

*В.Г. Усенко, к.т.н., доцент
В.Г. Новохатний, д.т.н., професор
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка
О.І. Кретович, генеральний директор
Комунальне підприємство Полтавської обласної ради «Полтававодоканал»*

ОЦІНЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ СТРУКТУРИ ВОДОПРОВІДНОЇ МЕРЕЖІ м. ПОЛТАВА

Проаналізовано надійність структури магістральної водопровідної мережі м. Полтава та приведено результати аналізу. Побудовано аналітичні вирази оцінювання надійності структури, обраховано чисельні значення всіх станів та працездатних станів зокрема. Обчислено надійність структури мережі для трьох окремих районів магістральної водопровідної мережі. Отримано числові значення граничної надійності структури.

Ключові слова: водопровідна мережа, структура мережі, надійність структури, теорія графів.

*В.Г. Усенко, к.т.н., доцент
В.Г. Новохатний, д.т.н., профессор
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка
О.И. Кретович, генеральный директор
Коммунальное предприятие Полтавского областного совета «Полтававодоканал»*

ОЦЕНИВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СТРУКТУРЫ ВОДОПРОВОДНОЙ СЕТИ г. ПОЛТАВА

Проаналізована надійність структури магістральної водопровідної мережі г. Полтава, і приведені результати аналізу. Побудовані аналітичні вирази оцінювання надійності структури, визначені чисельні значення всіх станів і працездатних станів. Обчислена надійність структури мережі для трьох окремих районів магістральної водопровідної мережі. Отримані числові значення граничної надійності структури.

Ключевые слова: водопроводная сеть, структура сети, надежность структуры, теория графов.

*V. Usenko, PhD, Associate Professor
V. Novokhatniy, ScD, Professor
Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University
O. Kretovich, director general
Communal enterprise «Poltavavodokanal» of the Poltava regional soviet*

EVALUATION THE RELIABILITY OF THE STRUCTURE OF WATER NETWORK FOR s. POLTAVA

The concept of structure and the reliability of the structure from the point of the graph theory was introduced; was determinated the workable conditions and inefficient conditions

of reliability and built the polynomials of reliability. The results of reliability analysis structures water network of Poltava was shown. The reliability of structures for three separate areas of the network was calculated. Numerical values obtained reliability boundary.

Keywords: *water network system, network structure, reliability of structure, theory of the graphs.*

Вступ. Протягом усього періоду функціонування водопровідної мережі населеного пункту існує необхідність її реконструкції. Надійність кожної ділянки впливає на рівень надійності структури мережі, яка може як підвищуватися, так і знижуватися, що у свою чергу впливає на працездатність системи водопостачання у цілому. Аналіз надійності структури мережі завжди актуальний для планування розвитку та реконструкції мережі міста.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Шляхи розв'язання проблеми надійності окремих споруд зазначені в роботах з надійності систем водопостачання [1, 2, 8, 9] та водогосподарських об'єктів [3]. Проте реальні рішення були складними й громіздкими для застосування в практиці проектування та експлуатації таких споруд, у тому числі й водопровідних мереж, або призначалися для простих задач.

Виділення не розв'язаних раніше частин загальної проблеми. У дослідженні [4] запропоновано розділити процес проектування водопровідних мереж на два етапи, а саме: на першому етапі виконувати оцінювання надійності побудови структури (трасування) мережі, а на другому етапі – гідравлічні розрахунки мережі. Проте рішення з надійності були отримані тільки для елементарних структур мереж.

Постановка завдання. Завдання полягає у викладенні методу оцінювання надійності структури водопровідної мережі на прикладі магістральної водопровідної мережі м. Полтава.

