DOI: 10.32347/2412-9933.2026.65.181-187
УДК 519.6

Полтораченко Наталія Іванівна
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2238-6130
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна
Кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій проектування та прикладної математики

Теренчук Світлана Анатоліївна
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6527-4123
Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна
Кандидат фізико-математичних наук, професор, професор кафедри інформаційних технологій проектування та прикладної математики

Історія статті:
Надійшла: 24.01.2026
Прийнята: 25.02.2026
Опублікована: 26.03.2026

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПОЧАТКОВОГО ЕТАПУ ПРОЄКТУВАННЯ ІНЖЕНЕРНОЇ МЕРЕЖІ

Анотація. *Розв'язано задачу розподілу обсягів робіт за різними етапами спорудження чи реконструкції інженерних мереж з урахуванням сучасного стану систем комунального господарства. Задачу сформульовано з урахуванням умов невизначеності початкової інформації і перспективного розвитку інженерної мережі. Запропонована математична модель є задачею булевого програмування зі змінними у вигляді інтервальних чисел, що характеризують належність ділянок території проєктування до того чи іншого етапу спорудження чи реконструкції інженерної мережі. Задача розв'язується методами булевого програмування з урахуванням апарату інтервальної арифметики. Запропоновано два варіанти алгоритму пошуку компромісного розв'язку. На початку числові характеристики розраховуються на базі експертних висновків, що ставляться у відповідність до інтервальних коефіцієнтів. На наступному етапі вирішується задача редукції шляхом використання двох крайніх цільових функцій, що обмежують множину допустимих компромісних розв'язків. На базі проміжних результатів виділяються змінні, які приймають однакові значення. Значення цих змінних приймаються за остаточні та виводяться із цільової функції початкової моделі, що значно зменшує кількість змінних в моделі. До нової моделі з меншою кількістю булевих функцій та інтервальними коефіцієнтами цільової функції знову застосовується метод булевого програмування, який забезпечує найбільш ймовірний розв'язок. Якщо задача має розв'язок, то він є близьким до оптимального. Якщо задача не має розв'язку, то застосовуються методики нечіткого відношення переваг на множині альтернатив. Якщо на початку моделювання допускається зниження вимоги належності ділянки до відповідного етапу спорудження (реконструкції) інженерної мережі, то відбувається модифікація задач булевого програмування до частково-дискретного лінійного програмування, що дозволяє розширити критерії надання змінним остаточних значень та вилучення їх з цільової функції початкової моделі.*

Ключові слова: булева змінна; інженерна мережа; інтервальне число; компромісне рішення; математична модель; невизначеність; розподіл робіт

Вступ

Комунальна інфраструктура, складовими якої є системи водо-, тепло- і газопостачання, на частині території України характеризується як морально застаріла, оскільки знаходиться на межі фізичного зносу, а на частині території зруйнована через військові дії. І це на фоні збільшення обсягів використання цільового продукту (води, газу, теплоносіїв) в уже наявних системах, а також потреби подальшої газифікації і теплофікації територій і населених пунктів [1 – 3].

В таких умовах надзвичайно актуальними є завдання:

– забезпечення повного і надійного постачання цільового продукту всіх або (в умовах дефіциту) пріоритетних споживачів шляхом оперативного перерозподілу потоків цільового продукту з тим, щоб використання його наявної кількості в поточній ситуації забезпечило максимальний економічний і соціальний ефект;

– спорудження (реконструкція) інженерних мереж;

– транспортування і розподіл цільового продукту інженерними мережами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Задачі проєктування нових або реконструкції старих інженерних мереж є багатокритеріальними і багатовимірними. Вирішення таких задач вимагає формалізації невизначеності інформації, особливо на початкових етапах проєктування. Необхідність одночасного урахування детерміністських і динамічних даних – це чи не одна з головних проблем сучасного моделювання мереж комунального господарства [4].

Функціонально-динамічні схеми моделювання інженерних мереж розглянуто у статті [5].

Стохастичні моделі проектування інженерних мереж досліджено в роботі [6].

Застосування нечітких та інтервальних чисел і множин для відображення невизначеності інформації представлено в статтях [8-10].

