

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ОПТИМІЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ВИТРАТ З УРАХУВАННЯМ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ТЕРМІНІВ ДОСТАВКИ

НОВОЖИЛОВА М.В., ЛИТВИНЕНКО Є.М.

Розглядається транспортно-логістична система обслуговування клієнтів з організацією доставки та вивезення інструментів. Пропонується динамічна модель виконання портфеля замовлень на визначеному горизонті планування з мінімізацією транспортних витрат.

1. Вступ

Перевезення продукції або обладнання автомобільним транспортом є невід'ємною складовою функціонування будь-якого підприємства або організації. В умовах конкуренції та жорсткої обмеженості ресурсів суб'єкти господарювання приділяють значну увагу мінімізації транспортних витрат.

Особливо актуальною задачею мінімізації транспортних витрат є для транспортно-логістичних систем (ТЛС) підприємств та організацій [1], які залежать від щоденного використання транспортних засобів, наприклад:

– надають клієнтам, на їх замовлення, в оренду інструменти, машини та механізми або зразки інструментів для тимчасового користування та випробування;

– організують тестування та обслуговування клієнтського обладнання у своїх лабораторіях тощо.

Важливою умовою функціонування таких транспортно-логістичних систем є організація доставки, на замовлення клієнтів, обладнання (інструментів певних типів) з їх наступним поверненням через деякий проміжок часу. Крім того, для таких систем характерна можливість відтермінування у часі виконання замовлень, узгоджена з клієнтами.

Складність, багатовимірність і, в загальному випадку, багатокритеріальність задач обумовлює необхідність моделювання ТЛС із урахуванням можливості зміни часу виконання замовлень з метою:

– зменшення витрат на утримання транспортних засобів шляхом мінімізації їх кількості;

– зменшення витрат на слідування до клієнта шляхом оптимізації транспортних маршрутів;

– зменшення холостого пробігу транспортних засобів.

2. Огляд попередніх досліджень

Починаючи з відомої публікації Г. Данцига [2], яка була першою в даній предметній галузі, цей клас задач викликає незмінний інтерес дослідників. Задачі оптимізації структури та складу ТЛС розглядалися у чис-

ленних наукових публікаціях вітчизняних та закордонних авторів.

Виділимо роботи [3, 4], які присвячені задачам оперативного планування перевезень та розподілу вантажів. В дослідженні [5] запропоновано багатокритеріальну задачу підвищення ефективності управління перевезенням вантажів у динамічній транспортній мережі за рахунок складання попереднього плану перевезень.

В роботах [6-10] розглянуті задачі маршрутизації транспортних засобів. В [7] досліджена транспортна модель з обмеженою кількістю транспортних засобів (ТЗ), в публікації [9] розглянуто наближений метод розв'язання кластерної задачі маршрутизації.

Слід зазначити, що задачі, які передбачають не тільки доставку, але й повернення вантажів, є вкрай малодослідженими. Крім того, в більшості досліджень розглядаються задачі оперативного планування [11, 12], а задачам з необхідністю використання горизонту планування приділяється недостатня увага.

3. Опис транспортно-логістичної системи

Метою дослідження є побудова динамічної моделі задачі мінімізації витрат в ТЛС з урахуванням можливості відтермінування у часі виконання замовлень.

Розглянемо ТЛС як цілеспрямовану систему Λ , що містить множину різнорідних елементів M , на якій реалізовано множину зв'язків R , що упорядковують елементи в структуру

$$\Lambda = \langle (M \times R) \times P \rangle, \quad (1)$$

де P – множина властивостей структури $(M \times R)$, що дають змогу досягти заданої цілі [13].

В системі, що розглядається, множина елементів M містить склад C_0 , множину клієнтів $C = (C_1, C_2, \dots, C_N)$ та множину транспортних засобів $V = (V_1, V_2, \dots, V_J)$ (рис. 1).