Основний матеріал і результати. Відповідно до системного аналізу [5], структура системи – це стійка впорядкованість у просторі й у часі її елементів та зв'язків. Стосовно водопровідної мережі введемо таке поняття: структура водопровідної мережі – це стійка впорядкованість у просторі й у часі споживачів та джерел водопостачання, які пов'язані між собою трубопроводами. Структура водопровідної мережі створюється на першому етапі проектування мережі, а саме – на етапі трасування, тобто накреслення її на плані населеного пункту. У гідравлічних розрахунках водопровідної мережі застосовується математична модель, яка передбачає відбори води споживачами у вузлах мережі, пов'язаних між собою ділянками труб визначених довжини, діаметра та матеріалу.

У такому представленні деякій кількості споживачів відповідають вузли мережі, а зв'язкам між вузлами – ділянки труб мережі. При абстрагуванні, коли ще не відомі величини витрат води на ділянках мережі, діаметри труб, довжини ділянок і вузлові відбори води, мережа моделюється графом. Граф мережі – це топологічна структура, яка не змінює своїх властивостей при будь-яких перетвореннях, крім розривів та поєднань (склеювань).

Водопровідна мережа, як будь-який технічний об'єкт, має таку важливу властивість, як надійність. Форма мережі значною мірою впливає на процес її функціонування. Тому першою має бути задача оцінювання надійності саме структури водопровідної мережі з використанням методів теорії графів та теорії ймовірностей. Надійність не може бути розрахована без такого фундаментального поняття, як «відмова». Процес функціонування мережі у часі поділяється на два потоки: потік послідовних випадкових відрізків часу роботи і потік послідовних випадкових відрізків часу відновлення. Відповідно до цього відмовою є миттєвий перехід із робочого

(працездатного) стану в неробочий (непрацездатний), а відновлення – це миттєвий перехід із непрацездатного стану в працездатний.

За накресленням у плані мережі можуть мати розгалужену, замкнену (кільцеву) та комбіновану (кільцеву з відгалуженнями) форму. За структурою водопровідні мережі можна поділити на послідовні, паралельні й мішані. Найпростішою структурою є один елемент – одна ділянка мережі. Критерієм відмови для одієї ділянки, послідовного та паралельного поєднання ділянок є відсутність шляху для руху води від початкового до кінцевого вузла. Для мішаної структури, яка має форму кільця, цей критерій застосувати неможливо, тому що вода подається від початкового вузла до всіх інших вузлів одночасно, тобто паралельно. У цьому випадку працездатним станом буде такий, коли існує покривне дерево мережі – це граф, у якому кожна пара вузлів з'єднана ділянкою. А непрацездатним станом буде той, за наявності котрого покривного дерева не існує. У такий спосіб усі стани структури мережі можна поділити на дві множини: працездатні стани (покривне дерево існує) і непрацездатні стани (структура незв'язна). Імовірність існування кожного стану визначається за формулою Я. Бернуллі, яка при однаковій надійності ділянок дозволяє отримати поліном, що характеризує надійність структури. Показником надійності може бути ймовірність безвідмовної роботи або коефіцієнт готовності.

Значення функції надійності структури, яка включає в себе всього один елемент (рис. 1, а), дорівнює надійності цього елемента при всіх значеннях аргумента $0 \leq r \leq 1$. Графік функції $R=f(r)$ буде мати форму прямої $R=r$ (рис. 1, б).