В роботі [10] для території проєктування інженерних мереж $Y = \{Y_i \mid \forall\left(i \neq j\right)\left(\cup Y_i = Y\right) \wedge$ $\wedge\left(\left(Y_i \cap Y_j \neq \varnothing\right) \vee \left(Y_i \cap Y_j = \varnothing\right)\right), i, j = \overline{1,T}\}$ досліджується математична модель:

$$z = \sum_{i=1}^{T-1} \sum_{j=i+1}^{T} (K_{ij} y_{ij} + B_{ij} x_{ij} + R_{ij} y_{ij} + Z_{ij} x_{ij}) \to \min,$$

$$\sum_{j=i+1}^{T} \left(T_{ij} y_{ij} + P_{ij} x_{ij}\right) + \sum_{j=1}^{i-1} TR_{ij} y_{ij} \leq \sum_{k=1}^{i} \left(T_k^n - T_k^o\right),$$

$$i = \overline{1, T-1},\ x_{ij} + y_{ij} = 1, i, j = \overline{1, T},$$

де: Z – збитки від заморожування ресурсів; K та B – капітальні вкладення; R – витрати на реконструкцію; P та TR – об’єм труб; i та j – етапи спорудження (реконструкції); T – кількість цих етапів; x_{ij} та y_{ij} – булеві змінні, які приймають значення так, що:

– $x_{ij} = 0$, а $y_{ij} = 1$, якщо для ділянки Y_{ij} на етапі i роботи виконуються за планом для етапу i;

– $x_{ij} = 1$, а $y_{ij} = 0$, якщо для ділянки Y_{ij} на етапі i роботи виконуються за планом для етапу j.

При чому: K_{ij} – капітальні вкладення, що відповідають випадку $x_{ij} = 0$, $y_{ij} = 1$; R_{ij} – витрати на реконструкцію ділянки Y_{ij} при $x_{ij} = 0$, $y_{ij} = 1$; B_{ij} – капітальні вкладення, що відповідають випадку $x_{ij} = 1$, а $y_{ij} = 0$; Z_{ij} – збитки від заморожування ресурсів, якщо $x_{ij} = 1$, а $y_{ij} = 0$; T_{ij} – об’єм труб, що відповідає випадку $x_{ij} = 0$, а $y_{ij} = 1$; P_{ij} – об’єм труб, що відповідає випадку $x_{ij} = 1$, а $y_{ij} = 0$; T_k^n – об’єм труб, що відпускається для виконання робіт в період k; TR_{ij} – об’єм труб для реконструкції ділянки Y_{ij}; T_k^o – об’єм труб, якого потребує виконання робіт на території:

$$Y_k \setminus \left(\bigcup_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{T} \left(Y_{ij} \cup Y_{ji}\right) \right).$$

За такої умови розглядається випадок, коли за об’єми робіт «конкурують» два етапи, а сама «конкуренція» визначається через:

$$Y_{ij} = Y_i \cap Y_j, i = \overline{1, T-1},\ \ j = \overline{i+1, T}\ .$$

Цю задачу булевого програмування можна доповнити іншими критеріями якості і обмеженнями, що принципово не змінить її характер та можливість розв’язку одним з відомих класичних методів.

Оскільки вхідні дані задачі є результатом експертного аналізу, то дослідження щодо складу експертної групи, яке проведено в роботі [7], може бути актуальним для початкового етапу проєктування.

Формулювання мети статті

Метою роботи є формалізація задачі розподілу об’ємів робіт за різними етапами спорудження або реконструкції інженерних мереж з урахуванням перспективного розвитку мережі та невизначеності початкової інформації у вигляді інтервальних чисел.

Виклад основного матеріалу

Оскільки моделювання розподілу об’ємів робіт відбувається для початкового етапу проєктування, то в цій роботі пропонується розглянути коефіцієнти цільової функції у вигляді інтервальних чисел, а саме:

$$K_{ij} = \left[\underline{K_{ij}}; \overline{K_{ij}}\right], B_{ij} = \left[\underline{B_{ij}}; \overline{B_{ij}}\right],\ R_{ij} = \left[\underline{R_{ij}}; \overline{R_{ij}}\right],$$

$$Z_{ij} = \left[\underline{Z_{ij}}; \overline{Z_{ij}}\right],\ i, j = \overline{1, T}\ .$$

Такий підхід до формалізації задачі розподілу перетворює її на задачу булевого програмування з нескінченною кількістю цільових функцій.

Зупинимося на побудові числових проміжків.