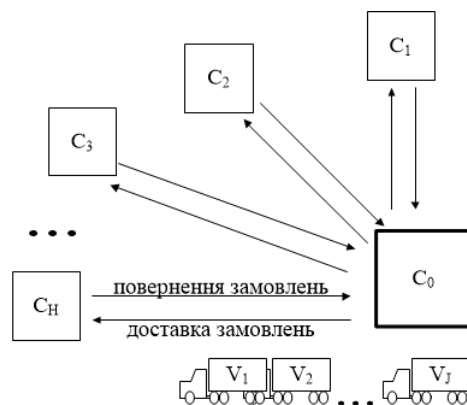


Рис. 1. Елементи ТЛС

Позначимо координати розміщення C_0 через (x_0, y_0) . Склад C_0 містить упорядковану множину типів інструментів $I = (I_1, I_2, \dots, I_N)$, які можуть бути надані клієнтам на їх замовлення.

Кожен з типів інструментів визначається параметрами:

$$I_i = (q_i, w_i), i = 1, \dots, I,$$

де q_i – доступна кількість інструментів i -го типу; w_i – вага одиниці інструмента i -го типу.

Для використання у подальшому введемо

$$Q = \sum_{i=1}^I q_i, Q^i = \sum_{n=1}^{i-1} q_n.$$

Позначимо через (x_h, y_h) координати розміщення елемента $C_h, h=1, \dots, N$ множини клієнтів C .

Визначення 1. Горизонтом планування $[1, T]$ будемо називати інтервал часу, на якому планується виконання замовлення клієнтів.

Врамак даної роботи вважатимемо елементи множини $V = (V_1, V_2, \dots, V_J)$ однотипними та визначатимемо як

$$V_j = (AW_j, AD_j, AC_j), j = 1, \dots, J, \quad (2)$$

де AW_j – вантажопідйомність; AD_j – максимальний добовий пробіг; AC_j – вартість використання V_j за період $[1, T]$.

Транспортні засоби виділяються на весь період горизонту планування. Використання ТЗ один день означає його оренду на весь період функціонування системи.

Транспортні перевезення здійснюються згідно з транспортною мережею, яка є повним графом $G = (C, E)$ з множиною вершин C та множиною ребер E . Вершинам графа відповідають склад та клієнти $C = \{C_0, C_h\}$, а ребрам $e_{ug} \in E$ – ділянки шляху, які їх з'єднують (рис. 2).



Рис. 2. Граф транспортної мережі

Ваги s_{ug} ребер e_{ug} обчислюються таким чином:

$$s_{ug} = \sqrt{(x_g - x_u)^2 + (y_g - y_u)^2}, \quad (3)$$

$u, g = 0, \dots, N, u \neq g$.

Транспортний засіб може здійснювати декілька рейсів протягом одного дня.

Визначення 2. Рейсом 1 транспортного засобу V_j будемо називати цикл на графі G вигляду

$$l = (C_0, \dots, C_h, C_{h+1}, \dots, C_0).$$

Рейс є припустимим, якщо виконані замовлення усіх поточних клієнтів та загальна вага інструментів, що перевозяться, не перевищує вантажопідйомність AW_j .

Визначення 3. Маршрутом Ψ_{jt} назвемо сукупність рейсів V_j , які виконуються протягом одного дня t .

Маршрут Ψ_{jt} є припустимим, якщо він складається з припустимих рейсів та їх загальна довжина не перевищує максимальний добовий пробіг транспортного засобу AD_j .

Замовлення інструментів клієнтами визначаються як:

$$R_k = (i_k, h_k, t_{\min k}, t_{\max k}, q_k, d_k), k = 1, \dots, K, \quad (4)$$

де k – номер замовлення; $i_k = 1, \dots, N$ – тип замовленого інструмента; $h_k = 1, \dots, N$ – номер клієнта; $[t_{\min k} \dots t_{\max k}]$ – період виконання замовлення; q_k – кількість замовлених інструментів; d_k – тривалість виконання замовлення.

Замовлення $R = (R_1, R_2, \dots, R_K)$ утворюють множину зв'язків ТЛС (1).

Таким чином, задача планування роботи ТЛС на період $[1, T]$ включає виконання K замовлень на доставку клієнтам інструментів зі складу та їх повернення на склад.

