

УДК 658.7:004.94:623

doi: 10.32620/aktf.2022.6.05

О. Є. ФЕДОРОВИЧ, Є. В. ПОЛЩУК, Є. К. ЧМИХУН, В. С. СОЛОВЙОВ

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

МОДЕЛЮВАННЯ КРИТИЧНИХ ВРАЗЛИВОСТЕЙ У ЛОГІСТИЦІ ПОСТАЧАННЯ ОЗБРОЄННЯ ТА ВІЙСЬКОВОЇ ТЕХНІКИ В УМОВАХ ВОЄННИХ ЗАГРОЗ

Вирішується задача системного характеру, яка пов'язана з моделюванням впливу воєнних загроз на логістичний ланцюг постачання озброєння та військової техніки (запчастини для авіатехніки, боеприпаси для ракетних систем залпового вогню, тощо). Воєнні загрози можуть призводити до логістичних збитків (руйнування: аеродромів, мостів, залізничних та автомобільних магістралей, тощо), що досліджується у роботі. Актуальність дослідження пов'язана з системним характером рішення логістичної проблеми. Виникнення збитків призводить до прийняття превентивних заходів щодо зниження рівня критичних вразливостей (наприклад, злітно-посадкова смуга, наземне обладнання аеродромів, тощо) логістичного ланцюга постачання (наприклад, авіаційний) озброєння та військової техніки, в умовах воєнного стану. Метою дослідження є створення комплексу моделей, що дозволить системно проаналізувати послідовність подій, які пов'язані з виникненням воєнної загрози у логістиці постачання озброєння та військової техніки: виникнення воєнної загрози – збудження критичних вразливостей логістичного ланцюга – поява логістичних збитків – формування превентивних дій. Проведено аналіз публікацій та досліджень логістики постачання військових вантажів з виявленням невирішених задач. Створено модель для аналізу критичності вразливостей логістичного ланцюга постачання, за допомогою оцінок військових експертів та планування віртуальних експериментів. Розроблена модель для аналізу причинно-наслідкового ланцюга: воєнна загроза – критична вразливість – збитки, за допомогою якісних оцінок експертів у формі значень лінгвістичних змінних. Використано лексикографічне впорядкування можливих варіантів шляхів постачання озброєння та військової техніки у зону воєнного конфлікту. Це дозволило обрати раціональний варіант постачання для зменшення можливих логістичних збитків. Створена оптимізаційна модель для зменшення рівня критичності вразливостей у логістичному ланцюгу постачання, що забезпечує мінімізацію збитків. При цьому враховується час, ризики та витрати на проведення превентивних дій в умовах воєнного стану. Сформована агентна модель для дослідження динамічних процесів просування військових вантажів в логістичному ланцюгу постачання, за допомогою якої імітується виникнення воєнної загрози, збудження критичних вразливостей та поява можливих логістичних збитків. Ефективність запропонованого підходу забезпечується системним представленням послідовності подій виникнення воєнної загрози, збудження критичних вразливостей, появи логістичних збитків, що забезпечує прийняття раціональних превентивних дій до запобігання наслідків воєнних загроз. Наукова новизна дослідження пов'язана з розробкою оригінальних моделей, які засновані на системному представленні логістичного ланцюга постачання озброєння та військової техніки у зону воєнного конфлікту, в умовах виникнення воєнних загроз, що забезпечує прийняття ефективних превентивних дій для мінімізації логістичних збитків. Результати дослідження доцільно використовувати для планування превентивних заходів щодо мінімізації можливих збитків та забезпечення постачання військових вантажів в умовах ризиків виникнення воєнних загроз.

Ключові слова: логістичний ланцюг постачання військових вантажів; воєнна загроза; критична логістична вразливість; виникнення логістичних збитків; оптимізація; агентне імітаційне моделювання.