Якщо джерелом інформації є одна експертна думка та всередині проміжку неможливо надати пріоритет відповідним значенням коефіцієнтів, то наведені експертним джерелом числові проміжки використовуються у подальшому дослідженні як коефіцієнти цільової функції. Проте відповідальність рішень, які приймаються на початкових етапах проектування, та їх суттєвий вплив на наступні етапи проєктування потребує урахування досвіду кількох експертів.

Задача побудови модифікованої гаусової інтервальної функції належності на базі кількох експертних думок розглядається в роботі [11] і спирається на центральну граничну теорему теорії ймовірності про збіг ймовірнісного розподілу суми випадкових величин у разі зростання їх кількості до гаусового розподілу із щільністю:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}),$$

де m та σ – математичне сподівання та середньоквадратичне відхилення випадкової величини. Тобто в цьому разі маємо справу з нечіткими числами.

Повертаємося до математичної моделі задачі розподілу об’ємів робіт. З огляду на суттєве ускладнення задачі, є сенс говорити не про оптимальний, а про компромісний розв’язок [12].

Найпростішим способом у цьому разі є вибір з кожного інтервалу числового значення, яке буде представляти цей проміжок.

При роботі з інтервальними числами (урахування думки одного експерта) такими числовими значеннями можуть бути середньоарифметичні кінців проміжків або в більш загальному випадку можливе використання розв’язувального правила Гурвіца:

$$K_{ij}^* = (1-\lambda_{K_{ij}})\underline{K_{ij}} + \lambda_{K_{ij}}\overline{K_{ij}},$$

$$B_{ij}^* = (1-\lambda_{B_{ij}})\underline{B_{ij}} + \lambda_{B_{ij}}\overline{B_{ij}},$$

$$R_{ij}^* = (1-\lambda_{R_{ij}})\underline{R_{ij}} + \lambda_{R_{ij}}\overline{R_{ij}},$$

$$Z_{ij}^* = (1-\lambda_{Z_{ij}})\underline{Z_{ij}} + \lambda_{Z_{ij}}\overline{Z_{ij}},$$

$$i, j = \overline{1,T},$$

де $\lambda_{K_{ij}}, \lambda_{B_{ij}}, \lambda_{R_{ij}}, \lambda_{Z_{ij}}$ – параметри важливості кінців інтервалів (при $\lambda_{K_{ij}}, \lambda_{B_{ij}}, \lambda_{R_{ij}}, \lambda_{Z_{ij}} = 1/2$, маємо справу з середньоарифметичними значеннями).

Під час роботи з нечіткими числами (урахування думок кількох експертів) роль «представників» числових значень виконують математичні сподівання: $K_{ij}^* = m_{K_{ij}}$, $B_{ij}^* = m_{B_{ij}}$, $R_{ij}^* = m_{R_{ij}}$, $Z_{ij}^* = m_{Z_{ij}}$, $i, j = \overline{1,T}$.

Тоді маємо задачу булевого програмування:

$$z^* = \sum_{i=1}^{T-1}\sum_{j=i+1}^{T}(K_{ij}^* y_{ij} + B_{ij}^* x_{ij} + R_{ij}^* y_{ij} + Z_{ij}^* x_{ij}) \to \min,$$

$$\sum_{j=i+1}^{T}\left(T_{ij}y_{ij} + P_{ij}x_{ij}\right) + \sum_{j=1}^{i-1}TR_{ij}y_{ij} \le \sum_{k=1}^{i}\left(T_k^n - T_k^o\right),$$

$$i = \overline{1,T-1},\ x_{ij} + y_{ij} = 1, i, j = \overline{1,T}.$$

За такої постановки задачі залишається відкритим питання урахування всього проміжку для кожного коефіцієнту, тому нескінченну множину цільових функцій доцільно звузити шляхом редукції до системи двох задач булевого програмування, розв’язки яких обмежують множину допустимих компромісних рішень:

$$z_{\min} = \sum_{i=1}^{T-1}\sum_{j=i+1}^{T}(\underline{K_{ij}} y_{ij} + \underline{B_{ij}} x_{ij} + \underline{R_{ij}} y_{ij} + \underline{Z_{ij}} x_{ij}) \to \min,$$

$$\sum_{j=i+1}^{T}\left(T_{ij}y_{ij} + P_{ij}x_{ij}\right) + \sum_{j=1}^{i-1}TR_{ij}y_{ij} \le \sum_{k=1}^{i}\left(T_k^n - T_k^o\right), \quad (1)$$

