

УДК 519.863: 330.4

ОПТИМІЗАЦІЯ МЕРЕЖ МАКРОЛОГІСТИКИ З УРАХУВАННЯМ ЇХ ВПЛИВУ НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

Жабський Д. С., Безкоровайний В. В.

Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків

Процес оптимізації сучасних мікро- та макрологістичних систем передбачає розв'язання комплексу задач їх технологічної, структурної, параметричної та топологічної оптимізації [1–2]. Глобальні екологічні зміни та посилення регуляторних вимог щодо скорочення викидів парникових газів створюють нові умови їх функціонування. З урахуванням цього, у процесах проектування, адаптації чи реінжинірингу логістичних мереж (ЛМ) виникає необхідність розширення традиційного двокритеріального підходу (оптимізація за комплексним показником «Витрати-Час») додаванням екологічного виміру. Це сприятиме досягненню балансу між економічною ефективністю та зменшенням впливу на довкілля [3].

Метою дослідження є розробка математичної моделі трикритеріальної задачі оптимізації топологічної структури логістичної мережі на етапі реінжинірингу з явним урахуванням екологічного критерію – мінімізації викидів парникових газів.

Задача оптимізації топологічної структури ЛМ розглядається у такій постановці.

Задані: множина елементів (центр, вузли, споживачі) існуючої мережі та обсяги попиту споживачів; топологічна структура існуючої мережі (розташування елементів і зв'язки між ними); витрати на створення та експлуатацію вузлів, транспортні тарифи, часу доставки вантажів; інтервальні оцінки функціональних, витратних та екологічних показників транспортних процесів (у подальшому подаються в квадратних дужках).

Необхідно визначити: найбільш ефективний варіант топологічної структури мережі $s \in S$ (де S – множина допустимих варіантів) з оцінкою за

трьома локальними критеріями: $[k_1(s)]$ – наведені витрати; $[k_2(s)]$ – час доставки вантажів споживачам; $[k_3(s)]$ – екологічний вплив мережі на оточуюче середовище.

Використаємо традиційну систему обмежень для ЛМ з радіально-вузловою структурою [4]:

$$S = \begin{cases} [s_{ij}], s_{ij} \in \{0,1\}, i, j = \overline{1, n}, s_{11} = 1; \\ \sum_{i=j}^n s_{ij} \geq 1, \forall j = \overline{1, n}; \\ \sum_{j=1}^n \sum_{i=j}^n s_{ij} = n + \sum_{i=1}^n s_{ii} \\ s_{ii} = 1 \rightarrow s_{i1} = 1 \forall i = \overline{1, n}; \\ s_{ii} \wedge s_{ij} = 1 \rightarrow ij = \arg \min_{1 \leq i, j \leq n} [e_{ij}] \forall i, j = \overline{1, n}, \end{cases}$$

Цільову функцію визначення найкращого варіанта побудови ЛМ за показником витрат пропонується подати у такому вигляді [4]:

$$[k_1(s', s)] = \sum_{j=1}^n \{ [a_j](1-s'_{jj})s_{jj} + [b_j]s'_{jj}s_{jj} + [c_j](1-s_{jj})s'_{jj} - [d_j](1-s_{jj})s'_{jj} \} + \sum_{j=1}^n \sum_{i=j}^n \{ [e_{ji}](1-s'_{ji})s'_{ji} + [f_{ji}]s'_{ji}s_{ji} + [g_{ji}](1-s'_{ji})s'_{ji} - [h_{ji}](1-s'_{ji})s'_{ji} \} \rightarrow \min_{s \in S}$$

де $[a_j], [b_j], [c_j], [d_j]$ – інтервальне подання витрат на створення, модернізацію, демонтаж та вартість ресурсів, які можуть бути повторно використані після демонтажу обладнання j -го вузла у новій структурі; s'_{jp}, s_{ji} – елементи матриць суміжності існуючої мережі та мережі після реінжинірингу; $[e_{ji}], [f_{ji}], [g_{ji}], [h_{ji}]$ – інтервальне подання витрат на перевезення вантажів між елементами i та j , модернізацію транспортних засобів, їх утилізацію та вартість ресурсів, які можуть бути повторно використані.