Вступ

Логістична мережа постачання озброєння та військової техніки в зону бойових дій, в умовах воєнного стану країни, є критичною з-за агресивних дій противника, які спрямовані на руйнування логістичних об'єктів (аеродроми, автомобільні та залізничні магістралі, тощо) [1-3]. Тому, для планування військових перевезень, необхідно сформулювати відно-

сно безпечні шляхи постачання та проводити комплекс заходів щодо забезпечення доставки озброєння та військової техніки (запчастини для авіатехніки, боеприпаси для ракетних систем залпового вогню, тощо) в зону воєнного конфлікту з мінімальними логістичними ризиками [4-6]. Звідси випливає актуальність теми даної публікації, в якій проводиться моделювання причинно-наслідкових взаємодій між появою військової загрози (наприклад, раке-

тний обстріл аеродрому), збудженню критичних вразливостей (наприклад, злітно-посадкова смуга аеродрому) у логістичному ланцюгу постачання (наприклад, авіаційний) та виникненню логістичних збитків (наприклад, руйнування злітно-посадкової смуги), що потребує проведення комплексу превентивних дій для усунення або мінімізації рівня критичності вразливостей (створення або посилення системи ППО для захисту аеродрому від ракетного обстрілу противника). Виникає протиріччя між необхідністю виконання успішних бойових дій в зоні воєнного конфлікту та невідосконаленістю існуючих методів дослідження логістичних процесів постачання озброєння, що потребує розробки нових методів та моделей, які направлені на дослідження критичних вразливостей та їх усунення в логістиці постачання, в умовах воєнних загроз. Проведений аналіз досліджень та існуючих публікацій, за тематикою даною статті, показав:

1. В існуючих публікаціях досліджуються загрози логістики постачання для мирного часу, практично відсутні дослідження впливу воєнних загроз на логістику постачання військових вантажів, в умовах воєнного стану [7-9].

2. Відсутні роботи щодо досліджень послідовності подій: виникнення військової загрози – збудження критичних логістичних вразливостей – поява можливих логістичних збитків – формування превентивних дій [10-12].

3. Мало уваги, в роботах з дослідження військової логістики, приділено виявленню критичних місць при появі воєнних загроз [13-15].

4. В існуючих роботах не досліджується формування превентивних дій в залежності від рівня критичності вразливостей, які збуджуються при виникненні воєнних загроз, що може призводити до можливих логістичних збитків [16].

Метою дослідження є створення комплексу моделей, які дозволяють аналізувати логістичний процес постачання озброєння та військової техніки, в умовах виникнення військових загроз та збудження критичних логістичних вразливостей, що дозволяє формувати комплекс превентивних заходів щодо мінімізації та усуненню логістичних збитків.

У відповідності до поставленої мети дослідження, необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести аналіз процесу постачання озброєння та військової техніки для виявлення критичних вразливостей в логістичних ланцюгах постачання.

2. Дослідити логістику постачання військових вантажів в умовах виникнення військової загрози.

3. Розробити оптимізаційну модель формування комплексу превентивних дій для зменшення можливих логістичних збитків, при виникненні військових загроз.

4. Створити імітаційну модель для дослідження впливу воєнних загроз на логістику постачання озброєння та військової техніки в зону воєнного конфлікту.

1. Аналіз процесу постачання озброєння та військової техніки для виявлення критичних вразливостей в логістичних ланцюгах постачання

