

ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 658.264

Оцінка ризиків забезпечення надійного теплопостачання споживачів в умовах зовнішнього руйнування

А. С. Мазуренко¹✉, В. В. Кандеєва², В. В. Чиченін³, А. В. Пустовіт⁴, В. Д. Станіславов⁵¹⁻⁵Національний університет «Одеська політехніка», просп. Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна✉ e-mail: ¹mazurenko@op.edu.uaORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-0165-3826>; ²<https://orcid.org/0000-0002-8707-0700>; ³<https://orcid.org/0000-0001-7772-7142>; ⁴<https://orcid.org/0009-0008-4320-953X>; ⁵<https://orcid.org/0009-0002-4512-2725>

Сучасні умови функціонування теплоенергетичного комплексу в Україні потрубують ретельного підходу не тільки енергоефективності як основного обладнання так і систем енергозабезпечення в цілому, насамперед найголовнішим стає питання безпеки та надійності роботи їх в екстремальних умовах. Вказане характерно як для енергетичного комплексу, промислових підприємств так і для комунального сектору. Одним із найважливіших в комунальному секторі є теплопостачання житлових мікрорайонів. Теплозабезпечення житлових комплексів в опалювальний сезон носить важливу соціальну складову, яка в свою чергу впливає на загальний стан в енергетиці, промисловості та інших важливих сферах діяльності країни. Вказане показує важливість оцінки ризиків відмов системи теплопостачання та її елементів, а також можливості та ефективність резервування системи та її окремих підсистем. В роботі проведено аналіз сучасних методик та підходів, щодо визначення ймовірності відмови як окремих елементів так і в цілому системи теплозабезпечення. На основі проведеного аналізу літературних джерел взаємозв'язок між елементами та подіями в системі теплопостачання представлено діаграмою відмов систем теплопостачання в результаті руйнувань. Також для оцінки надійності використано підхід на базі «дерева відмов», яке відповідає методиці оцінки ризиків та причин виникнення аварійних станів складної системи. При цьому використовуються відповідні логічні символи, які пов'язують події відповідно до причин, що впливають на виникнення події. Для конкретної системи теплозабезпечення мікрорайону міста було проведено дослідження на базі обраних методик щодо визначення ймовірності відмови як окремих елементів системи теплопостачання так і всієї системи в екстремальних умовах. Отримані результати дають змогу оцінити важливість збору статистичних даних по частоті відмов протягом тривалого періоду експлуатації системи теплозабезпечення. Також продемонстровано можливість використання методу експертних оцінок за відсутності необхідної кількості накопичення статистичних даних.

Ключові слова: Надійність систем теплопостачання; Ймовірності відмов елементів; Системи теплопостачання.

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v61i3.3274>

© 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

В сучасних умовах функціонування енергетичного комплексу в Україні багато уваги приділяється не лише енергоефективності систем теплопоста-

чання [1], а й надійності їх роботи. Вказане важливо як для промисловості так і для комунального сектору [2]. Одним із напрямків забезпечення надійності роботи енергетичних систем є теплопостачання житлових мікрорайонів. Вирішенню за-

дач забезпечення енергоефективності та надійності систем енергопостачання багато уваги приділяється також у багатьох країнах Європейського Союзу та і в світі в цілому [3,4].

Стабільне теплопостачання промислових об'єктів та житлових комплексів в зимовий період є надзвичайно важливим навіть в умовах військового стану країни. При цьому слід враховувати підвищену ймовірність руйнування як самих генеруючих об'єктів, так і елементів всієї системи теплопостачання. В таких умовах важливо оцінити ризики відмов системи і її елементів, а також можливості та ефективність резервування системи та її окремих підсистем.

Розробці методик визначення ймовірності відмови як окремих елементів систем так і в цілому надійності системи енергозабезпечення присвячено багато науково-дослідницьких робіт. На основі проведеного аналізу взаємозв'язок між елементами та подіями в системі теплопостачання можна представити діаграмою (рис. 1).

