



С. М. Неронов

ХНАДУ, м. Харків, Україна, sernikner@gmail.com, ORCID iD: 0000-0003-2381-1271

МОДЕЛІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛОГІСТИКИ ПЕРЕВЕЗЕНЬ У ПЕРІОД ВОЄННОГО СТАНУ

Ставиться та вирішується задача моделювання та планування логістичних процесів перевезень у період воєнного стану країни. Відокремлюються особливості транспортування вантажів та людей, які пов'язані з наявністю військових загроз (обстріли, прильоти ракет, атаки дронів, тощо). Актуальність теми дослідження обумовлена створенням оригінальних оптимізаційних моделей для планування перевезень в умовах особливого стану. Велику увагу приділено часу та ризикам перевезень в умовах військових загроз. Наукова новизна дослідження пов'язана зі створенням оригінальних оптимізаційних моделей, які дозволяють аналізувати та планувати логістику перевезень військових вантажів на передову та евакуацію населення до тилу.

ЛОГІСТИКА, ПЕРЕВЕЗЕННЯ, ВІЙСЬКОВА ЗАГРОЗА, ОПТИМІЗАЦІЙНА МОДЕЛЬ, ЛОГІСТИЧНІ ПОКАЗНИКИ

S. M. Neronov. Research models of transportation logistics in the period of martial law. The task of modeling and planning logistics processes of transportation during the period of the country's martial law is set and solved. The features of the transportation of goods and people are separated, which are connected with the presence of military threats (shelling, missile attacks, drone attacks, etc.). The relevance of the research topic is due to the creation of original optimization models for planning transportation in special conditions. Much attention is paid to the time and risks of transportation in conditions of military threats. The scientific novelty of the study is related to the creation of original optimization models that allow for the analysis and planning of the logistics of transporting military cargo to the front and evacuating the population to the rear.

LOGISTICS, TRANSPORTATION, MILITARY THREAT, OPTIMIZATION MODEL, LOGISTICS INDICATORS

Вступ

Воєнний стан країни змусив переглянути логістичні процеси перевезень [1–9]. З'явилися нові напрямки в логістиці, які необхідно дослідити для ефективного планування перевезень в умовах військових загроз. Особливо важливими є напрямки логістики, які пов'язані з транспортуванням озброєння та військової техніки (ОВТ) на передову та перевезення (евакуація) населення до тилу з прифронтових районів. Тому, актуальна тема запропонованої публікації, в якій створюються оптимізаційні моделі для раціонального вибору шляхів перевезень в умовах воєнного стану. Метою дослідження є створення моделей для прикладної інформаційної технології дослідження логістичних процесів транспортування вантажів та людей у період воєнного стану країни. Завдання, які вирішуються у роботі:

- створення оптимізаційних моделей для планування перевезень ОВТ на передову;
- створення оптимізаційних моделей для планування евакуації населення до тилу.

1. Оптимізаційна модель планування перевезень озброєння та військової техніки на передову

Одним з актуальних завдань, яке пов'язане з проведінням ефективних оперативних тактичних дій на полі бою, є формування необхідних запасів озброєння та військової техніки (ОВТ) на передову. Лінія фронту включає актуальні військові локальні зони (ВЛЗ), в яких проводяться активні бойові дії. Необхідно сформулювати у ВЛЗ потрібні запаси ОВТ для проведення

успішних оперативних тактичних дій. Тому, актуально завдання пошуку відносно безпечних шляхів постачання ОВТ на передову в умовах військових загроз. Для вирішення поставленої задачі будемо використовувати метод цілочисельного (булевого) програмування. Введемо змінну x_{ijk} :

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{якщо обрано } j\text{-й шлях постачання ОВТ} \\ & \text{до } i\text{-ї ВЛЗ з } k\text{-м складом логістичних} \\ & \text{компонент (перевалка, складування,} \\ & \text{розподіл, тимчасова зупинка тощо);} \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \quad (1)$$

При цьому необхідно щоб: $\sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_j} x_{ijk} = 1$, що означає обов'язковий вибір конкретного шляху постачання ОВТ до i -ї ВЛЗ з k -м складом логістичних компонент, де N – кількість ВЛЗ на лінії фронту; m_j – кількість можливих складів логістичних компонент на j -у шляху постачання; n_i – кількість можливих шляхів постачання військових вантажів до i -ї ВЛЗ.