Критичні вразливості пов'язані з критичними елементами в логістичному ланцюгу постачання озброєння та військової техніки (наприклад, залізничний міст, залізнична розв'язка, локомотивне депо, тощо). Для виявлення критичних вразливостей скористаємося оцінками експертів (військових фахівців у галузі логістики), які формують множину можливих вразливостей (Q) шляхом аналізу шляхів постачання військових вантажів. Далі, необхідно проаналізувати кожну вразливість у множині Q для виявлення рівня її критичності, при появі військових загроз. Для цього, сформуємо план проведення віртуальних експериментів, в якому аналізуються, за допомогою експертів, можливі варіанти прояви вразливостей та виникнення логістичних збитків. До критичних вразливостей експерти будуть відносити ті вразливості, для яких рівень збитків (W) привішує допустиме (порогове) значення (W'). Зручним та простим планом, для проведення віртуальних експериментів військовими експертами, є повний факторний експеримент (ПФЕ), в якому використовується повний перебір можливих факторів (вразливостей) та оцінюється їх вплив на «відклик». В нашому випадку, в якості «відклику», буде використаний рівень збитків, а в якості факторів – множина можливих вразливостей у логістичному ланцюгу постачання. Наведемо ілюстрований приклад проведення віртуального експерименту за допомогою ПФЕ, для оцінки впливу трьох можливих вразливостей на рівень логістичних збитків (рис. 1).

№	X ₁	X ₂	X ₃	W
1	-	-	-	0
2	-	-	+	7
3	-	+	-	8
4	-	+	+	10
5	+	-	-	9
6	+	-	+	10
7	+	+	-	10
8	+	+	+	10

Рис. 1. План проведення віртуальних експериментів

Нехай, фактор X_1 буде пов'язаний з логістичною вразливістю «залізничний міст», фактор X_2 – «залізнична розв'язка», фактор X_3 – «локомотивне депо». На рис. 1 наведений план проведення віртуальних експериментів військових фахівців з вразливостями X_1, X_2, X_3 .

Кожна строчка плану ПФЕ являє собою комбінацію можливих вразливостей, з оцінкою їх впливу на «відклик» (величина логістичного збитку). Наприклад, друга строчка плану (-, -, +) вказує на можливе збудження вразливості X_3 (локомотивне депо) при появі військової загрози. Це призводить до збитку у сім балів (шкала $0 \div 10$). П'ята строчка плану (+, -, -) пов'язана з вразливістю X_1 та руйнуванням залізничного моста (збиток у дев'ять балів). Комбінація вразливостей для четвертої строчки плану (-, +, +) пов'язана зі збудженням другої та третьої вразливості, що призводить до логістичного збитку у десять балів. В результаті проведення віртуального експерименту, з участю військових фахівців у воєнній логістиці, можливо сформувати регресійну залежність, яка дозволить оцінювати рівень впливу вразливостей на величину логістичного збитку:

$$W = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{13}X_1X_3 + b_{23}X_2X_3 + b_{123}X_1X_2X_3.$$

Величина коефіцієнту b_j вказує на ступень впливу вразливості X_j на величину логістичного збитку (W). В результаті розрахунку коефіцієнтів регресивної залежності, за відомими формулами для ПФЕ, отримаємо значення впливу вразливостей на логістичні збитки. Для аналізу критичності вразливостей, нам необхідно оцінити значення коефіцієнтів b_1, b_2, b_3 для факторів X_1, X_2, X_3 . Для цього, звернемо увагу, тільки на лінійну частину регресивної залежності:

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 = 8 + 4,25X_1 + 2,38X_2 + 1,25X_3.$$

Якщо проаналізувати сформовану залежність, можна зробити висновок, що найбільш суттєвим фактором (вразливістю), який впливає на «відклик» (логістичний збиток) є «руйнування мостів» (фактор X_1). Найменш важливим фактором є фактор X_3 (руйнування локомотивного депо). Таким чином, шляхом проведення віртуальних експериментів та оцінок військових експертів, можна встановити рівень впливу вразливостей на логістичні збитки, при появі воєнних загроз, а також визначити критичність тих чи інших можливих вразливостей.

