

## ОЦІНКА НАДІЙНОСТІ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ В ОПАЛЮВАЛЬНИЙ ТА НЕОПАЛЮВАЛЬНИЙ СЕЗОНИ РОКУ

*Державний вищий навчальний заклад  
«Криворізький національний університет», Україна*

*Пропонується обґрунтування розрахункової формули показника надійності теплової мережі на основі класичної теорії ймовірності.*

*Досліджено залежність показника надійності від конструктивних особливостей теплової мережі для опалювального та неопалювального сезонів року.*

**Постановка проблеми.** При експлуатації теплових мереж виникають аварійні ситуації, при яких відсутнє постачання тепла або всім абонентам, або певній їх частині. Для ліквідації аварій на пошкодженій ділянці теплової системи виконуються ремонтні роботи. Тривалість часу відключення споживачів тепла при ремонтах в середньому становить  $t_p \approx 5$  годин для трубопроводів  $D=100-200$  мм та  $t_p \approx 9,1$  години для трубопроводів  $D=250-400$  мм [1, 2]. При проектуванні теплових мереж слід передбачити таку їх конструкцію, при якій показник надійності  $R(t)$  буде не меншим, ніж його нормоване значення. Для систем теплопостачання від квартальних котелень та районних теплових котелень показник надійності приймають не менше  $R(t) > 0,85$ , а від ТЕЦ –  $R(t) > 0,9$ . За розрахункове значення часу  $t$  приймають тривалість опалювального сезону ( $t \approx 0,50-0,56$  року).

**Аналіз основних досліджень і публікацій.** Дослідження надійності теплових мереж студенти спеціальності «Теплогазопостачання і вентиляція» виконують при розробці магістерських робіт та дипломних проектів. Методика оцінки надійності теплових мереж викладена в підручнику [2]. Однак, при ознайомленні з цією методикою виникають певні труднощі з ряду причин. По-перше, обґрунтування розрахункових формул в підручнику базується на теорії графів та тензорному численні, які студенти вказаної спеціальності не вивчають. По-друге, приклади розрахунків подані в стислому вигляді і без достатніх коментарів, що також викликає ряд запитань. По-третє, тепла мережа експлуатується і в неопалювальний сезон року (дещо з меншою потужністю), але відсутня оцінка показника надійності для цього періоду року. Перераховані причини і викликали необхідність написання даної роботи.

**Формулювання цілей та завдання статті.** Методику оцінки надійності теплових мереж пропонується обґрунтувати на основі класичної теорії ймовірності, сутність якої студентам відома з курсу вищої математики [3]. В такому випадку більш наочно ілюструється отримання кінцевої розрахункової формули показника надійності  $R(t)$ .

**Основна частина.** Показник надійності  $R(t)$  теплової системи, яка пропрацювала протягом часу  $t$ , визначається за формулою

$$R(t) = \frac{Q(t)}{Q_0} = \frac{[Q_0 - \Delta Q(t)]}{Q_0}, \quad (1)$$

де  $Q_0$  – проектна потужність теплової мережі, МВт;  $Q(t)$  – відпуск тепла споживачам за час  $t$ , МВт;  $\Delta Q(t)$  – недопостачання тепла при  $j=1,2 \dots k$  аварійних ситуаціях, МВт.

Аварійні ситуації обумовлені сукупністю  $\lambda_{j,i}$  ( $i=1,2 \dots r_j$ ) потоків відмов елементів теплової мережі при  $j$ -тій ситуації: трубопроводів разом з компенсаторами, засувок. Через імовірний характер виникнення відмови елементів мереж, розрахунок недоотримання тепла  $\Delta Q(t)$ , МВт здійснюється за допомогою методів теорії імовірності

$$\begin{aligned} \Delta Q(t) &= \frac{(\Delta Q_1(t) \cdot \lambda_{1i} + \Delta Q_2(t) \cdot \lambda_{2i} + \dots + \Delta Q_k(t) \cdot \lambda_{ki}) \cdot F(\lambda t)}{\sum \lambda_i} = \\ &= \frac{(\sum \Delta Q_j \cdot \lambda_{ji}) \cdot F(\lambda t)}{\sum \lambda_i}, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\sum \lambda_i$  – сума відмов усіх елементів теплової системи при всіх аварійних ситуаціях;  $F(\lambda t)$  – функція імовірності відмов елементів, проявлення яких відповідає закону Пуассона, вигляд якої буде вказано нижче.

