

УДК 658.512:004.94:355.247

doi: 10.32620/akt.2022.3.09

О. Є. ФЕДОРОВИЧ, Ю. Л. ПРОНЧАКОВ, К. О. РИБКА, Ю. О. ЛЕЩЕНКО

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна*

МОДЕЛЮВАННЯ ЛОГІСТИЧНОГО ПРОЦЕСУ ЕВАКУАЦІЇ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА У ВОЄННИЙ ЧАС

Формулюється та вирішується складна задача багатокритеріального характеру, що пов'язана з обґрунтуванням місця дислокації підприємства, яке евакуюється. Проводиться моделювання логістичного процесу евакуації, в умовах загроз та вразливостей воєнного часу. Актуальність дослідження пов'язана з обґрунтуванням можливого місця виробництва промислового підприємства з урахуванням процесу транспортування технологічного обладнання у тил, в умовах різномірної транспортної мережі. При цьому, досліджується процес розміщення та налаштування виробництва підприємства, яке евакуюється, на нове місце дислокації. Метою дослідження є моделювання логістичного процесу евакуації промислового підприємства у тил, в умовах загроз та вразливостей воєнного часу. Запропоновано метод обґрунтування місця дислокації промислового підприємства, який заснований на багатоваріантному аналізі, з використанням якісних оцінок експертів, у вигляді значень лінгвістичних змінних. Враховується складна динаміка доставки вантажів з технологічним обладнанням на нове місце дислокації, за допомогою імітаційного моделювання, з урахуванням особливостей різномірної транспортної мережі, ризиків та загроз воєнного часу. Розроблена агентна імітаційна модель логістичного процесу евакуації промислового підприємства. Представлено новий алгоритм мінімізації часу доставки вантажів з технологічним обладнанням, який дозволяє сформулювати раціональний маршрут у різномірній транспортній мережі, з урахуванням можливих ризиків та загроз. Створено оптимізаційну модель для розташування технологічного обладнання промислового підприємства, що евакуюється, на нову територію, з урахуванням критеріїв часу, витрат та ризиків. Проведено багатокритеріальну оптимізацію розміщення технологічного обладнання в умовах суперечних критеріїв, з урахуванням вимог воєнного часу. Наукова новизна проведеного дослідження пов'язана з розробкою методів та моделей процесу евакуації промислового підприємства, що заснована на агентному імітаційному моделюванні, цілочисельній (булевій) оптимізації, експертному оцінюванні, за допомогою лінгвістичних змінних, що дозволяє обґрунтувати логістику евакуації промислового підприємства у воєнний час. Результати дослідження доцільно використовувати для планування процесу евакуації промислового підприємства, з урахуванням вимог воєнного часу.

Ключові слова: евакуація промислового підприємства; загрози та вразливості воєнного часу; логістика евакуації; агентна імітаційна модель; маршрутизація; оптимізація; ризики.

Вступ

В теперішній час, з урахуванням воєнних дій агресора на території країни, виникла гостра проблема, пов'язана з евакуацією до тилу високотехнологічних промислових підприємств (аерокосмічна, машинобудівна, приладобудівна галузі тощо) з прифронтової зони [1, 2]. При цьому, необхідно провести цілий комплекс заходів (демонтаж технологічного обладнання, транспортування, підготовка нової території, розміщення та монтаж технологічного обладнання тощо) за короткий строк, з мінімальними ризиками, та з урахуванням загроз воєнного часу [3, 4]. Тому, актуальна тема запропонованої публікації, у якій ставиться та вирішується задача моделювання логістичного процесу евакуації промисло-

вого підприємства з прифронтової зони до тилу, з мінімальними ризиками та часом на переміщення у нове місце виробництва [5, 6]. Як відомо, евакуація складається з цілого ряду етапів, які необхідно заздалегідь спланувати та здійснити у потрібні строки, які залежать від ситуації на фронті [7, 8]. До основних етапів, які досліджуються у роботі, можна віднести:

- вибір місця дислокації промислового підприємства, що евакуюється;
- демонтаж технологічного обладнання;
- підготовка до транспортування технологічного обладнання;
- транспортування технологічного обладнання;
- підготовка нової території для розміщення технологічних об'єктів промислового підприємства;

- розміщення технологічного обладнання на новій території;
- монтаж технологічного обладнання;
- формування комунікаційних каналів зв'язку, для функціонування та управління технологічним обладнанням;
- проведення комплексу пусконаладжувальних робіт, для відновлення виробництва актуальної продукції промислового підприємства, що евакуюється.

Проведений аналіз публікацій, за даною тематикою, показав, що основну увагу приділено окремим етапам евакуації без комплексного дослідження всього процесу [9, 10]. Не враховується логістичний характер процесу евакуації, ризики та загрози, які виникають через вимоги воєнного часу [11, 12].

Таким чином, виникає складна науково-прикладна задача багатокритеріального характеру, пов'язана з успішним проведенням евакуаційних заходів в умовах воєнного часу.

Метою дослідження є моделювання логістичного процесу евакуації промислового підприємства, в умовах воєнного часу, ризиків та вимог до строків відновлення виробництва для випуску актуальної продукції на новій території.

В якості основних критеріїв, для досягнення мети дослідження, використовуються: час евакуації, витрати, ризики, які виникають в умовах воєнного часу.

