

Оптимізація Мереж Ланцюжків Поставок у Системах Екологічної Логістики

Володимир Безкоровайний, Світлана Мальцева
кафедра системотехніки
Харківський національний університет
радіоелектроніки
Харків, Україна
vladimir.beskorovainyi@nure.ua
svitlana.maltseva@nure.ua

Олександр Колодяжний
інформаційно-обчислювальний центр
Харківський національний університет
радіоелектроніки
Харків, Україна
oleksandr.kolodiazhny@nure.ua

Optimization of Supply Chain Networks in Ecological Logistics Systems

Volodymyr Beskorovainyi, Svitlana Maltseva
Department of System Engineering
Kharkiv National University of Radioelectronics
Kharkiv, Ukraine
vladimir.beskorovainyi@nure.ua
svitlana.maltseva@nure.ua

Oleksandr Kolodiazhny
Information and Computer Center
Kharkiv National University of Radioelectronics
Kharkiv, Ukraine
oleksandr.kolodiazhny@nure.ua

Анотація—З урахуванням взаємозв'язку задач структурної, топологічної, параметричної та технологічної оптимізації виконані формалізація опису та цілей створення систем екологічної логістики, що відображають показники їх ефекту і витрат ресурсів на їх створення й експлуатацію. Декомпозиція проблеми системної оптимізації дозволила виділити задачі їх аналізу і синтезу, які вирішуються за множиною показників в умовах неповної визначеності цілей і даних. З урахуванням взаємозв'язку виділених задач за вхідними і вихідними даними запропоновано метод спрямованого перебору для оптимізації мереж ланцюжків поставок у централізованих системах екологічної логістики з реверсивними потоками.

Abstract— Taking into account the interconnection of the tasks of structural, topological, parametric and technological optimization, the formalization of the description and objectives of the creation of systems of ecological logistics, reflecting the indicators of their effect and the cost of resources for their creation and operation. Decomposition of the problem of system optimization allowed to highlight the problems of their analysis and synthesis, which are solved by a set of indicators in conditions of incomplete certainty of goals and data. Taking into account the interrelation of the selected tasks with input and output data, the method of directed selection is proposed for optimization of supply chain networks in centralized systems of ecological logistics with reversal flows.

Ключові слова— екологічна логістика, ланцюжки поставок, структура, топологія, невизначеність, багатокритеріальна оптимізація.

Keywords— ecological logistics, supply chains, structure, topology, uncertainty, multicriteria optimization.

I. ВСТУП

Економічність і комфортність бізнес-процесів, інших процесів життєдіяльності людей багато у чому визначається якістю відповідної логістики. Традиційно логістичні процеси охоплювали основні етапи господарської діяльності – від розробки джерел сировини і матеріалів до поставки продуктів і послуг кінцевому споживачу [1]. Подальшим розвитком логістики стало керування ланцюгами поставок. При цьому об'єктами керування стали матеріальні, фінансові й інформаційні потоки, що проходять логістичними ланцюгами від первинного джерела сировини до постачання готової продукції кінцевому споживачу. Проектування мереж ланцюжків поставок SCND (Supply chain network design) є однією з найбільш важливих проблем планування в управлінні ланцюжками поставок SCM (supply chain management) [2]. Проектні рішення щодо ланцюжків поставок SC (supply chain) повинні бути достатньо стійкими і життєздатними в складних та невизначених бізнес-середовищах протягом років. В останні десятиліття виникла і швидкими темпами розвивається екологічна («зелена») логістика, яка розглядається як інструмент підтримання екологічної безпеки [3]. В її рамках суттєво розширюється управлінська діяльність, охоплюючи цикл від раціональної експлуатації природної сировини до



Інформаційні системи та технології ІСТ-2018
Секція 3. Інформаційні ресурсорозберігаючі, екологічно безпечні технології.
Геоінформаційні системи та технології

утилізації відходів діяльності. Створювана методологія екологічної логістики спрямована на зниження рівня ризиків економічних втрат, обумовлених погіршенням якості навколишнього середовища або ж для підвищення не тільки економічної, а еколога-економічної ефективності діяльності підприємств [4]. Одним з напрямів екологічної є реверсивна логістика, у рамках якої здійснюється впорядкування та систематизація зворотних товарно-матеріальних, інформаційних, грошових потоків [5, 6]. Необхідність врахування зворотних потоків у рамках екологічної логістики породжує множину нових задач, що потребують формалізації та розробки ефективних методів їх розв'язання.

II. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОБЛЕМИ

Системи екологічної логістики (СЕЛ), як і системи логістики в цілому, є територіально розподіленими об'єктами [7]. Ефективність подібних об'єктів багато в чому визначається рішеннями, які приймаються у процесі їх структурно-топологічної оптимізації [8]. Процеси проектування, модернізації, планування розвитку, реінжинірингу, керування СЕЛ передбачають розв'язання множини взаємопов'язаних задач структурної, топологічної, параметричної та технологічної оптимізації. Їх оптимізація полягає у виборі кращого варіанту ланцюгів з множини допустимих, що задовольняють функціональним, вартісним і екологічним обмеженням за множиною показників в умовах неповної визначеності даних і цілей [9].

Зі зростанням масштабів СЕЛ, як територіально розподілених об'єктів, їх вартісні і функціональні характеристики стають все більш залежними від топології (територіальної організації). У процесах оптимізації СЕЛ спільно з традиційними задачами структурного, параметричного і технологічного синтезу необхідно вирішувати комплекси задач їх топологічної оптимізації. Структурні, параметричні, вартісні та функціональні характеристики СЕЛ багато в чому визначаються топологією їх підсистем та елементів. Топологія підсистем і елементів, в свою чергу, визначає топологію зв'язків, що забезпечують функціонування логістичної системи як єдиного цілого, реалізуючи взаємодію між елементами та підсистемами [10].

Система екологічної логістики, як територіально розподілений об'єкт проектування чи керування поданий у вигляді $s = \langle E, R \rangle$ (де E – множин елементів: постачальників, переробників, терміналів, споживачів тощо; R – множина зв'язків або маршрутів між елементами), може бути реалізований множиною різних топологій G^* . Виходячи з цього кожній з топологічних реалізацій системи $G \in G^*$, буде відповідати оригінальний набір функціональних, вартісних і екологічних властивостей, що визначаються відображенням φ [10]: $\varphi : (E, R, G) \rightarrow P$.

З урахуванням цього в задачах системної оптимізації опис СЕЛ має відображати її топологічні властивості:

$s = \langle E, R, G \rangle$, $G = \langle G_E, G_R, G_A \rangle$, де G - топологічна реалізація структури системи $\langle E, R \rangle$; G_E - топологія елементів; G_R - топологія зв'язків; G_A - топологія, яка визначається технологією функціонування системи.

На перших етапах оптимізації шляхом аналізу мети створення СЕЛ, умов її функціонування та її бажаних властивостей P' визначаються підмножини елементів E' , зв'язків (маршрутів) R' і топологій G' , на яких вона може бути реалізована. На наступних етапах визначаються підмножини елементів $E^o \subseteq E'$, зв'язків $R^o \subseteq R'$ і топологій $G^o \subseteq G'$, які забезпечують найбільш ефективне досягнення необхідних властивостей P' .

Метою оптимізації ланцюгів поставок СЕЛ є максимізація її ефективності Q при виконанні технологічних $R_T \subseteq R_T^*$ і екологічних $R_E \subseteq R_E^*$ обмежень (де R_T^*, R_E^* – множини допустимих значень технологічних і екологічних показників системи):

$$s^o = \arg \max_{s \in S^*} Q(s), R_T(s) \subseteq R_T^*, R_E(s) \subseteq R_E^*, \quad (1)$$

де s - варіант побудови системи; S^* - множина допустимих варіантів побудови системи.

Формалізація задачі оптимізації СЕЛ (1) є досить загальною та потребує деталізації, що дозволить встановлювати зв'язок показників її ефективності з її структурними, параметричними, топологічними та технологічними характеристиками. Тісний взаємозв'язок задач структурного, функціонального, параметричного і топологічного синтезу, що вимагає їх спільного розв'язання, призводить до складної проблеми, для розв'язання якої необхідна розробка відповідної системної методології.

