

Полтораченко Наталія Іванівна

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

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ

МОДЕЛЮВАННЯ ІНЖЕНЕРНОЇ МЕРЕЖІ В ЗОНІ ДІЇ ОДНОГО РЕГУЛЯТОРА

Анотація. У запропонованій статті наведено задачі, що актуалізують питання математичного моделювання системного процесу проектування нових і реконструкції старих інженерних мереж в умовах їх перспективного розвитку. Зроблено аналіз досліджень щодо проектування інженерних мереж з урахуванням невизначеності інформації. Основний матеріал статті присвячено питанню побудови математичної моделі задачі синтезу мережі в зоні дії одного регулятора постачання цільового продукту як складової частини процесу проектування інженерної мережі, що розвивається. Наведено перелік питань, на які слід надати відповідь при проектуванні мережі. Задача розв'язується на підграфі надлишкового графа загального процесу проектування. У ньому виокремлюються вершина регулятора постачання цільового продукту, вершини споживачів цільового продукту, що живляться від регулятора, та допустимі комунікації (дуги) між споживачами. Кожній комунікації ставиться у відповідність її довжина, показник надійності функціонування, характеристики критеріїв якості на одиницю довжини комунікації. Кожній вершині ставиться у відповідність показник надійності забезпечення цільовим продуктом. Оскільки критерії якості є нечіткими числами зі своїми функціями належності, то для можливості порівняння критеріїв нормуються. Також для них вводяться відповідні показники, які разом з ваговими коефіцієнтами утворюють узагальнені критерії якості на одиницю довжини комунікації. Структура мережі має кільцевий характер, для побудови якої вершини графа поділяються на підмножини з урахуванням радіуса кільцювання. На основі такого графа побудовано базову математичну модель задачі булевого програмування, в якій оптимізуються узагальнені критерії якості з урахуванням обмежень на забезпечення показників надійності постачання для споживачів. До побудованої моделі застосовано процес декомпозиції. Він дає змогу розв'язування загальної задачі звести до розв'язування задачі булевого програмування окремо для кожної вершини в рамках пошуку оптимальних маршрутів за побудованим критерієм між попередньою множиною вершин та множиною вершин, до якої належить виокремлена вершина. У роботі доведено можливості такого підходу. На основі розробленої декомпозиції запропоновано алгоритм розв'язування задачі синтезу мережі в зоні дії одного регулятора постачання цільового продукту.

Ключові слова: інженерна мережа; математична модель; невизначеність інформації; булеві змінні; декомпозиція

Постановка проблеми

Сучасні системи тепло-, водо-, газопостачання, які складають основу комунального господарства України, перебувають на межі фізичного зносу. Ситуація, яка склалася, загострює три важливих питання [1; 2]:

1) потреба у великих капіталовкладеннях для побудови нових або реконструкції старих інженерних мереж;

2) екологічна загроза навколишньому середовищу;

3) використання мереж життєзабезпечення як засобу у війні.

Такі проблеми вимагають:

– підвищення ефективності діючих систем централізованого тепло-, водо-, газопостачання;

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

– скорочення витрат у системах транспортування та розподілу цільового продукту (ЦП);

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

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Задача синтезу ІМ у зоні дії одного регулятора постачання ЦП є складовою загального процесу проектування ІМ, що розвивається [3]. Онтологічні питання щодо підходу до розподіленого моделювання інженерних мереж досліджено в роботі [4]. Застосування функціонально-динамічних схем для моделювання інженерної мережі розглянуто у статті [5]. Питання проектування ІМ з точки зору ймовірнісного моделювання досліджені в роботі [6]. Проблема ранжування критеріїв розглядається в роботах [7; 8]. Питанням невизначеності інформації при проектуванні ІМ присвячені роботи [9–11]. Розташування джерел ЦП в умовах невизначеності початкових даних, яка виражена через нечіткі числа, є предметом дослідження в роботі [9]. Проблема нечіткої прив'язки споживачів до мереж різних категорій розглядається в статті [10], а в роботі [11] досліджується задача оптимізації розташування регуляторів постачання ЦП.

Формулювання мети статті

Метою статті є побудова математичної моделі задачі синтезу ІМ у зоні дії одного регулятора постачання ЦП та розроблення алгоритму розв'язання сформульованої задачі з урахуванням невизначеності інформації у вигляді нечітких чисел, які є наслідком варіативності початкових даних та експертних думок. Запропонована стаття є розвиненням матеріалу, що викладено в роботах [9–11].

