

УДК 628.14

Новохатній В. Г., д.т.н., доцент (Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка)

ЗВ'ЯЗОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ КІЛЬЦЕВИХ СТРУКТУР

Показано зв'язок та можливість обчислення показників надійності.

Ключові слова: кільцеві структури, надійність.

Аналіз останніх досліджень. Проблема оцінювання надійності кільцевих водопровідних мереж не має остаточного вирішення до цього часу. Серед останніх досліджень слід вказати на роботи А.Я. Найманова [1] та Є.М. Гальперіна [2]. Пропозиція автора [3] зводиться до поділу процесу проєктування кільцевих водопровідних мереж на два етапи. На першому етапі вибирається структура кільцевої мережі максимальної надійності, а на другому – виконуються гідравлічні і техніко-економічні розрахунки. Під структурою кільцевої мережі розуміється безмасштабна схема кільцевої водопровідної мережі, яка зберігає взаємнооднозначну відповідність зв'язків між вузлами реальної мережі та вузлами на схемі.

При розрахунках надійності кільцевих мереж спочатку було проаналізовано [3] базові структури мереж: одна ділянка, послідовно поєднані ділянки, паралельні ділянки та мішана структура. У теорії надійності доказано, що мішана структура не може бути представлена ні послідовно-паралельною структурою, ні паралельно-послідовною, ні будь-якою комбінацією послідовного чи паралельного поєднання елементів. Графічне зображення математичної моделі надійності інженерних мереж показано на рис. 1.

Постановка завдання та виклад основного матеріалу досліджень. Розглянемо дві властивості надійності: безвідмовність і ремонтпридатність. Працездатний стан водопровідної мережі – це її здатність забезпечувати подачу води визначеної якості всім споживачам води у необхідній кількості й під потрібним напором впродовж заданого часу. Згідно з [4] “споживач питної води – це юридична або фізична особа, яка використовує питну воду для забезпечення фізіологічних, санітарно-гігієнічних, побутових та господарських потреб”. У разі, коли розглядається водопостачання будинку, споживачем питної води буде “фізична особа”, яку підприємство “Водоканал” називає “абонент”. Якщо аналізувати зовнішню магістральну водопровідну

мережу міста, то потрібно виконати укрупнення, а в якості споживачів питної води розглядати мікрорайони міста. Тоді можна, як і при гідравлічному розрахунку, умовно вважати, що розбирання води укрупненими споживачами відбувається у вузлах кільцевої мережі та зробити такі визначення.