У переважній більшості традиційних схем ланцюгів поставок враховується рух матеріальних ресурсів тільки в напрямку від виробників до споживачів продукції. За такого підходу не приймають до уваги реверсивні потоки тари, бракованих виробів, виробів після закінчення терміну використання, відходів тощо. У математичних моделях управління зворотними потоками як критерій оптимальності зазвичай розглядається мінімізація витрат, пов'язаних зі збором і захороненням відходів, а за можливості проведення рециклінгу – максимізація прибутку від реалізації переробленої продукції за вирахуванням витрат на збір і переробку відходів [6]. Серед питань, які у загальному випадку необхідно вирішити під час оптимізації систем екологічної реверсивної логістики, виділяються: визначення постачальників, переробників, терміналів, типів і видів транспорту, прямих і зворотних маршрутів доставки.

Проведений огляд сучасного стану проблеми системної оптимізації ланцюгів СЕЛ [1–9] виявив протиріччя, яке вказує на те, що існуючі технології передбачають умовно незалежне розв'язання



однокритеріальних задач їх структурної, топологічної, параметричної та технологічної оптимізації, що не дозволяє забезпечувати ефективність та спадковість рішень, які приймаються на різних етапах їх життєвих циклів.

Це визначає актуальність завдання розробки методології системної оптимізації ланцюгів СЕЛ, що передбачає коректну декомпозицію проблеми на комплекси задач, які відносяться до різних рівнів опису й етапів їх оптимізації, різного ступеня визначеності мети і даних, розробку комплексу відповідних математичних моделей, методів і технологій, що дозволяють отримувати рішення за множиною показників якості. Зокрема, актуальним завданням при цьому вважається визначення впливу логістичних систем на величину еколого-економічних ризиків та можливих збитків (втрат) або ж, навпаки, на величину еколого-економічних ефектів діяльності суб'єктів господарювання [4].

III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Системи екологічної логістики до складаються з великої кількості елементів зі складною схемою взаємозв'язків між ними (рис. 1).

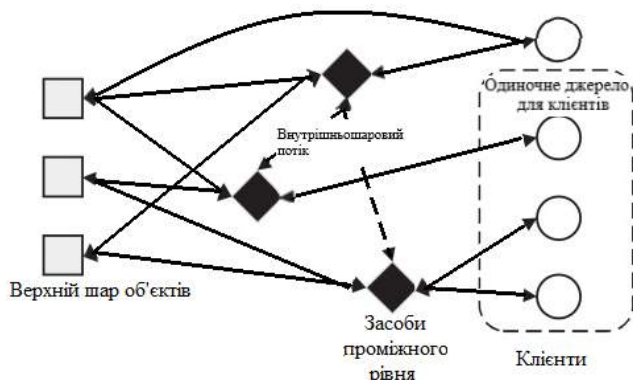


Рис. 1. Приклад структури SC-мережі з реверсивним потоками

Створення формалізованого опису задачі оптимізації СЕЛ є проблемою, що складається з сукупності неповністю визначених задач, для яких не сконструйовані моделі та методи розв'язання [10]. Будемо розглядати її як метазадачу $MetaTask$, яка складається з множини задач $MetaTask = \{Task^l\}$, $l = \overline{1, n_l}$, що відносяться до різних ієрархічних рівнів, з їх взаємозв'язками за вхідними даними та результатами розв'язання:

$$Task^l = \{Task_i^l\}, \quad l = \overline{1, n_l}, \quad i = \overline{1, n_i}, \quad (2)$$

де n_l - кількість рівнів опису; n_i - кількість задач на рівні l .

Кожну із задач (2) формально являє собою перетворювач даних:

$$Task_i^l: In_i^l \rightarrow Out_i^l, \quad l = \overline{1, n_l}, \quad i = \overline{1, n_i}, \quad (3)$$

де In_i^l , Out_i^l - відповідно вхідні та вихідні дані i -ої задачі l -го рівня.

На нижньому рівні ($l = 2$) розв'язуються задачі системної оптимізації СЕЛ, що виникають на стадіях її передпроектних досліджень, проектування, створення й експлуатації [10]: $Task_1^2$ - вибір принципів побудови; $Task_2^2$ - вибір структури; $Task_3^2$ - визначення топології елементів і зв'язків; $Task_4^2$ - вибір технології функціонування; $Task_5^2$ - визначення параметрів елементів і зв'язків; $Task_6^2$ - оцінка ефективності і вибір рішень.

Для розв'язання задачі оптимізації СЕЛ пропонується використати апарат агрегативно-декомпозиційного підходу, системного аналізу та системного проектування складних систем [11–12], на основі чого обрана мережева модель задачі її системної оптимізації. Це дозволяє для розв'язання множини задач (2), пов'язаних за вхідними та вихідними даними (3), використати логічну схему оптимізації територіально розподілених об'єктів і визначити раціональну послідовність розв'язання комплексу задач системної оптимізації СЕЛ [12–13].