Для реалізації поставленої мети дослідження, необхідно вирішити наступні завдання:

1. обґрунтувати та вибрати місце дислокації підприємства, що евакуюється, з урахуванням загроз та вразливостей воєнного часу;
2. побудувати агентну імітаційну модель, для дослідження логістичного процесу евакуації промислового підприємства;
3. сформувати раціональні маршрути транспортування технологічного обладнання на нове місце дислокації промислового підприємства;
4. вирішити задачу оптимального розміщення промислового підприємства, що евакуюється, на нове місце дислокації.

1. Обґрунтування та вибір місця дислокації підприємства, що евакуюється, з урахуванням загроз та вразливостей воєнного часу

Вибір нового місця дислокації промислового підприємства, на якому буде відновлено виробництво актуальної продукції, залежить від цілого ряду факторів, таких як:

- час, витрачений на переміщення промислового підприємства в нове місце дислокації;
- можливі загрози та вразливості воєнного часу на новому місці дислокації промислового підприємства;
- наявність інженерної інфраструктури для нормальної роботи промислового підприємства на новому місці (подача потрібних обсягів електроенергії, води, газу тощо);
- час, витрачений на розміщення та монтаж технологічного обладнання на новому місці дислокації промислового підприємства;
- витрати, пов'язані з переміщенням промислового підприємства на нове місце дислокації.

Задача, яка розглядається у роботі, носить багатоваріантний багатокритеріальний характер, з урахуванням можливого протиріччя критеріїв (час, витрати, ризики), та вимагає компромісного рішення.

Загрози, пов'язані з воєнним часом, залежать від наявності вразливостей на новому місці дислокації промислового підприємства (наявність оборонних та ремонтних заводів, військових пунктів управління, сховищ та складів військової техніки, боєприпасів, палива тощо). Тому, необхідно, оцінити рівень загроз, шляхом оцінки впливу на них існуючих вразливостей. Для аналізу рівня загроз та вразливостей скористаємося оцінками експертів (фахівців у галузі військової логістики). Для зручності та спрощення проведення експертного оцінювання, скористаємося якісними оцінками, у вигляді значень лінгвістичних змінних. Для кожного можливого місця дислокації евакуйованого промислового підприємства, сформуємо множину оцінок загроз у вигляді впливу на них вразливостей. Для оцінки рівня загроз, скористаємося якісними значеннями вразливостей на новому місці дислокації промислового підприємства. Наприклад, якісні значення вразливостей можна представити в такому вигляді:

1. Наявність військових пунктів управління:
 - A – відсутні;
 - B – присутні.
2. Наявність складів озброєння, військової техніки, боєприпасів:
 - A – відсутні;
 - B – присутні.
3. Наявність сховищ палива:
 - A – відсутні;
 - B – у малому обсязі;
 - C – у великому обсязі.
4. Наявність оборонних підприємств:
 - A – відсутні;
 - B – у малому обсязі;
 - C – у великому обсязі.

Тоді, кожне можливе місце дислокації промислового підприємства, що евакуюється, можна представити у вигляді переліку лінгвістичних змінних («слово»), де на першому місці, за важливістю, в якості прикладу, знаходиться значення лінгвістичної змінної «військові пункти управління», на другому місці – наявність «складів озброєння військової техніки та боєприпасів», на третьому – наявність «сховищ палива», на четвертому – наявність «оборонних підприємств».

Нехай, експерти, для оцінювання запропонували 10 можливих місць дислокації промислового підприємства, що евакуюється. Для кожного з них, за допомогою військових експертів, проведено оцінювання впливу вразливостей на загрози. Представимо варіанти, з їх оцінками, у вигляді неупорядкованого списку «слів»:

1. А В А В
2. А А С В
3. В А В А
4. А В А А
5. В А А А
6. А А С С
7. А А В В
8. В А В С
9. В А А В
10. А В А С.

Враховуючи значимість вразливостей, які представлені положенням відповідної лінгвістичної змінної у «слові» варіанту, можна, шляхом лексикографічного впорядкування «слів», виділити, найбільш, перспективні варіанти, для дислокації підприємства, що евакуюється, на нову територію. Отримаємо:

7. А А В В
2. А А С В
6. А А С С
4. А В А А
1. А В А В
10. А В А С
5. В А А А
9. В А А В
3. В А В А
8. В А В С.

Варіанти, які розташовані в началі списку, найбільш переважні, для вибору місця дислокації підприємства, що евакуюється. Підсумковий вибір, було зроблено експертами для сьомого варіанту місця дислокації промислового підприємства, у якому немає військових пунктів управління, відсутні склади озброєння військової техніки та боєприпасів, але є сховища палива у малій кількості та оборонні підприємства, також, у малій кількості.

Проведений аналіз був пов'язаний, тільки, з оцінками впливу вразливостей на загрози, при вибо-

рі місця дислокації промислового підприємства, що евакуюється. Для обліку таких показників як: рівень загроз – V , наявність інженерної інфраструктури – W , час на переміщення – T , витрати на переміщення – Z , скористаємося методом цілочисельного (булевого) програмування.