$$i = \overline{1,T-1},\ x_{ij} + y_{ij} = 1, i, j = \overline{1,T}.$$

та

$$z_{\max} = \sum_{i=1}^{T-1}\sum_{j=i+1}^{T}(\overline{K_{ij}} y_{ij} + \overline{B_{ij}} x_{ij} + \overline{R_{ij}} y_{ij} + \overline{Z_{ij}} x_{ij}) \to \min,$$

$$\sum_{j=i+1}^{T}\left(T_{ij}y_{ij} + P_{ij}x_{ij}\right) + \sum_{j=1}^{i-1}TR_{ij}y_{ij} \le \sum_{k=1}^{i}\left(T_k^n - T_k^o\right), \quad (2)$$

$$i = \overline{1,T-1},\ x_{ij} + y_{ij} = 1, i, j = \overline{1,T}.$$

На цьому етапі є сенс проаналізувати отримані розв’язки для задач із z^*, $z_{\min}$, $z_{\max}$. Значення змінних x_{ij} та y_{ij}, які співпадають у результатах всіх трьох задач, доцільно прийняти за остаточні, вивести їх з цільової функції початкової моделі, а в обмеженнях доданки з їх участю набудуть вигляду звичайних сталих.

Якщо з перших індексів змінних, значення яких залишилися невизначеними, утворити множину M_1, а з других індексів змінних – множину M_2, то нова математична модель матиме вигляд:

$$z_{\text{int}} = \sum_{i\in M_1}\sum_{j\in M_2}(\left[\underline{K_{ij}};\overline{K_{ij}}\right]y_{ij} + \left[\underline{B_{ij}};\overline{B_{ij}}\right]x_{ij} +$$

$$+\left[\underline{R_{ij}};\overline{R_{ij}}\right]y_{ij} + \left[\underline{Z_{ij}};\overline{Z_{ij}}\right]x_{ij}) \to \min,$$

$$\sum_{j=i+1}^{T}\left(T_{ij}y_{ij} + P_{ij}x_{ij}\right) + \sum_{j=1}^{i-1}TR_{ij}y_{ij} \le \sum_{k=1}^{i}\left(T_k^n - T_k^o\right),$$

$$i = \overline{1,T-1},\ x_{ij} + y_{ij} = 1, i, j = \overline{1,T}.$$

Отримана задача булевого програмування з інтервальними коефіцієнтами цільової функції.

Зменшення кількості булевих змінних збільшує шанси на розв’язування задачі із застосуванням апарату інтервальної арифметики:

$$A \in \left[\underline{A}; \overline{A} \right], B \in \left[\underline{B}; \overline{B} \right],$$

$$A + B = \left[\underline{A} + \underline{B}; \overline{A} + \overline{B} \right],$$

$$A - B = \left[\underline{A} - \overline{B}; \overline{A} - \underline{B} \right],$$

$$A < B, \text{ якщо } \overline{A} < \underline{B},$$

$$A > B, \text{ якщо } \underline{A} < \overline{B}.$$

Інші варіанти порівняння інтервальних чисел допускають конкретні числові реалізації, що порушують знак нерівності.

Під час застосування одного з методів булевого програмування можуть виникнути проблеми на етапі порівняння покращеного значення цільової функції з її поточною нижньою оцінкою. Якщо правила порівняння інтервальних чисел на цьому етапі не працюють, то запропонований підхід відхиляється. Якщо правила порівняння працюють, то отриманий розв’язок буде близьким до оптимального. Такий підхід можна було б застосувати до початкової моделі, але більша кількість змінних знижує шанси на успіх.

Ще один варіант зменшення кількості змінних множини допустимих компромісних розв’язків, що залишилися невизначеними, – застосування до моделей із цільовими функціями z^*, $z_{\min}$, $z_{\max}$ переходу від булевих змінних x_{ij} та y_{ij} до дійсних змінних x_{ij} та y_{ij} в межах проміжку $[0;1]$, які інтерпретуються як функції належності ділянки Y_{ij} до i-го або j-го етапу спорудження (реконструкції) інженерних мереж $\left(i = \overline{1, T-1},\ j = \overline{i+1, T}\right)$.

Такий підхід можливий, якщо на початку моделювання допускається зниження вимоги належності ділянки Y_{ij} до i-го або j-го етапу.