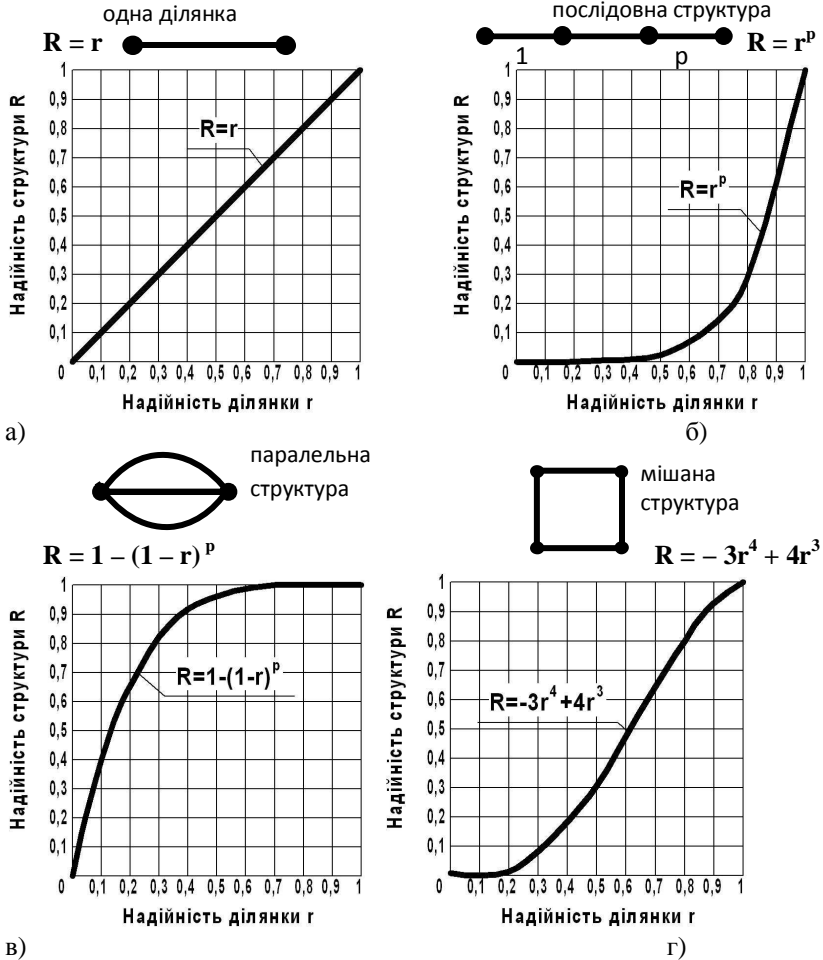


Рис. 1. Графіки функцій надійності структур інженерних мереж

Працездатний стан – стан структури кільцевої мережі, коли всі вузли мережі з'єднані між собою працездатними ділянками. Це можуть бути як циклічні структури, так і циклічні структури з окремими відгалуженнями. **Граничний працездатний стан** – стан структури кільцевої мережі, коли всі вузли мережі поєднані ділянками, які утворюють покривне дерево структури мережі. **Непрацездатний стан** – стан структури кільцевої мережі, коли хоча б один із вузлів структури мережі відокремлений. **Критерій відмови** – наявність у структурі кільцевої мережі хоча б одного відокремленого вузла. **Відмова** – момент відокремлення будь-якого вузла структури кільцевої мережі. Критерієм відмови для перших трьох структур є відсутність шляху для руху води від початкового до кінцевого вузла. Для цих структур працездатними вважається такий стан, коли існує шлях для руху води від початкового до кінцевого вузла. Для мішаної структури такий критерій відмови недостатній, адже вода повинна надходити до всіх вузлів одночасно. Математичною моделлю надійності мішаної структури, яка моделює кільцеву водопровідну мережу, запропоновано [3] поліном степені p

$$R = a_1 r^p + a_2 r^{p-1} + \dots + a_n r^{p-n+1} + T r^{p-n}, \quad (1)$$

де $r_1 = r_2 = \dots = r_p$ – надійність ділянок; p – число ділянок; n – число кілець структури; T – число покривних дерев; a_i – коефіцієнти полінома.

Суміщення графіків (рис. 2) дозволяє виявити граничну точку P_{zp} (r_{zp} ; R_{zp}), яка визначає таку граничну надійність ділянки r_{zp} , що використання при структурному резервуванні ділянок з меншою надійністю призводить до зменшення надійності структури мережі і, навпаки, якщо надійність ділянки більше граничної надійності ($r > r_{zp}$), то надійність структури збільшиться ($R > r$).

Процес функціонування у часі відновлюваних елементів, якими є ділянки мережі, може розглядатись як потік випадкових подій. У математичних моделях часто використовують **найпростіший потік (простейший потік (рос.))**, який стаціонарний, тобто однорідний у часі; не має післядії – відмови відбуваються незалежно одна від одної; ординарний – відмови відбуваються поодиноці, а не парами, трійками. Кількісною характеристикою потоку відмов приймають параметр потоку відмов $\omega(t)$. Для найпростішого потоку проміжок часу між відмовами має експоненціальний розподіл, а середнє значення параметра потоку відмов ω визначає кількість відмов за одиницю часу. Імовірність безвідмовної роботи обчислюється за формулою

$$P(t) = \exp[-\omega t], \quad (2)$$

де t – відрізок часу, за який обчислюється $P(t)$.

Для відновлюваних елементів, функціонування яких представляє найпростіший потік, можна обчислити стаціонарний коефіцієнт готовності

$$K_G = T / (T + T_B), \quad (3)$$

де T , T_B – відповідно, середнє напрацювання на відмову та середній час відновлення працездатності.

Для найпростішого потоку виконується умова $\omega = 1/T$. Тоді $P(t) = \exp[-t/T]$; $\ln P(t) = -t/T$; $T = -t/\ln P(t)$. З формули (3) $T_B = T(1 - K_G)/K_G$.