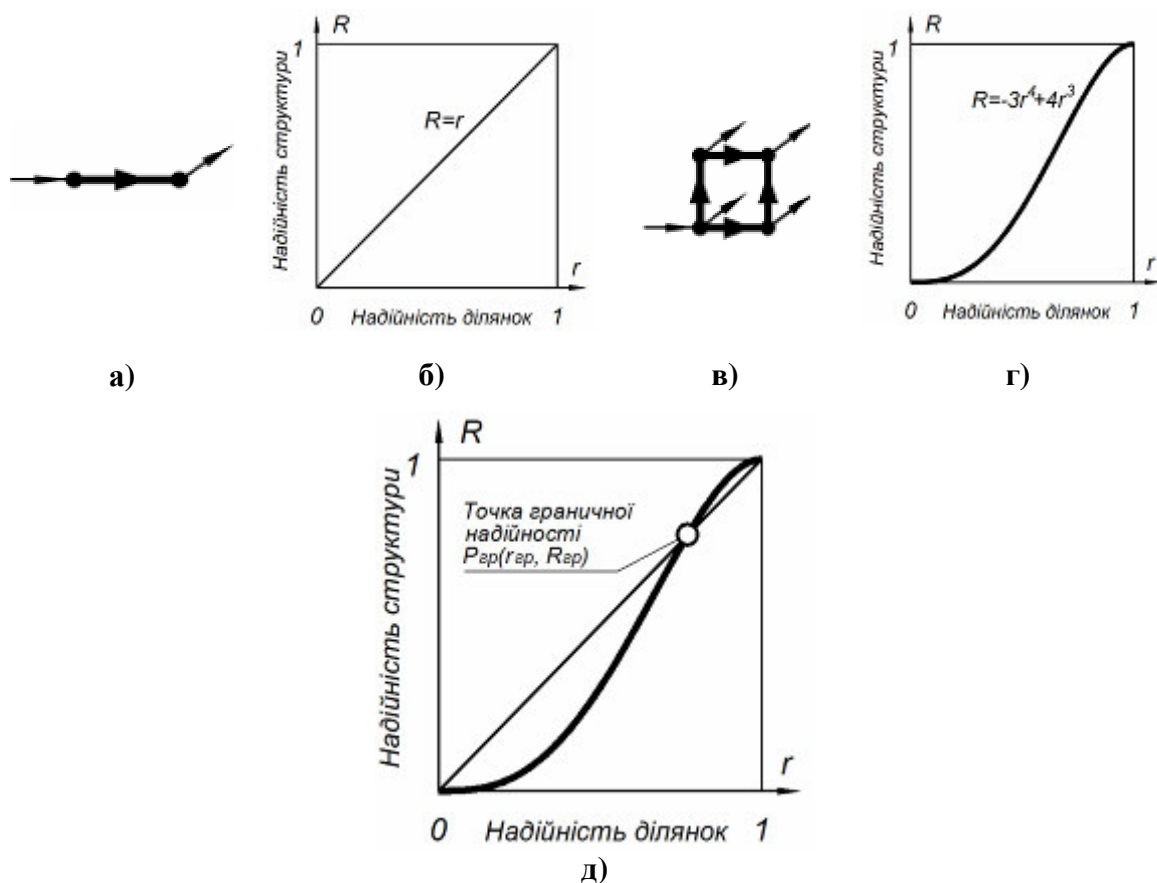


Рис. 1. Представлення надійності: а – одна ділянка в структурі; б – графік функції надійності структури з однієї ділянки; в – мішана структура; г – графік функції надійності мішаної структури; д – сумісний графік функцій

Надійність мішаної структури, яка моделює кільцеву водопровідну мережу, описується функцією у вигляді полінома $R=f(r)$ (рис. 1, в)

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

де p – число ділянок структури; n – число кілець структури; T – число покривних дерев структури; a_i – коефіцієнти полінома. Коефіцієнти a дорівнюють числу розкладення структури на елементи без кілець [6]. Число членів полінома дорівнює числу кілець структури на одиницю більше, тобто $n+1$. Побудова залежності (1) реалізована в алгоритмі та комп'ютерній програмі [7]. Графік функції $R=f(r)$ знаходиться в області з граничними кривими $R=r^p$ і $R=1-(1-r)^p$.