Ця задача розглядалася в роботі [10], де було побудовано модель частково-дискретного лінійного програмування з дійсними та булевими змінними шляхом введення додаткових обмежень:

$$x_{ij} - \alpha_{ij} + \alpha_{ij} s_{ij} \ge 0,$$

$$-x_{ij} + \left(1 - \alpha_{ij}\right) s_{ij} + 1 - s_{ij} \ge 0,$$

$$y_{ij} - \alpha_{ij} + \alpha_{ij} p_{ij} \ge 0,$$

$$-y_{ij} + \left(1 - \alpha_{ij}\right) p_{ij} + 1 - p_{ij} \ge 0,$$

$$x_{ij} \in \left[0; 1 - \alpha_{ij}\right] \cup \left[\alpha_{ij}; 1\right],$$

$$y_{ij} \in \left[0; 1 - \alpha_{ij}\right] \cup \left[\alpha_{ij}; 1\right],$$

$$s_{ij}, p_{ij} \in \{0,1\},\ \alpha_{ij} = \max\left(\alpha_i, \alpha_j\right),\ i, j = \overline{1, T},$$

де $\alpha_i \left(i = \overline{1, T}\right)$ – показник надійності віднесення ділянки до етапу i, $\alpha_i \in [0;1]$.

Розглянуті підходи до розв’язування задачі розподілу об’ємів робіт за етапами спорудження (реконструкції) інженерних мереж з урахуванням перспективного розвитку мережі дозволяють побудувати алгоритм розв’язку задачі з інтервальними коефіцієнтами цільової функції.

Схема алгоритму в строгій та в «пом’якшеній» постановках показано на рисунку.

Запропонований алгоритм складається з таких кроків:

Крок 1. Введення експертних даних щодо $K_{ij} = \left[\underline{K_{ij}}; \overline{K_{ij}} \right]$, $B_{ij} = \left[\underline{B_{ij}}; \overline{B_{ij}} \right]$, $R_{ij} = \left[\underline{R_{ij}}; \overline{R_{ij}} \right]$, $Z_{ij} = \left[\underline{Z_{ij}}; \overline{Z_{ij}} \right]$, $i, j = \overline{1, T}$.

Водночас:

– якщо працює один експерт, то вводяться параметри $\lambda_{K_{ij}}, \lambda_{B_{ij}}, \lambda_{R_{ij}}, \lambda_{Z_{ij}}$ і здійснюється перехід до кроку 3;

– якщо задіяно кілька експертів, то здійснюється перехід до кроку 2.

Крок 2. Розрахунок модифікованих гаусових інтервальних функцій належності для K_{ij}, B_{ij}, R_{ij}, Z_{ij}, $i, j = \overline{1, T}$.

Крок 3. Розв’язування задачі булевого програмування з інтервальними коефіцієнтами цільової функції z із застосуванням інтервальної арифметики.

Водночас:

– якщо задача має розв’язок, то він є оптимальним, робота алгоритму завершена;

– якщо розв’язок не може бути знайденим, то здійснюється перехід до кроку 4.

Крок 4. Розрахунок значень K_{ij}^*, B_{ij}^*, R_{ij}^*, Z_{ij}^*, $i, j = \overline{1, T}$.

Крок 5. Розв’язування задачі булевого програмування з цільовою функцією z^*, який можна розглядати як найбільш ймовірнісний.

Цей результат може бути використаний як базовий під час подальшого розв’язування задачі булевого програмування з інтервальними коефіцієнтами цільової функції.

Крок 6. Розв’язування задач булевого програмування з цільовими функціями $z_{\min}$, $z_{\max}$.

