

Моделі транспортної логістики для управління територіально розподіленими технологічними комплексами

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»

Актуальність задачі

Економічні перетворення в Україні спрямовані на розвиток сучасних технологічних комплексів. Однією з характерних особливостей великих підприємств та об'єднань (аерокосмічної галузі, газо- і нафтовидобутку, транспортного комплексу і т.д.) є територіально розподілений виробничий цикл. Це призводить до виникнення складних для планування задач транспортного обслуговування (ТО) розподілених технологічних комплексів (РТК).

Вантажі можуть доставлятися з баз зберігання (БЗ), розташованих на великій відстані від технологічних вузлів (ТВ) РТК. Тому планування ТО РТК необхідно здійснювати з урахуванням сучасних вимог транспортної логістики, що враховує бізнес-процеси, які пов'язані з доставкою вантажів та обслуговуванням РТК. В існуючих методах маршрутизації транспортних засобів, основаних на відомих алгоритмах (наприклад, на алгоритмі Дейкстри) [1], не враховані особливості, реальні умови і обмеження, пов'язані з ТО РТК. Для автоматизованого управління ТО РТК необхідно: проаналізувати різноманітність схем і потоків транспортного обслуговування РТК; розробити методи планування та маршрутизації транспортних засобів.

У зв'язку з цим актуальною науковою задачею є розробка методу планування транспортного обслуговування та формування маршрутів пересування транспортних засобів у розподілених виробничих системах.

Постановка задачі дослідження

Метою роботи є підвищення ефективності планування транспортного обслуговування РТК на основі структурного аналізу транспортної мережі РТК, автоматизованого формування маршрутів транспортних засобів за умов обмежень, що змінюються, і вимог виробництва. Для цього необхідно вирішити такі задачі:

- розробити методи структурного аналізу ТО РТК для формування можливих варіантів транспортної системи;
- розробити метод маршрутизації транспортних засобів у ТО РТК;
- створити імітаційну модель для вирішення задач автоматизованого планування перевезень у РТК.

Проведені у роботі дослідження базуються на використанні методів теорії перерахування та комбінаторики для структурного аналізу схем і потоків транспортного обслуговування РТК; методах теорії імітаційного моделювання складних систем для задач планування ТО РТК; методах штучного інтелекту для створення знанняорієнтованої моделі маршрутизації транспортних засобів; методах об'єктно-орієнтованої інформаційної технології для створення підсистеми аналізу та планування ТО РТК.

Метод вирішення

Виконаємо структурний аналіз РТК на основі методів теорії перерахування та комбінаторного аналізу [2]. Різноманітність технологічних процесів, що проходять у РТК, вимоги своєчасного обслуговування приводять до множини можливих структур і схем вантажопотоків транспортного обслуговування РТК. Для оцінки множини варіантів ТО РТК виділені такі етапи:

- підрахування варіантів структур ТО РТК;
- автоматизоване формування варіантів ТО РТК.

Спочатку здійснюється перехід від структурних властивостей ТО РТК до теоретико-множинного подання. Наприклад, є множина технологічних модулів, які відображаються у множину технологічних вузлів (систем) РТК. Далі підраховуються класи еквівалентності (введеної однаковості) варіантів з використанням результатів (основних теорем і висновків) теорії перерахування (Пойа, Де Брейн). Здійснюються різні постановки перерахування варіантів РТК. Наприклад, якщо при формуванні РТК цікавить тільки склад технологічних модулів (множина B) без урахування транспортних зв'язків між ними, то на множині R окремих систем, що входять до складу РТК, діє група H_R , яка є симетричною групою S_r , $r = |R|$. Необхідно знайти всі можливі варіанти складу РТК. Ця задача еквівалентна задачі розбиття числа n (кількість модулів) на не більш ніж r частин (систем). Тоді число варіантів [2]:

$$K = |H_R|^{-1} \sum_{h \in H_R} Z(H_B; \dots, \sum_{j/i} j C_j, \dots) = \frac{1}{r!} \sum_{h \in S_r} Z(S_n; \dots, \sum_{j/i} j C_j, \dots), \quad (1)$$

де H_B - група підстановок вихідної множини модулів B , $n = |B|$, $H_B = S_n$, H_R - група підстановок, що діє на множині R ; h - елементарна підстановка; $\{C_1, C_2, \dots\}$ – тип елемента h ; $Z(S_n; \dots)$ - цикловий індекс групи S_n .