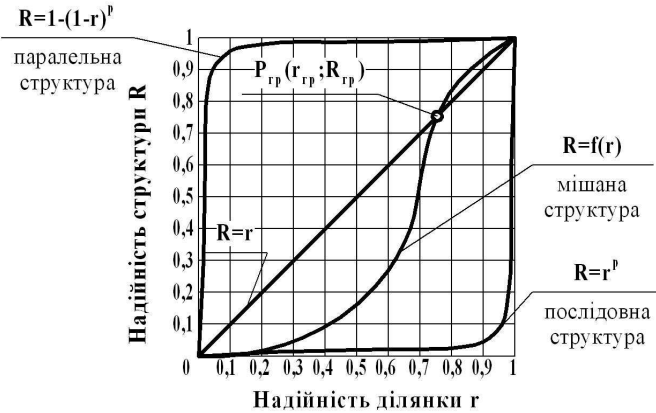


Рис. 2. Сумісний графік функцій надійності структур водопровідних мереж

Покажемо на прикладі структури кільцевої мережі те, як можна обчислити базові показники надійності T і T_B , якщо відомі показники надійності окремих ділянок мережі. Розглянемо кільце водопровідної мережі з чотирьох ділянок та чотирьох вузлів (рис. 1, г). Формула надійності такої структури $R = -3r^4 + 4r^3$, а точка граничної надійності $r_{zp} = 0,768$.

Прийнемо напрацювання на відмову ділянки 1 рік $T = 8760$ год, а середній час відновлення працездатності ділянки $T_B = 12$ год. Тоді ймовірність безвідмовної роботи ділянки впродовж року складає

$$r = \exp[-8760/8760] = e^{-1} = 0,3679.$$

Коефіцієнт готовності ділянки $k_G = 8760/8772 = 0,9986$. Імовірність безвідмовної роботи кільця мережі впродовж одного року дорівнює $R = -3 \cdot 0,3679^4 + 4 \cdot 0,3679^3 = 0,14422$, а середнє напрацювання на відмову становить $T = -8760/\ln 0,14422 = -8760/-1,9364 = 4523,8$ год.

Коефіцієнт готовності кільця мережі складе $K_G = -3 \cdot 0,9986^4 + 4 \cdot 0,9986^3 = 0,999988$, а середній час відновлення працездатності структури дорівнює $T_B = 4523,8(1 - 0,999988) / 0,999988 = 0,054$ год ≈ 3 хв.

Виконані обчислення вказують на те, що:

– ймовірність того, що з початку і до кінця року у кільці мережі не відбудеться відмова, низька і дорівнює всього 0,144; ймовірність відмови висока і складає 0,856;

– ймовірність того, що у довільний момент часу кільце мережі знаходиться у працездатному стані, надзвичайно висока і дорівнює 0,999988; ймовірність того, що у довільний момент часу хоча б один з вузлів кільця буде відокремленим, надзвичайно мала і складає всього 0,000012.

Отже, ймовірність безвідмовної роботи кільця зменшилась, тому що ймовірність безвідмовної роботи ділянки менше граничної надійності $r < r_{zp}$ ($0,3679 < 0,768$), а коефіцієнт готовності кільця збільшився, тому що коефіцієнт готовності ділянки більше граничної надійності $k_G > r_{zp}$ ($0,9986 > 0,768$).

Прийmemo напрацювання на відмову ділянок 5 років $T = 43800$ год. Тоді ймовірність безвідмовної роботи ділянки впродовж року складе

$$r = \exp[-8760/43800] = e^{-0,2} = 0,8187.$$

Ймовірність безвідмовної роботи кільця мережі впродовж року дорівнює

$$R = -3 \cdot 0,8187^4 + 4 \cdot 0,8187^3 = 0,8472.$$

Отже, ймовірність безвідмовної роботи кільця R більша ніж ймовірність безвідмовної роботи ділянки r ($0,8472 > 0,8187$), тому що ймовірність безвідмовної роботи ділянки r більша, ніж гранична надійність r_{zp} ($0,8187 > 0,768$).

Можна визначити граничну величину напрацювання на відмову ділянки мережі таку, щоб ймовірність безвідмовної роботи кільця зростала

$$\ln 0,768 = -8760/T; T = 33186 \text{ год} = 3,79 \text{ року.}$$

Якщо напрацювання на відмову ділянки T буде більше ніж 3,79 року ($T > 3,79$), то ймовірність безвідмовної роботи впродовж року кільця мережі R буде більше ніж 0,768 ($R > 0,768$).

Розглянемо ситуацію, коли коефіцієнт готовності ділянки менше граничної надійності $r_{zp} = 0,768$ ($k_G < 0,768$). Наприклад, напрацювання на відмову ділянки мережі T складає 1 місяць ($T = 720$ год), а середній час відновлення працездатності ділянки мережі 10 днів ($T_B = 240$ год). Тоді коефіцієнт готовності ділянки $k_G = 720/(720+240) = 0,75$. Коефіцієнт готовності кільця мережі дорівнює $K_G = -3 \cdot 0,75^4 + 4 \cdot 0,75^3 = 0,7383$.

У цьому разі коефіцієнт готовності кільця K_{Γ} став меншим за коефіцієнт готовності ділянки k_{Γ} ($0,7383 < 0,75$).

