

Полтораченко Наталія Іванівна

Кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій проектування та прикладної математики, orcid.org/0000-0002-2238-6130

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

МОДЕЛЮВАННЯ ПОЧАТКОВОГО ЕТАПУ ПРОЄКТУВАННЯ ІНЖЕНЕРНОЇ МЕРЕЖІ

***Анотація.** Робота містить аналіз сучасного стану централізованих систем комунального господарства, які складають основу інженерних мереж країни. Наведено задачі, що актуалізують питання математичного моделювання системного процесу проектування нових та реконструкції старих інженерних мереж в умовах їх перспективного розвитку. Зроблено аналіз досліджень у сфері проектування інженерних мереж з урахуванням невизначеності інформації. Основний матеріал статті присвячено питанню побудови математичної моделі задачі розподілу обсягів робіт по різних етапах спорудження або реконструкції інженерної мережі з урахуванням перспективного розвитку системи. Наведено перелік питань, на які слід дати відповідь при проектуванні мережі. Запропоновано топологічну модель території проектування. Вона складається з ділянок, для яких ведеться проектування, показників надійності віднесення ділянок проектування до різних етапів спорудження або реконструкції інженерної мережі, критеріїв якості та характеристик ресурсних обмежень. Побудовано базову математичну модель задачі, в якій враховано умови перспективного розвитку інженерної мережі. Вона розв'язується методами бульового програмування. Запропоновано інший погляд на введені змінні, який допомагає розглядати їх як функції належності ділянок території проектування до того чи іншого етапу спорудження або реконструкції інженерної мережі. Введення показників надійності віднесення ділянок проектування до різних етапів спорудження або реконструкції інженерної мережі призводить до розривного характеру допустимих значень змінних, що робить задачу дихотомічною. Результатом розв'язання цієї проблеми стала задача частково-цілочисельного лінійного програмування. Запропоновано ще один підхід до врахування невизначеності інформації на початкових етапах проектування інженерних мереж – використання алгебри інтервальних чисел. За допомогою інтервальних чисел є можливість відтворити експертну думку щодо розсіяння початкових даних. Наведено аналіз ефективності застосування інтервальної алгебри і сформульована потреба подальшого дослідження цієї тематики.*

Ключові слова: інженерна мережа; математична модель; невизначеність інформації; бульові змінні; інтервальні числа

Постановка проблеми

Сучасний стан централізованих систем тепло-, водо-, газопостачання, які складають основу комунального господарства міст та населених пунктів України, можна охарактеризувати не тільки як морально застарілий, а й такий, що перебуває на межі фізичного зносу. Ситуація, яка склалася, загострює три важливі питання:

- 1) потреба у великих капіталовкладеннях для побудови нових або реконструкції старих інженерних мереж;
- 2) екологічна загроза навколишньому середовищу;
- 3) можливість використання мереж життєзабезпечення як засобу в «гібридній» війні.

В рамках «Енергетичної стратегії України на період до 2035 р. «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» передбачається, що «до 2025 р. здебільшого буде завершено реформування енергетичного комплексу України, досягнуто першочергових цільових показників з безпеки та енергоефективності, забезпечено його інноваційне оновлення та інтеграцію з енергетичним сектором ЄС» [1 – 3].

Такі амбітні задачі потребуватимуть:

– підвищення ефективності діючих систем централізованого тепло-, водо-, газопостачання (забезпечення надійного функціонування інфраструктури, проведення необхідних заходів із модернізації, зниження аварійності, подовження експлуатації в штатному режимі);

– створення необхідної інфраструктури для подальшого сталого розвитку країни на конкурентних засадах;

– скорочення витрат у системах транспортування та розподілу цільового продукту (ЦП) шляхом технічної, технологічної модернізації та концептуального перегляду схем постачання;

– формування місцевих систем інженерних мереж (ІМ) на основі економічно ефективного врахування потенціалу місцевих ресурсів, логістики постачання, регіональної та загальнодержавної інфраструктури.