Імовірність  $m=(0;1)$  відмов за час  $t$  в простому потоку подій відповідно до формули Пуассона дорівнює

$$P_m(\lambda t) = \frac{(\lambda t)^m \exp(-\lambda t)}{m!}. \quad (3)$$

Імовірність  $P_m(\lambda t)$  того, що за час  $t$  не спостерігається жодної відмови  $m=0$  (трапляється нуль відмов) одного елемента мережі, становить

$$P_0(\lambda t) = \frac{(\lambda t)^0 \exp(-\lambda t)}{0!} = \exp(-\lambda t). \quad (4)$$

Теплова мережа буде працювати в безаварійних ситуаціях, якщо всі елементи теплової мережі будуть в безумовній ситуації, тобто події  $\lambda_1 t, \lambda_2 t, \dots, \lambda_r t$  відбуваються одночасно.

Відповідно з теоремою множення імовірностей одночасних незалежних подій отримано

$$P_0[\lambda_1 t; \lambda_2 t; \dots; \lambda_r t] = \exp(-\lambda_1 t) \cdot \exp(-\lambda_2 t) \cdot \dots \cdot \exp(-\lambda_r t) = \exp(-\sum \lambda_i t). \quad (5)$$

В аварійній ситуації теплова мережа буде в тому випадку, якщо буде відмова хоча б одного елемента мережі. Функція такої події буде дорівнювати

$$F(\lambda t) = 1 - P_0(\lambda_1 t \dots \lambda_r t) = 1 - \exp(-\sum \lambda_i t). \quad (6)$$

Параметри  $\lambda_i$ , рік<sup>-1</sup> потоків відмов розраховуються наступним чином. Відмова одного теплопроводу протягом одного року довжиною в 1 км характеризується величиною  $\omega_m=0,05$  (км рік)<sup>-1</sup>, а відмова засувки – величиною  $\omega_s=0,002$  рік<sup>-1</sup>. Для  $j$ -тої аварійної ситуації або  $i$ -тої ділянки двотрубною мережі (включаючи і відгалуження) довжиною  $l_i$  параметр відмов обох трубопроводів буде дорівнювати

$$\lambda_{j,i} = 2 \cdot \omega_m \cdot l_i = 0,1 \cdot l_i. \quad (7)$$

Якщо на  $i$ -тій ділянці тепломережі при  $j$ -тій аварійній ситуації розташовано  $n_i$  засувок на певному трубопроводі, то параметр  $\lambda_{j,i}$ , рік<sup>-1</sup> розраховується аналогічно

$$\lambda_{j,i} = 2 \cdot \omega_3 \cdot n_i = 0,004 \cdot n_i. \quad (8)$$

В загальному випадку потік відмов усіх елементів теплової мережі дорівнює сумі відмов кожного елемента, рік<sup>-1</sup>

$$\lambda_{\Sigma} = \sum \omega_i = \sum (0,1 \cdot l_i + 0,004 \cdot n_i). \quad (9)$$

Таким чином, з урахуванням залежностей (2), (9) формула (1) для розрахунку показника надійності  $R(t)$  має наступний вигляд

$$R(t) = \frac{Q(t)}{Q_0} = 1 - [1 - \exp(-\lambda_{\Sigma} t)] \cdot [\sum \Delta Q_j(t) \lambda_{j,i}] \cdot (Q_0 \lambda_{\Sigma})^{-1}. \quad (10)$$

Для більш жорсткої оцінки показника надійності роботи теплової мережі (без урахування впливу секційних засувок) використовується залежність

$$R_m(t) = \exp(-\sum 0,1 \cdot l_i t). \quad (11)$$

В якості прикладів приведені розрахунки показника надійності  $R(t)$  теплової мережі, що має дві однотипні магістралі по п'ять ділянок на кожній з них. Розрахункова схема приведена на рис. 1.