Точка перетину графіків функцій $R=r$ і $R=f(r)$ (рис. 1, д) визначає таке значення граничної надійності ділянки r_{zp} , що використання при структурному резервуванні ділянок з меншою, ніж r_{zp} , надійністю призводить до зменшення надійності структури мережі, й при цьому завжди буде $R < r$. І навпаки, використання ділянок з більшою надійністю, ніж гранична $r > r_{zp}$, завжди призводить до збільшення надійності структури мережі, й тоді завжди буде виконуватися нерівність $R > r$. Отже, чим менше значення r_{zp} , тим суттєвішим є вплив топології структури мережі на її надійність. Це означає, що саме таке поєднання ділянок мережі є найкращим, тому що при однакових значеннях надійності ділянок r для всієї можливої множини структур саме така топологія забезпечує найбільшу надійність структури мережі.

Проаналізуємо структуру магістральної водопровідної мережі м. Полтава (рис. 2). На рисунку позначено номери ділянок та вузлів мережі (у колах), чорними крапками на ділянках показано місця поділу мережі на окремі райони.

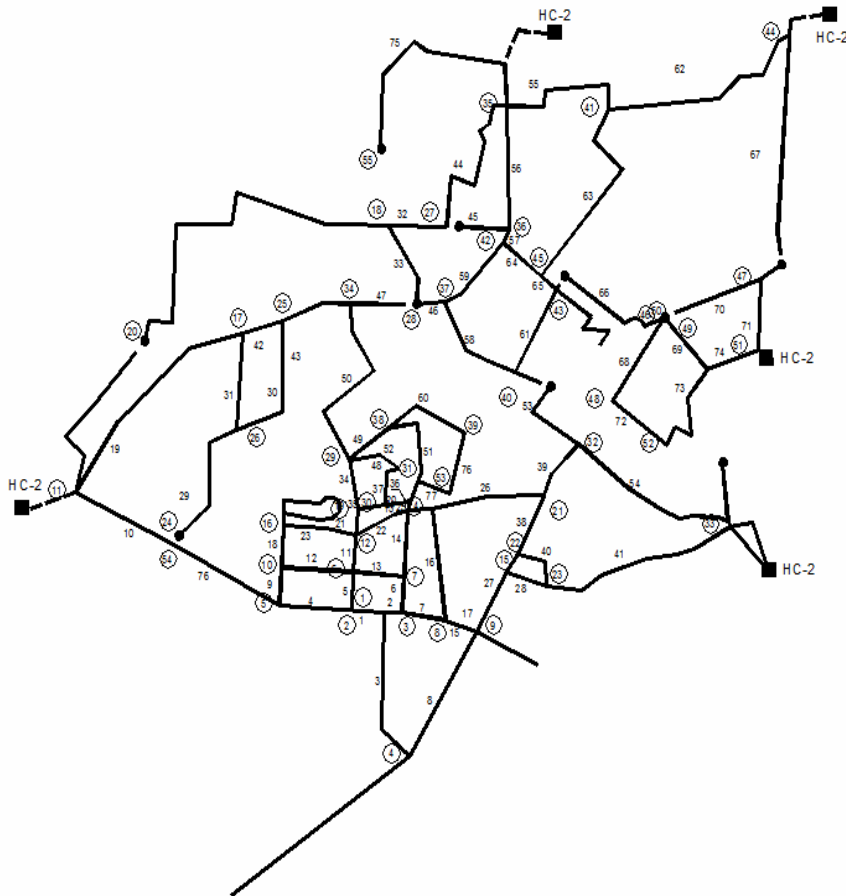


Рис. 2. Структура магістральної водопровідної мережі м. Полтава

Для поліпшення керованості мережі утворено три райони, а саме: зона впливу 1-го водозабору, зона впливу 2-го й 4-го водозаборів; зона впливу 3-го й 5-го водозаборів. У зоні впливу 1-го водозабору магістральна водопровідна мережа м. Полтава та її структура має найбільш просту форму (рис. 3, 4).