4. Властивості постановки задачі

Визначимо властивості постановки задачі, що розглядається.

Властивість 1. Кожний клієнт C_h генерує одне або декілька замовлень R_k виду (4). Замовлення містить інструменти одного типу. У разі необхідності замовлення декількох інструментів клієнт генерує відповідну кількість замовлень.

Властивість 2. Момент t_k початку виконання певного замовлення R_k належить інтервалу $[t_{\min k}, t_{\max k} - d_k + 1]$.

Згідно з властивістю 2 існує $(t_{\max k} - d_k - t_{\min k} + 1)$ варіантів виконання замовлення R_k (рис. 3).

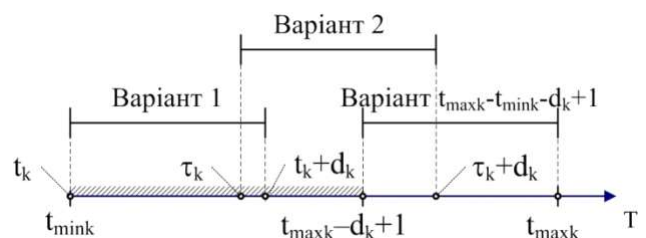


Рис. 3. Приклади варіантів виконання замовлення R_k

Властивість 3. Повернення інструментів типу i_k від клієнта C_h на склад відбувається у перший день після завершення виконання замовлення R_k . Це день $(t_k + d_k)$. Інструмент стає доступним для іншого замовлення наступного дня $(t_k + d_k + 1)$.

Зважаючи на введені визначення та виділені властивості змістовної постановки задачі, побудуємо загальну динамічну модель оптимізації транспортних витрат.

5. Динамічна модель оптимізації транспортних витрат

Характеристики та властивості ТЛС, наведені вище, є фундаментом постановки задачі мінімізації транспортних витрат ТЛС.

Припустимим (але, очевидно, неоптимальним) є рішення, при якому кожний рейс засобу V_j виконує тільки одне замовлення (відвідує одного клієнта), а кожний транспортний засіб виконує тільки один рейс в день. Одне замовлення, у разі перевищення ним вантажопідйомності ТЗ, може виконуватися декількома ТЗ, кількість яких можна визначити як

$$J_k = \text{round}\left(\frac{q_k^i \times w_i}{AW_j}\right),$$

де round – округлення вгору до найближчого цілого числа.

Тоді верхня оцінка J_{\max} кількості J , необхідних ТЗ, дорівнює

$$J_{\max} = \frac{\sum_{k=1}^K J_k \times (s_{0h_k} + s_{hk0})}{AD_j}.$$

Ендогенні змінні моделі. Введемо булеві змінні:

$$\beta_{jt} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } V_j \text{ використовується у день } t, \\ 0, \text{ інакше,} \end{cases}$$

$$j = 1, \dots, J_{\max},$$

$$\mu_{jt} = \begin{cases} 1, \text{ якщо рейс } l \text{ використовується у день } t, \\ 0, \text{ інакше,} \end{cases}$$

$$l = 1, \dots, L, t = 1, \dots, T,$$

$$x_{ug}^l = \begin{cases} 1, \text{ якщо ребро } e_{ug} \text{ входить у рейс } l, \\ 0, \text{ інакше,} \end{cases}$$

$$l = 1, \dots, L, u, g = 0, \dots, H, u \neq g.$$

Використовуючи підхід [14, 15], введемо у розгляд простір ресурсів TOQ з прямокутною системою координат, в якій горизонтальна вісь OT відповідає горизонту планування $[1, T]$, а вертикальна вісь OQ відбиває інформацію про кількість інструментів i -го типу $i=1, \dots, I$ (рис. 4).

Тоді замовлення R_k є прямокутником розмірів (d_k, q_k^i) у відповідній смузі ресурсів простору TOQ , (t_k, r_k^i) – координати нижнього лівого кута прямокутника R_k , котрі задають розміщення відповідного замовлення у просторі ресурсів (див. рис. 4).