2. Дослідження логістики постачання військових вантажів в умовах виникнення військової загрози

Для вибору раціональних шляхів постачання озброєння та військової техніки, необхідно врахувати логічну послідовність подій: виникнення військової загрози – збудження критичних вразливостей – виникнення логістичних збитків – проведення дій для запобігання можливих наслідків військової загрози. При цьому, необхідно враховувати той факт, на який вказують військові експерти, що при дослідженні впливу військової загрози на логістичні вразливості, на практиці, часто збуджується тільки одна, найбільш критична логістична вразливість. Вибір найбільш критичної вразливості, яка збуджується при виникненні воєнної загрози, було розглянуто у п.1 даної публікації. Тому, для дослідження можливих шляхів постачання озброєння та військової техніки в зону воєнного конфлікту, будемо розглядати тільки одну, критичну вразливість, для конкретного, який розглядається, шляху постачання. Для порівняння можливих шляхів постачання, скористаємося якісними оцінками експертів, у вигляді значень лінгвістичних змінних X_i (букв латинського алфавіту). Тоді, для шляху постачання, що розглядається, можливі наступні значення лінгвістичних змінних X_i :

1. Для оцінки рівня критичності вразливості:

$$X_1 = \begin{cases} A - \text{мінімальний рівень критичності вразливості;} \\ B - \text{задовільний рівень критичності вразливості;} \\ C - \text{допустимий рівень критичності вразливості;} \\ D - \text{максимальний рівень критичності вразливості.} \end{cases}$$

2. Для оцінки величини логістичних збитків, які виникають при збудженні критичної вразливості:

$$X_2 = \begin{cases} A - \text{мінімальні збитки;} \\ B - \text{задовільні збитки;} \\ C - \text{допустимі збитки;} \\ D - \text{максимальні збитки.} \end{cases}$$

3. Проведення комплексу превентивних дій, для зменшення рівня критичності вразливостей, будемо оцінювати у вигляді трьох показників:

3.1. Час, який витрачено на проведення комплексу превентивних дій:

$$X_3 = \begin{cases} A - \text{мінімальний час;} \\ B - \text{задовільний час;} \\ C - \text{допустимий час;} \\ D - \text{максимальний час.} \end{cases}$$

7. C, B, A, B, D
8. A, B, A, B, D
9. A, A, C, B, D
10. A, B, C, B, A.

3.2. Ризики, які пов'язані з проведення превентивних дій у воєнний час:

$$X_4 = \begin{cases} A - \text{мінімальний ризик;} \\ B - \text{задовільний ризик;} \\ C - \text{допустимий ризик;} \\ D - \text{максимальний ризик.} \end{cases}$$

4. A, A, B, C, A
9. A, A, C, B, D
8. A, B, A, B, D
10. A, B, C, B, A
2. A, D, A, B, C
6. B, A, A, C, D
1. B, C, B, C, B
3. C, A, B, B, D
7. C, B, A, B, D
5. C, B, B, D, C.

3.3. Витрати для проведення комплексу превентивних дій:

$$X_5 = \begin{cases} A - \text{мінімальні витрати;} \\ B - \text{задовільні витрати;} \\ C - \text{допустимі витрати;} \\ D - \text{максимальні витрати.} \end{cases}$$

Враховуючи, те що постачання озброєння та військової техніки здійснюється у воєнний час, військові експерти навели наступну послідовність показників з урахуванням їх важливості:

$$X_3, X_4, X_5.$$

Тоді, для вибору раціонального шляху постачання озброєння та військової техніки, в умовах виникнення воєнних загроз, будемо використовувати, для порівняння можливих варіантів шляхів постачання, лексикографічне впорядкування, у вигляді значень лінгвістичних змінних:

$$X_1, X_2, X_3, X_4, X_5.$$

Тоді, найліпший шлях постачання, пов'язаний з наближенням значення змінної X_i до значення А. Наведемо ілюстрований приклад вибору раціонального шляху постачання озброєння та військової техніки. Нехай, військові експерти сформувавши 10 можливих варіантів постачання озброєння та військової техніки в зону воєнного конфлікту, в умовах виникнення воєнних загроз:

1. B, C, B, C, B
2. A, D, A, B, C
3. C, A, B, B, D
4. A, A, B, C, A
5. C, B, B, D, C
6. B, A, A, C, D

Впорядкуємо варіанти, з урахуванням значень лінгвістичних змінних X_i . Отримаємо впорядкований список:

Очевидно, найліпший варіант постачання буде знаходитися вверху впорядкованого списку, а найгірший варіант – унизу цього списку. В даному прикладі, найліпший варіант шляху постачання – це четвертий варіант постачання озброєння та військової техніки, у якому:

- рівень критичності – мінімальний (А),
- рівень збитків – мінімальний (А),
- час, який витрачено на проведення превентивних дій – задовільний (В),
- ризики проведення превентивних дій – допустимий рівень (С),
- витрати на проведення превентивних дій – мінімальний рівень (А).

3. Оптимізаційна модель формування комплексу превентивних дій для зменшення можливих логістичних збитків, при виникненні військових загроз

Виникнення військової загрози, а потім збудження критичних вразливостей, може призвести до збитків логістичного характеру та припиненню руху військових вантажів. Для зменшення можливих логістичних збитків, необхідно, заздалегідь, провести комплекс превентивних заходів, які спрямовані на зменшення рівня критичності вразливостей в логістичному ланцюгу постачання озброєння та військової техніки. Такі дії потребують часу, витрат та мають ризики, які пов'язані з воєнним станом. У довгих логістичних ланцюгах критичних вразливостей може бути забагато, тому комплекс превентивних заходів повинен враховувати можливі вразливості усього логістичного шляху військових вантажів. Проведений комплекс превентивних дій повинен

мінімізувати можливі збитки, з урахуванням довгого логістичного ланцюга постачання.

Сформуємо оптимізаційну модель, яка буде спрямована на зменшення рівня критичності значень можливих збитків, шляхом раціонального розподілу витрат на проведення превентивних дій. Для цього, необхідно проаналізувати та сформулювати множини вразливостей (P), які, як рахують військові експерти в галузі логістики, є критичними та, в першу чергу, збуджуються при появі воєнних загроз. Ці вразливості можна впорядкувати за рівнем критичності та величині збитків, які виникають при їх збудженні:

$$P_k \in P, P_1 > P_2 > P_3 > \dots > P_N,$$

де N – кількість критичних вразливостей у множині P.

Для мінімізації можливих логістичних збитків, при виникненні воєнних загроз та збудженні критичних вразливостей, для обраного шляху постачання озброєння та військової техніки, скористаємося цілочисельним (булевим) програмуванням. Для цього, представимо можливі варіанти складу (Q_j) критичних вразливостей для j-ої ланки логістичного ланцюга постачання. Для цих варіантів вразливостей необхідно обрати оптимальний склад для проведення превентивних дій, щодо запобігання виникнення збитків, шляхом перебору варіантів. Кількість варіантів:

$$Q_j = 2^{N_j} - 1,$$

де N_j – кількість можливих варіантів складу вразливостей у j-й ланці логістичного ланцюга.

Наприклад, для чотирьох критичних вразливостей:

$$Q_j = 2^{N_j} - 1 = 2^4 - 1 = 15.$$

Варіанти складу критичних вразливостей можна сформулювати шляхом використання двійкового лічильника:

1. 0001	6. 0110	11. 1011
2. 0010	7. 0111	12. 1100
3. 0011	8. 1000	13. 1101
4. 0100	9. 1001	14. 1110
5. 0101	10. 1010	15. 1111,

де 1 – означає присутність у складі i-ої вразливості. Наприклад, 1001 – присутність у складі 1 та 4 вразливостей.