Нехай, для кожного можливого варіанту місця дислокації промислового підприємства, що евакуюється, за допомогою оцінок військових експертів, було отримано кількісні значення для:

v_i – рівень загроз для i -го місця дислокації промислового підприємства;

w_i – наявність інженерної інфраструктури для i -го місця дислокації;

t_i – час, витрачений на переміщення промислового підприємства на i -е місце дислокації;

z_i – витрати, пов'язані з переміщенням промислового підприємства на i -е місце дислокації.

Для проведення наступної оптимізації, необхідно кількісні оцінки експертів пронормувати, тобто перевести у відносну шкалу $(0 \dots 1)$ шляхом:

$$\bar{v}_i = \frac{v_i}{v_{\max}}, \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_{\max}}, \bar{t}_i = \frac{t_i}{t_{\max}}, \bar{z}_i = \frac{z_i}{z_{\max}},$$

де $v_{\max}, w_{\max}, t_{\max}, z_{\max}$ – максимальні значення оцінок у множині варіантів, що розглядаються.

Введемо булеву змінну x_i :

$$x_i = \begin{cases} 1 - \text{якщо обрано } i\text{-й варіант} \\ \text{дислокації підприємства,} \\ 0 - \text{в іншому випадку.} \end{cases}$$

При цьому $\sum_{i=1}^M x_i = 1$, де M – кількість можли-

вих місць дислокації евакуйованого промислового підприємства.

Для комплексної оптимізації та пошуку компромісних рішень, введемо критерій Q у вигляді адитивної згортки локальних критеріїв:

$$Q = \alpha_V V + \alpha_W W + \alpha_T T + \alpha_Z Z,$$

де $\alpha_V, \alpha_W, \alpha_T, \alpha_Z$ – ваги (значимість) локальних критеріїв V, W, T, Z . При цьому:

$$\alpha_V + \alpha_W + \alpha_T + \alpha_Z = 1,$$

$$V = \sum_{i=1}^M \bar{v}_i x_i,$$

$$W = \sum_{i=1}^M \bar{w}_i x_i,$$

$$T = \sum_{i=1}^M \bar{t}_i x_i,$$

$$Z = \sum_{i=1}^M \bar{z}_i x_i.$$

Необхідно, знайти $\min Q$, з урахуванням обмежень $V \leq \widehat{V}$, $W \leq \widehat{W}$, $T \leq \widehat{T}$, $Z \leq \widehat{Z}$, де \widehat{V} , \widehat{W} , \widehat{T} , \widehat{Z} – допустимі значення критеріїв.

2. Розробка агентної імітаційної моделі для дослідження логістичного процесу евакуації промислового підприємства

Для рішення наступних задач дослідження, враховуючи динамічний характер процесу евакуації промислового підприємства, використано імітаційне моделювання основних подій процесу евакуації.

До основних подій, у імітаційному моделюванні логістичного процесу евакуації промислового підприємства, відносяться:

- подія початку демонтажу технологічного обладнання промислового підприємства;
- подія закінчення демонтажу;
- подія, пов'язана з початком транспортування технологічного обладнання до тилу;
- подія, надходження обладнання (яке представлено у вигляді заявки у імітаційному моделюванні) у транспортний вузол різномірної транспортної мережі;
- подія виходу заявки з транспортного вузлу;
- подія надходження заявки до ділянки транспортної магістралі;
- подія виходу заявки з ділянки транспортної магістралі;
- подія початку розміщення технологічного обладнання, на новому місці дислокації промислового підприємства;
- подія закінчення розміщення технологічного обладнання;
- подія початку монтажу технологічного обладнання;
- подія закінчення монтажу технологічного обладнання;
- подія початку пусконаладжувальних робіт на промисловому підприємстві;
- подія закінчення пусконаладжувальних робіт на промисловому підприємстві;
- подія початку налагоджування серійного виробництва актуальної продукції, на новому місці

дислокації промислового підприємства (фінішна подія).

Реалізація подій здійснюється за часом, масштаб якого задається на початку моделювання (час, доба, тиждень тощо).

Послідовність подій логістичного процесу евакуації відповідає причинно-наслідковим зв'язкам та забезпечує ефективність процесу імітаційного моделювання.

Наприклад, подія початку монтажу технологічного обладнання визиває наслідок. Наслідок є подією закінчення монтажу технологічного обладнання. Планування подій здійснюється у заданому масштабі часу, у відповідності, заздалегідь, визначеними причинно-наслідковими зв'язками.

Подійна імітаційна модель реалізована у агентному представленні у середовищі Anylogic, де кожний агент, пов'язаний з визначеними причинно-наслідковими подіями.

Окремо, виділено агент управління, який забезпечує планування подій у заданому масштабі часу, та формує послідовний список подій, в якому, на початку, знаходиться сама рання подія.

Множина агентів складається з:

1. Агент опису різномірної транспортної мережі.
2. Агент початку моделювання (стартовий агент).
3. Агент демонтажу обладнання.
4. Агент початку транспортування обладнання.
5. Агент, пов'язаний з транспортним вузлом різномірної транспортної мережі.
6. Агент, пов'язаний з ділянкою транспортної магістралі.
7. Агент розміщення технологічного обладнання.
8. Агент монтажу обладнання.
9. Агент пусконаладжувальних робіт.
10. Агент ризиків.
11. Агент управління моделюванням.
12. Агент початку серійного виробництва (фінішний агент).
13. Агент результатів моделювання.