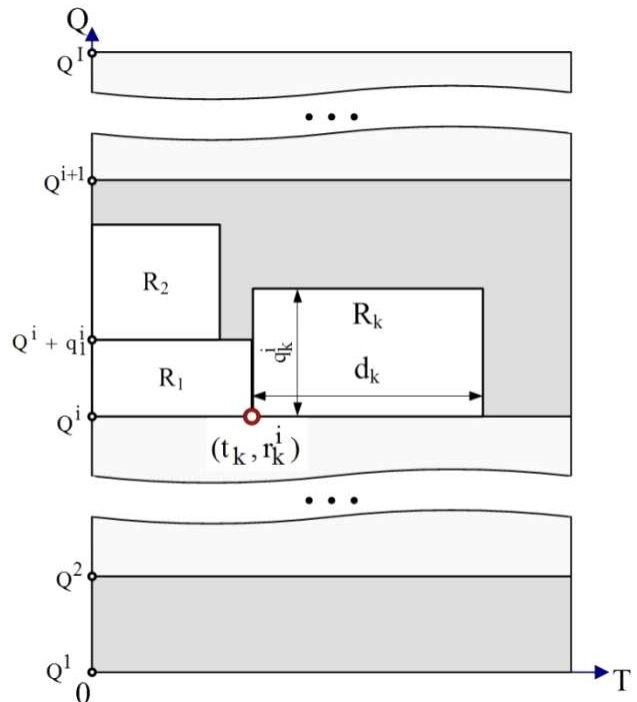


Рис. 4. Розміщення замовлень у просторі ресурсів

Нехай також змінні

$$a_i = \max_{t=1, \dots, T} (r_k^i + q_k^i) \quad i = 1, \dots, N,$$

які визначають максимальну кількість інструментів i -го типу, що одночасно використовуються.

Відмітимо, що ендогенні змінні t_k, r_k^i, a_i можуть сприйматися як неперервні величини, задані у визначених діапазонах.

Цільовий функціонал задачі мінімізації транспортних витрат ТЛС є векторним:

$$F(F_1, F_2, F_3), \quad (5)$$

де функція $F_1(\beta_{jt})$ має вигляд:

$$F_1(\beta_{jt}) = \max_{t=1, \dots, T} \sum_{j=1}^{J_{\max}} \beta_{jt},$$

визначає отримання оптимальної множини транспортних засобів та збігається до мінімуму:

$$F_1(\beta_{jt}) \rightarrow \min.$$

Функціонал $F_2 = \{f_{21}, f_{22}, \dots, f_{2T}\}$, де частковий критерій f_{2t} має вигляд

$$f_{2t} = \sum_{l=1}^L \left(\mu_{lt} \times \left(\sum_{u=0}^H \sum_{g=0}^H s_{ug} \times x_{ug}^l \right) \right) \rightarrow \min,$$

відповідає побудові припустимих щоденних маршрутів мінімальної довжини, які забезпечують виконання передбачених замовлень.

Нарешті, функція F_3 навантаження на транспортні засоби має вигляд

$$F_3 = \sum_{i=1}^N a_i \times w_i \rightarrow \min.$$

Основні обмеження моделі. Загальна кількість доступних для використання інструментів обмежена:

$$a_i \leq q_i. \quad (6)$$

Для виконання кожного замовлення мають бути наявними відповідні інструменти:

$$\begin{cases} r_k^i \geq Q^i \\ -r_k^i \geq -a_i, k = 1, \dots, K. \end{cases} \quad (7)$$

Термін виконання замовлення обмежений:

$$\begin{cases} t_k \geq t_{\min k} \\ -t_k \geq -t_{\max k} + d_k - 1, k = 1, \dots, K. \end{cases} \quad (8)$$

Жодна пара замовлень не може одночасно використовувати один і той же інструмент:

$$\begin{cases} r_m^i - r_k^i \geq q_k^i \\ r_k^i - r_m^i \geq q_m^i \\ t_k - t_m \geq d_m \\ t_m - t_k \geq d_k \end{cases}, k, m = 1, \dots, K. \quad (9)$$