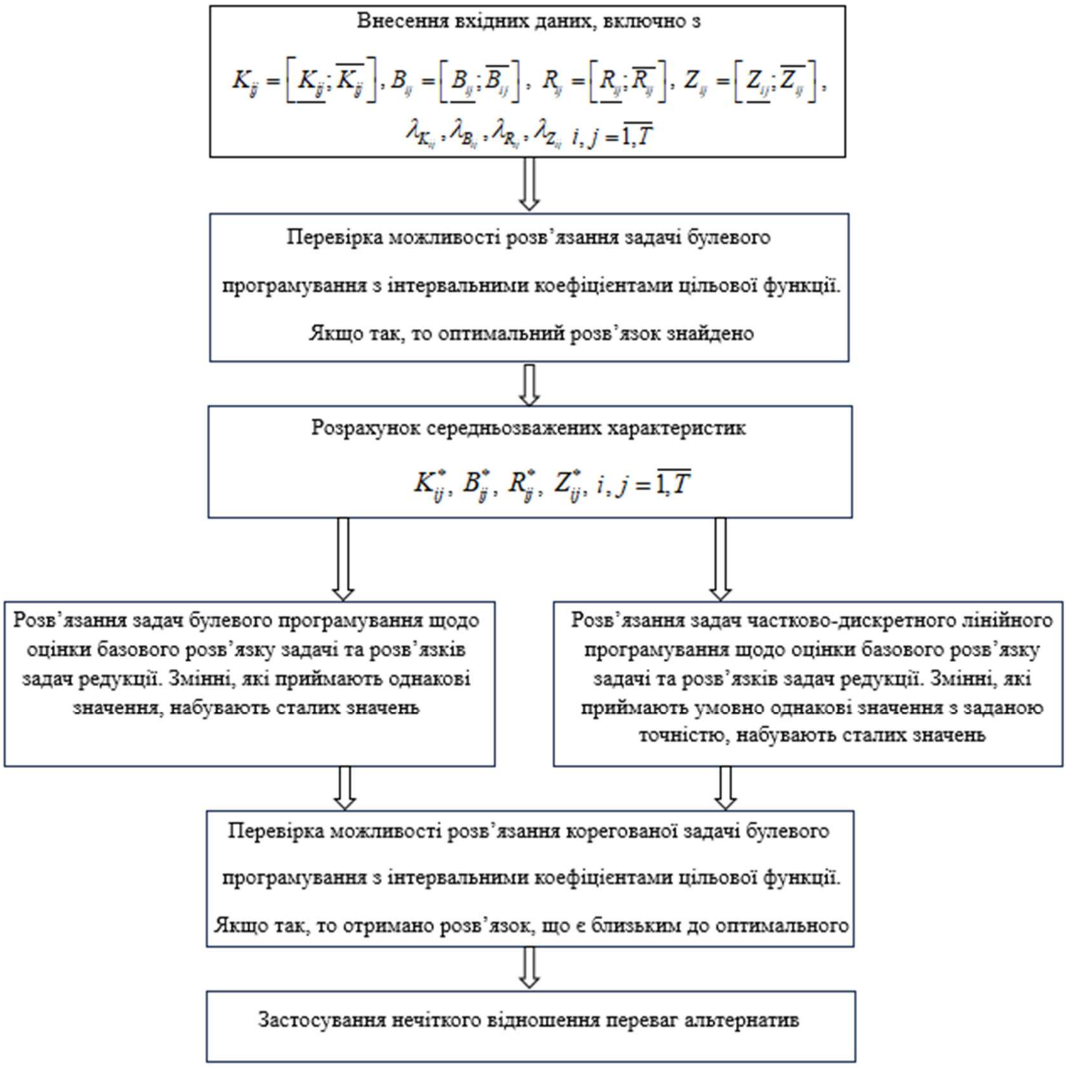

Рисунок – Схема алгоритму в строгій та в «пом'якшеній» постановках

Крок 7. Надання змінним x_{ij} та y_{ij} остаточних значень, якщо вони співпадають у розв'язках задач на 5 та 6 кроках. Вилучення їх з цільової функції початкової моделі.

Крок 8. Розв'язування задачі булевого програмування з інтервальними коефіцієнтами цільової функції z_{int} із застосуванням інтервальної арифметики.

На цьому кроці:

– якщо розв'язок не може бути знайденим, то виконується перехід до кроку 9;

– якщо задача має розв'язок, то отримано розв'язок, що є близьким до оптимального, робота алгоритму завершена.

Крок 9. Застосування нечіткого відношення переваг на множині альтернатив.

Якщо на початку моделювання допускається зниження вимоги належності ділянки до відповідного етапу спорудження (реконструкції) інженерних мереж, то для кроків 5 та 6 відбувається модифікація задачі до частково-дискретного лінійного програмування, що дозволяє на 7 кроці розширити критерії надання змінним x_{ij} та y_{ij} остаточних значень і вилучення їх з цільової функції початкової моделі.

Висновки

1. У роботі запропоновано два алгоритми розв'язання задачі розподілу об'ємів робіт за різними етапами спорудження або реконструкції інженерних мереж з урахуванням перспективного розвитку мережі та невизначеності початкової інформації у вигляді інтервальних чисел.