Виклад основного матеріалу

У процесі синтезу ІМ у зоні дії одного регулятора постачання ЦП треба висвітлити низку питань, а саме:

- вибір схеми 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 тощо.

Наведені питання частково враховані при побудові надлишкового графа, на якому відбувається моделювання, а частина питань висвітлюється при розробці критеріїв якості задачі.

Базовою моделлю сформульованої задачі є підграф $G(N, V)$ надлишкового графа задачі проектування ІМ, що розвивається, де N – множина вершин, які відповідають регулятору подачі ЦП ($i = 1$) та споживачам ЦП у зоні дії цього регулятора, а V – дуги підграфа, що відображують допустимі комунікації між споживачами ЦП у зоні дії цього регулятора. Кожній комунікації (дугі) v_{ij} ставиться у відповідність її довжина l_{ij} , показник надійності функціонування α_{ij} ($0 \leq \alpha_{ij} \leq 1$), характеристика k -го критерію якості на одиницю довжини комунікації A_{ij}^k , де $i, j = \overline{1, N}$, $k = \overline{1, K}$, K – кількість критеріїв якості. Кожному споживачеві ЦП (вершині) ставиться у відповідність показник надійності постачання ЦП α_i , де $0 \leq \alpha_i \leq 1$ ($i = \overline{2, N}$).

Розглянемо питання щодо критеріїв задачі. Якщо критерії якості A_{ij}^k є нечіткими числами зі своїми функціями належності, то для можливості порівняння їх між собою критерії нормуються

$$B_{ij}^k = \frac{A_{ij}^k - \inf A_{ij}^k}{\sup A_{ij}^k - \inf A_{ij}^k} \quad (i, j = \overline{1, N})$$

та отримують показник

$$H(B_{ij}^k) = \int M(B_{ij}^k(\alpha)) d\alpha,$$

де $B_{ij}^k(\alpha)$ – α – рівнева множина нечіткого числа

B_{ij}^k , а

$$M(B_{ij}^k(\alpha)) = \frac{\inf(B_{ij}^k(\alpha)) + \sup(B_{ij}^k(\alpha))}{2}.$$

Тоді узагальнений критерій якості на одиницю довжини комунікації матиме вигляд

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^K \lambda_k \cdot H(B_{ij}^k) \quad i, j = \overline{1, N}, \quad k = \overline{1, K},$$

де λ_k – ваговий коефіцієнт k -го критерію якості,

$$\sum_{k=1}^K \lambda_k = 1.$$

Для розв'язання задачі синтезу мережі, що оптимізує критерії якості та забезпечує виконання вимоги надійності постачання ЦП, споживачам пропонується побудувати кільцеву структуру. Для цього скористаємося ідеєю, яка запропонована в статті [12]. Розділимо вершини базового підграфа на P підмножин: $W_0 = \{1\}$ – вершина регулятора подачі ЦП; $W_1 = \{i_1, i_1 = \overline{2, m_{i_1}}\}$, де i_1 – вершини підграфа, для яких $l_{i_1} \leq r$ ($W_1 \in N \setminus W_0$); $W_2 = \{i_2, i_2 = \overline{m_{i_1} + 1, m_{i_2}}\}$, де i_2 – вершини підграфа, для яких $l_{i_2} \leq r$ ($W_2 \in N \setminus (W_0 \cup W_1)$); і т. д. до $W_{p-1} = \{i_{p-1}, i_{p-1} = \overline{m_{i_{p-2}} + 1, m_{i_{p-1}}}\}$, де i_{p-1} – вершини підграфа, для яких $l_{i_{p-2}i_{p-1}} \leq r$ ($W_2 \in N \setminus (W_0 \cup W_1 \cup \dots \cup W_{p-2})$); r – радіус кільцювання.

Визначимо пошук розв'язку на p -му кроці як побудову мережі між вершинами множин W_{p-1} та W_p , що оптимізує критерії якості та забезпечує виконання вимоги надійності постачання ЦП споживачам. Це означає, що для кожної вершини множини W_p будується стільки маршрутів з множини W_{p-1} , скільки необхідно для досягнення заданого показника надійності постачання. До складу маршруту включається початкова вершина з множини W_{p-1} та одна або декілька вершин з множини W_p . Надійність маршруту α_i^p визначається як мінімум показників надійності початкової вершини та всіх дуг, що складають маршрут, де i_l – номер допустимого маршруту для вершини $i \in W_p$.