Максимальна довжина маршруту транспортного засобу обмежена:

$$\mu_{lt} \times \sum_{l=1}^L \sum_{u=0}^H \sum_{g=0}^H s_{ug} \times x_{ug}^l \leq AD_j, \forall t = 1, \dots, T, \quad (10)$$

$$\forall j = 1, \dots, J_{\max}.$$

У кожному рейсі кількість ребер, що входить у вершину, дорівнює кількості ребер, які виходять з неї:

$$\sum_{g=0}^H x_{ug}^l = \sum_{g=0}^H x_{gu}^l, u = 0, \dots, H, l = 1, \dots, K. \quad (11)$$

В кожний рейс завжди входить склад:

$$\sum_{g=0}^H x_{og}^l = 1, u = 0, \dots, H, l = 1, \dots, K. \quad (12)$$

Задача (5)-(12) є багатокритеріальною та NP-складною, для розв'язання якої пропонується розбити її на дві взаємозалежні задачі.

Задача 1. Пошук раціонального $(t_1, r_1^i, t_2, r_2^j, \dots, t_K, r_K^n)$ розміщення замовлень на горизонті планування $[1, T]$, або можливо у визначений день t .

Задача 2. Пошук маршруту виконання замовлень для кожного часового такту $t = 1, \dots, T$.

Задача 1 визначає на горизонті планування $[1, T]$ час виконання операцій доставки та повернення інструментів на замовлення клієнтів.

Розв'язання задачі 2 дозволяє визначити кількість транспортних засобів, необхідних для виконання усіх замовлень, та розрахувати їх оптимальні маршрути. У разі потреби відбувається виклик задачі 1 для оптимізації розміщення замовлень на деякому періоді горизонту $[1, T]$ (рис. 5).

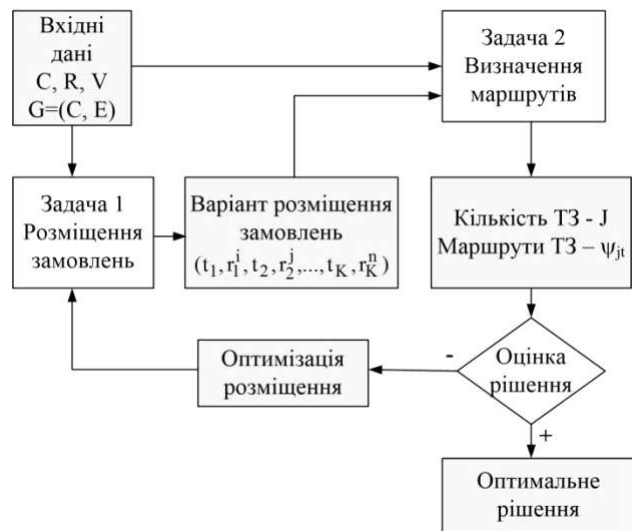


Рис. 5. Розв'язання загальної задачі мінімізації транспортних витрат

6. Висновки

1. Запропоновано теоретико-множинний опис ТЛС, функціонування якої розглядається на горизонті планування.
2. Розроблено багатокритеріальну математичну модель оптимізації транспортних витрат підприємства за рахунок зменшення витрат на оренду ТЗ та оптимізації щоденних транспортних маршрутів. Представлена математична модель дозволяє виконувати стратегічне планування функціонування ТЛС та враховує можливість відтермінування початку виконання замовлень.
3. Запропоноване розбиття оптимізаційної задачі на дві взаємозалежні: задачу розміщення та задачу маршрутизації.

Подальші дослідження спрямовані на побудову та реалізацію методу розв'язання поставленої задачі оптимізації.