2. Перший алгоритм розв'язує сформульовану задачу в строгій постановці, коли на змінні накладається вимога рівності 0 або 1.

3. Другий алгоритм розв'язує сформульовану задачу в «пом'якшеній» постановці, коли до змінних знижуються вимоги, тобто вони приймають значення з проміжку $[0;1]$.

4. Питання нечіткого відношення переваг на множині альтернатив [12] потребує додаткових досліджень і буде предметом подальших робіт.

Конфлікт інтересів. Автори підтверджують відсутність фінансових, особистих чи інших інтересів, що можуть розглядатися як потенційний конфлікт інтересів щодо публікації цієї статті.

Фінансування. Дослідження було проведено без фінансової підтримки.

Доступність даних. Усі дані доступні в цифровій або графічній формі в основному тексті рукопису.

Використання штучного інтелекту. Автори підтверджують, що при створенні даної роботи вони не використовували інструментальні засоби штучного інтелекту.

Список використаних джерел

1. Звіт про прямі збитки інфраструктури та непрямі втрати економіки від руйнувань внаслідок військової агресії Росії проти України станом на червень 2023 року / Громадська організація «Інститут Київська Школа Економіки» в межах Проєкту USAID «Економічна підтримка України». 2023. URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2023/09/June_Damages_UKR_-Report.pdf (дата звернення: 02.04.2026).
2. Потапенко С., Кравченко О. Основні проблеми функціонування існуючих систем водопостачання та водовідведення в Україні. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2024. № 46. С. 35–42.
3. Редько І. О., Редько А. О., Бурда Ю. О. Підвищення ефективності систем теплогенерації центрального теплопостачання. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2019. № 28. С. 41–47.
4. Демченко В. В. Переваги онтологічного підходу до розподіленого моделювання інженерних та транспортних мереж. *Містобудування та територіальне планування*. 2008. № 29. С. 79–83.
5. Міхайленко В. М., Анпілогов А. П., Кошарна Ю. В. Застосування функціонально-динамічних схем для моделювання інженерної мережі водопостачання міста. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2007. № 27. С. 8–13.
6. Кулик Ю. В. Оптимизация проектируемых трубопроводных систем : учеб. пособие. Киев, 1991. 152 с.
7. Доманецька І. М., Хроленко Я. О. Особливості визначення оптимального складу експертної групи на основі семантико-статистичного підходу. *Управління розвитком складних систем*. 2025. № 64. С. 194–200. DOI: https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.64.194-200.
8. Полтораченко Н. І. Задача нечіткої прив'язки споживачів до мереж різних категорій. *Управління розвитком складних систем*. 2016. № 28. С. 142–146.
9. Полтораченко Н. І. Задача розміщення регуляторів подачі цільового продукту при проектуванні інженерних мереж. *Управління розвитком складних систем*. 2019. № 40. С. 129–133. DOI: https://doi.org/10.6084/m9.figshare.11969067.
10. Полтораченко Н. І. Моделювання початкового етапу проєктування інженерної мережі. *Управління розвитком складних систем*. 2021. № 45. С. 97–101. DOI: https://doi.org/10.32347/2412-9933.2021.45.97-101.
11. Кондратенко Н. Р., Снігур О. О., Кондратенко Р. М. Узагальнювальна інтервальна нечітка модель типу-2 для моніторингу станів складних систем з використанням експертних знань. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2023. № 2. С. 63–73.
12. Зайченко Ю. П. Дослідження операцій : підручник. Київ, 2000. 688 с.

Natalia Poltorachenko
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2238-6130
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine
PhD, Associate Professor at the Department of Information Technologies of Design and Applied Mathematics
Svitlana Terenchuk
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6527-4123
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine
PhD, Professor at the Department of Information Technologies of Design and Applied Mathematics