Задача оптимізації мережі ланцюжків поставок для одного постачальника і одного переробника може бути подана у такій постановці. Задані множини: територіально розосереджених споживачів $Ob = \{ob_i\}$, $i = \overline{1, n_o}$ та їх характеристик (місця розміщення, потреби, витрати на транспортування, зберігання, перевантаження); типових елементів $\Omega_E = \{\omega\}$ і зв'язків (транспортних засобів) $\Omega_C = \{\omega\}$, на базі яких створюється система; місць можливого розміщення її проміжних елементів $G = \{g\}$; допустимих технологій її функціонування $\Gamma = \{\gamma\}$.

Необхідно визначити: кількість проміжних елементів системи (складів, хабів тощо) n_E ; їх типи $X = \{x_i^\omega\}$, $i = \overline{1, n_E}$, $\omega \in \Omega_E$; місця розміщення проміжних елементів $Y = \{y_i^g\}$, $i = \overline{1, n_E}$, $g \in G$; множини та типи зв'язків між елементами $R = \{r_{ij}^\omega\}$, $i, j = \overline{1, n_E}$, $\omega \in \Omega_C$; підмножини об'єктів (споживачів), що закріплені за кожним із проміжних елементів $V = \{Ob_i\}$, $i = \overline{1, n_E}$, $\bigcup_{i=1}^{n_E} Ob_i = Ob$ і технологій їх обслуговування $Z = \{z_i^\gamma\}$, $i = \overline{1, n_E}$, $\gamma \in \Gamma$. При цьому бажаною метою є екстремізація одного або множини часткових критеріїв ефективності:

- витрат $k_1(n_E, X, Y, R, V, Z) \rightarrow \min_{n_E, X, Y, R, V, Z}$;
- часу доставки $k_2(n_E, X, Y, R, V, Z) \rightarrow \min_{n_E, X, Y, R, V, Z}$;
- живучості $k_3(n_E, X, Y, R, V, Z) \rightarrow \max_{n_E, X, Y, R, V, Z}$;
- надійності $k_4(n_E, X, Y, R, V, Z) \rightarrow \max_{n_E, X, Y, R, V, Z}$.

Розв'язувана задача може бути подана як задача



оптимізації: $s^o = \arg \max_{s \in S^*} P(s)$, де $P(s)$ - узагальнена оцінка s -го варіанта побудови системи.

Неповна визначеність вхідних даних регуляризується моделями нечітких множин з використанням Π -, S - або S -подібних функцій належності [14, 15]. Неповна визначеність мети створення системи (1) регуляризується за допомогою моделей багатокритеріального оцінювання на основі поліному Колмогорова-Габора [16]:

$$P(s) = \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \xi_i(s) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \lambda_{ij} \cdot \xi_i(s) \cdot \xi_j(s) + \dots, \quad (4)$$

де m - кількість часткових критеріїв; λ_i, λ_{ij} - вагові коефіцієнти часткових критеріїв $k_i(s)$ та їх добутків $\lambda_i \geq 0, \lambda_{ij} \geq 0, i = \overline{1, m}, \xi_i(s)$ - функція корисності часткового критерію $k_i(x), i = \overline{1, m}$.

При цьому функція загальної корисності (4) розглядається як функція належності нечіткій множині «кращий варіант», що може бути подана як множина упорядкованих пар: «Кращий варіант» = $\{ \langle s, P(s) \rangle \}$, де $s \in S^*$ - рішення з множини допустимих; $P(s)$ - значення функції (ступінь) належності рішення $s \in S^*$ нечіткій множині «Кращий варіант» (1).

Задача визначення вектора параметрів моделі багатокритеріального оцінювання $\lambda_i, \lambda_{ij}, i, j = \overline{1, m}$ (4) є некоректною. За умови визначеності параметрів функцій корисності часткових критеріїв $\xi_i(s), i = \overline{1, m}$ регуляризація здійснюється шляхом зведення її до задачі пошуку чебишовської точки [16]. Вибір параметрів функцій корисності часткових критеріїв (у залежності від їх виду) може здійснюватися методами сіток, покоординатного спуску, штучних нейронних мереж.