Література: 1. *Миротин Л.Б., Гудков В.А., Зырянов В.В.* Управление грузовыми потоками в транспортно-логистических системах / Под ред. Л.Б. Миротина. М.: Горячая линия-Телеком. 2010. 704 с. 2. *Dantzig G.B., Ramser J.H.* The Truck Dispatching Problem // Management Science. 1959. Vol. 6, No. 1. P. 80-91. 3. *Гришко С.В., Гуца О.М., Сухомлинов А.І.* Моделивання виробничої логістики в умовах перебудови підприємства // Радіоелектроніка та інформатика. 2013. № 2. С. 31-34. 4. *Гвоздинський А.М., Обізна М.Ю.* Дослідження інтелектуальних методів розв'язання оптимізаційних задач транспортного типу // Радіоелектроніка та інформатика. 2013. № 4. С. 35-39. 5. *Задоров В.Б., Федусенко О.В., Федусенко А.О.* Застосування методів багатокритеріальної оптимізації до планування вантажних перевезень // Управління розвитком складних систем. 2010. №2. С. 27-31. 6. *Меламед И.И., Сергеев С.И., Сигал И.Х.* Задача коммивояжера. Вопросы теории // Автоматика и телемеханика. 1989. № 9. С. 3-33. 7. *Hajghasem M., Shojaie A.A.* Optimal routing in supply chain aimed at minimizing vehicle cost and supply // Procedia Economics and Finance. 2016. Vol. 36. P. 353-362. 8. *Szucs G.* Decision support for route search and optimum finding in transport networks under uncertainty // Journal of Applied Research and Technology. 2015. Vol. 13. P. 125-134. 9. *Кузнецов К.А., Громов В.А.* Подход к решению задачи оптимизации структуры дистрибуторской компании / / Вісник АМСУ. Серія: «Технічні науки». 2014. № 1 (51). С. 94-103. 10. *Lang Z., Yao E., Hu W., Pan Z.* A vehicle routing problem solution considering alternative stop points // Procedia-Social and Behavioral Sciences. 2014. Vol. 138. P. 584-591. 11. *Giaglis G. M., Minis I., Tatarakis A., Zeimpekis V.* Minimizing logistics risk through real-time vehicle routing and mobile technologies: research to date and future trends // International Journal of Physical Distribution & Logistics Management. 2004. Vol. 34. P. 749-764. 12. *Victor Pillac, Michel Gendreau, Christelle Gureret, Andries Medaglia.* A review of dynamic vehicle routing problems // European Journal of Operational Research, Elsevier. 2013. Vol. 225 (1). P. 1-11. 13. *Петров Е.Г., Новожилова М.В., Гребенник І.В.* Методи і засоби прийняття рішень у соціально-економічних системах. К.: Техніка. 2004. 256 с. 14. *Чуб О.І., Новожилова М.В.* Оптиміальний розподіл ресурсів при реалізації проєктів реконструкції інженерних мереж в мультипроєктному середовищі // Вісник НТУ «ХПІ». 2013. Вип. 6. С. 67-75. 15. *Чуб І.А., Іванілов А.С., Новожилова М.В.* Решение задачи распределения ресурсов проєкта как оптимизационной задачи размещения геометрических объектов с изменяемыми метрическими характеристиками // Проблемы машиностроения. 2010. Т. 3, № 5-6. С. 79-90.

Транслітерований список літератури: 1. *Mirotin L.B., Gudkov V.A., Zyrjanov V.V.* i dr. Upravlenie gruzovymi potokami v transportno-logisticheskikh sistemah / Pod red. L.B. Mirotina. M.: Gorjachaja linija-Telekom. 2010. 704 p. 2. *Dantzig G.B., Ramser J.H.* The Truck Dispatching Problem // Management Science. 1959. Vol. 6. No. 1. P. 80-91. 3. *Gryshko S.V., Guca O.M., Suhomlinov A.I.* Modeljvannja vyrobnychoj logistyky v umovah perebudovy pidpryjemstva // Radioelektronika ta informatyka. 2013. № 2. S. 31-34. 4. *Gvozdyn's'kyj A.M., Obizna M.Ju.* Doslidzhennja zadach transportnogo typu // Radioelektronika ta informatyka. 2013. № 4. S. 35-39. 5. *Zadorov V.B., Fedusenko O.V., Fedusenko A.O.* Zastosuvannja metodiv bagatokryterial'noi' optyimizacii' do planuvannja vantaznyh perevezen' // Upravlinnja rozvytkom skladnyh