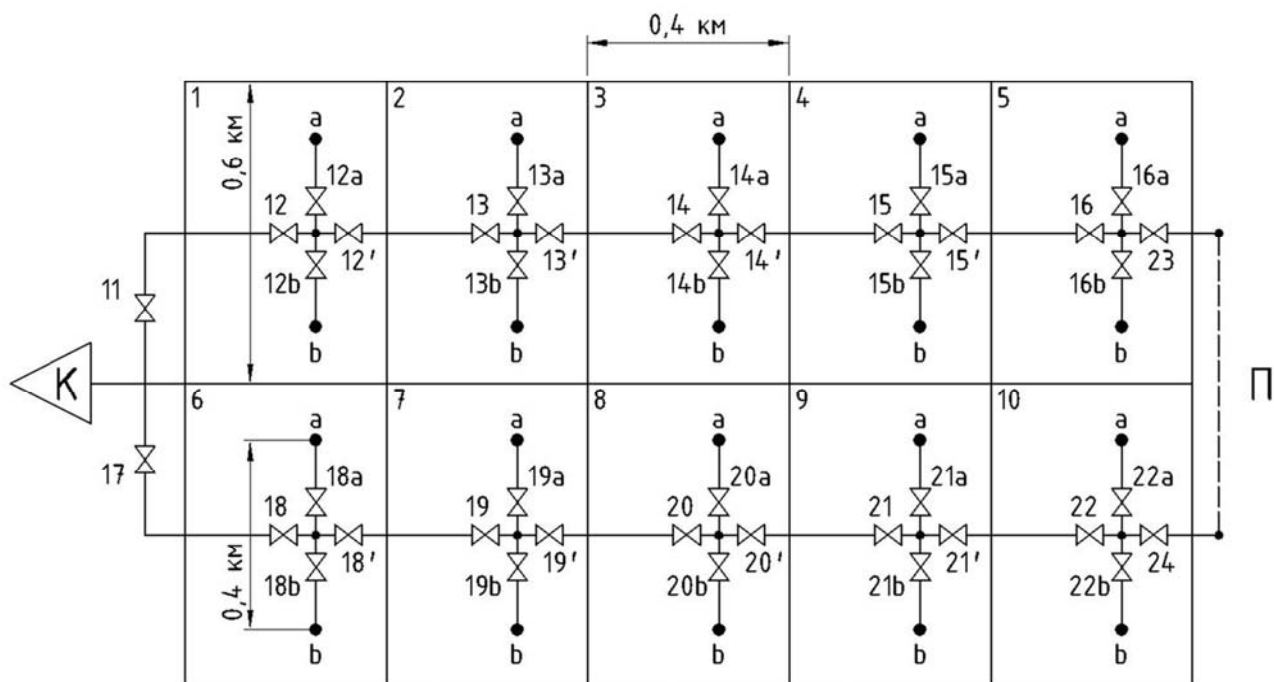


Рис. 1. Розрахункова схема теплової мережі:

К – районна котельня або ТЕЦ; 11, 17 – засувки головного вузла двох магістралей («гілок») двотрубною тепловою мережі; 1-10 – території ділянок теплової мережі; 12-16, 18-22 – головні секційні засувки на теплопроводах (варіанти 1 та 4); а ● —, б ● — – квартальні контрольно-розподільчі пункти (КРП); П – перемичка з засувками 23, 24 (варіанти 2 та 5); 12'-15', 18'-21' – додаткові секційні засувки; 12a-12b, ..., 22a-22b – засувки на трубопроводах відгалужень (варіанти 3 та 6).

Основні вихідні дані наступні: проектна теплова потужність мережі – 200 МВт; на 10 ділянках розташовані 20 квартальних контрольно-розподільчих пунктів (КРП) з тепловою потужністю по 10 МВт; протяжність подавальних і зворотних ліній кожної ділянки із врахуванням відгалужень до КРП становить  $l_i=0,8$  км; оцінка аварійних ситуацій здійснюється за час  $t \approx 0,56$  року (опалювальний сезон).