FORMALIZATION OF THE INITIAL STAGE OF ENGINEERING NETWORK DESIGN

Abstract. *The problem of distributing work volumes at different stages of construction or reconstruction of engineering networks is solved, taking into account the current state of communal utility systems. The problem is formulated considering the conditions of initial information uncertainty and the prospective development of the engineering network. The proposed mathematical model is a Boolean programming problem with variables in the form of interval numbers that characterize the assignment of design territory sections to a particular stage of construction or reconstruction of the engineering network. The problem is solved by Boolean programming methods taking into account the apparatus of interval arithmetic. Two variants of the algorithm for finding a compromise solution are proposed. Initially, numerical characteristics are calculated based on expert conclusions, which are associated with interval coefficients. At the next stage, the reduction task is solved by using two extreme objective functions, which limit the set of feasible compromise solutions. Based on the intermediate results, variables that take the same values are selected. The values of these variables are taken as final and are removed from the objective function of the initial model, which significantly reduces the number of variables in the model. Boolean programming methods are again applied to the new model with a smaller number of Boolean functions and interval coefficients of the objective function, which provides the most* *probable solution. If the problem has a solution, then it is close to the optimal one. If the problem does not have a solution, then fuzzy preference relation methods are used on a set of alternatives. If at the beginning of the modeling it is allowed to reduce the requirement that the site belongs to the corresponding stage of construction (reconstruction) of the engineering network, then Boolean programming problems are modified to partially discrete linear programming, which allows expanding the criteria for assigning final values to variables and removing them from the objective function of the initial model.*

Keywords: Boolean variable; compromise solution; engineering network; interval number; mathematical model; uncertainty; work distribution

References

1. Kyiv School of Economics Institute. (2023). *Report on direct infrastructure damage and indirect economic losses from destruction caused by Russia's military aggression against Ukraine as of June 2023*. https://kse.ua/wp-content/uploads/2023/09/June_Damages_UKR_-Report.pdf [in Ukrainian].
2. Potapenko, S., & Kravchenko, O. (2024). Main problems of functioning of existing water supply and sewerage systems in Ukraine. *Problems of Water Supply, Sewerage and Hydraulics*, (46), 35–42. [in Ukrainian].
3. Redko, I. O., Redko, A. O., & Burda, Yu. O. (2019). Improving the efficiency of heat generation systems for district heating. *Ventilation, Lighting and Gas Supply*, (28), 41–47. [in Ukrainian].
4. Demchenko, V. V. (2008). Advantages of the ontological approach to distributed modeling of engineering and transport networks. *Urban Planning and Territorial Planning*, (29), 79–83. [in Ukrainian].
5. Mikhailenko, V. M., Anpilogov, A. P., & Kosharna, Yu. V. (2007). Application of functional-dynamic schemes for modeling the urban water supply engineering network. *Problems of Water Supply, Sewerage and Hydraulics*, (27), 8–13. [in Ukrainian].
6. Kulik, Yu. V. (1991). Optimization of designed pipeline systems: Manual. 152 p. [in Ukrainian].
7. Domanetska, I. M., & Khrolenko, Ya. O. (2025). Features of determining the optimal composition of an expert group based on a semantic-statistical approach. *Management of Development of Complex Systems*, (64), 194–200. https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.64.194-200 [in Ukrainian].
8. Poltorachenko, N. I. (2016). The problem of fuzzy binding of consumers to networks of different categories. *Management of Development of Complex Systems*, (28), 142–146. [in Ukrainian].
9. Poltorachenko, N. I. (2019). The problem of placement of regulators of the target product supply during the design of engineering networks. *Management of Development of Complex Systems*, (40), 129–133. https://doi.org/10.6084/m9.figshare.11969067 [in Ukrainian].
10. Poltorachenko, N. I. (2021). Modeling the initial stage of engineering network design. *Management of Development of Complex Systems*, (45), 97–101. https://doi.org/10.32347/2412-9933.2021.45.97-101 [in Ukrainian].
11. Kondratenko, N. R., Snihur, O. O., & Kondratenko, R. M. (2023). Generalized interval fuzzy type-2 model for monitoring states of complex systems using expert knowledge. *System Research and Information Technologies*, (2), 63–73. [in Ukrainian]
12. Zaichenko, Yu. P. (2000). Operations research: Textbook. 688 p. [in Ukrainian].

Посилання на публікацію

APA Poltorachenko, N., & Terenchuk, S. (2026). Formalization of the initial stage of engineering network design. *Management of Development of Complex Systems*, 65, 181–187, dx.doi.org\10.32347/2412-9933.2026.65.181-187.

ДСТУ Полтораченко Н. І., Теренчук С. О. Формалізація початкового етапу проєктування інженерної мережі. *Управління розвитком складних систем.* Київ, 2026. № 65. С. 181 – 187, dx.doi.org\10.32347/2412-9933.2026.65.181-187.