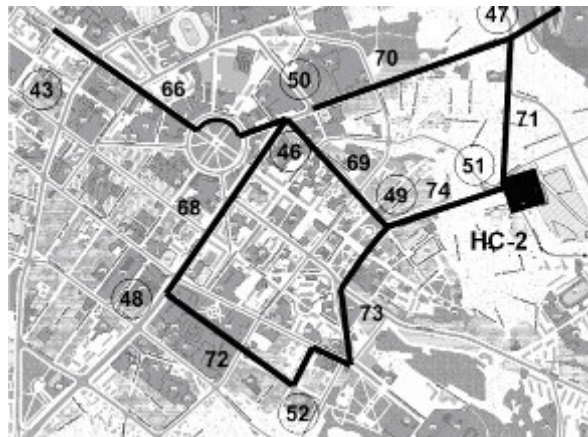


Рис. 3. План водопровідної мережі для зони 1-го водозабору

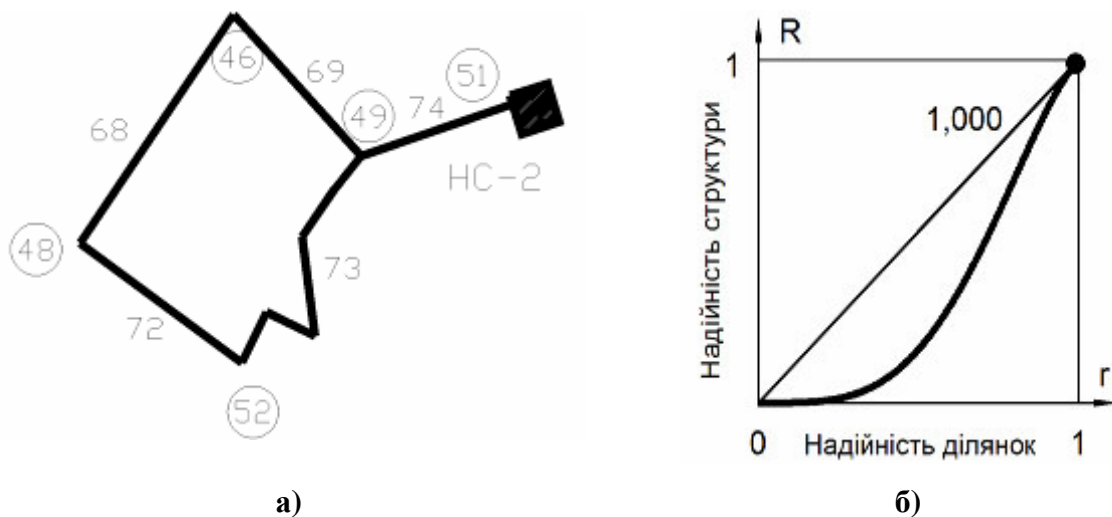


Рис. 4. Структура мережі (а) та графік функції надійності (б) для зони 1-го водозабору

Структура має такі числові характеристики: кількість ділянок $p=5$, кілець $n=1$, число вузлів $m=5$. Рівняння надійності структури

$$R = -3r^5 + 4r^4. \quad (2)$$

Точка граничної надійності для цієї структури 1,000 (рис. 4, б). Число працездатних станів структури – 6, число всіх станів – 32.

План водопровідної мережі в зоні 3-го й 5-го водозаборів показана на рисунку 5, структура мережі та графік функції надійності – на рис. 6.

Числові характеристики структури мережі: число вузлів $m=10$, число ділянок $p=12$, число кілець $n=3$. Рівняння надійності структури мережі у зоні 3-го та 5-го водозабору

$$R = -62r^{12} + 222r^{11} - 267r^{10} + 108r^9. \quad (3)$$

Структура має 179 працездатних станів із 4096. Значення граничної надійності $r_{zp}=0,9004$.