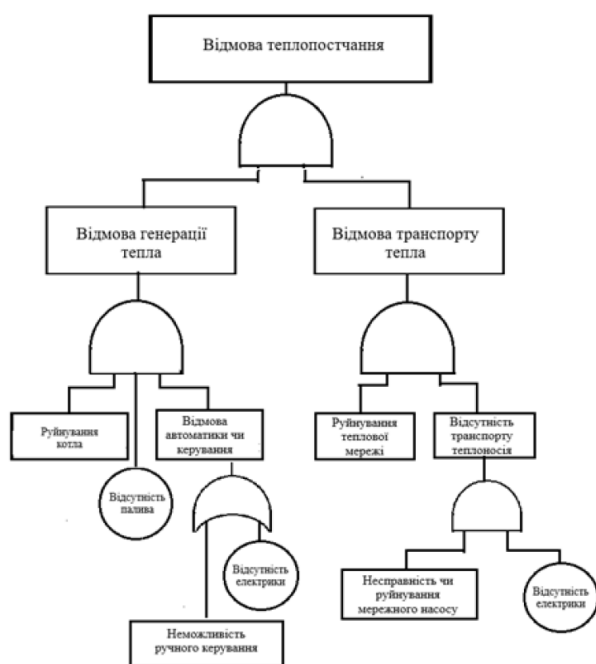


Рисунок 1 – Діаграма відмов систем теплопостачання в результаті руйнувань

Представлена діаграма основних відмов в системі теплопостачання, які можливі в результаті зовнішнього впливу, або інших аварійних ситуацій в системах теплопостачання (наприклад руйнувань). Також для оцінки надійності як окремих елементів так і системи теплопостачання в цілому використовують так зване «дерево відмов». Дерево відмов відповідає методиці оцінки ризиків та причин виникнення аварійних станів складної системи, яка запропонована Дж. Хенлі та Х. Кумамото [5].

При цьому використовуються відповідні логічні символи, які пов'язують події відповідно до причин, що впливають на виникнення події. Логічний символ має тільки один вихід або вихідну подію, проте може мати як один, так і або декілька причинних входів.

Вихідна подія логічного знаку «АБО» настає в тому випадку, якщо всі вхідні причини діють незалежно. В нашому випадку подія відмови в керуванні генерацією тепла може мати місце коли відсутнє електроживлення систем автоматики, «АБО» відсутня можливість ручного курування. Вихідна подія логічного знаку «І» відбувається, якщо вплив має будь-яка з вхідних причин, наприклад відсутність теплопостачання, як при відмові генерації тепла в котельні, так і при неможливості його транспорту в мережі до споживачів. При побудові дерева відмов використовується пряма логіка, тобто: «Що трапиться, якщо...».

«Дерево відмов» пов'язує причини та наслідки подій і його побудова є корисним інструментом для «мозкового штурму» оцінки аварійних ситуацій та їх наслідків [6], проте не надає можливість оцінити кількісні параметри ризиків в різних умовах. Для кількісної оцінки ймовірності подій більш доцільним уявляється побудова та використання дерева подій. Ймовірність події P визначається з використанням зворотної логіки – «Як, чи чому може відмовити...», тому логіка, яка використовується при аналізі за допомогою дерева відмов, є дедуктивною.

Важливим також є те, що використання для аналізу ефективності заходів з підвищення надійності теплопостачання в екстремальних ситуаціях дозволяє оцінити доцільність та ефективність резервування системи та її окремих елементів, як найбільш ефективного шляху зменшення ризиків як відмов в забезпеченні теплом споживачів, так і відмов в живучості всієї системи [7].

Ініціюючою подією P_1 , ймовірність якої дорівнює 1, в нашому прикладі є допущення, що на протязі року відбувається один випадок вибуху в мікрорайоні міста. При цьому, ймовірність попадання та руйнувань на території котельні прийнято за $P_k = 0,1$, а ймовірність відсутності руйнувань складе $P = 1 - P_k = 0,9$.

В подальшому, для аналізу і далі використовується двійкова система, в якій елементи можуть або виконувати свої функції, або відмовляють. В

цьому випадку число потенційних відмов дорівнює $2n - 1$, де n – число елементів, з яких утворена система. При цьому важливо враховувати, що дерево подій включає складні взаємодії між технічними системами забезпечення надійного функціонування.