Введемо булеву змінну x_{kj} , яка приймає наступні значення:

$$x_{kj} = \begin{cases} 1, & \text{якщо обрано k-й варіант складу} \\ & \text{критичних вразливостей для j-ої} \\ & \text{ланки логістичного ланцюга постачання} \\ & \text{для проведення комплексу заходів} \\ & \text{щодо їх зменшення;} \\ 0, & \text{в іншому випадку.} \end{cases}$$

Введемо наступні показники для оцінки можливих варіантів складу критичних вразливостей, для яких будуть проведені превентивні дії для зменшення їх критичності:

1. Величина логістичних збитків (V), які можливо виникнуть після проведення комплексу превентивних дій, що спрямовані на зменшення критичності вразливостей у логістичному ланцюгу постачання озброєння та військової техніки:

$$V = \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^{Q_j} v_{kj} x_{kj},$$

де v_{kj} – величина логістичних збитків для k-го варіанту складу вразливостей j-ої ланки логістичного ланцюгу постачання після проведення превентивних дій, щодо зменшення критичності вразливостей;

L – довжина логістичного ланцюга постачання озброєння та військової техніки.

2. Час постачання військової техніки та озброєння для ланцюга постачання, що розглядається:

$$T = \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^{Q_j} t_{kj} x_{kj},$$

де t_{kj} – час, який витрачено на проведення превентивних дій для зменшення критичності вразливостей для k-го варіанту складу критичних вразливостей j-ої ланки логістичного ланцюгу постачання.

3. Ризики проведення комплексу превентивних дій в умовах воєнного стану:

$$R = \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^{Q_j} r_{kj} x_{kj},$$

де r_{kj} – ризик проведення комплексу превентивних дій, в умовах воєнного стану, для k-го варіанту складу критичних вразливостей j-ої ланки логістичного ланцюгу постачання.

4. Витрати на проведення превентивних дій, які спрямовані на зменшення рівня критичності вразливостей j -ої ланки логістичного ланцюгу постачання:

$$W = \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^{Q_j} w_{kj} x_{kj},$$

де w_{kj} – витрати, які пов’язані з проведенням комплексу превентивних дій для k -го варіанту складу критичних вразливостей.

Необхідно мінімізувати величину можливих збитків при виникненні воєнних загроз, шляхом раціонального розподілу витрат на зменшення рівня критичності вразливостей:

$$\min V, V = \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^{Q_j} v_{kj} x_{kj},$$

з урахуванням можливих значень інших показників:

$$R \leq R', R = \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^{Q_j} r_{kj} x_{kj},$$

$$T \leq T', T = \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^{Q_j} t_{kj} x_{kj},$$

$$W \leq W', W = \sum_{j=1}^L \sum_{k=1}^{Q_j} f_{kj} x_{kj},$$

де R', T', W' – допустимі значення показників R, T, W .

4. Імітаційна модель для дослідження впливу воєнних загроз на логістику постачання озброєння та військової техніки в зону воєнного конфлікту

Створена подійно-імітаційна модель, за допомогою агентів на платформі AnyLogic, дозволяє проводити дослідження динамічних процесів перевезення військових вантажів за заданим шляхом постачання. Основою для створення імітаційної моделі є причино-наслідкові події, які виникають при появі військової загрози. Це призводить до збудження критичних вразливостей у логістичному шляху постачання та виникнення можливих збитків, для яких необхідно проведення комплексу превентивних дій. До складу основних агентів імітаційної моделі надходять генератор воєнних загроз, генератор збудження критичних вразливостей, генератор можливих збитків та генератор комплексу превен-

тивних дій, які залежать від величини можливих збитків. На рис. 2 представлена структура агентної моделі, яку складають наступні агенти:

1. Опис логістичного ланцюгу постачання (у вигляді послідовності ланок логістичного ланцюга).
2. Генератор воєнних загроз.
3. Генератор вразливостей.
4. Генератор можливих збитків.
5. Генератор превентивних дій (формується величина витрат, за допомогою експертів, яка залежить від величини можливих збитків)..
6. Агент управління.
7. Агент результатів моделювання.