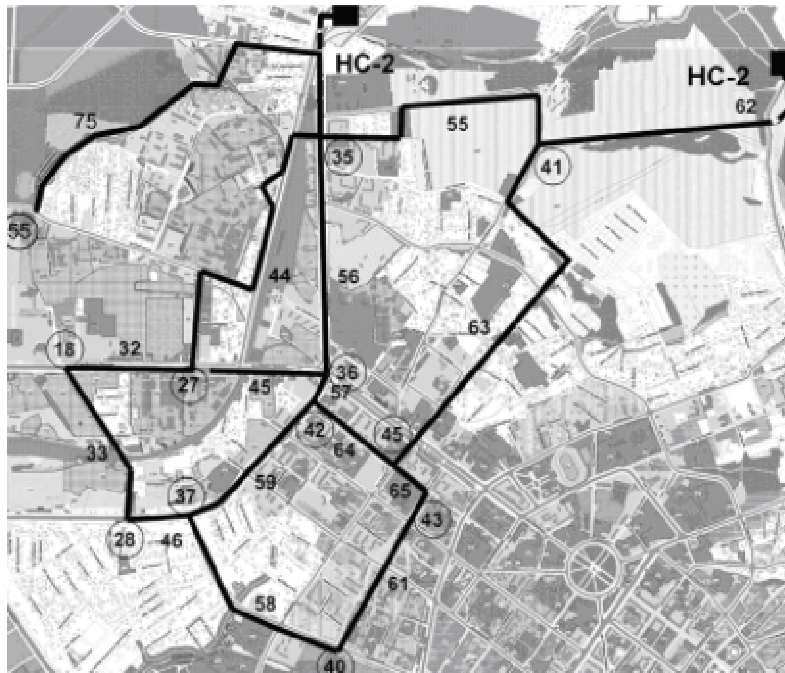


Рис. 5. План мережі для зони 3-го та 5-го водозаборів

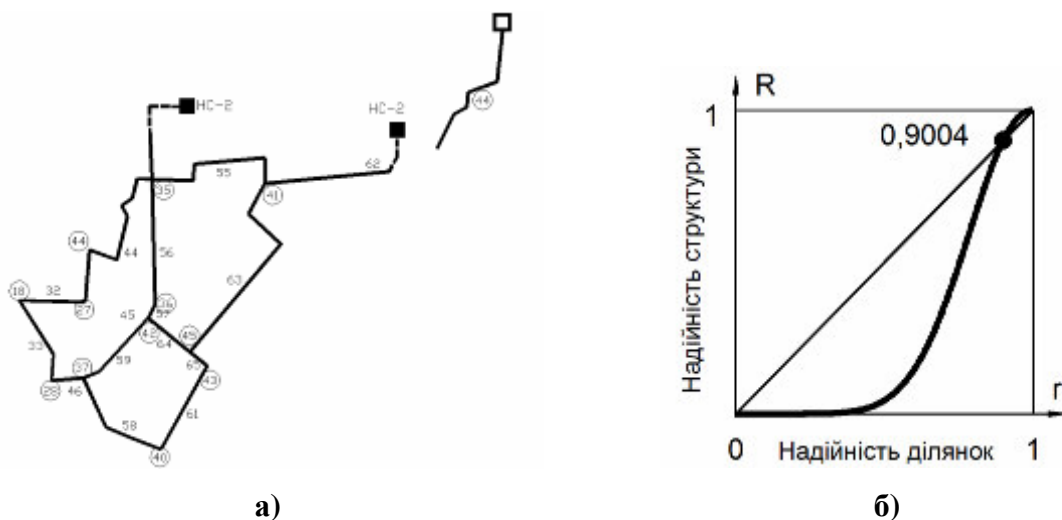


Рис. 6. Структура мережі (а) та графік функції надійності для зони 3-го та 5-го водозаборів (б)