2. Матеріали та методи досліджень

Для визначення надійності системи теплопостачання використовувались наявні статистичні данні працюючих котельень, на основі яких було складено дерево ймовірності подій та визначені основні показники для розрахунку стійкості системи теплопостачання.

Коефіцієнт стійкості системи теплопостачання формуються на ряді окремих показників [6]:

$$K_{CT} = K_n \cdot K_e \cdot K_y \cdot K_m \cdot K_z \cdot K_p \cdot K_d,$$

де K_n – коефіцієнт надійності постачання палива, K_e – коефіцієнт надійності водопостачання, K_y – характеризує стійкість системи електропостачання, K_y – коефіцієнт надійності устаткування котельні, K_m – коефіцієнт стійкості системи транспорту теплоносія від котельні до споживачів, K_z – коефіцієнт захисту елементів системи теплопостачання, як правило пасивні методи захисту, K_p – цей коефіцієнт відображає наявність достатньої кількості робітників в системі теплопостачання, які можуть забезпечити кваліфікований рівень експлуатації та ремонту устаткування, K_d – коефіцієнт дублювання систем теплопостачання та їх елементів.

Визначення вказаних коефіцієнтів є досить непростою задачею, так як вони залежать від великої кількості як зовнішніх незалежних, так і керованих для конкретних систем факторів (табл. 1). Найбільш точним можна вважати метод збору та статистичного аналізу великої кількості даних з відмовами різних систем теплопостачання у відповідних умовах експлуатації.

Не слід ігнорувати і методикку експертних

оцінок фахівців, наприклад метод «Делфі» [8]. Значна кількість таких експертних оцінювань може бути об'єктивним показником як надійності так і стійкості системи теплопостачання в екстремальних умовах.

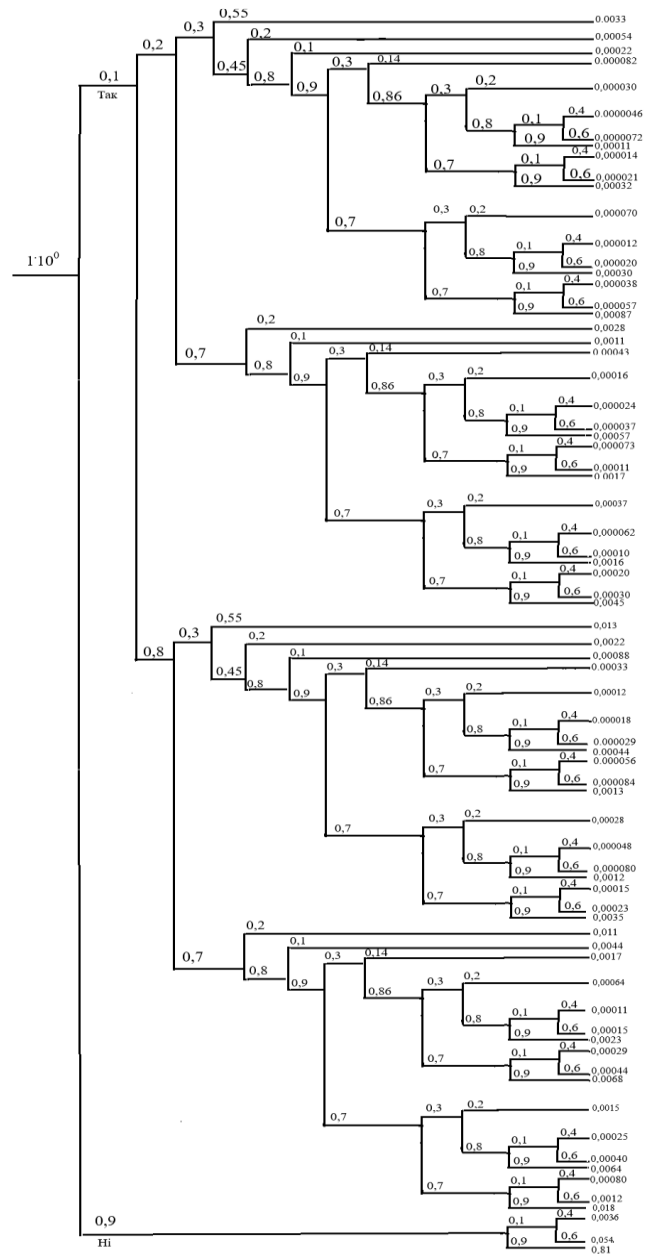


Рисунок 2 – Дерево ймовірності подій в умовах аварій чи руйнувань з урахуванням резервування елементів системи теплопостачання