За прийнятим критерієм відмови найбільшу надійність мають структури, які містять у собі найбільшу надійність кілець трикутної форми. Викликано це тим, що значення граничної надійності кільця трикутної форми складає $r_{zp} = 0,5$, а для структури, яка складається тільки з кілець трикутної форми та в якій всі вузли пов'язані між собою ділянками (“повний граф”) $r_{zp} = 0,4$ (рис. 3).

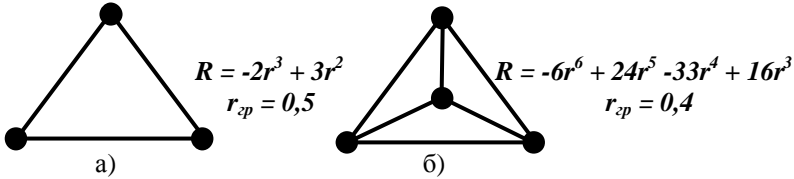


Рис. 3. Рівняння надійності для структур трикутної форми

Нехай напрацювання на відмову ділянки складає 1,5 року $T = 13140$ год, а середній час відновлення працездатності ділянки $T_B = 12$ год. Тоді ймовірність безвідмовної роботи впродовж одного року ділянки дорівнює

$$r = \exp[-8760/13140] = e^{-0,67} = 0,5117.$$

Коефіцієнт готовності ділянки $k_z = 13140/13152 = 0,9991$. Імовірність безвідмовної роботи впродовж одного року одного кільця трикутної форми (рис. 2а) дорівнює $R = -2 \cdot 0,5117^3 + 3 \cdot 0,5117^2 = -0,2680 + 0,7855 = 0,5175$. Отже, ймовірність безвідмовної роботи трикутного кільця збільшилась ($0,5175 > 0,5117$), тому що ймовірність безвідмовної роботи ділянки $r = 0,5117$ більша за граничну надійність структури $r_{zp} = 0,5$. Зрозуміло, що коефіцієнт готовності трикутного кільця буде значно більшим за коефіцієнт готовності ділянки, тому що коефіцієнт готовності ділянки $k = 0,9991$ значно більший за граничну надійність структури $r_{zp} = 0,5$.

Перевіримо вказаний принцип визначення надійності для трикутної структури, яка представлена повним графом (рис. 2б). Якщо прийняти напрацювання на відмову ділянки 1 рік $T = 8760$ год, то ймовірність безвідмовної роботи ділянки впродовж одного року дорівнює $r = e^{-1} = 0,3679$. Імовірність безвідмовної роботи структури “повний граф” складає

$$R = -6 \cdot 0,3679^6 + 24 \cdot 0,3679^5 - 33 \cdot 0,3679^4 + 16 \cdot 0,3679^3 = 0,33905.$$

Отже, якщо надійність ділянки r менше за граничну надійність r_{zp} ($0,3679 < 0,4$), то надійність структури R менше надійності ділянки

(0,33905<0,3679).

Висновки:

1. Коефіцієнт готовності має невисоку чутливість, тому в розрахунках пропонується використовувати базові показники надійності – середнє напрацювання на відмову T та середній час відновлення працездатності T_B .

2. Точка граничної надійності r_{gr} ефективний критерій для вибору кращої за надійністю структури кільцевої водопровідної мережі.

1. Найманов А. Я. Особенности оценки надежности кольцевой водопроводной сети / А. Я. Найманов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2006. – № 12. – С. 11-16. 2. Гальперин Е. М. Совершенствование расчетной модели функционирования кольцевой водопроводной сети / Е. М. Гальперин // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – № 2. – С. 51-54. 3. Новохатний В. Г. Надійність функціонування подавально-розподільного комплексу систем водопостачання: дис. ... докт. техн. наук: 05.23.04 / Новохатний Валерій Гаврилович. – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – 351 с. 4. Закон України «Про питну воду та питне водопостачання» № 2918-III від 10.01.2002.

Рецензент: д.т.н., професор Орлов В. О. (НУВГП)

Novohatnii V. G., Doctor of Engineering, Professor (Yuri Kondratyuk Poltava National Technical University)

PARAMETERS OF RELIABILITY OF CIRCULAR STRUCTURE CONNECTION

The connection and the possibility of calculating the reliability indices is shown.

Keywords: ring structures, reliability.

Новохатний В. Г., д.т.н., професор (Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка)

СВЯЗЬ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КОЛЬЦЕВЫХ СТРУКТУР

Показана связь и возможность расчета показателей надежности.

Ключевые слова: кольцевые структуры, надежность.