Магістральна водопровідна мережа у зоні 2-го й 4-го водозаборів має складну планувальну та топологічну структури (рис. 7). Числові характеристики структури: число ділянок $p=35$, число вузлів $m=23$ і число кілець $n=13$. Побудована формула надійності структури магістральної водопровідної мережі для зони 2-го й 4-го водозаборів має вигляд полінома 35-го степеня

$$\begin{aligned}
 R = & -528736r^{35} + 8570848r^{34} - 64230848r^{33} + 294683012r^{32} - \\
 & -923533856r^{31} + 2088090964r^{30} - 3504533098r^{29} + 4421250184r^{28} - \\
 & -4193273909r^{27} + 2953407510r^{26} - 1501727688r^{25} + 522118001r^{24} - \\
 & -111273281r^{23} + 10980898r^{22}.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Значення граничної надійності структури $r_{gp} = 0,9001$. Число всіх станів – 34359738368, число всіх працездатних станів – 164623488. Число граничних працездатних станів – 10980898. Структура мережі та графік функції наведені на рисунку 8.

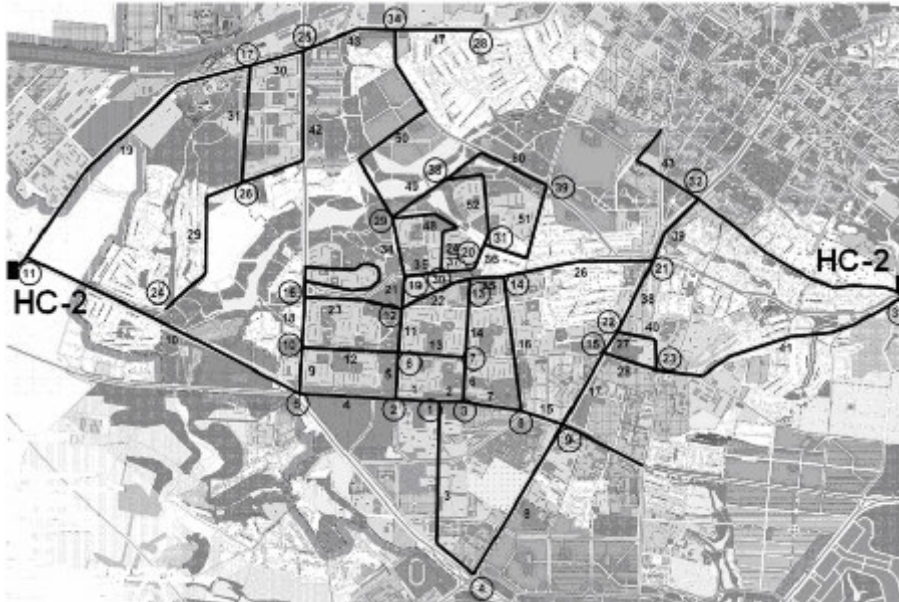


Рис. 7. План мережі для зони 2-го та 4-го водозаборів

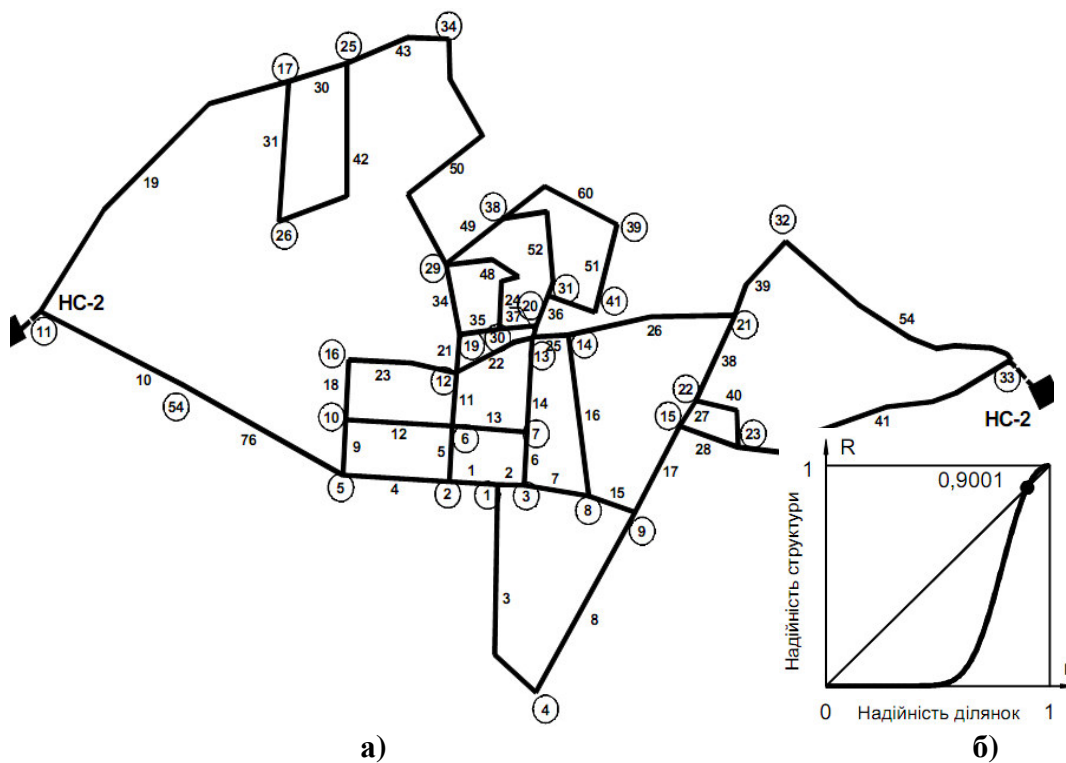


Рис. 8. Структура мережі (а) та графік функції надійності (б) для зони 2-го та 4-го водозаборів

Висновки. Аналіз надійності структури магістральної водопровідної мережі м. Полтава показує, що її надійність може бути підвищена. Отримані рівняння надійності структури мережі мають той недолік, що передбачається однакова надійність ділянок мережі. У дійсності ділянки мережі мають різну надійність, але у такому випадку поліном надійності отримати неможливо. Розроблені алгоритми і програми для ПЕОМ дозволяють одержати у цьому разі числову оцінку надійності.