Варіант 1. Теплова мережа не закільцьована (відсутня перемичка П); на подавальному та зворотному теплопроводах встановлені тільки секційні засувки 12-15 та 18-21; на головному вузлі встановлені засувки 11 та 17 (по 2 шт.).

Порядок розрахунку наступний.

За формулою (7) розраховується потік відмов на теплопроводах однотипових ділянках мережі, рік<sup>-1</sup>

$$\lambda_{j,i} = 2 \cdot 0,05 \cdot 0,8 = 0,08,$$

а за формулою (8) – потік відмови головного вузла, рік<sup>-1</sup>

$$\lambda_{j,i} = 4 \cdot 0,002 = 0,008,$$

а також секційних засувок кожної ділянки, рік<sup>-1</sup>

$$\lambda_{j,i} = 2 \cdot 0,002 = 0,004.$$

В залежності від відмови ділянки чи головних і секційних засувок оцінюють недоотримання тепла  $\Delta Q_j(t)$  при  $j$ -тій аварійній ситуації.

Результати розрахунку занесені в табл. 1.

Таблиця 1.

Розрахунок параметрів  $\lambda_{j,i}$ ,  $\Delta Q_j(t)$ ,  $\Delta Q_j(t) \cdot \lambda_{j,i}$  (варіант 1)

№ елемента, що відмовив (ділянки)	Потік відмов елемента $\lambda_{j,i}$ , рік <sup>-1</sup>	Недоотримання тепла $\Delta Q_j(t)$ , МВт	$\Delta Q_j(t) \cdot \lambda_{j,i}$ , МВт/рік	№ елемента, що відмовив (засувки)	Потік відмов елемента $\lambda_{j,i}$ , рік <sup>-1</sup>	Недоотримання тепла $\Delta Q_j(t)$ , МВт	$\Delta Q_j(t) \cdot \lambda_{j,i}$ , МВт/рік
1	0,08	100	8,0	11	0,004	100	0,40
2	0,08	80	6,4	12	0,004	100	0,40
3	0,08	60	4,8	13	0,004	80	0,32
4	0,08	50	4,0	14	0,004	60	0,24
5	0,08	20	1,6	15	0,004	40	0,16
6	0,08	100	8,0	17	0,004	100	0,40
7	0,08	80	6,4	18	0,004	100	0,40
8	0,08	60	4,8	19	0,004	80	0,32
9	0,08	50	4,0	20	0,004	60	0,24
10	0,08	20	1,6	21	0,004	40	0,16
	$\Sigma=0,8$		$\Sigma=49,6$		$\Sigma=0,04$		$\Sigma=3,04$

На основі розрахунків, що занесені в табл. 1, обчислено

$$\lambda_{\Sigma} = 0,8 + 0,04 = 0,84 \text{ рік}^{-1},$$
$$\Sigma Q_j(t) \cdot \lambda_{j,i} = 49,6 + 3,04 = 52,64 \text{ МВт/рік.}$$

За формулою (10) розраховується показник надійності  $R_l(0,56)$  за час  $t=0,56$  року

$$R_l(0,56) = 1 - [1 - \exp(-0,84 \cdot 0,56)] \cdot 52,64 / (0,84 \cdot 200) = 0,882.$$

В тому випадку, коли на ділянках будуть відсутні секційні засувки, показник надійності на основі залежності (11) буде становити

$$R_m(0,56) = \exp[-(0,1 \cdot 0,8 \cdot 10) \cdot 0,56] = \exp(-0,448) \approx 0,64.$$

Аналіз результатів розрахунків показує, що коли тепла мережа підключена до районної котельні, то її показник надійності задовольняє вимогам мінімального значення  $0,882 > 0,85$ . Якщо тепла мережа буде підключена до промислової опалювальної котельні або до ТЕЦ, то показник надійності нижчий, ніж це необхідно  $0,882 < 0,9$ . При відсутності секційних засувок надійність теплових мереж буде невисокою  $R_m(0,56) = 0,64$ , що вказує на доцільність обладнання теплової мережі засувками.