Для розв'язання задачі оптимізації ланцюжків поставок у централізованих трирівневих системах екологічної логістики запропоновані модифікації методу спрямованого перебору варіантів за кількістю проміжних елементів у системі [17].

IV. ВИСНОВКИ

З урахуванням взаємозв'язку задач структурної, топологічної, параметричної та технологічної оптимізації виконані формалізація опису та цілей створення систем екологічної логістики, що відображають показники їх ефекту і витрат ресурсів на їх створення й експлуатацію. Декомпозиція проблеми системної оптимізації дозволила виділити задачі їх аналізу і синтезу, які вирішуються за множиною показників в умовах неповної визначеності цілей і даних. З урахуванням взаємозв'язку виділених задач за вхідними і вихідними даними запропоновано метод спрямованого перебору для оптимізації мереж

ланцюжків поставок у централізованих системах екологічної логістики з реверсивними потоками. Практичне використання розробленого методу дозволяє підвищити ефективність процедур багатокритеріальної оптимізації мереж ланцюжків поставок у системах екологічної логістики за умов неповної визначеності цілей і даних.

ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Д. Бауэрсокс, Д. Клосс, Логистика: интегрированная цепь поставок. 2-е изд. / [Пер. с англ. Н.Н. Барышниковой, Б.С. Пинскера], М.: Издательство «Олимп-Бизнес», 2017, 640 с.
- [2] K. Govindan, M. Fattahi, E. Keyvanshokoo, "Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions", *European Journal of Operational Research*, vol. 263, pp. 108–141, 2017.
- [3] Л.М. Гурч, Л.С. Хмара, "Розвиток «зеленої логістики» в Україні", *Вісник Національного університету «Львівська політехніка. Логістика*, № 811, с. 86–91, 2014.
- [4] Ю.В. Чортюк, "Напрямки зниження негативного еколого-економічного впливу логістичної системи", *Механізм регулювання економіки*, №3, с. 165–172, 2007.
- [5] В.А. Лазарев, И.А. Кулькова, "Реверсивная логистика – логистика возвратных и обратных потоков", *Управленец*, № 5 (51), с. 48–51, 2014.
- [6] Е.И. Павлова, И.А. Мамедова, "Возвратные товаропотоки в логистике: причинные связи", *Мир транспорта*, т. 13, № 5, с. 124–131, 2015.
- [7] И.Г. Смирнов, Логистика: просторово-территориальный вимір, К.: Обрії, 2004, 335 с.
- [8] Э.Г. Петров, В.П. Писклакова, В.В. Бескоровайный, *Территориально распределенные системы обслуживания*. – Киев: Техника, 1992, 208 с.
- [9] M.S. Pishvae, J. Razmi, "Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming", *Applied Mathematical Modelling*, vol. 36, p. 3433–3446, 2012.
- [10] В.В. Бескоровайный, "Системологический анализ проблемы структурного синтеза территориально распределенных систем", *Автоматизированные системы управления и приборы автоматки*, вып. 120, с. 29–37, 2002.
- [11] Дж. Клир, Системология. Автоматизация решения системных задач. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1990, 544 с.
- [12] А.А. Тимченко, Основы системного проектирования та аналізу складних об'єктів: У 2-х кн. Кн. 1. Основы САПР та системного проектирования складных об'єктів / За ред. В.І.Бикова, К.: Либідь, 2000, 272 с.
- [13] В.В. Бескоровайный, "Синтез логической схемы системного проектирования территориально распределенных систем", *Радиоэлектроника и информатика*, № 3, с. 94 – 96, 2002.
- [14] И.Г. Раскин, О.В. Серая, Нечеткая математика. Основы теории. Приложения, Харьков: Парус, 2008, 352 с.
- [15] V. Beskorovainyi, H. Berezovskyi, "Identification of preferences in decision support systems", *ECONTECHMOD*, Vol. 06, №4, pp. 15-20, 2017.
- [16] В.В. Бескоровайный, И.В. Трофименко, "Структурно-параметрична ідентифікація моделей багатofакторного оцінювання", *Системні озброєння і військова техніка*, № 3 (7), с. 56-59, 2006.
- [17] V. Beskorovainyi, K. Podoliaka, "Reengineering the topological structure of large-scale monitoring systems", *ECONTECHMOD*, Vol. 4 (3), pp. 13–18, 2015.