Таблиця 1 – Основні показники визначення коефіцієнту стійкості системи теплопостачання

Подія-вибух в районі	Вибух в котельні	K_z	K_y	K_y^p	K_n	K_e	K_e	K_e^p	K_k	K_k^p	K_m	K_m^p	Ймовірність подій – $P = \prod K_i \cdot K_i^p$
1	0,1	0,2	0,3	0,55	0,2	0,1	0,3	0,14	0,3	0,2	0,1	0,4	подія -
	0,9	0,8	0,7	0,45	0,8	0,9	0,7	0,86	0,7	0,8	0,9	0,6	подія +

Наведене дерево ймовірності подій (рис. 2) в умовах аварій чи руйнувань враховує найбільш важливі та реальні події та відповідні коефіцієнти ризиків з урахуванням резервування системи чи дублювання окремих елементів. Стовпець після ініціюючої події оцінює ймовірність вибуху безпосередньо на території котельні у 0,1, а за її межами у 0,9. Ця величина може бути визначена, наприклад, як частина площі котельні у відношенні до площі мікрорайону, в якому виникла вказана подія.

3. Результати досліджень

Наявність та ефективність захисту генеруючого тепло устаткування (котла) від вибуху на території котельні K_z оцінимо як 0,8 – захист та 0,2 – відмова. При цьому ймовірність відмови котла K_y прийнято 0,3, а продовження функціонування – 0,7.

В разі відмови котла слід розглянути можливість підключення резервного устаткування генерації тепла, виходячи з наявності додаткових котлів, або використання встановленої потужності котлів, які працювали з неповною потужністю. Коефіцієнт відмови резервування генерації K_y^p оцінимо у 0,55, а ймовірність продовження генерації тепла у 0,45.

Ризик призупинення генерації тепла через відсутність палива K_n , наприклад при руйнуванні газопроводу, оцінимо у 0,2, а через відсутність води K_e у 0,1.

Ймовірність припинення електричного живлення котельні в даних екстремальних умовах K_e приймемо у 0,3, при цьому ймовірність електроживлення від резервного електрогенератора K_e^p оцінено у 0,86, а відмова у 0,14.

Відмову функціонування системи автоматичного керування роботою котельні K_k приймаємо у 0,3, а ймовірність переходу на резервне чи ручне керування K_k^p у 0,8. Відмова – відповідно 0,2.

Функціонування мережі транспорту тепла до споживачів залежить від особливості прокладки мережі, цілісності водоводів, роботи мережних насосів. Ризик відмови транспорту тепла мережею, яка прокладена в ґрунті або в каналах K_m оцінимо у 0,1, а ймовірність використання в разі необхідності резервної магістралі K_m^p у 0,6, відмова в цьому випадку складе 0,4.

Аналіз наведеного дерева відмов дозволяє оцінити ймовірність забезпечення постачання тепла

до споживачів, або його відсутності в різних комбінаціях можливих відмов.

Так, якщо пройтись по нижнім гілкам дерева подій (ймовірностям позитивних i -тих подій), то підсумкове значення ймовірності збереження працездатності системи тепlopостачання складе – $1 \cdot 0,9 \cdot 0,9 = 0,81$. Тут врахована ймовірність відсутності вибуху на території котельні у 0,9, проте допускається ймовірність руйнування теплової мережі між котельнею та споживачами у 0,1. Ймовірність відсутності руйнування мережі при цьому буде 0,9 і надійністю теплозабезпечення буде на достатньо високому рівні.