Вищенаведені задачі актуалізують питання математичного моделювання системного процесу проектування нових та реконструкції старих ІМ в умовах їх перспективного розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання онтологічного підходу до розподіленого моделювання інженерних мереж розглянуто в роботі [4]. Саме складність моделі потребує етапності розв'язування сформульованої задачі. Застосування функціонально-динамічних схем для моделювання інженерної мережі розглянуто у статті [5]. Питанням проектування зі стохастичної точки зору присвячена робота [6]. Проблема ранжування критеріїв розглядається в роботах [7; 8]. У статті [9] запропоновано підхід до задачі параметричної оптимізації інженерної мережі при довільній цільовій функції та інтервальному характері початкових даних. Розташування джерел ЦП в умовах невизначеності початкових даних, яка виражена через нечіткі числа, є предметом дослідження в роботі [10]. Проблема нечіткої прив'язки споживачів до мереж різних категорій розглядається в статті [11], а в роботі [12] досліджується задача оптимізації розташування регуляторів постачання ЦП.

Мета статті

Метою роботи є побудова математичної моделі задачі розподілу об'ємів робіт по різних етапах спорудження або реконструкції ІМ з урахуванням перспективного розвитку мережі.

Виклад основного матеріалу

При визначенні об'ємів робіт, які мають бути виконаними на різних етапах спорудження або реконструкції ІМ, треба дати відповідь на багато питань: вибір рівня централізації; основні напрями траси; використання і дублювання джерел постачання ЦП; кільцювання мереж; дублювання окремих ділянок; розподілення мереж на гідравлічно незалежні зони; вибір схем приєднання споживачів;

об'єм капітальних вкладень; вартість прокладання труб; вартість земляних робіт; вартість ізоляційних робіт; матеріаломісткість системи; довжина мережі, що закладається наново або перекладається; насиченість транспортних мереж інженерними комунікаціями; наявність дублюючих мереж для окремих споживачів; експлуатаційні витрати; екологічна безпечність; безпека функціонування зосереджених споживачів; надійність забезпечення ЦП зосереджених споживачів; наявність резервних можливостей; оцінка можливостей подальшого розвитку системи; соціальний ефект тощо.

Частина наведеної вище інформації врахована при побудові надлишкового графа, на якому відбувається моделювання. Основою для побудови математичної моделі сформульованої задачі є топологічна модель, для якої введено такі позначення.

Територію проектування Y розбито на ділянки

$$Y_i (i = \overline{1, T}), \text{ де } Y = \{Y_i \mid \forall (i \neq j) (\cup Y_i = Y) \wedge \wedge ((Y_i \cap Y_j \neq \emptyset) \vee (Y_i \cap Y_j = \emptyset)), i, j = \overline{1, T}\},$$

T – кількість етапів спорудження або реконструкції ІМ. Кожній ділянці поставлено у відповідність $\alpha_i (i = \overline{1, T})$ – показник надійності віднесення ділянки до етапу i , $\alpha_i \in [0; 1]$. Тоді топологічна модель території проектування матиме вигляд $T = \langle Y, K, \alpha \rangle$, де $Y = \{Y_i\}$, $\alpha = \{\alpha_i\}$, $(i = \overline{1, T})$, K – критерії якості та показники ресурсних обмежень. Питання застосування ВІМ технології для опису життєвого циклу території проектування ретельно досліджено в роботі [13].

Розглянемо випадок, коли за обсяги робіт «конкурують» два етапи, а сама «конкуренція» визначається через $Y_{ij} = Y_i \cap Y_j, i = \overline{1, T-1}, j = \overline{i+1, T}$.

Введемо бульові змінні x_{ij} та y_{ij} так, що $x_{ij} = 0$, а $y_{ij} = 1$, якщо на етапі i для ділянки Y_{ij} роботи виконуються за планом для етапу i , та $x_{ij} = 1$, а $y_{ij} = 0$, якщо на етапі i для ділянки Y_{ij} роботи виконуються за планом для етапу j . Очевидно, що $x_{ij} + y_{ij} = 1$.