Далі досліджуються структури РТК у вигляді топологічного уявлення ТО РТК. Визначено комбінаторно-групові властивості основних типів ТО РТК, за допомогою яких можна перелічити всі можливі варіанти структур РТК: одновимірний (послідовний) транспортний зв'язок; матрична структура; магістральний зв'язок; радіальний, кільцевий зв'язки та ін. Наприклад, для змішаної радіально-кільцевої топології транспортних зв'язків комбінаторно-групові властивості графа G структури РТК описуються у вигляді групи підстановок вершин графа:

$$\Gamma(G) = D_p \cdot [S_1 + S_{p''}], \quad (2)$$

де D_p - дієдральна група ступеня p' ; p' – число окремих систем РТК; p'' – число підсистем, що входять до складу систем РТК.

Як приклад розглянемо структуру ТО РТК для обслуговування нафтовидобутку (рис. 1). Тут: 1 – райони свердловин з видобутку нафти; 2 – модулі (заводи) з попереднього очищення нафти; 3 – модулі (заводи) з остаточного очищення нафти для подачі в магістральний нафтопровід; 4 – бази зберігання матеріалів, інструмента й оснащення, що обслуговують нафтовидобуток.

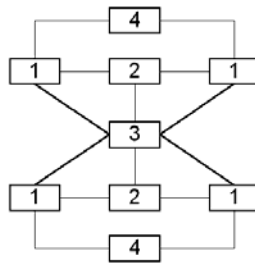


Рис. 1. РТК нафтовидобутку

Отримано цикловий індекс групи підстановок вершин графа G структури РТК

$$Z(\Gamma(G)) = 1/8(x_{1(1)}^4 x_{1(2)}^2 x_{1(3)} + 2x_{1(1)}^2 x_{1(2)}^2 x_{1(3)} + x_{2(1)}^2 x_{1(2)}^2 x_{1(3)} + 2x_{2(1)}^2 x_{2(2)} x_{1(3)} + 2x_{4(1)} x_{2(2)} x_{1(3)}), \quad (3)$$

де $x_{i(j)}$ - i -а змінна, що стосується j -го найменування модуля РТК.

Нехай множина модулів, з яких формується РТК, включає в себе:

$P_{1(1)} = 2, P_{2(1)} = 2, P_{1(2)} = 1, P_{2(2)} = 1, P_{3(2)} = 1, P_{1(3)} = 1, P_{2(3)} = 1$, де $P_{k(j)}$ - число пристрою k -го типу j -го найменування. Цикловий індекс для групи підстановок H вихідної множини модулів РТК:

$$Z(H) = 1/4(x_{1(1)}^4 x_{1(2)}^3 x_{1(3)}^2 + x_{2(1)}^2 x_{1(2)}^3 x_{1(3)}^2 + 2x_{1(1)}^2 x_{2(1)} x_{1(2)}^3 x_{1(3)}^2). \quad (4)$$

На основі формули теорії перерахування Де Брейна для підрахунку відображень множини H у G отримано кількість можливих варіантів нафтовидобувного комплексу для заданої топології транспортних зв'язків у РТК:

$$K = Z(\Gamma(G); \frac{\partial}{\partial z_1}, \frac{\partial}{\partial z_2}, \dots) Z(H_B; 1 + z_1, 1 + 2z_2, \dots) =$$

$$= \frac{1}{4 \cdot 8} (6 \cdot 4! 2! + 6 \cdot 2^2 \cdot 2! 2! + 24 \cdot 2! \cdot 2 \cdot 2!) = 18.$$

(5)

Далі побудовані методи автоматизованого формування варіантів структур ТО РТК з урахуванням підрахованих варіантів. Найпростіший метод оснований на переборі значень цілочислових змінних x_j , що являють собою кількість окремих систем ТО РТК. Для скорочення комбінацій, що перебираються, вибираємо значення x_n з множини $\{0, 1\}$, $x_{n-1} - \{0, 1, 2\}, \dots, x_1 - \{0, 1, 2, \dots, n\}$. Більш складний метод оснований на використанні твірних функцій (енумераторів) і введеного в роботі лексикографічного упорядкування варіантів. Наприклад, для підрахунку варіантів структур ТО РТК граф G структури у вигляді матриці суміжності подається за допомогою лексикографічного впорядкованого списку. Отримане подання використовується для розпізнавання ізоморфізмів позначених графів структур ТО РТК.