До основних результатів моделювання відносяться:

- час, витрачений на евакуацію промислового підприємства;
- час початку серійного виробництва;
- запізнення строків початку серійного виробництва;
- маршрут руху технологічного обладнання у різномірній транспортній мережі (послідовність транспортних вузлів та ділянок транспортної магістралі). Маршрут може бути заданий заздалегідь, або, за допомогою розробленого алгоритму (п. 3), визначено

но оптимальний маршрут за часом або за значенням ризику.

- значення підсумкового ризику, пов'язаного з евакуацією промислового підприємства (ризик накопичується при транспортуванні технологічного обладнання у вузлах та на ділянках транспортної магістралі).

На рис. 1 представлена структурна схема агентної імітаційної моделі.



Рис. 1. Структурна схема агентної імітаційної моделі

3. Метод пошуку раціональних маршрутів транспортування технологічного обладнання на нове місце дислокації промислового підприємства

Для пошуку раціональних маршрутів транспортування технологічного обладнання евакуйованого підприємства, було розроблено оригінальний алгоритм маршрутизації, який реалізовано у рамках агентної імітаційної моделі. Алгоритм заснований на використанні розмноженні заявок (клонів), у вигляді технологічного обладнання, у графі G, який представляє різномірну транспортну мережу, що використовується для переміщення технологічного обладнання у нове місце дислокації промислового підприємства. Враховуючи спеціальний характер вантажів, а також їх характеристики (габарити, вага,

вимоги скритності транспортування, тощо) не всі транспортні вузли та ділянки транспортної мережі можуть бути використані для переміщення технологічного обладнання. Тому, заздалегідь, повинні бути за допомогою військових фахівців, виділені дозволені транспортні вузли та ділянки транспортної магістралі, які можуть бути використані для евакуації промислового підприємства. Рух заявок (клонів) технологічного обладнання у графі G транспортної мережі, з урахуванням дозволених вузлів та ділянок транспортної магістралі здійснюється наступним чином: початок транспортування, пов'язаний з виходом заявки з транспортного вузла, в який надійшло евакуйоване технологічне обладнання. Далі, шляхом розмноження заявок (появлення клонів заявок) здійснюється рух їх за всіма можливими ділянками магістралі, пов'язаних з даним транспортним вузлом. При попаданні заявки (клон) у сусідній транспортний вузол, вона помічає його номером цієї заявки. Якщо заявка (клон) потрапляє у помічений вузол, то її рух припиняється з-за того, що раніше вже пройшла заявка (клон) через цей вузол, тому ця заявка (клон) не є перспективним, з точки зору вибору оптимального, за часом, маршрутом. При досягненні фінішного вузла (надходження технологічного обладнання на нове місце дислокації промислового підприємства), здійснюється фіксація часу закінчення транспортування технологічного обладнання. Далі, шляхом зворотного руху за поміченими вузлами, формується маршрут руху обладнання, який є мінімальним за часом, та враховує особливості, та спеціальний режим роботи різномірної транспортної мережі, яка використовується для евакуації технологічного обладнання промислового підприємства.

Для пошуку маршруту з мінімальним ризиком транспортування технологічного обладнання, необхідно, перед початком моделювання, за допомогою військових експертів, оцінити ризики проходження технологічного обладнання на окремих вузлах та ділянках транспортної магістралі. У процесі моделювання, при русі заявок (клонів) за вузлами та ділянками транспортної магістралі, накопичуються окремі ризики та формується підсумковий ризик, пов'язаний з логістикою транспортного обслуговування евакуйованого підприємства. Для моделювання ризиків та знаходження маршруту з мінімальним ризиком, в якості основного фактору в управлінні імітаційним моделюванням (агент управління), використовується значення накопичуваного ризику.

Розроблений алгоритм можна використовувати як для пошуку оптимального (мінімального) за часом маршруту евакуації технологічного обладнання, так і для пошуку безпечного маршруту руху з мінімальним зазначенням ризику. Остаточний вибір маршруту евакуації технологічного обладнання

промислового підприємства, що евакуюється визнають фахівці в області військової логістики, з використанням розробленої агентної імітаційної моделі.

4. Метод оптимального розміщення промислового підприємства, що евакуюється, на нове місце дислокації

Успішне розміщення підприємства, що евакуюється, на нову територію залежить від цілого ряду факторів:

1. Потрібна площа для розміщення технологічного обладнання.
2. Проведення земляних робіт, щодо підготовки території до розміщення технологічного обладнання.
3. Наявність інженерної інфраструктури на новій території (електропостачання, водопостачання, газопостачання та інші).
4. Наявність комунікацій для організації взаємодії технологічних об'єктів та управління обладнанням.
5. Тривалість та витрати комплексу робіт, щодо підготовки нової території к розміщенню технологічного обладнання підприємства, що евакуюється.
6. Ризики, пов'язані з розміщенням технологічного обладнання промислового підприємства на новій території.

Основними критеріями для оцінки розміщення промислового підприємства, що евакуюється, на новій території є:

- час, витрачений на розміщення промислового підприємства на новій території – T ;
- витрати, пов'язані з розміщенням промислового підприємства на новій території – W ;
- ризики розміщення промислового підприємства на новій території – R .