Тоді цільова функція для однієї вершини $i \in W_p$ матиме вигляд:

$$R_i^p = \sum_{v_{ij} \in d_{ij}^p} R_{ij}^p \cdot y_{ij}^p \rightarrow \min$$

при обмеженнях:

$$\sum_{v_{ij} \in d_{ij}^p} \alpha_{i_l}^p \cdot y_{ij}^p \geq \alpha_i,$$

$$\sum_{v_{ij} \in d_{ij}^p} y_{ij}^p \leq 1, b = \overline{1, B_i^p},$$

$$d_{ij}^p \in \Delta_i^p,$$

$$d_{i_q}^p \in \Delta_{i_b}^p, b = \overline{1, B_i^p},$$

$$y_{i_l}^p, y_{i_q}^p \in \{0; 1\},$$

де Δ_i^p – множина допустимих маршрутів d_{ij}^p

для вершини $i \in W_p$; $\Delta_{i_b}^p$ – b -та множина несумісних маршрутів d_{ij}^p для вершини $i \in W_p$; B_i^p – кількість множин несумісних маршрутів; $y_{i_l}^p, y_{i_q}^p$ – булеві змінні, що відповідають маршрутам d_{ij}^p та $d_{i_q}^p$; R_{ij}^p – оцінка критерію якості прокладання маршруту d_{ij}^p , яка визначається так:

$$R_{ij}^p = \sum_{v_{ij} \in d_{ij}^p} (A_{ij} \cdot l_{ij}).$$

На p -му кроці цільова функція матиме вигляд:

$$\sum_{i=m_{i_{p-1}}+1}^{m_{i_{p-1}}} R_i^p \rightarrow \min$$

при вищенаведених обмеженнях для $i = \overline{m_{i_{p-1}} + 1, m_{i_p}}$, а для всієї задачі:

$$\sum_{p=1}^P \sum_{i=m_{i_{p-1}}+1}^{m_{i_{p-1}}} R_i^p \rightarrow \min.$$

Щоб побудувати алгоритм розв'язування задачі, доведемо таке твердження.

Твердження. Для побудови оптимальної мережі в зоні дії одного регулятора подачі ЦП за розробленим критерієм достатньо для кожної вершини $i \in W_p$ на етапі p побудувати L_i^p «найкоротших» маршрутів між вершинами множини W_{p-1} та вершиною i .

Доведення. Припустимо, що оптимальна мережа побудована, і для довільної вершини $i \in W_p$ існує допустимий маршрут d_{ji}^p ($j \in W_{p-1}$), який є більш ефективним за критерієм якості, ніж використаний при побудові маршрут d_{mi}^p ($m \in W_{p-1}$). Якщо замінити маршрут d_{mi}^p на d_{ji}^p , то цей факт жодним чином не вплине на попередню та наступну структури, бо відповідно до вимоги виконання умови надійності забезпечення j -го споживача j -та вершина буде завжди досяжна для регулятора подачі ЦП. Досяжність вершини i через маршрут d_{ji}^p забезпечує досяжність від регулятора всіх інших вершин мережі. Тоді початкове припущення про оптимальність мережі є хибним, а отримане протиріччя методом від супротивного доводить правильність наведеного твердження.

З доведеного твердження можна зробити висновок, що розв'язування побудованої задачі зводиться до розв'язку задачі булевого програмування [13] для кожної вершини множини $W_p (p = \overline{1, P})$, а алгоритм розв'язування задачі матиме вигляд:

Ітерація 1. Розбиття вершин початкового надлишкового графа на P підмножин за наведеним вище правилом.

Ітерація 2. $i = 1, p = 0$.

Ітерація 3. $p = p + 1$.

Ітерація 4. $i = i + 1$.

Ітерація 5. Для вершини $i \in W_p$ пошук L_i^p «найкоротших» маршрутів між вершинами множини W_{p-1} та вершиною i , що забезпечують досягнення встановленого показника надійності постачання ЦП.

Ітерація 6. Перевірка: чи всі вершини з множини W_p розглянуто? Якщо ні, то перехід до ітерації 4. Якщо так, то перехід до ітерації 7.

Ітерація 7. Перевірка: чи всі множини $W_p (p = \overline{1, P})$ розглянуто? Якщо ні, то перехід до ітерації 3. Якщо так, то робота алгоритму завершена.

Висновки

У роботі розглянуто задачу синтезу ІМ у зоні дії одного регулятора постачання ЦП.

Запропонована декомпозиція початкової моделі базового графа дає змогу розбити побудовану математичну модель задачі булевого програмування на $N - 1$ задач булевого програмування, де N – множина вершин базового графа, які відповідають регулятору подачі ЦП ($i = 1$) та споживачам ЦП у зоні дії цього регулятора.