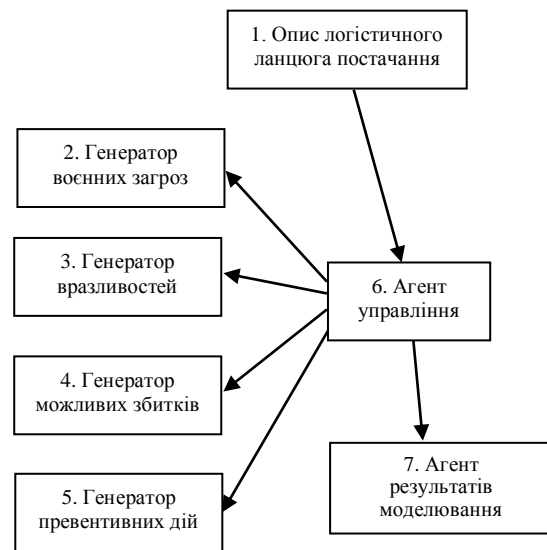


Рис. 2. Структурна схема агентної моделі

Для роботи генераторів 2, 3 використовуються закони розподілу ймовірностей (рівномірний, нормальний, тощо), які обирають та задають, за допомогою існуючої статистики експерти. Моделювання проводиться багатократно для статистичного усереднення результатів.

В якості результатів імітаційного моделювання використовуються:

- кількість воєнних загроз за термін моделювання;
- перелік вразливостей, які були збуджені при появі воєнних загроз;
- величина логістичних збитків, які виникають при появі воєнних загроз та збудження критичних вразливостей;
- витрати на проведенням комплексу превентивних дій (задаються за допомогою військових експертів та залежать від величини можливих збитків).

Аналіз результатів моделювання дозволяє оцінити критичність вразливостей та їх вплив на можливі логістичні збитки, що потребує планування превентивних дій, які необхідно провести у корот-

кий термін часу, для запобігання впливу воєнних загроз на логістичні процеси постачання озброєння та військової техніки в зону воєнного конфлікту.

Висновки

Проведені дослідження спрямовані на створення комплексу моделей для аналізу впливу воєнних загроз на логістичний ланцюг постачання озброєння та військової техніки в зону воєнних дій. У результаті попереднього аналізу виявлено, що відсутні дослідження причинно-наслідкової послідовності подій: виникнення воєнної загрози, збудження критичних логістичних вразливостей, поява можливих логістичних збитків (руйнування: мостів, залізничних магістралей, автомобільних розв'язок, тощо). Прогнозування виникнення логістичних збитків, у залежності від рівня критичності логістичних вразливостей, дозволяє сформулювати комплекс превентивних дій для усунення або зменшення збитків.

Проведено аналіз можливих критичних вразливостей, з використанням оцінок експертів, шляхом проведення віртуальних експериментів для оцінки можливих збитків при виникненні воєнних загроз та збудження логістичних вразливостей. Це дозволило виявити рівень критичності вразливості, який впливає на величину логістичного збитку.

Проведено оцінювання можливих варіантів вибору шляхів постачання озброєння та військової техніки, в умовах воєнного стану. При цьому, використовуються як кількісні, так і якісні оцінки у формі значень лінгвістичних змінних.

Використовуючи лексикографічне впорядкування якісних оцінок для множини логістичних змінних, для оцінки шляху постачання озброєння та військової техніки, в зону воєнного конфлікту, проведено обґрунтування та вибір найліпшого варіанту з множини можливих.

Створена оптимізаційна модель, яка дозволяє мінімізувати можливі логістичні збитки, шляхом проведення превентивних дій, у вигляді комплексу заходів, щодо зменшення рівня критичності логістичних вразливостей, в умовах воєнного стану. При оптимізації враховуються вимоги часу, ризиків з-за військових загроз, та допустимі витрати на проведення превентивних дій.