Наявність альтернативних варіантів розміщення, пов'язаних з можливими територіями та місцями евакуації промислового підприємства, а також використання не одного, а декілька критеріїв для оцінки розміщення, призводить до необхідності постановки та рішення багатокритеріальної, багатоваріантної задачі пошуку раціонального варіанту розміщення.

Нехай, заздалегідь, за допомогою військових експертів та керівництва промислового підприємства, визначена множина – M можливих місць розміщення промислового підприємства, що евакууються до тилу. Для кожної можливої території розміщення проведено попереднє оцінювання часу, витрат та ризиків, пов'язаних з розміщенням технологічного обладнання промислового підприємства, що

евакуюються, на новій площі. Представимо критерії у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} T_k &= t_{k_1} + t_{k_2} + t_{k_3}, \\ W_k &= w_{k_1} + w_{k_2} + w_{k_3}, \\ R_k &= r_{k_1} + r_{k_2} + r_{k_3}, \end{aligned}$$

де T_k, W_k, R_k – відповідно час, витрати та ризики, пов'язані з вибором k -го варіанту розміщення промислового підприємства на новому місці дислокації;

$t_{k_1}, w_{k_1}, r_{k_1}$ – час, витрати та ризики, пов'язані з проведенням земляних робіт щодо підготовки території для розміщення промислового підприємства для k -го варіанту розміщення;

$t_{k_2}, w_{k_2}, r_{k_2}$ – час, витрати та ризики, пов'язані з підготовкою інженерної інфраструктури для розміщення промислового підприємства, для k -го варіанту розміщення;

$t_{k_3}, w_{k_3}, r_{k_3}$ – час, витрати та ризики, пов'язані з організацією комунікаційних каналів зв'язку технологічного обладнання для k -го варіанту розміщення.

Для пошуку раціональних варіантів розміщення скористаємося методом цілочисельного (булевого) програмування. Введемо змінні x_k , значення яких:

$$x_k = \begin{cases} 1 - \text{якщо обрано } k\text{-й варіант} \\ \text{для розміщення} \\ \text{технологічного обладнання;} \\ 0 - \text{в іншому випадку.} \end{cases}$$

Тоді, з урахуванням, змінних x_k , критерії для оцінки розміщення промислового підприємства, будуть мати наступний вигляд:

$$\begin{aligned} T &= \sum_{k=1}^M (t_{k_1} + t_{k_2} + t_{k_3}) x_k, \\ W &= \sum_{k=1}^M (w_{k_1} + w_{k_2} + w_{k_3}) x_k, \\ R &= \sum_{k=1}^M (r_{k_1} + r_{k_2} + r_{k_3}) x_k. \end{aligned}$$

Можливі дві постановки задачі оптимального розміщення промислового підприємства, що евакуюється, на новій площі:

1. Однокритеріальна оптимізація. У цьому випадку, здійснюється оптимізація окремих, локаль-

них критеріїв (T, W, R), з урахуванням обмежень, у вигляді допустимих значень T', W', R' .

Наприклад, необхідно знайти:

$$\min T, \quad T = \sum_{k=1}^M (t_{k_1} + t_{k_2} + t_{k_3})x_k,$$

з урахуванням виконання обмежень:

$$W \leq W', \quad W = \sum_{k=1}^M (w_{k_1} + w_{k_2} + w_{k_3})x_k,$$

$$R \leq R', \quad R = \sum_{k=1}^M (r_{k_1} + r_{k_2} + r_{k_3})x_k,$$

$$\sum_{k=1}^M x_k = 1.$$

2. Багатокритеріальна оптимізація, для пошуку компромісного рішення, щодо розміщення промислового підприємства, що евакуюється. У цьому випадку, використовуємо комплексний критерій P :

$$P = \alpha_T \hat{T} + \alpha_W \hat{W} + \alpha_R \hat{R},$$

де $\alpha_T + \alpha_W + \alpha_R = 1$,

$$\hat{T} = \frac{T - T^*}{T' - T^*}, \quad \hat{W} = \frac{W - W^*}{W' - W^*},$$

$$\hat{R} = \frac{R - R^*}{R' - R^*},$$

де T^*, W^*, R^* – оптимальні значення T, W, R визначені шляхом попередньої однокритеріальної оптимізації.

Необхідно знайти:

$$\begin{aligned} \min P, \quad P &= \alpha_T \hat{T} + \alpha_W \hat{W} + \alpha_R \hat{R} = \\ &= \frac{\alpha_T}{T' - T^*} \left[\sum_{k=1}^M (t_{k_1} + t_{k_2} + t_{k_3})x_k - T^* \right] + \\ &+ \frac{\alpha_W}{W' - W^*} \left[\sum_{k=1}^M (w_{k_1} + w_{k_2} + w_{k_3})x_k - W^* \right] + \\ &+ \frac{\alpha_R}{R' - R^*} \left[\sum_{k=1}^M (r_{k_1} + r_{k_2} + r_{k_3})x_k - R^* \right], \end{aligned}$$

з урахуванням обмежень:

$$T \leq T', W \leq W', R \leq R',$$

$$\sum_{k=1}^M x_k = 1,$$

$$\alpha_T + \alpha_W + \alpha_R = 1,$$

де $\alpha_T, \alpha_W, \alpha_R$ – значимість критеріїв T, W, R , що задані експертами в галузі промислового будівництва.