Варіант 2. Оцінимо зміну показника надійності при кільцюванні двох магістралей перемичкою П довжиною  $l_n = 0,6$  км (див. рис. 1), на якій встановлені засувки 16 та 22 з потоком відмов,  $\text{рік}^{-1}$

$$\lambda_{j,i} = 2 \cdot 0,002 = 0,004,$$

а на головних магістралях встановлено секційні засувки 12-15 та 18-21.

При відмові одного з трубопроводів ділянки (*a* чи *b*) недоотримання тепла складає 20 МВт, а при відмові секційної засувки – недопостача буде дорівнювати 40 МВт (будуть відключені дві ділянки). Необхідні розрахунки варіанту 2 занесені в табл. 2.

Сума потоку відмов всіх елементів теплової мережі разом з перемичкою П

$$\lambda_{\Sigma} = 0,8 + 0,044 = 0,844 \text{ рік}^{-1},$$

а сума добутків  $\Delta Q_j(t) \cdot \lambda_{j,i}$  становить

$$\Sigma Q_j(t) \cdot \lambda_{j,i} = 16,0 + 3,04 = 19,04 \text{ МВт/рік.}$$

Показник надійності відповідно з формулою (10)

$$R_2(0,56) = (1 - [1 - \exp(-0,844 \cdot 0,56)] \cdot 19,04) / (0,844 \cdot 200) = 0,958.$$

Показник надійності теплової мережі, яка запроєктована за варіантом 2, досить високий ( $0,958 > 0,9$ ), але при такій конструкції можуть знаходитися в аварійній ситуації або дві ділянки (відмова секційних засувок), або одна діляниця (відмова одного з теплопроводів ділянки).

Варіант 3. Системою обв'язки кожного вузла трубопроводів на ділянках 1-10 засувками в кількості 8 (наприклад, 12, 12', 12a, 12b на кожному трубопроводі), разом з перемичкою П можливо досягти найбільшої надійності роботи теплової мережі. У випадку аварії буде відключений лише один КРП з потужністю 5,0 МВт. За такою схемою кожний вузловий споживач (КРП) буде приєднаний до двох сусідніх ділянок, і при відмові одного з трубопроводів ділянки магістралі споживач отримує тепло від сусідніх ділянок. Відсутність

Таблиця 2.

Розрахунки параметрів  $\lambda_{j,i}$ ,  $\Delta Q_j(t)$ ,  $\Delta Q_j(t) \cdot \lambda_{j,i}$ 

№ елемента, що відмовив (ділянки)	Потік відмов елемента $\lambda_{j,i}$ , рік <sup>-1</sup>	Недоотримання тепла $\Delta Q_j(t)$ , МВт	$\Delta Q_j(t) \cdot \lambda_{j,i}$ , МВт/рік	№ елемента, що відмовив (засувки)	Потік відмов елемента $\lambda_{j,i}$ , рік <sup>-1</sup>	Недоотримання тепла $\Delta Q_j(t)$ , МВт	$\Delta Q_j(t) \cdot \lambda_{j,i}$ , МВт/рік
1	0,08	20	1,6	11, 17	0,004	200	1,6
2	0,08	20	1,6	12	0,004	40	0,16
3	0,08	20	1,6	13	0,004	40	0,16
4	0,08	20	1,6	14	0,004	40	0,16
5	0,08	20	1,6	15	0,004	40	0,16
6	0,08	20	1,6	18	0,004	40	0,16
7	0,08	20	1,6	19	0,004	40	0,16
8	0,08	20	1,6	20	0,004	40	0,16
9	0,08	20	1,6	21	0,004	40	0,16
10	0,08	20	1,6	16, 22	0,004	40	0,16
	$\Sigma=0,8$		$\Sigma=16,0$		$\Sigma=0,044$		$\Sigma=3,04$

теплопостачання на одному з КРП викликана відмовою або однієї із засувок вузла приєднання або однієї труби відгалуження. У зв'язку з тим, що засувки і відгалуження приєднані послідовно, параметр потоку відмов вузла дорівнює сумі потоків відмов його елементів.