system. 2010. №2. S. 27-31. 6. *Melamed I.I., Sergeev S.I., Sigal I.H.* Zadacha kommivojazhera. Voprosy teorii // Avtomatika i telemekhanika. 1989. № 9. С. 3-33. 7. *Hajghasem M., Shojaie A.A.* Optimal routing in supply chain aimed at minimizing vehicle cost and supply // Procedia Economics and Finance. 2016. Vol. 36. P. 353-362. 8. *Szucs G.* Decision support for route search and optimum finding in transport networks under uncertainty // Journal of Applied Research and Technology. 2015. Vol. 13. P. 125-134. 9. *Kuznecov K.A., Gromov V.A.* Podhod k resheniju zadachi optyimizacii struktury distrib'jutorskoj kompanii // Visnyk AMSU. Serija: «Tehnichni nauky». 2014. № 1 (51). S. 94-103. 10. *Lang Z., Yao E., Hu W., Pan Z.* A vehicle routing problem solution considering alternative stop points // Procedia-Social and Behavioral Sciences. 2014. Vol. 138. P. 584-591. 11. *Giaglis G. M., Minis I., Tatarakis A., Zeimpekis V.* Minimizing logistics risk through real-time vehicle routing and mobile technologies: research to date and future trends // International Journal of Physical Distribution & Logistics Management. 2004. Vol. 34. P. 749-764. 12. *Victor Pillac, Michel Gendreau, Christelle Gureret, Andries Medaglia.* A review of dynamic vehicle routing problems // European Journal of Operational Research, Elsevier. 2013. Vol. 225 (1). P. 1-11. 13. *Petrov E.G., Novozhylova M.V., Grebennik I.V.* Metody i zasoby pryjnjjattja rishen' u social'no-ekonomichnyh systemah. K.: Tehnika. 2004. 256 s. 14. *Chub O.I., Novozhylova M.V.* Optymal'nyj rozpodil resursiv pry realizacii' proektiv rekonstrukcii' inzhenernyh merezh v mul'typroektnomu seredovyshhi // Visnyk NTU «HPI». 2013. Vyp. 6. S. 67-75. 15. *Chub I.A., Ivanilov A.S., Novozhilova M.V.* Reshenie zadachi raspredelenija resursov proekta kak optimizacionnoj zadachi razmeshhenija geometricheskikh ob'ektov s izmenjaemyimi metriceskimi karakteristikami // Problemy mashinostroenija. 2010. T. 3, № 5-6. S. 79-90.

Надійшла до редколегії 04.03.16

Рецензент: д-р фіз.-мат. наук, проф. Сізова Н.Д.

Новожилова Марина Володимирівна, д-р фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри економічної кібернетики та інформаційних технологій Харківського національного університету будівництва та архітектури. Наукові інтереси: системний аналіз, математичне моделювання складних динамічних систем. Адреса: Україна, 61002, Харків, вул. Сумська, 40, тел. (057) 706-20-49.

Литвиненко Євген Миколайович, доцент кафедри економічної кібернетики та інформаційних технологій Харківського національного університету будівництва та архітектури. Наукові інтереси: інформаційні технології, багатокритеріальна оптимізація. Адреса: Україна, 61002, Харків, вул. Сумська, 40, тел. (057) 700-02-46.

Marina V. Novozhilova, doctor of physical and mathematical sciences, professor, head of department of economic cybernetics and information technologies Kharkiv national university of construction and architecture. Scientific interests: system analysis, mathematical modeling of complex dynamical systems. Address: Ukraine, 61002, Kharkiv, Sumskaia street, 40, Tel.: (057) 706-20-49.

Yevhen M. Lytvynenko, associate professor of the department of economic cybernetics and information technologies Kharkiv national university of construction and architecture. Scientific interests: information technology, multicriteria optimization. Address: Ukraine, 61002, Kharkiv, Sumskaia street, 40, Tel.: (057) 700-02-46.