Для прикладу як критерій задачі виберемо мінімізацію капітальних вкладень, при цьому треба враховувати, що будівництво на перспективу потребує додаткових капітальних вкладень і допускає заморожування надлишкових потужностей. Без урахування розвитку ІМ комунікації треба буде реконструювати. Наведені аргументи відображені у такій функціональній залежності:

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

де K_{ij} – капітальні вкладення, що відповідають випадку $x_{ij} = 0, y_{ij} = 1$; B_{ij} – капітальні вкладення, що відповідають випадку $x_{ij} = 1, y_{ij} = 0$; R_{ij} – витрати на реконструкцію ділянки Y_{ij} при $x_{ij} = 0, y_{ij} = 1$; Z_{ij} – збитки від заморожування потужностей, якщо $x_{ij} = 1, y_{ij} = 0$.

Як критерії можна використати й інші показники, для яких ввести вагові коефіцієнти та побудувати загальний критерій математичної моделі.

Обмеження розглянемо на прикладі ситуації з трубами:

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

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

де T_{ij} – об'єм труб, що відповідає випадку $x_{ij} = 0, y_{ij} = 1$; P_{ij} – об'єм труб, що відповідає випадку $x_{ij} = 1, y_{ij} = 0$; TR_{ij} – об'єм труб для реконструкції ділянки Y_{ij} ; T_k^n – об'єм труб, що відпускається для виконання робіт в період k ; T_k^o – об'єм труб, якого потребує виконання робіт на території

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

Аналогічні обмеження можливі й для інших видів ресурсів (будівельні матеріали, трудові ресурси тощо). Можлива різна деталізація обмежень (наприклад, за типами труб).

При реконструкції мережі в ролі критерію є сенс розглянути показник забезпечення споживачів ЦП, а капітальні вкладення можуть бути винесені до обмежень.

У будь-якому випадку отримаємо задачу бульового програмування $2 \cdot \sum_{i=1}^T i$ змінними, яка

може бути розв'язана одним з відомих методів [14], але не враховує момент неточності інформації, що робить її результати інколи далекими від реальної ситуації.

Пропонується змінним x_{ij} та y_{ij} надати можливість приймати значення в межах

проміжку $[0; 1]$. Тоді їх можна інтерпретувати як функції належності ділянки Y_{ij} до i -го або j -го етапу спорудження (реконструкції) ІМ $(i = \overline{1, T-1}, j = \overline{i+1, T})$, а задача з бульового програмування перетворюється на задачу лінійного програмування.

Але виникає питання: як бути, коли $x_{ij} \approx y_{ij}$?

Тобто шанси долучити ділянку Y_{ij} до i -го або j -го етапу спорудження (реконструкції) ІМ приблизно однакові. Саме для уникнення цієї ситуації є сенс скористатися $\alpha_i (i = \overline{1, T})$, показниками надійності долучення ділянки до етапу i . Для кожної ділянки $Y_{ij} (i = \overline{1, T-1}, j = \overline{i+1, T})$ показник надійності α_{ij} пропонується оцінювати як максимальний серед показників надійності для ділянок Y_i та Y_j , а саме $\alpha_{ij} = \max(\alpha_i, \alpha_j)$, де $i = \overline{1, T-1}, j = \overline{i+1, T}$. Тоді на змінні x_{ij} та y_{ij} накладаються умови:

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

$$y_{ij} \in [0; 1 - \alpha_{ij}] \cup [\alpha_{ij}; 1].$$

Введення розривних проміжків для x_{ij} та y_{ij} робить задачу дихотомічною, що потребує залучення бульових змінних s_{ij} та p_{ij} так, що

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

$$-x_{ij} + (1 - \alpha_{ij})s_{ij} + 1 - s_{ij} \geq 0,$$

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

$$-y_{ij} + (1 - \alpha_{ij})p_{ij} + 1 - p_{ij} \geq 0,$$

$$s_{ij}, p_{ij} \in \{0, 1\}.$$

У такому випадку отримаємо задачу частково-цілочисельного лінійного програмування з $2 \cdot \sum_{i=1}^T i$ дійсними змінними та з $2 \cdot \sum_{i=1}^T i$ бульовими змінними.

Якщо $\alpha_{ij} = 1 (i = \overline{1, T-1}, j = \overline{i+1, T})$, то задача перетворюється у побудовану вище задачу бульового програмування.