Висновки

Проведено дослідження пов'язане з моделюванням логістичного процесу евакуації промислового підприємства в умовах воєнного часу. В результаті попереднього аналізу, виявлено недоліки існуючих підходів, в яких досліджуються окремі етапи евакуації промислового підприємства без комплексного аналізу логістично пов'язаних етапів, без урахування динамічного характеру евакуації, в умовах можливих загроз та вразливостей. Обґрунтовано вибір нового місця дислокації промислового підприємства, що евакуюється, на основі багатоваріантного аналізу, та якісних оцінок військових експертів у вигляді значень лінгвістичних змінних. Розроблена агентна імітаційна модель дослідження логістичного процесу евакуації, за допомогою якої визначається раціональні та оптимальні маршрути транспортування технологічного обладнання промислового підприємства, що евакуюється, в умовах ризиків воєнного часу. Представлено та вирішено задачу оптимального розміщення технологічного обладнання промислового підприємства на новому місці дислокації, з урахування часу, витрат та ризиків, з використанням цілочисельного (булевого) лінійного програмування. Для пошуку компромісних рішень, при розміщенні технологічного обладнання промислового підприємства, використано комплексний критерій у вигляді адитивної згортки локальних критеріїв часу, витрат та ризиків.

Таким чином, можна стверджувати, що проведене дослідження, яке засноване на моделюванні процесу евакуації промислового підприємства у воєнний час, яке включає обґрунтування нового місця дислокації промислового підприємства за допомогою експертного оцінювання, розробку агентної імітаційної моделі для дослідження логістики процесу евакуації, в умовах ризиків, оптимізацію розміщення технологічного обладнання промислового підприємства на новій території, повністю підтверджує виконання мети дослідження.

Використані математичні методи та методи моделювання: системний аналіз, експертне оціню-

вання, за допомогою лінгвістичних змінних, агентне імітаційне моделювання, цілочисельне (булеве) програмування.

Запропонований підхід дозволяє, при плануванні процесу евакуації промислового підприємства, обґрунтовано обрати нове місце дислокації промислового підприємства, сформувати раціональні (оптимальні) маршрути транспортування технологічного обладнання при евакуації, зробити раціональне розміщення технологічного обладнання на новій території, з урахуванням часу, витрат та ризиків.

Література

1. Milewski, R. *Decision making scenarios in military transport processes [Text]* / R. Milewski, T. Smal // *Archives of Transport*. – 2018. – Vol. 45, Iss. 1. – P. 75-91. DOI:10.5604/01.3001.0012.0945.

2. *Value stream analysis in military logistics: The improvement in order processing procedure [Text]* / R. Acero, M. Torralba, R. Pérez-Moya, J. A. Pozo // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10, No. 1. – Article No. 106. DOI: 10.3390/app10010106.

3. Pecina, M. *Application of the new NATO logistics system [Text]* / M. Pecina, J. Husak // *Land Forces Academy Review*. – 2018. – Vol. 23, No. 2. – P. 121-127. DOI: 10.2478/raft-2018-0014.

4. Наконечний, О. Аналіз умов та факторів, що впливають на ефективність функціонування системи логістики сил оборони держави [Текст] / О. Наконечний // *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. – 2019. – Т. 3, №. 55. – С. 48-57. DOI: 10.26906/SUNZ.2019.3.048.

5. Гаврилюк, І. Ю. Концептуальні основи управління потоками в системі логістичного забезпечення Збройних Сил України [Текст] / І. Ю. Гаврилюк, О. Й. Мацько, В. О. Дачковський // *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. – 2019. – Т. 34, №. 1. – С. 37-44. DOI: 10.33099/2311-7249/2019-34-1-37-44.

6. *Development of methods for supply management in transportation networks under conditions of uncertainty of transportation cost values [Text]* / L. Raskin, O. Sira, Y. Parfeniuk, K. Bazilevych // *EUREKA: Physics and Engineering*. – 2021. – No. 2. – P. 108-123. DOI: 10.21303/2461-4262.2021.001691.m

7. *Development of a model of the service system of batch arrivals in the passengers flow of public transport [Text]* / L. Raskin, O. Sira, O. Palant, Y. E. Vodovozov // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2019. – Vol. 5, No. 3(101). – P. 51-56. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.180562.

8. Федорович, О. Є. Метод формування логістичних транспортних взаємодій для нового портфелю замовлень розподіленого віртуального виробництва [Text] / О. Є. Федорович, Ю. Л. Прончаков // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. –

2020. – №. 2. – С. 102-108. DOI: 10.32620/reks.2020.2.09.

9. Barbu, M.-L. *Theoretical considerations concerning the setting of the capability requirements specific to combat engineers structures supporting management activities from the airfield [Text]* / M.-L. Barbu // *Journal of Defense Resources Management*. – 2019. – Vol. 10, No. 2(19). – P. 188-196.

10. Бовда, Е. М. Петрі-об'єктне моделювання транспортних перевезень матеріальних засобів у військових підрозділах [Текст] / Е. М. Бовда, І. В. Стеценко, В. Е. Бовда // *Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікації та інформатизації*. – 2019. – №. 3. – С. 6-15.