Для оцінки оперативності мережі використаємо сумарні витрати часу на перевезення вантажу від центру через відповідний вузол до кінцевого

споживача [4]: $[\tau_i(s)] = \{[t_{1j}(s)] + [t_j(s)] + [t_{ji}(s)]\}s_{ij}$ (де $[t_{1j}(s)], [t_j(s)], [t_{ji}(s)]$ – інтервальні подання часу транспортування вантажу від центру до вузла j , його оброблення у вузлі i доставки від вузла до споживача i). Максимуму оперативності ЛМ відповідає мінімум максимального часу доставки вантажів серед усіх споживачів: $[k_2(s)] = \max_{1 \leq i \leq n} \{[\tau_{ij}]\} \rightarrow \min_{s \in S}$.

З метою оцінки показника екологічності мережі для кожного вузла і маршруту від елемента i до елемента j введемо інтервальні оцінки питомих викидів $[q_j]$ і $[q_{ij}]$, $i, j = \overline{1, n}$. Вони відображають можливі діапазони утворення викидів при експлуатації мережі (CO₂, інших забруднюючих речовин).

Цільову функцію задачі оптимізації на основі оцінки загального екологічного впливу пропонується подати у такому вигляді:

$$[k_3(s)] = \sum_{j=1}^n q_j(s) + \sum_{i,j=1}^n q_{ij}s_{ij} \rightarrow \min_{s \in S}$$

Значення показника $[k_3(s)]$ відобразатиме рівень екологічного навантаження варіанту побудови ЛМ на довкілля.

У процесі оптимізації для вибору найбільш ефективного варіанту побудови мережі $s^o \in S$ пропонується використати модель теорії корисності, що дозволяє отримувати скалярні інтервальні оцінки варіантів [5]:

$$[P(s)] = \sum_{i=1}^3 \lambda_i [\xi_i(s)] + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=i}^3 \lambda_{ij} [\xi_i(s)] [\xi_j(s)] \rightarrow \max_{s \in S}$$

де λ_i, λ_{ij} – вагові коефіцієнти, що визначають пріоритетність економічних та екологічних факторів; $\lambda_i(s)$ – функції корисності локальних критеріїв.

Особливістю запропонованої моделі є врахування синергетичних ефектів між критеріями через парні добутки $\xi_i(s) \cdot \xi_j(s)$. Це дозволяє моделювати нелінійні залежності, наприклад, коли зменшення відстаней транспортування одночасно скорочує, витрати, викиди і час доставки.

Для порівняння варіантів з інтервальною визначеністю параметрів і

змінних показників пропонується використовувати індекс на основі узагальненої різниці Хукухари, що дозволяє оцінити ризики перевищення нормативів викидів [4–5].

Теоретичний аналіз запропонованої моделі показує, що інтеграція екологічного критерію дозволяє знайти компромісні рішення між економічною ефективністю та екологічною безпекою. Використання адитивно-мультиплікативної функції корисності забезпечує гнучкість у налаштуванні пріоритетів між витратами, часом доставки та обсягами викидів залежно від корпоративної політики та регуляторних вимог.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробкою адаптивних методів оптимізації, що враховують динаміку зміни екологічних стандартів, а також створенням математичного забезпечення для підтримки прийняття ефективних рішень при проектуванні екологічно орієнтованих логістичних систем.

Література:

1. Govindan K., Fattahi M., Keyvanshokoo E. Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions // *European Journal of Operational Research*. 2017. Vol. 263. P. 108–141.
2. Beskorovainyi V., Sudik A. Optimization of topological structures of centralized logistics networks in the process of reengineering // *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*. 2021. No. 1 (15). P. 23–31.
3. Jo D., Kwon C. Structure of Green Supply Chain Management for Sustainability of Small and Medium Enterprises // *Sustainability*. 2022. Vol. 14. No. 1. 50.
4. Безкоровайний В. В., Русскін В. М., Тітов С. В. Математична модель задачі оптимізації логістичних мереж в умовах інтервальної визначеності вхідних даних // *Вісник ХНАДУ*. 2023. Вип. 102. С. 95-103.
5. Bezkorovainyi V., Binkovska A., Noskov V., Gopejenko V., Kosenko V. Adaptation of Logistics Network Structures in Emergency Situations // *Advanced Information Systems*, 2025. Vol. 9. No. 4. P. 39–50.