрат теплової енергії використано аналітичний підхід, який лежить в основі нормативно-правових документів України в частині оцінювання таких втрат. Це дозволяє використовувати затверджені методики і впроваджувати удосконалені методологічні підходи на їх основі.

В результаті виконаного дослідження було вперше запропоновано методологічні принципи оцінювання внеску кожного виробника в рівень втрат теплової енергії в системі, що дозволяє оцінювати кількість енергії яку необхідно додатково виробити, щоб компенсувати втрати в системі. Такий підхід може врегульовувати суперечності у формуванні ціни на теплову енергію виробниками та тарифу для споживачів.

Був запропонований перелік критеріїв, на основі яких може відбуватись визначення внеску кожного виробника в рівень втрат теплової енергії в системі, які в свою чергу мають відповідні вагові коефіцієнти, які підлягають оптимізації при моделюванні ринкових умов в СЦТ.

Ці методологічні підходи можуть бути використані для моделювання СЦТ в ринкових умовах з метою оцінювання та оптимізації конфігурацій суб'єктів системи на етапі впровадження ринку.

## Список літератури:

1. Frölke L., Sousa T., Pinson P. A network-aware market mechanism for decentralized district heating systems. *Applied Energy*. 2022. № 306. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117956>.
2. Khosravi M., Monsef H., Aliabadi M. H. Approach for allocation of transmission loss based on contribution of generators and loads in injected complex power into network lines. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2017. Vol. 12, № 3. Pp. 713–725. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0659>.
3. Jesus P., Mario R., Gustavo R. Energy Loss Allocation in Smart Distribution Systems with Electric Vehicle Integration. *Energies*. 2018. Vol. 11. № 1962. Pp. 1–19. <https://doi.org/10.3390/en11081962>.
4. Amaris H., Molina Y. P., Alonso M., Luyo J. E. Loss Allocation in Distribution Networks Based on Aumann–Shapley. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2018. Vol. 6. № 33. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2844740>.
5. Gurung S., Gautam B. K. Review of Various Transmission Loss Allocation Methods: A Case Study of Integrated Nepal Power System using Best Method. *Himalayan Journal of Applied Science and Engineering*. 2022. Vol. 3. № 2. P. 41–54. <https://doi.org/10.3126/hijase.v3i2.52295>.
6. Ok Y., Atak M. Allocation of Distributed Energy Systems at District-Scale over Wide Areas for Sustainable Urban Planning with a MILP Model. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/4208415>.
7. Haoran Zhang, Dongnian Yin, Xiaojie Lin, Rong Liu. Load Distribution Optimization of Multi-Source District Heating System Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process. *IEEE Access*. 2020. № 8. P. 209074–209090. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3038381>.
8. Boghetti R., Kämpf J. H. A benchmark for the simulation of meshed district heating networks based on anonymised monitoring data. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. № 2600. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2600/2/022008>.
9. Arcea I. d. H., Lópeza S. H., Pereza S. L., Rämab M. Models for fast modelling of district heating and cooling networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. T. 82. № 2. p. 1863–1873. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.109>.
10. Dешко V. I., Zamulko A. I., Karpenko D. S., Mahnitko A., Linkevics O. 2018 Evaluation of the district heating market efficiency as the function of its size and number of competing suppliers. *IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. 2018. Riga, Latvia. <https://doi.org/10.1109/RTUCON.2018.8659907>.
11. Moser S., Puschnigg S. Supra-Regional District Heating Networks: A Missing Infrastructure for a Sustainable Energy System. *Energies*. 2021. Vol. 3380. № 14. <https://doi.org/10.3390/en14123380>.
12. Schindler M., Gnam L., Puchegger M., Medwenitsch K., Jasek P. Optimization-Based Operation of District Heating Networks: A Case Study for Two Real Sites. *Energies*. 2023. Vol. 16. № 2120. P. 1–15. <https://doi.org/10.3390/en16052120>.
13. Babak V. P., Kulyk M. M. Increasing the efficiency and security of integrated power system operation through heat supply electrification in Ukraine. *Science and Innovation*. 2023. Vol. 19. № 5. P. 100–116. <https://doi.org/10.15407/scine19.05.100>.
14. Derii V., Teslenko O., Lenchevsky E., Denisov V., Maistrenko N. Prospects and Energy-Economic Indicators of Heat Energy Production Through Direct Use of Electricity from Renewable Sources in Modern Heat Generators. In: Zaporozhets, A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control*. 2023. Vol. 454. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_27).
15. Heidariannoghondar M., Ahmadi A. Modeling thermal energy distribution and transmission networks for household consumption through comparative analysis. *Science Progress*. 2023. Vol. 106. № 4. P. 1–37. <https://doi.org/10.1177/00368504231215583>.
16. Bucker D., Jell P., Botsch R. Performance monitoring of rural district heating systems. *16th International Symposium on District Heating and Cooling, DHC2018*. 2018. Hamburg, Germany. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.164>.
17. Каплін М., Білан Т. Агрегована модель енергозабезпечення за структурою даних продуктового енергетичного балансу. *Системні дослідження в енергетиці*. 2023. № 2 (73). P. 48–61. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.02.048>.
18. Wang H., Duanmu L., Li X., Lahdelma R. Optimizing the District Heating Primary Network from the Perspective of Economic-Specific Pressure Loss. *Energies*. 2017. Vol. 10, № 1095, P. 1–12. <https://doi.org/10.3390/en10081095>.
19. Howard D. A., Filonenko K., Busk F. S., Veje C. Methodology for Evaluation of District Heating Network Efficiency. *2020 The 3rd International Conference on Electrical Engineering and Green Energy (CEEGE 2020)*. 2020. E3S Web Conf. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018601006>.
20. Jakubek D., Ochoń P., Nowak-Ochoń M., Sułowicz M., Varbanov P. S., Klemeš J. J. Mathematical modelling and model validation of the heat losses in district heating networks. *Energy*. 2023. № 267. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126460>.