11. Степанюк, М. Ю. Проблема створення інформаційної системи логістики в збройних силах України, що відповідає стандартам НАТО [Текст] / М. Ю. Степанюк, І. П. Сініцин, О. В. Комеля // *Проблеми програмування*. – 2018. – №. 4. – С. 101-110. DOI: 10.15407/pp2018.04.101.

12. Raskin, L. *Dynamic problem of formation of securities portfolio under uncertainty conditions [Text]* / L. Raskin, O. Sira, T. Katkova // *EUREKA: Physics and Engineering*. – 2019. – No. 6. – P. 73-82. DOI: 10.21303/2461-4262.2019.00985.

References

1. Milewski, R., Smal, T. *Decision making scenarios in military transport processes. Archives of Transport*, 2018, vol. 45, iss. 1, pp. 75-91. DOI: 10.5604/01.3001.0012.0945.

2. Acero, R., Torralba, M., Pérez-Moya, R., Pozo, J. A. *Value stream analysis in military logistics: The improvement in order processing procedure. Applied Sciences*, 2020, vol. 10, no. 1, article no. 106. DOI: 10.3390/app10010106.

3. Pecina, M., Husak, J. *Application of the new NATO logistics system. Land Forces Academy Review*, 2018, vol. 23, no. 2, pp. 121-127. DOI: 10.2478/raft-2018-0014.

4. Nakonechnyi, O. *Analiz umov ta faktoriv, shcho vplyvayut' na efektyvnist' funktsionuvannya systemy lohistyky syl oborony derzhavy [Analysis of conditions and factors influencing the efficiency of the system of logistics of the country defense forces]. Systemy upravlinnya, navihatsiyi ta zv'yazku. Zbirnyk naukovykh prats' – Control, navigation and communication systems. academic journal*, 2019, vol. 3, no. 55, pp. 48-57. DOI: 10.26906/SUNZ.2019.3.048.

5. Havryliuk, I., Matsko, O., Dachkovskiy, V. *Kontseptual'ni osnovy upravlinnya potokamy v systemi lohistychnoho zabezpechennya Zbroynykh Syl Ukrainy [Conceptual basis of flow management in the system of logistic support of the armed forces of Ukraine]. Suchasni informatsiyi tehnolohiyi u sferi bezpeky ta oborony – Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, 2019, vol. 34, no. 1, pp. 37-44. DOI: 10.33099/2311-7249/2019-34-1-37-44.

6. Raskin, L., Sira, O., Parfeniuk, Y., Bazilevych, K. Development of methods for supply management in transportation networks under conditions of uncertainty of transportation cost values. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2021, no. 2, pp. 108-123. DOI: 10.21303/2461-4262.2021.001691.

7. Raskin, L., Sira, O., Palant, O., Vodovozov, Y. E. Development of a model of the service system of batch arrivals in the passengers flow of public transport. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, vol. 5, no. 3(101), pp. 51-56. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.180562.

8. Fedorovich, O., Pronchakov, Y. Metod formuvannya lohistychnykh transportnykh vzayemodiy dlya novoho portfelyu zamovlen' rozpodilenooho virtual'noho vyrobnytstva [Method to organize logistic transport interactions for the new order portfolio of distributed virtual manufacture]. *Radioelektronni i komp'uterni sistemi – Radioelectronic and computer systems*, 2020, no. 2, pp. 102-108. DOI: 10.32620/reks.2020.2.09.

9. Barbu, M.-L. Theoretical considerations concerning the setting of the capability requirements specific to combat engineers structures supporting manage-

ment activities from the airfield. *Journal of Defense Resources Management*, 2019, vol. 10, no. 2(19), pp. 188-196.

10. Bovda, E. M., Stetsenko, I. V., Bovda, V. E. Petri-ob'yektne modelyuvannya transportnykh perevezhen' material'nykh zasobiv u viys'kovykh pidrozdilakh [Petri-object modeling of transportation of material assets in military units]. *Zbirnyk naukovykh prats' Viys'kovoho instytutu telekomunikatsiy ta informatyzatsiyi – Collection of scientific papers of Military Institute of Telecommunications and Informatization*, 2019, no. 3, pp. 6-15.

11. Stepaniuk, M. Y., Sinitsyn, I. P., Kotelia, O. V. Problema stvorenniya informatsiyanoi systemy lohistyky v zbroynykh sylakh Ukrayiny, shcho vidpovidaye standartam NATO [About applicability of NATO logistics information systems in Ukraine]. *Problemy prohranuvannya – Problems in programming*, 2018, no. 4, pp. 101-110. DOI: 10.15407/pp2018.04.101.

12. Raskin, L., Sira, O., Katkova, T. Dynamic problem of formation of securities portfolio under uncertainty conditions. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2019, no. 6, pp. 73-82. DOI: 10.21303/2461-4262.2019.00985.