Розглянута модель задачі та методика її розв'язання можуть бути застосовані як при проектуванні нових ІМ, так і при розробці проєктів їх реконструкції.

Список літератури

1. 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.
2. Редько І. О., Редько А. О., Бурда Ю. О. Підвищення ефективності систем теплогенерації центрального теплопостачання. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2019. № 28. С. 41–47.
3. Полтораченко Н. І. Моделювання початкового етапу проектування інженерної мережі. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2021. № 45. С. 97 – 101, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2021.45.97–101.
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 проєкту інженерної мережі. *Управління розвитком складних систем*. 2017. № 30. С. 132–135.
8. Безклубенко І. С. Методи ранжування критеріїв в задачі оптимізації поточкорозподілу інженерної мережі. *Управління розвитком складних систем*. 2018. № 34. С. 11 –114.
9. Полтораченко Н. І. Нечітка багатокритеріальна задача розміщення. *Управління розвитком складних систем*. 2014. № 17. С. 121–124.
10. Полтораченко Н. І. Задача нечіткої прив'язки споживачів до мереж різних категорій. *Управління розвитком складних систем*. 2016. № 28. С. 142–146.
11. 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.
12. Михайленко В. М., Кравчук О. П. Синтез структури багатомерної мережі в умовах оптимального управління потоком. *Автоматика*. 1990. № 1. С. 109–111.
13. Зайченко Ю. П. Дослідження операцій: підручник. Київ, 2000. 688 с.

Стаття надійшла до редколегії 02.03.2024

Poltorachenko Natalia

PhD (Eng.), Associate Professor, Department of Information technologies of Design and applied mathematics department, <https://orcid.org/0000-0002-2238-6130>
Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv

SIMULATION OF THE ENGINEERING NETWORK IN THE AREA OF ONE REGULATOR

Abstract. The proposed article presents problems that update the issue of mathematical modeling of the system process of designing of new and reconstruction of old engineering networks in the conditions of their perspective development. 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 the network synthesis in the area of action of one regulator of the supply of the target product as component of the developing engineering network design process. The list of questions to be answered when designing a network is given. The problem is solved on a subgraph of the redundant graph of the general design process. It distinguishes the vertex of the regulator of the supply of the target product, the vertices of the consumers of the target product fed by the regulator, and the permissible communications (arcs) between the consumers. Each communication is matched with its length, indicator of reliability of functioning, characteristics of quality criteria per unit of communication length. Each vertex is matched with an indicator of reliability of providing the target product. Since the quality criteria are fuzzy numbers with their membership functions, the criteria are normalized for comparison. Corresponding indicators for them, together with the weighting factors, form a generalized quality criterion per unit of communication length. The structure of the network has a ring character, for construction of which the vertices of the graph are divided into subset taking into account the radius of the ring. On the basis of such a graph, a basic mathematical modeling of the Boolean programming problem was built, in which generalized quality criterion are optimized taking into account the restrictions on ensuring supply reliability indicators for consumers. The decomposition process was applied to the constructed model. It allows the solution of the general problem to be reduced to the solution of the Boolean programming problem separately for each vertex in the framework of the search for optimal routes according to the constructed criterion between the previous set of vertices and the set of vertices to which the selected vertex belongs. The work proves the possibilities of such an approach. Based on the developed decomposition, an algorithm for solving the problem of the network synthesis in the area of action of one regulator of the supply of the target product is proposed.

Keywords: engineering network; mathematical model; uncertainty of information; Boolean variables; decomposition

References

1. 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.
2. Redko, I. O. (2019). Improving the efficiency of district heating systems. *Ventilation, lighting and heat supply*, 28, 41–47.
3. 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.
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. (2014). Fuzzy multiple-criteria problem of location. *Management of development of difficult systems*, 17, 121–124.
10. Poltorachenko, N. I. (2016). Problem of fuzzy consumers connection to the networks with different categories. *Management of Development of Complex Systems*, 28, 142–146.
11. 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.
12. Mykhailenko, V. M., Kravchuk, O. P. (1990). Synthesis of the structure of a multidimensional network under conditions of optimal flow control. *Automation*, 1, 109–111.
13. Zajchenko, Y. P. (2000). Operations research, 688.

Посилання на публікацію

- APA Poltorachenko, N. I. (2024). Simulation of the engineering network in the area of one regulator. *Management of Development of Complex Systems*, 57, 107–111, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2024.57.107-111.
- ДСТУ Полтораченко Н. І. моделювання інженерної мережі в зоні дії одного регулятора. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2024. № 57. С. 107 – 111, dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2024.57.107-111.