У випадку вибуху на території котельні з ймовірністю 0,1 при наявності захисту устаткування з коефіцієнтом ймовірності 0,8, при сприятливих наступних подіях з відповідними P_i ймовірність збереження постачання теплом споживачів буде на рівні 0,018 (четверта знизу кінцева гілка дерева відмов).

Якщо ж пройтись по верхнім гілкам дерева подій, тобто по ймовірностям негативних розвитків подій, то мінімальне значення ймовірності наявності тепlopостачання буде в діапазоні від 0,0000072 до 0,00087 (відповідно сьома та вісімнадцята гілки зверху дерева відмов).

4. Висновки

Очевидно, що найбільш складною проблемою побудови дерева подій є об'єктивне визначення ймовірностей відмов різних елементів системи – P_i . Існують різні методи таких кількісних оцінок.

Досить ефективним методом оцінки показників надійності окремих елементів, чи систем в цілому є збір статистичних даних по частоті відмов на протязі тривалого періоду експлуатації. При відповідній математичній обробці отриманих даних можна визначати ймовірність відмови чи надійної роботи за визначений період роботи.

У випадках відсутності значної кількості накопичених статистичних даних при нетривалій експлуатації відповідного обладнання, його унікальності, або при використанні принципово нових систем з відсутністю досвіду їх використання, можна скористатись методом експертних оцінок. При цьому, важливим є підбір кваліфікованих експертів та відповідна обробка результатів з метою оцінки узгодженості їх думок через визначення коефіцієнту конкордації.

Представлені розрахункові методи оцінки міцності і надійності основних елементів устаткування застосовують виходячи з умов експлуатації, терміну роботи, властивостей використаних матеріалів і таке інше.

Ця частина кількісного визначення ризиків відмов технічних систем, особливо систем теплопостачання відповідальних споживачів першої категорії [5] є досить важливою та потребує окремого розгляду та аналізу.

Особистий внесок авторів CRediТ

Мазуренко А.С.: розробка методики. **Кандєєва В.В.:** аналіз отриманих результатів. **Чиченін В.В.:** складання дерева ймовірності подій. **Пустовіт А.В.:** збір статистичних даних, дослідження коефіцієнта стійкості системи теплопостачання; **Станіславов В.Д.:** аналіз літературних джерел.

Література

1. Про затвердження Порядку погодження Міністерством схем теплопостачання населених пунктів з кількістю жителів більш як 20 тисяч осіб та регіональних програм модернізації систем теплопостачання. Наказ № 403 від 08.08.2012. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1474-12>. (дата звернення 13.08.2025)
2. Про схвалення Концепції реалізації державної

- політики у сфері теплопостачання. Наказ № 569-р від 18.08.2017. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/569-2017-%D1%80>. (дата звернення 13.08.2025)
3. European Energy Security Strategy (Strategy No. 52014DC0330). URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52014DC0330> (дата звернення 13.08.2025)
 4. Small and medium cogeneration in district heating systems in Ukraine: Potential and benefits. URL: <https://energysecurityua.org/blogs/small-and-medium-cogeneration-in-district-heating-systems-in-ukraine-potential-and-benefits/> (дата звернення 13.08.2025)
 5. **Kumamoto H., Henley E.J.** Safety and Reliability Synthesis of Systems with Control Loops // *AIChE Journal*. – 1979. – Vol. 25. – P. 108-113.
 6. **Mazurenko A., Klymchuk O., Pozdniakova H., Pustovit A., Shavrov V.** Problems of ensuring reliable heat supply in conditions of unguaranteed electricity supply to heat-generating enterprises // *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. – 2024. – Vol. 69. – P. 23-31.
 7. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Теплові мережі. ДБНВ. 2.5-39:2008. – Київ, 2018.
 8. **Kurtov A. I., Polikashyn O. V., Potikhenskiy A. I., Aleksandrov V. M.** The “Delphi” method as a technology for management decision-making // *Collection of Scientific Papers of Kharkiv Air Force University*. – 2017. – Vol. (1). – P. 118-122.