Надійшла до редакції 10.03.2022, розглянута на редколегії 16.05.2022

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОГИСТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭВАКУАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ В ВОЕННОЕ ВРЕМЯ

*О. Е. Федорович, Ю. Л. Прончakov,
К. О. Рыбка, Ю. А. Лещенко*

Формулируется и решается сложная задача многокритериального характера, связанная с обоснованием места дислокации эвакуируемого предприятия. Проводится моделирование логистического процесса эвакуации, в условиях угроз и уязвимостей военного времени. Актуальность исследования, связана с обоснованием возможного места производства промышленного предприятия, с учетом процесса транспортировки технологического оборудования в тыл, в условиях разнородной транспортной сети. При этом, исследуется процесс размещения и налаживания производства промышленного предприятия, эвакуируемого на новое место дислокации. Целью исследования, является моделирование логистического процесса эвакуации промышленного предприятия в условиях угроз и уязвимостей военного времени. Предложен метод обоснования места дислокации эвакуируемого промышленного предприятия, основанный на многовариантном анализе с использованием качественных оценок экспертов, в виде значений лингвистических переменных. Учитывается сложная динамика доставки военных грузов с технологическим оборудованием на место дислокации, с помощью имитационного моделирования, с учетом особенностей разнородной транспортной сети, рисков и угроз военного времени. Разработана агентная имитационная модель логистического процесса эвакуации промышленного предприятия. Представлен новый алгоритм минимизации времени доставки грузов с технологическим оборудованием, позволяющий сформировать рациональный маршрут в разнородной транспортной сети, с учетом возможных рисков и угроз. Создана оптимизационная модель для размещения технологического оборудования эвакуированного промышленного предприятия на новой территории, с учетом критериев времени, затрат и рисков. Проведена многокритериальная оптимизация размещения технологического оборудования в условиях противоречивых критериев, с учетом требований военного времени. Научная новизна проведенного исследования, связана с разработкой методов и моделей процесса эвакуации промышленного предприятия, основанных на агентном имитационном моделировании, целочисленной (булевой) оптимизации, экспертном оценивании, с помощью лингвистических переменных, которое позволяет обосновать логистику эвакуации промышленного предприятия в военное время. Результаты исследования целесообразно использовать для планирования эвакуации промышленного предприятия, с учетом требований военного времени.

Ключевые слова: эвакуация промышленного предприятия; угрозы и уязвимости военного времени; логистика эвакуации; агентная имитационная модель; маршрутизация; оптимизация; риски.

**SIMULATION OF THE LOGISTIC PROCESS
OF THE INDUSTRIAL ENTERPRISE EVACUATION IN WARTIME**

*Oleg Fedorovich, Yurii Pronchakov,
Kseniia Rybka, Yuliia Leshchenko*

The complex problem of a multicriteria nature that is related to the justification of the new location for the evacuated enterprise is stated and solved. The simulation of the logistic process of evacuation in the conditions of threats and vulnerabilities of wartime is carried out. The relevance of the study is related to the justification of the possible location of the industrial enterprise production, considering the process of technological equipment transportation to the rear in a heterogeneous transport network. Also, the processes of moving the evacuated industrial enterprise to a new location and establishing the production in the new place are studied. The study simulates the logistical process of industrial enterprise evacuation in terms of wartime threats and vulnerabilities. A method to justify the location of the evacuated industrial enterprise that is based on a multivariate analysis with the use of qualitative expert assessments in the form of linguistic variables values is proposed. The complex dynamics of military cargo and technological equipment delivery to the new location are considered. This is done by means of simulation modeling that considers the specifics of a heterogeneous transport network and the risks and threats of wartime. An agent-based simulation model of the logistical process of the industrial enterprise evacuation has been developed. A new algorithm to minimize the delivery time of cargo and technological equipment that considers possible risks and threats and makes it possible to find the optimal route in a heterogeneous transport network is presented. An optimization model to locate the technological equipment of the evacuated industrial enterprise in the new territory, considering the criteria of time, cost and risks has been created. The multi-criteria optimization of the technological equipment location was carried out under the conditions of conflicting criteria, considering the requirements of wartime. The scientific novelty of the study is related to the development of methods and models of the industrial enterprise evacuation process based on agent-based simulation modeling, integer (Boolean) optimization, expert evaluation, use of linguistic variables that ultimately makes possible to justify the logistics of industrial enterprise evacuation in wartime. The results of the study should be used to plan the evacuation process of the industrial enterprise considering the requirements of wartime.

Keywords: industrial enterprise evacuation; wartime threats and vulnerabilities; evacuation logistics; agent-based simulation model; routing; optimization; risks.

Федорович Олег Євгенович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. комп’ютерних наук та інформаційних технологій, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Прончаков Юрій Леонідович – канд. техн. наук, доцент, декан факультету програмної інженерії та бізнесу, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Рибка Ксенія Олександрівна – канд. техн. наук, доц., доц. каф. комп’ютерних наук та інформаційних технологій, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Лещенко Юлія Олександрівна – канд. техн. наук, доц. каф. комп’ютерних наук та інформаційних технологій, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Oleg Fedorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computer Science and Information Technologies, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.fedorovych@khai.edu, ORCID: 0000-0001-7883-1144.

Yurii Pronchakov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Software Engineering and Business Faculty, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"; Kharkiv, Ukraine, e-mail: pronchakov@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0027-1452.

Kseniia Rybka – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Science and Information Technologies, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: k.zapadnia@khai.edu, ORCID: 0000-0002-9705-7470.

Yuliia Leshchenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Sciences and Information Technologies, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: j.leshchenko@khai.edu, ORCID: 0000-0001-9232-697X.