Далі проведено аналіз вантажопотоків транспортного обслуговування РТК. Аналізуються різні схеми матеріальних потоків: односпрямований; паралельні потоки з різними зв'язками; потоки з петлями; замкнуті й розімкнуті, комбіновані потоки та ін. Гнучкість схем вантажопотоків пов'язана з кількістю можливих варіантів організації маршрутів руху транспорту. Так, наприклад, для розімкнутих

паралельних транспортних потоків із внутрішнім розташуванням n модулів РТК кількість можливих транспортних маршрутів

$$L_T = 2(2^n - 1). \quad (6)$$

Для складних систем ТО РТК характерна наявність великої кількості паралельних вантажопотоків. Аналізуються варіанти з одно- і багатомономенклатурним поданням вантажопотоків. Так, у випадку використання декількох типів технологічних модулів у РТК кількість варіантів закріплень модулів за технологічними операціями всередині окремого p -го вантажопотоку транспортного обслуговування

$$K_p = \prod_{j=1}^r \left(\frac{1}{e_j!} \sum_{h \in S_{e_j}} Z[S_L; \dots, (\sum_{j/i} P_{h_j} C_{h_j})^{m_j}, \dots] \right), \quad (7)$$

де r - число типів модулів; e_j - кількість модулів j -го типу.

Якщо за кожним матеріальним потоком закріплюються «свої» модулі, то в цьому випадку будь-який потік і закріплення модулів у ньому можна розглядати незалежно від інших потоків. Загальна кількість можливих варіантів закріплень з урахуванням всіх матеріальних потоків у РТК визначається формулою

$$K_\Sigma = \prod_{p=1}^L K_p. \quad (8)$$

Розробимо метод планування перевезень, оснований на імітаційному моделюванні, в якому враховуються основні критерії транспортного обслуговування РТК – час доставки вантажів і вартість перевезень. Виділимо особливості транспортного обслуговування РТК, пов'язані з використанням різних транспортних магістралей (автомобільних, залізничних, морських), транспортних засобів, обмеженнями маси, габаритних розмірів, умов руху, тимчасовими обмеженнями дорожнього руху, умовами перевезень, що змінюються. Перераховані особливості ускладнюють використання традиційних методів вирішення транспортних задач.

Запропонуємо поетапний підхід для вирішення задачі планування ТО РТК. На першому етапі формується портфель замовлень щодо введення в експлуатацію нових технологічних об'єктів РТК. Для цього весь інтервал планування розбивається на ряд підінтервалів, для кожного з яких виділяються актуальні (пріоритетні) технологічні об'єкти, які вводять в експлуатацію. Для цих об'єктів необхідно побудувати графіки допоміжних (транспортних) операцій, прив'язані до графіків введення нових технологічних об'єктів із заданими директивними строками D_i . Операції транспортування на цьому етапі розглядаються спрощено, шляхом моделювання переміщення вантажів без вибору раціональних маршрутів руху. Основна задача першого етапу пов'язана із задоволенням директивних строків D_i і урахуванням страхових запасів за часом.

На другому етапі (маршрутизація) проводиться пошук раціональних маршрутів, що задовольняють заданий набір умов і обмежень. Для маршрутизації розроблено оригінальний метод, оснований на імітаційному моделюванні та розповсюдженні «числових хвиль» у транспортній мережі РТК. Механізм моделювання ґрунтується на ідеї генетичного алгоритму, в якому є процес «розмноження» й «загибелі» заявок. «Розмноження» заявок здійснюється при генеруванні «числових хвиль» у сусідніх вузлах ТО РТК. «Загибель» заявок із

безперспективними маршрутами пов'язана з виконанням умов і обмежень ТО. Це дозволяє ефективно відкидати ті «числові хвили», які не відповідають раціональним маршрутам руху. Крім того, при досягненні «числовою хвилею» кінцевого вузла автоматично відкидаються і припиняють розмножуватися всі інші «числові хвили».