Введемо основні логістичні показники для оцінки та вибору можливого варіанту транспортування ОВТ на передову:

1. R – ризики постачання ОВТ на передову, в умовах військових загроз.
2. T – час потрібний для постачання ОВТ на передову.
3. W – запаси озброєння, які формуються на передовій для виконання актуальних оперативних тактичних завдань військового керівництва.

Представимо показники R , T , W з урахуванням змінних x_{ijk} :

$$R = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_j} r_{ijk} x_{ijk}, \quad (2)$$

де r_{ijk} – ризик доставки військових вантажів до i -ї ВЛЗ по j -у шляху постачання з k -м складом логістичних компонент.

$$T = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_j} t_{ijk} x_{ijk}, \quad (3)$$

де t_{ijk} – час, потрібний на транспортування військових вантажів в i -у ВЛЗ за j -м шляхом з k -м можливим складом логістичних компонент.

$$W = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_j} w_{ijk} x_{ijk}, \quad (4)$$

де w_{ijk} – кількість партій ОБТ, які можна пересувати за j -м можливим шляхом постачання з k -м складом логістичних компонент до i -ї ВЛЗ.

Сформуємо оптимізаційні моделі для рішення завдання формування запасів ОБТ на передовій для проведення ефективних бойових дій на полі бою.

1. Мінімізація ризиків формування запасів ОБТ в умовах дій військових загроз:

$$\min R, \quad R = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_j} r_{ijk} x_{ijk}, \quad (5)$$

при виконанні обмежень:

$$T \leq T^*, \quad T = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_j} t_{ijk} x_{ijk}, \quad (6)$$

де T^* – допустимий (запланований) час постачання ОБТ на передову.

$$W \geq W^*, \quad W = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_j} w_{ijk} x_{ijk}, \quad (7)$$

де W^* – запас ОБТ, який необхідно сформувати для виконання актуальних оперативно-тактичних завдань військового керівництва.

2. Максимізація запасів ОБТ на передовій для проведення успішних бойових дій:

$$\max W, \quad W = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_j} w_{ijk} x_{ijk}, \quad (8)$$

при виконанні обмежень:

$$R \leq R^*, \quad R = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_j} r_{ijk} x_{ijk}, \quad (9)$$

де R^* – допустимий ризик постачання ОБТ в умовах дій військових загроз.

$$T \leq T^*, \quad T = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_j} t_{ijk} x_{ijk}. \quad (10)$$

Можлива багатокритеріальна постановка оптимізаційної задачі з використанням показників R , T , W .

У цьому випадку необхідно сформулювати комплексний показник:

$$K = \alpha_R \check{R} + \alpha_T \check{T} + \alpha_W \check{W}, \quad (11)$$

де $\alpha_R, \alpha_T, \alpha_W$ – «ваги» показників $R, T, W, \alpha_R + \alpha_T + \alpha_W = 1$.

\check{R} – пронормований показник R :

$$\check{R} = \alpha_R \frac{R - R_{\min}}{R^* - R_{\min}}, \quad (12)$$

де R_{\min} – мінімальне значення показника R після його оптимізації.

\check{T} – пронормований показник часу постачання:

$$\check{T} = \alpha_T \frac{T - T_{\min}}{T^* - T_{\min}}, \quad (13)$$

де T_{\min} – мінімальне значення часу T після його оптимізації.

\check{W} – пронормований показник W :

$$\check{W} = \alpha_W \frac{W_{\max}}{W^*_{\max}}, \quad (14)$$

де W_{\max} – максимальне значення запасу ОБТ після його оптимізації.