21. Liu Z., Zhang H., Wang Y., Fan X., You S., Jiang Y., Gao X. Optimization of hydraulic distribution using loop adjustment method in meshed district heating system with multiple heat sources. *Energy*. 2023. № 284. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3038381>.
22. Tol H. İ., Svendsen S. The Exergetic, Environmental and Economic Effect of the Hydrostatic Design Static Pressure Level on the Pipe Dimensions of Low-Energy District Heating Networks. *Challenges*. 2013. № 4. P. 1–16. <https://doi.org/10.3390/challe4010001>.
23. Pakare I., Gravelins A., Lauka D., Blumberga D.. Estimating energy efficiency increase in national district heating network. *The 17th International Symposium on District Heating and Cooling, Nottingham Trent University*. 2021. Nottingham, UK. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.088>.
24. Nussbaumer T., Thalmann S. Influence of system design on heat distribution costs in district heating. *Energy*. 2016. № 101. P. 496–505. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.062>.
25. Persson U., Werner S. Heat distribution and the future competitiveness of district heating. *Applied Energy*. 2011. Vol. 3. № 88. P. 568–576. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.09.020>.
26. Ковалко О. М., Ковалко Н. М., Євтухова Т. О., Новосельцев О. В. Комунальна теплоенергетика: енергоефективність, структура управління, енергосервісні послуги. Київ : НАН України, Ін-т заг. Енергетики. 2023. URL: <https://web.nlu.org.ua/object.html?id=2196>.
27. Flores J. F. C., Lacarrière B., Chiu J. N. W., Martin V. Assessing the techno-economic impact of low-temperature subnets in conventional district heating networks. *Energy Procedia*. 2017. № 116. P. 260–272. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.073>.
28. Babak V., Zaporozhets A., Kovtun S., Serhienko R. Methods and Means of Heat Losses Monitoring for Heat Pipelines. *International Journal “NDT Days”*. 2018. Vol. 1. № 2. P. 1–10. <https://www.ndt.net/article/NDTDays2018/papers/JNDTD-v1-n2-a08.pdf>.
29. Про затвердження Порядку формування тарифів на теплову енергію, її виробництво, транспортування та постачання : Постанова НКРЕКП № 1174 від 25.06.2019. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v1174874-19>.
30. Методика визначення витрат та втрат паливно-енергетичних ресурсів для врахування в тарифах на теплову енергію, її виробництво, транспортування та постачання : Постанова НКРЕКП № 1188 від 20.09.2022. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1188874-22>.

#### **Karpenko D.S., Yevtukhova T.O., Novoseltsev O.V., Teslenko O.I. MARKET FEATURES OF HEAT PRODUCERS CONTRIBUTION TO LOSSES IN DISTRICT HEATING SYSTEM NETWORKS**

*The study addresses critical aspects of the equitable distribution of thermal energy losses among producers in district heating systems. An overview of existing approaches to allocating producers' contributions to energy losses is presented, and their relevance to centralized heat supply systems operating under market conditions is assessed. The study establishes an approach for determining the total annual consumption of thermal energy in the system and defines the methodological basis for assessing thermal energy losses in networks. Key criteria for determining each producer's contribution to thermal energy losses include the producer's distance from the weighted centroid of the system's thermal energy consumption points, the amount of thermal energy produced, and the variability in transportation and supply paths relative to the centroid. These criteria are used to assess the distribution of losses among producers and incorporate their value into the price of thermal energy, which reflects the total costs of production. The identified criteria are assigned appropriate weighting factors, which are optimized within the objective function of minimizing the weighted average price of thermal energy in the centralized heat supply system. The research employs multifactor optimization methods to achieve this. Integrating technical, economic, and regulatory factors in loss allocation methods is expected to stimulate innovative technological upgrades and operational improvements among producers. The study emphasizes the importance of fair pricing of heat energy for consumers as a means of enhancing competitiveness in the heat supply market.*

**Key words:** district heating system, heating market, heat losses allocation in networks.