Враховуючи, що процес моделювання відбувається для початкового етапу проєктування, то є сенс розглянути випадок, коли дані мають вигляд

числових проміжків (експертна думка). Наприклад, капітальні вкладення K_{ij} належать інтервалу $[K_{ij}; \overline{K_{ij}}]$. Оскільки алгоритми цілочисельного лінійного програмування використовують операції додавання, віднімання та порівняння чисел, то є сенс скористатися означеннями цих операцій для інтервальних чисел ($A \in [\underline{A}; \overline{A}]$, $B \in [\underline{B}; \overline{B}]$):

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

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

$A < B$, якщо $\overline{A} < \underline{B}$, $A > B$, якщо $\underline{A} < \overline{B}$ (інші варіанти допускають конкретні числові реалізації, що порушують знак нерівності). До речі, порівняння коефіцієнтів з нулем (один з етапів адитивного алгоритму) не викликає проблем, оскільки всі початкові дані є додатними, тому знак перед коефіцієнтом визначає знак проміжку. Що стосується змінних X_{ij} та Y_{ij} , то на поверхні питання

про заміну Y_{ij} на $1 - X_{ij}$ і, як наслідок, зменшення кількості змінних вдвічі. Але у цьому випадку є шанс появи коефіцієнтів, які містять 0 в своєму проміжку, що є небажаним. А назагал використання інтервальних чисел потребує додаткових досліджень.

Висновки

В роботі досліджено різні варіанти побудови математичної моделі задачі розподілу обсягів робіт по етапах спорудження або реконструкції ІМ з урахуванням перспективного розвитку мережі.

Перша модель є базовою моделлю бульового програмування, яка може бути розв'язаною одним з відомих методів. Друга модель за рахунок варіювання змінними X_{ij} та Y_{ij} і введення показника надійності α_{ij} дає змогу оцінити ступінь належності ділянки до того чи іншого етапу спорудження або реконструкції ІМ. Третя модель будується на базі першої (з використанням апарату інтервальних чисел), а четверта – на базі другої (також з використанням інтервальної алгебри).

Список літератури

1. Енергетична стратегія України на період до 2035 р.: розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р., № 605-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80#Text>.
2. Василенко С. Л., Волков В. М. Надійність і сталість систем водопостачання як складова національної та екологічної безпеки. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2017. № 28. С. 53–59.
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. Михайленко 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: учебное пособие. Киев, 1991. 152 с.
7. Безклубенко І. С. Завдання вектора переваги критеріїв при виборі варіанта проекту інженерної мережі. *Управління розвитком складних систем*. 2017. № 30. С. 132–135.
8. Безклубенко І. С. Методи ранжування критеріїв в задачі оптимізації потокорозподілу інженерної мережі. *Управління розвитком складних систем*. 2018. № 34. С. 11–114.
9. Полтораченко Н. І. «Інтервальна» модель параметричної оптимізації інженерної мережі при довільній цільовій функції. *Управління розвитком складних систем*. 2011. № 7. С. 118–120.
10. Полтораченко Н. І. Нечітка багатокритеріальна задача розміщення. *Управління розвитком складних систем*. 2014. № 17. С. 121–124.
11. Полтораченко Н. І. Задача нечіткої прив'язки споживачів до мереж різних категорій. *Управління розвитком складних систем*. 2016. № 28. С. 142–146.
12. Полтораченко Н. І. Задача розміщення регуляторів подачі цільового продукту при проектуванні інженерних мереж. *Управління розвитком складних систем*. 2019. № 40. С. 129–133; [dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.11969067](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.11969067).
13. Гончаренко, Т. А. Інтеграційна модель життєвого циклу території будівлі на основі ВІМ. *Управління розвитком складних систем*. 2020. № 43. С. 83–90; [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.83-90](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.83-90).
14. Зайченко Ю. П. Дослідження операцій: підручник. Київ, 2000. 688 с.