Розрахунок параметра потоку відмов вузла  $\lambda_g$  при довжині відгалужень в 0,4 км та наявності 8 засувок дає значення

$$\lambda_g = 0,002 \cdot 8 + 2 \cdot 0,05 \cdot 0,4 = 0,056 \text{ рік}^{-1}.$$

До відмови системи теплопостачання приводять наступні аварійні ситуації: 1) відмова головного вузла засувок 11, 17 з потоком відмов  $\lambda_3=4 \cdot 0,002=0,008$  та недоотримання тепла  $\Delta Q_j(t)=Q_0=200$  МВт; 2) відмова довільного вузла приєднання одного (а чи б) із споживачів (КРП) з потоком відмов  $\lambda_g=0,056$  та недоотримання тепла  $\Delta Q=5,0$  МВт (таких ситуацій 10).

Сума параметрів потоку відмов буде складати

$$\lambda_{\Sigma} = 0,008 + 0,056 \cdot 10 = 0,568 \text{ рік}^{-1}.$$

Значення  $\Sigma Q_j(t) \cdot \lambda_{j,i}$  розраховується

$$\Sigma Q_j(t) \cdot \lambda_{j,i} = 10 \cdot 5,0 \cdot 0,056 + 200 \cdot 0,008 = 4,4 \text{ МВт/рік}.$$

Показник надійності теплової мережі  $R_3(0,56)$  відповідно до залежності (10) дорівнює

$$R_3(0,56) = 1 - [1 - \exp(-0,568 \cdot 0,56)] \cdot 4,4 / 0,568 \cdot 200 = 0,989.$$

Таким чином, ненадійність експлуатації теплової мережі варіанту 3 в порівнянні з варіантом 2, зменшилась в  $(1-0,958)/(1-0,989)=4,0$  рази, а в порівнянні з тепломережею варіанту 1 зменшилась в  $(1-0,882)/(1-0,989)=11,18$

рази. При проектуванні і будівництві теплової мережі за варіантом 3 (з перемичкою та обв'язкою вузлів секційними та резервуючими засувками) можливі аварійні ситуації, пов'язані з ушкодженням трубопроводів, але при безвідмовній роботі засувок аварія на трубопроводах не призведе до недоотримання тепла споживачами.

Для «літнього» періоду роботи теплової мережі протягом  $t=0,44$  року розглянуті варіанти  $1^s, 2^s, 3^s$ , які аналогічні варіантам 1, 2, 3. Відмінність полягає також в зміні загальної потужності теплової мережі від  $Q_0=200$  МВт до значення  $Q_0^s=50$  МВт. В результаті розрахунків отримані наступні значення показників надійності  $R_1^s(0,44)=0,903$ ;  $R_2^s(0,44)=0,965$ ;  $R_3^s(0,44)=0,986$ .

З метою отримання більшого масиву даних значень показника надійності  $R(t)$ , нижче наведені результати прикладів розрахунку, які запозичені з підручника [2]. В прикладах розглянута більш потужна тепла система з котельнею (ТЕЦ) потужністю  $Q_0=1000$  МВт. Конструктивна схема теплової мережі аналогічна схемі, зображеній на рис. 1. Довжина ділянок 1-10 складає  $l_m=1$  км для кожного трубопроводу (подавального та зворотного). Довжина кожного відгалуження ( $a$  чи  $b$ ) складає  $l_g=0,5$  км. Потік відмов для довгих трубопроводів прийнято  $w_m=0,1$  (км·рік)<sup>-1</sup>, для засувок –  $w_s=0,002$  рік<sup>-1</sup>. Для опалювального періоду роботи теплової мережі її конструктивні варіанти позначено як 4, 5, 6, а для «літнього» періоду року як  $4^s, 5^s, 6^s$ . Отримані результати досліджень наведені в табл. 3.