Необхідно знайти:

$$\begin{aligned} \min K &= \alpha_R \check{R} + \alpha_T \check{T} + \alpha_W \check{W} = \\ &= \alpha_R \frac{R - R_{\min}}{R^* - R_{\min}} + \alpha_T \frac{T - T_{\min}}{T^* - T_{\min}} + \alpha_W \frac{W_{\max} - W}{W_{\max} - W^*} = \\ &= \frac{\alpha_R}{R^* - R_{\min}} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_j} r_{ijk} x_{ijk} + \\ &+ \frac{\alpha_T}{T^* - T_{\min}} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_j} t_{ijk} x_{ijk} - \\ &- \frac{\alpha_W}{W_{\max} - W^*} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{m_j} w_{ijk} x_{ijk} - \\ &- \frac{\alpha_R R_{\min}}{R^* - R_{\min}} - \frac{\alpha_T T_{\min}}{T^* - T_{\min}} + \frac{\alpha_W W_{\max}}{W_{\max} - W^*}. \end{aligned} \quad (15)$$

2. Оптимізаційна модель планування перевезень озброєння та військової техніки на передову

Сучасна війна призвела до евакуації населення з прифронтової зони до тилу. Виникли міграційні процеси, для яких необхідно створювати логістичні ланцюги евакуації. Тому, актуальне дослідження евакуаційних потоків, для оцінки здатності транспортної мережі, та виконувати заплановані перевезення людей у тимчасові місця проживання (ТП). При плануванні процесів евакуації, необхідно сформувати множину місць (M), які здатні приймати населення, з їх можливостями щодо забезпечення соціальних потреб. Далі, необхідно сформувати шляхи перевезення людей, в умовах ризиків (R) військових загроз, оцінити вартість (W) та спланувати час (T) евакуації. Сформуємо

оптимізаційну модель, за допомогою якої можна визначити раціональні шляхи евакуації населення (F) з прифронтової зони до можливих місць тимчасового проживання в умовах воєнного стану країни. Введемо цілочисельну (булеву) змінну x_{plk} :

$$x_{plk} = \begin{cases} 1, & \text{якщо буде проведено перевезення людей} \\ & \text{до } p\text{-го місця проживання за допомогою} \\ & l\text{-го шляху транспортування з } k\text{-м складом} \\ & \text{логістичних компонент (тимчасова} \\ & \text{зупинка, перехід з одного шляху на інший,} \\ & \text{розподіл потоків евакуації, тощо);} \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases} \quad (16)$$

В якості основних логістичних показників евакуаційного процесу, будемо розглядати:

1. Час, потрібний на евакуацію людей (T).
 2. Вартість процесу евакуації населення (W).
 3. Ризики військових загроз (R).
 4. Кількість населення, яке буде евакуйовано (F).
- З урахуванням змінних x_{plk} , логістичні показники евакуації населення мають вигляд:

$$T = \sum_{p=1}^M \sum_{l=1}^{m_p} \sum_{k=1}^{n_l} t_{plk} x_{plk}, \quad (17)$$

де m_p – кількість можливих шляхів евакуації населення до p -го місця ТП; n_l – кількість можливих складів логістичних компонент для їх використання на l -у шляху перевезень; t_{plk} – час, потрібний для переміщення людей до p -го місця ТП з урахуванням l -го обраного шляху евакуації та k -го складу логістичних компонент.

$$W = \sum_{p=1}^M \sum_{l=1}^{m_p} \sum_{k=1}^{n_l} w_{plk} x_{plk}, \quad (18)$$

де w_{plk} – вартість перевезення людей до p -го можливого місця ТП з урахуванням обраного l -го шляху перевезення та k -го складу логістичних компонент.

$$R = \sum_{p=1}^M \sum_{l=1}^{m_p} \sum_{k=1}^{n_l} r_{plk} x_{plk}, \quad (19)$$

де r_{plk} – ризик перевезення людей, в умовах військових загроз, в p -е можливе місце ТП з урахуванням обраного l -го шляху транспортування та k -го складу логістичних компонент.

$$F = \sum_{p=1}^M \sum_{l=1}^{m_p} \sum_{k=1}^{n_l} f_{plk} x_{plk}, \quad (20)$$

де f_{plk} – кількість населення, яке буде спрямоване в p -е місце ТП з урахуванням обраного l -го шляху транспортування та k -го складу логістичних компонент.