Отримана в редакції 13.08.2025, прийнята до друку 29.08.2025

Risk assessment of providing reliable heat supply to consumers in conditions of external destruction

Anton Mazurenko^{1✉}, Vira Kandieieva², Vadym Chychenin³, Anatoly Pustovit⁴, Volodymyr Stanislavov⁵

¹⁻⁵National University "Odesa Polytechnic", 1 Shevchenko Ave., Odesa, 65044, Ukraine

✉ e-mail: ¹mazurenko@op.edu.ua

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-0165-3826>; ²<https://orcid.org/0000-0002-8707-0700>; ³<https://orcid.org/0000-0001-7772-7142>; ⁴<https://orcid.org/0009-0008-4320-953X>; ⁵<https://orcid.org/0009-0002-4512-2725>

The current conditions of operation of the heat and power complex in Ukraine require a careful approach not only to the energy efficiency of both the main equipment and the energy supply systems as a whole, but first of all, the issue of safety and reliability of their operation in extreme conditions becomes the most important. This is typical for both the energy complex, industrial enterprises and the municipal sector. One of the most important in the municipal sector is the heat supply of residential neighborhoods. The heat supply of residential complexes during the heating season has an important social component, which in turn affects the general state of the energy sector, industry and other important areas of the country's activity. This shows the importance of assessing the risks of failures of the heat supply system and its elements, as well as the possibilities and effectiveness of the system and its individual subsystems being reserved. The paper analyzes modern methods and approaches to determining the probability of failure of

both individual elements and the heat supply system as a whole. Based on the analysis of literary sources, the relationship between elements and events in the heat supply system is presented by a diagram of failures of heat supply systems as a result of destruction. Also, to assess the reliability of both individual elements and the heat supply system as a whole, an approach based on a "failure tree" was used, which corresponds to the methodology for assessing risks and causes of emergency states of a complex system. In this case, appropriate logical symbols are used that link events according to the causes that influence the occurrence of the event. For a specific heat supply system of a microdistrict of the city, a study was conducted based on the selected methods to determine the probability of failure of both individual elements of the heat supply system and the entire system in extreme conditions. The results obtained make it possible to assess the importance of collecting statistical data on the frequency of failures over a long period of operation of the heat supply system. The possibility of using the method of expert assessments in the absence of the required amount of statistical data accumulation is also demonstrated.

Keywords: Reliability of heat supply systems; Probability of failure of elements; Heat supply systems.

References

- (2012) Procedure for Approval by Minregion of Heat Supply Schemes for Settlements with a Population of More Than 20 thousand People and Regional Programs for Modernization of Heat Supply Systems (Order No. 403). Retrieved 13 August 2025 from <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1474-12>.
- (2017). Concept for the Implementation of State Policy in the Field of Heat Supply (Order No. 569-r). Retrieved 13 August 2025 from <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/569-2017-%D1%80>.
- (2014). European Energy Security Strategy (Strategy No. 52014DC0330). Retrieved 13 August 2025 from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52014DC0330>.
- (2023). Small and medium cogeneration in district heating systems in Ukraine: Potential and benefits. Retrieved 13 August 2025 from <https://energysecurityua.org/blogs/small-and-medium-cogeneration-in-district-heating-systems-in-ukraine-potential-and-benefits>
- Kumamoto, H., Henley, E.J. (1979) Safety and Reliability Synthesis of Systems with Control Loops. *AIChE Journal*, 25, 108-113.
- Mazurenko, A., Klymchuk, O., Pozdniakova, H., Pustovit, A., Shavrov, V. (2024). Problems of ensuring reliable heat supply in conditions of unguaranteed electricity supply to heat-generating enterprises. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, 69, 23-31.
- (2018) Engineering equipment of buildings and structures. External networks and structures. Heating networks. DBNV. 2.5-39:2008. Kyiv.
- Kurtov, A. I., Polikashyn, O. V., Potikhenskyi, A. I., Aleksandrov, V. M. (2017). The "Delphi" method as a technology for management decision-making. *Collection of Scientific Papers of Kharkiv Air Force University*, (1), 118-122.

Received 13 August 2025

Approved 29 August 2025

Available in Internet 30 September 2025