Стаття надійшла до редколегії 14.02.2021

Poltorachenko Natalia

PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Information technologies of Design and applied mathematics department, orcid.org/0000-0002-2238-6130

Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

SIMULATION OF THE INITIAL STAGE OF ENGINEERING NETWORK DESIGN

Abstract. The work contains an analysis of the current state of centralized utilities, which form the basis of engineering networks in the country. The problems actualizing questions of mathematical modeling of system process of designing of new and reconstruction of old engineering networks in the conditions of their perspective development are resulted. The analysis of researches in the field of designing of engineering networks taking into account uncertainty of the information is given. The main material of the article is devoted to the construction of a mathematical model of the problem of distribution of work volumes at different stages of construction or reconstruction of the engineering network, taking into account the long-term development of the system. The list of questions to be answered when designing a network is given. A topological model of the design area is proposed. It consists of sites for which design is carried out, indicators of reliability of assignment of design sites to various stages of construction or reconstruction of an engineering network, quality criteria and characteristics of resource constraints. The basic mathematical model of the problem is built, which takes into account the conditions of perspective development of the engineering network. It is solved by Boolean programming methods. Another view of the introduced variables is offered, which allows to consider them as functions of belonging of sites of the territory of designing to this or that stage of construction or reconstruction of an engineering network. The introduction of indicators of reliability of the design sites to different stages of construction or reconstruction of the engineering network leads to the discontinuous nature of the allowable values of variables, which makes the task dichotomous. The solution to this problem is the problem of partial-integer linear programming. Another approach to taking into account the uncertainty of information at the initial stages of design of engineering networks – the use of algebra of interval numbers. With the help of interval numbers it is possible to reproduce the expert opinion on the scattering of the initial data. The analysis of efficiency of application of interval algebra is resulted and formulated the need for further research on this topic.

Keywords: engineering network; mathematical model; uncertainty of information; boolean variables; interval numbers

References

1. Energy strategy of Ukraine for the period up to 2035. (2017). Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated August 18, 2017, № 605-r. [Electronic source]. – <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/605-2017-%D1%80#Text>
2. Vasilenko, S. L., (2017). Reliability and sustainability of water supply systems as a component of national and environmental safety. *Problems of water supply, drainage and hydraulics*, 28, 53–59.
3. Redko, I. O., (2019). Improving the efficiency of district heating systems. *Ventilation, lighting and heat supply*, 28, 41–47.
4. Demchenko, V. V., (2008). Benefits of ontological approach to dispersed modeling of engineering and transport systems. *City planning and territorial planning*, 29, 79–83.
5. Mykhailenko, V. M., Anpilogov, J. P. & Kosharna, J. V., (2007). Implementation of functional dynamic schemes of city water supply engineering network modeling. *Problems of water supply, leading away of water and hydraulics*, 27, 8–13.
6. Kulik, Yu. V., (1991). Optimization of projected pipeline systems, 152.
7. Bezklubenko, Irina, (2017). Application technology of artificial neural networks for modeling land relief of construction site. *Management of Development of Complex Systems*, 30, 132–135.
8. Bezklubenko, Irina, (2018). The methods for ranking criteria in stream optimization tasks engineering network. *Management of Development of Complex Systems*, 34, 111–114.
9. Poltorachenko, N. I., (2011). Interval model of parameters optimization for the engineering network with arbitrary target function. *Management of development of complex systems*, 7, 118–120.
10. Poltorachenko, N. I., (2014). Fuzzy multiple-criteria problem of location. *Management of development of complex systems*, 17, 121–124.
11. Poltorachenko, N. I., (2016). Problem of fuzzy consumers connection to the networks with different categories. *Management of Development of Complex Systems*, 28, 142–146.
12. Poltorachenko, N. I., (2019). A task of placing of regulators of the whole product at the design of the engineering network. *Management of development of complex systems*, 40, 129–133; [dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.1196906](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.1196906).
13. Honcharenko, Tetyana. (2020). Integration model of the life cycle of the building area based on BIM. *Management of Development of Complex Systems*, 43, 83–90. [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.83-90](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.83-90).
14. Zajchenko, Y. P., (2000). Operations research, 688.

Посилання на публікацію

- APA Poltorachenko, N. I., (2021). Simulation of the initial stage of the engineering network design. *Management of Development of Complex Systems*, 45, 97–101, [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2021.45.97-101](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2021.45.97-101).
- ДСТУ Полтораченко Н. І. Моделювання початкового етапу проєктування інженерної мережі. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2021. № 45. С. 97 – 101, [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2021.45.97-101](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2021.45.97-101).