Можливі такі постановки оптимізаційної задачі, які пов'язані з евакуацією населення до тилу:

1. Мінімізувати час, потрібний на евакуацію населення:

$$\min T, \quad T = \sum_{p=1}^M \sum_{l=1}^{m_p} \sum_{k=1}^{n_l} t_{plk} x_{plk}, \quad (21)$$

з урахуванням обмежень:

$$W \leq W^*, \quad W = \sum_{p=1}^M \sum_{l=1}^{m_p} \sum_{k=1}^{n_l} w_{plk} x_{plk}, \quad (22)$$

$$R \leq R^*, \quad R = \sum_{p=1}^M \sum_{l=1}^{m_p} \sum_{k=1}^{n_l} r_{plk} x_{plk}, \quad (23)$$

$$F \geq F^*, \quad F = \sum_{p=1}^M \sum_{l=1}^{m_p} \sum_{k=1}^{n_l} f_{plk} x_{plk}, \quad (24)$$

де W^* – запланована вартість процесу евакуації населення; R^* – допустимий ризик процесу евакуації, який пов'язаний з можливими діями військових загроз; F^* – запланована кількість населення, яка буде евакуйована з прифронтової зони до тилу.

2. Максимізувати кількість населення, яке буде евакуйоване з прифронтової зони до тилу:

$$\max F, \quad F = \sum_{p=1}^M \sum_{l=1}^{m_p} \sum_{k=1}^{n_l} f_{plk} x_{plk}, \quad (25)$$

з урахуванням обмежень:

$$T \leq T^*, \quad T = \sum_{p=1}^M \sum_{l=1}^{m_p} \sum_{k=1}^{n_l} t_{plk} x_{plk}, \quad (26)$$

$$W \leq W^*, \quad W = \sum_{p=1}^M \sum_{l=1}^{m_p} \sum_{k=1}^{n_l} w_{plk} x_{plk}, \quad (27)$$

$$R \leq R^*, \quad R = \sum_{p=1}^M \sum_{l=1}^{m_p} \sum_{k=1}^{n_l} r_{plk} x_{plk}, \quad (28)$$

де T^* – запланований час на евакуацію населення.

Мінімізувати ризики евакуації населення:

$$\min R, \quad R = \sum_{p=1}^M \sum_{l=1}^{m_p} \sum_{k=1}^{n_l} r_{plk} x_{plk}, \quad (29)$$

з урахуванням обмежень:

$$T \leq T^*, \quad T = \sum_{p=1}^M \sum_{l=1}^{m_p} \sum_{k=1}^{n_l} t_{plk} x_{plk}, \quad (30)$$

$$W \leq W^*, \quad W = \sum_{p=1}^M \sum_{l=1}^{m_p} \sum_{k=1}^{n_l} w_{plk} x_{plk}, \quad (31)$$

$$F \geq F^*, \quad F = \sum_{p=1}^M \sum_{l=1}^{m_p} \sum_{k=1}^{n_l} f_{plk} x_{plk}. \quad (32)$$

Можлива багатокритеріальна постановка оптимізаційної задачі евакуації населення. Для цього введемо комплексний критерій у вигляді адитивного складу логістичних показників T, W, R, F :

$$Q = \alpha_T \check{T} + \alpha_W \check{W} + \alpha_R \check{R} + \alpha_F \check{F}, \quad (33)$$

де $\alpha_T, \alpha_W, \alpha_R, \alpha_F \in \check{\Delta}$ «ваги» показників T, W, R, F , $\alpha_T + \alpha_W + \alpha_R + \alpha_F = 1$; $\check{T}, \check{W}, \check{R}, \check{F}$ – пронормовані значення показників T, W, R, F :

$$\check{T} = \frac{T - T_{\min}}{T^* - T_{\min}}, \quad (34)$$

$$\check{W} = \frac{W - W_{\min}}{W^* - W_{\min}}, \quad (35)$$

$$\check{R} = \frac{R - R_{\min}}{R^* - R_{\min}}, \quad (36)$$

$$\check{F} = \frac{F_{\max}}{F^*_{\max}}. \quad (37)$$

Необхідно мінімізувати комплексний критерій Q :