Таблиця 3.

Значення показника надійності теплових мереж в залежності від конструкції та періоду (сезону) року

Варіант конструкції	1	2	3	4	5	6
Потужність, $Q_0$ , МВт	200	200	200	1000	1000	1000
Показник $R_i(0,56)$	0,882	0,958	0,989	0,730	0,908	0,973
Варіант конструкції	$1^s$	$2^s$	$3^s$	$4^s$	$5^s$	$6^s$
Потужність $Q_0^s$ , МВт	50	50	50	250	250	250
Показник $R_i^s(0,44)$	0,903	0,965	0,986	0,740	0,914	0,977

Результати розрахунків, які наведені в табл. 3, показують, що значення показника надійності має наступний характер його зміни:

а) з ускладненням конструкції теплової мережі показник надійності  $R(t)$  зростає ( $R_1(t)<R_2(t)<R_3(t)$ ;  $R_4(t)<R_5(t)<R_6(t)$ ) як для опалювального періоду, так і для «літнього» періоду;

б) порівняно короткі за протяжністю теплові системи з середньою потужністю мають більшу надійність, ніж довгі та великопотужні теплові мережі ( $R_1(t)>R_4(t)$ ;  $R_2(t)>R_5(t)$ ;  $R_3(t)>R_6(t)$ );

в) при однаковій конструкції теплової мережі в «зимовий» та «літній» періоди роботи мають майже однакові значення показників надійності ( $R_i(0,56) \approx R_i^s(0,44)$ ) при  $i=1, 2, \dots, 6$ .

**Висновки.** Проведені дослідження (табл. 3) дозволяють сформулювати наступні практичні рекомендації:

1. При проектуванні і будівництві теплових мереж бажано здійснювати кільцювання окремих гілок теплової мережі за допомогою перемичок і обладнанням вузлів трубопроводів по одній секційній засувці на кожний трубопровід (варіанти 2 та 5).

2. Для забезпечення практично безвідмовної роботи двотрубної теплової мережі кожен з вузлів трубопроводів (подавальний та зворотній теплопроводи) бажано облаштувати двома секційними засувками та двома засувками на кожне відгалуження (варіанти 3 та 6).

3. Підвищення надійності роботи теплових мереж, що досягається кільцюванням гілок мережі та її повним секціюванням, дозволяє забезпечити безперебійне постачання теплової енергії абонентам і зменшити енергетичні витрати теплоносія при усуненні аварій на окремій ділянці теплопроводу, а також скоротити час перезапуску тепломережі на повну потужність.

### **Література**

1. *ДСТУ-Н Б В.3.2-3:2014*. Настанова з виконання термомодернізації житлових будинків / Мінрегіон України. – К. : 2014. – 71 с.

2. *Ионин А. А.* Теплоснабжение / *А. А. Ионин, Б. М. Хлыбов, В. Н. Братенко, Е. Н. Терлецкая.* – М. : Стройиздат, 1982. – 336 с., ил.

3. *Медведев М. Г.* Теорія ймовірностей та математична статистика: підручник / *М. Г. Медведев, І. О. Пащенко.* – К. : «Ліра-К», 2008. – 536 с.

### **ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ В ОТОПИТЕЛЬНЫЙ И НЕОТОПИТЕЛЬНЫЙ СЕЗОНЫ ГОДА**

*Голышев А. М., Денгуб В. И., Денгуб Т. В., Филонова К. А.*

Предлагается обоснование расчетной формулы показателя надежности тепловой сети на основе классической теории вероятности.

Исследована зависимость показателя надежности от конструктивных особенностей тепловой сети для отопительного и неотапительного сезонов года.

### **EVALUATION OF RELIABILITY OF THERMAL NETWORKS OF HEATING AND NON-HEATING SEASONS**

*Alexander M. Golyshev, Vitaly I. Dengub, Timur V. Dengub, Katherine A. Filonova*

Proposed justification of the formulas of the reliability of the heat network on the basis of the classical theory of probability.

The dependence of the reliability index from the constructional features of the heat network for heating and non-heating seasons.