Література

1. Абрамов Н.Н. Надежность систем водоснабжения / Н.Н. Абрамов. – М.: Стройиздат, 1979. – 231 с.
2. Ильин Ю.А. Расчет надежности подачи воды / Ю.А. Ильин. – М.: Стройиздат, 1987. – 320 с.
3. Науменко І.І. Оцінки надійності водогосподарських об'єктів / І.І. Науменко. – Рівне: НУВГП, 2006. – 182 с.
4. Новохатній В.Г. Надійність функціонування подавально-розподільного комплексу систем водопостачання: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук: спец. 05.23.04 – водопостачання, каналізація / В.Г. Новохатній. – К.: КНУБА, 2012. – 32 с.
5. Катренко А.В. Системний аналіз / А.В. Катренко. – Львів: Новий світ – 2011. – 396 с.
6. Райнішке К. Оценка надежности систем с использованием графов / К. Райнішке, И.А. Ушаков. – М.: Радио и связь, 1988. – 209 с.
7. Усенко, В.Г. Алгоритм побудови множини станів структури комунікаційної мережі / В.Г.Усенко // Прикладна геометрія та інженерна графіка: Міжвід. збірник наук. праць. – Вип. 85. – К.: КНУБА, 2010. – С. 216 – 220.
8. Ozger S. Optimal location of isolation valves in water distribution systems: a reliability / optimization approach / S. Ozger, L.W. Mays // Chapter 7. – P. 7.1 – 7.27. http://www.public.asu.edu/~lwadays/Ch07_Mays_144381-9.pdf.
9. Swamee P.K. Design of Water Supply pipe Networks / Prabhata K. Swamee, Ashok K. Sharma. – Wiley-Interscience, 2008. – 353 p. <http://bookodrom.ru/1589-prabhata-k-swamee-ashok-k-sharma-design-of-water.html>.

© В.Г. Усенко, В.Г. Новохатній, О.І. Кретович
Надійшла до редакції 26.01.2015