Для вирішення задачі планування транспортних перевезень враховані різні критерії ефективності транспортного обслуговування РТК – час доставки вантажів і вартість перевезень. Наприклад, вартість одного кілометра перевезення вантажу j -м транспортним засобом для i -го маршруту:

$$СП_j = \sum_i (q_{ij} + p_{ij} + s_{ij} + l_{ij} + \dots), \quad (9)$$

де q_{ij} - вартість споживаних паливно-мастильних матеріалів; p_{ij} - усереднена вартість простою; s_{ij} - усереднена вартість ремонту; l_{ij} - вартість одного кілометра проїзду по платній дорозі й т.д.

Вартість перевезення вантажів всіх транспортних засобів, що беруть участь у виконанні плану транспортного обслуговування на найближчий період:

$$СП = \sum_j СП_j. \quad (10)$$

Відзначимо, що значення часу руху транспортних засобів і вартість СП перевезення вантажів формується під час імітаційного моделювання ТО РТК.

Розглянемо різні постановки задачі транспортного обслуговування РТК з урахуванням бізнес-процесів транспортної логістики:

1. Забезпечити своєчасну, без затримок, доставку вантажів з урахуванням обмежень щодо вартості перевезення вантажів.
2. Мінімізувати транспортні витрати з урахуванням обмежень щодо часу транспортного обслуговування.
3. Забезпечити вирішення компромісної задачі, яка мінімізує вартість перевезення і час доставки вантажів з урахуванням обмежень щодо вартості й часу транспортного обслуговування.

Створимо знанняорієнтовану модель РТК, основу на ієрархічній структурі фреймів [3], у якій відображені всі характеристики транспортних засобів і транспортної системи РТК. Отримана структура використовується для імітаційного моделювання РТК (рис. 2).

Розроблений комплекс моделей і методів використано для створення комп'ютерної системи аналізу та планування транспортного обслуговування розподілених технологічних комплексів (КСАП ТО РТК). За допомогою КСАП ТО РТК менеджери, пов'язані з транспортним обслуговуванням РТК, можуть аналізувати нові структури РТК, модернізувати і реструктуризувати існуючу транспортну мережу, вибирати різні варіанти використання доріг, планувати і складати маршрути руху транспортних засобів. У КСАП ТО РТК виділимо основні напрямки дослідження:

- структурний аналіз транспортної мережі РТК (СА ТМ РТК);
- планування перевезень РТК на найближчий період часу (ПП РТК).