$$\begin{aligned} \min Q, Q &= \alpha_T \check{T} + \alpha_W \check{W} + \alpha_R \check{R} + \alpha_F \check{F} = \\ &= \frac{\alpha_T}{T^* - T_{\min} \sum_{p=1}^M \sum_{l=1}^{m_p} \sum_{k=1}^{n_l} t_{plk} x_{plk}} \\ &+ \frac{\alpha_W}{W^* - W_{\min} \sum_{p=1}^M \sum_{l=1}^{m_p} \sum_{k=1}^{n_l} w_{plk} x_{plk}} \\ &+ \frac{\alpha_R}{R^* - R_{\min} \sum_{p=1}^M \sum_{l=1}^{m_p} \sum_{k=1}^{n_l} r_{plk} x_{plk}} \\ &- \frac{\alpha_F}{F^*_{\max} \sum_{p=1}^M \sum_{l=1}^{m_p} \sum_{k=1}^{n_l} f_{plk} x_{plk}} \\ &- \frac{\alpha_T T_{\min}}{T^* - T_{\min} - \frac{\alpha_W W_{\min}}{W^* - W_{\min}} - \frac{\alpha_R R_{\min}}{R^* - R_{\min}} + \frac{\alpha_F F_{\max}}{F^*_{\max}}}, \quad (38) \end{aligned}$$

де T_{\min} , W_{\min} , R_{\min} , F_{\max} – екстремальні значення показників після їх оптимізації.

Висновки

У роботі проведено дослідження логістичних процесів перевезень у період воєнного стану країни. Відокремлені актуальні напрямки дослідження, які пов'язані з транспортуванням військових вантажів на передову, а також евакуації населення з прифронтової зони до тилу. Сформовані основні логістичні показники, які необхідно використовувати для оцінки процесів перевезень в умовах дій військових загроз (час перевезень, ризики перевезень, вартість перевезень, кількість населення, яке евакуюється). Створені оптимізаційні моделі для вибору раціональних шляхів перевезень на передову та до тилу. Проведена локальна оптимізація логістичних показників, з урахуванням обмежень за допустимим часом та ризиком перевезень. Створені багатокритеріальні моделі для пошуку компромісних рішень логістики перевезень.

Використані математичні методи та моделі: системний аналіз, методи транспортної логістики, ціло-

чисельна (булева) оптимізація, багатокритеріальна оптимізація, методи експертного оцінювання.

Наукова новизна дослідження пов'язана зі створенням комплексу оригінальних оптимізаційних моделей, за допомогою яких можна аналізувати та планувати логістику перевезень озброєння та військової техніки на передову та евакуацію населення до тилу.

Запропонований підхід є основою для створення прикладної інформаційної технології планування логістики перевезень як на передову, так і до тилу, з урахуванням можливих військових загроз, у період воєнного стану країни.

Список літератури:

- [1] Федорович О. Є., Западня К. О., Іванов М. В. Використання прецедентного підходу для формування плану заходів щодо підвищення конкурентоспроможності підприємства, що розвивається / О. Є. Федорович, К. О. Западня, М. В. Іванов // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2016. – № 1 (75). – С. 114–118.
- [2] Федорович О. Є., Прончаков Ю. Л. Метод формування логістичних транспортних взаємодій для нового портфелю замовлень розподіленого віртуального виробництва / О. Є. Федорович, Ю. Л. Прончаков // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2020. – № 2 (94). – С. 102–108
- [3] Федорович О. Є., Сломчинський О. В., Пуйденко В. А. Дослідження логістики управління виробництвом високотехнологічної продукції віртуального підприємства / О. Є. Федорович, О. В. Сломчинський, В. А. Пуйденко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2018. – № 4 (148). – С. 107–115.
- [4] Федорович О. Є., Гайденок О. А., Пуйденко В. А. Планування вантажних перевезень в умовах підвищених ризиків / О. Є. Федорович, О. А. Гайденок, В. А. Пуйденко // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2017. – № 6 (141). – С. 98–102.
- [5] Федорович О. Є., Уруський О. С., Лутай Л. М., Западня К. О. Оптимізація життєвого циклу створення нової техніки в умовах конкуренції та стохастичної поведінки ринку збуту високотехнологічної продукції / О. Є. Федорович, О. С. Уруський, Л. М. Лутай, К. О. Западня // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2020. – № 6 (166). – С. 80–85.
- [6] Алексієв О. П., Алексієв В. О., Неронов С. М. Мульти-агенти у віртуальному управлінні транспортним процесом / О. П. Алексієв, В. О. Алексієв, С. М. Неронов // *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету* – 2023. – Вип. 100. – С. 15–18.

Надійшла до редакції 14.09.2023