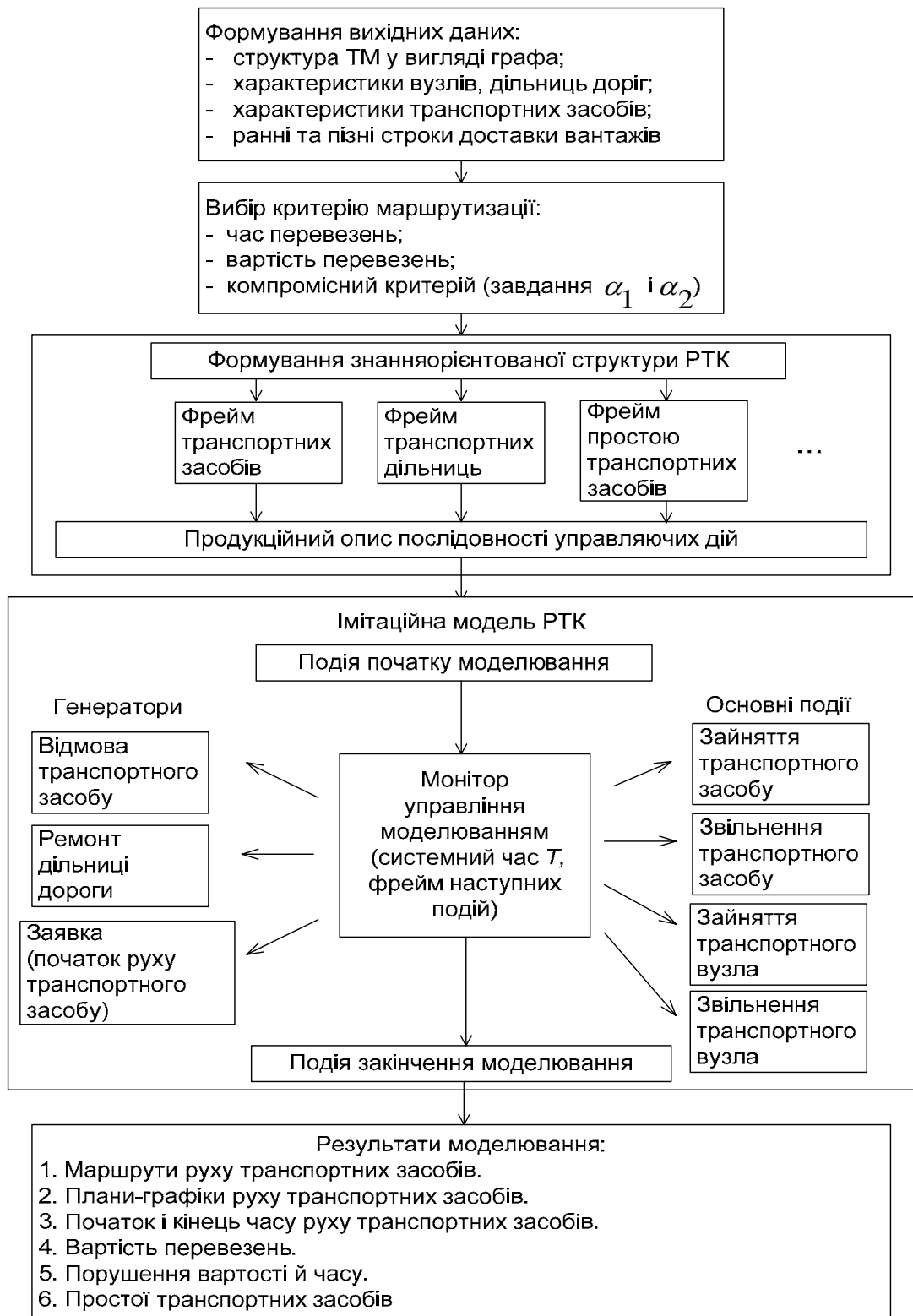


Рис. 2. Схема імітаційного моделювання транспортного обслуговування РТК

Кожен із напрямків складається з підсистем, а підсистеми – з модулів.

У рамках науково-технічного співробітництва між Національним аерокосмічним університетом ім. М.Є. Жуковського «ХАІ» і Державним науково-дослідним інститутом нафти (Мексика) здійснено моделювання транспортного

обслуговування нафтокомплексу. Дослідження проведені на реальних фрагментах системи видобутку і транспортування нафти.

Проаналізовано перспективні проекти розвитку інфраструктури нафтокомплексу з урахуванням модернізації й розвитку системи транспортного обслуговування. Отримано плани обслуговування та маршрути руху транспортних засобів (залізничний транспорт, морські судна, вертольоти) від баз зберігання до основних технологічних вузлів, які були використані в задачах планування розвитку інфраструктури комплексу.

Отримані плани й маршрути в середньому на 12% мінімізують час доставки вантажів і на 8% - вартість перевезень у порівнянні з евристичними методами, які використовують диспетчери перевезень.

Висновок

У роботі вирішено актуальну задачу розробки комплексу математичних моделей і методів автоматизованого планування транспортного обслуговування та формування маршрутів пересування транспортних засобів у розподілених виробничих системах.

Ця задача має важливе значення для автоматизованого управління транспортним обслуговуванням розподілених виробничих комплексів, для яких необхідно організувати вантажоперевезення, що забезпечують безперебійну роботу основних технологічних вузлів.

Розроблені моделі, методи та програмний інструментарій можуть бути використані при аналізі транспортних систем, в управлінні транспортною логістикою, при формуванні розкладів роботи автомобільного, залізничного й авіаційного транспорту.

Практичне використання результатів роботи дозволяє:

- підвищити ефективність планування ТО РТК;
- сформувані раціональні схеми вантажопотоків і маршрути руху транспортних засобів;
- одержати різні плани (оперативні й перспективні) і плани-графіки пересування транспортних засобів.

Список літератури

1. Филлипс Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей / Под ред. Б.Г. Сушкова – М.: Мир, 1989. – 496 с.
2. Западня К.О. Топологический анализ и синтез структур распределенных технологических комплексов // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. –2004. – № 4(8). – С. 131-136.
3. Западня К.О. Знаниеориентированное имитационное моделирование транспортного обслуживания в распределенных технологических комплексах // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2005. – № 6. – С. 89-93.