Розроблена агентна імітаційна модель, для дослідження динаміки просування військових вантажів в логістичному ланцюзі постачання, при виникненні військових загроз, збудженню критичних вразливостей, та появи логістичних збитків.

Використано математичні методи та методи моделювання: системний аналіз логістики постачання військових вантажів; експертні оцінки для проведення віртуальних експериментів, за допомо-

гою методів теорії експериментів; якісні оцінки, з використанням лінгвістичних змінних; оптимізаційні моделі, на основі цілочисельного (булевого) програмування; агентне імітаційне моделювання.

Запропонований підхід дозволяє оцінювати та планувати логістичні шляхи постачання озброєння та військової техніки, в зону воєнного конфлікту з урахуванням загроз, шляхом проведення превентивних дій, щодо зменшення рівня критичності логістичних вразливостей, які впливають на логістичні збитки при появі воєнних загроз.

Література

1. Наконечний, О. Аналіз умов та факторів, що впливають на ефективність функціонування системи логістики сил оборони держави [Text] / 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.

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. Гаврилюк, І. Ю. Концептуальні основи управління потоками в системі логістичного забезпечення Збройних Сил України [Text] / 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.

4. Моделювання транспортної логістики військових вантажів з урахуванням збитків, які виникають у зоні бойових дій через запізнення у постачанні [Текст] / О. Є. Федорович, О. С. Уруський, І. Б. Чепков, М. І. Луханін, Ю. Л. Прончаков, К. О. Рибка, Ю. О. Леценко // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2022. – № 2. – С. 63-74. DOI: 10.32620/reks.2022.2.05.

5. The Impacts of Transportation System towards the Military Logistics Support in Sabah [Text] / M. Halizahari, Mohamad Faris Daud, Azizi Ahmad Sarkawi // International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology. – 2022. – Vol. 12, Iss. 3. – P. 1092 – 1097. DOI: 10.18517/ijaseit.12.3.14516.

6. Dimitrov, M. S. State and trends in the development of the logistic system of the Bulgarian Armed Forces [Text] / M. S. Dimitrov, V. N. Irinkov // Obrońność-Zeszyty Naukowe Wydziału Zarządzania i Dowodzenia Akademii Sztuki Wojennej. – 2018. – No. 3 (27). – P. 35-44.

7. 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

8. 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.

9. Федорович, О. Є. Метод формування логістичних транспортних взаємодій для нового портфелю замовлень розподіленого віртуального виробництва [Text] / О. Є. Федорович, Ю. Л. Прончаків // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. – 2020. – № 2. – С. 102-108. DOI: 10.32620/reks.2020.2.09.

10. Lai, C.-M. Designing a reliable hierarchical military logistic network using an improved simplified swarm optimization [Text] / C.-M. Lai, M.-L. Tseng // *Computers and Industrial Engineering*. – 2022. – Vol. 169. – Article No. 108153. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108153.

11. Milewski, R. Decision making scenarios in military transport processes [Text] / R. Milewski, T. Smal // *Archives of Transport*. – 2018. – Vol. 45, iss. 1. – P. 65-81. DOI: 10.5604/01.3001.0012.0945.

12. Demertzis, K. A Blockchain Secure and Integrity-Preserved Architecture for Military Logistics Operations [Text] / K. Demertzis, P. Kikiras, L. Iliadis // *Communications in Computer and Information Science*. – 2022. – Vol. 1600. – P. 271-283. DOI: 10.1007/978-3-031-08223-8_23.

13. Školník, M. New trends in the management of logistics in the Armed Forces of the Slovak Republic [Text] / M. Školník // *Zeszyty Naukowe Akademii Sztuki Wojennej*. – 2018. – No. 3(112) – P. 53-63. DOI: 10.5604/01.3001.0013.0878.

14. 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. Котеля // *Проблеми програмування*. – 2018. – № 4. – С. 101-110. DOI: 10.15407/pp2018.04.101.

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

16. 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, Iss. 2(19). – P. 188-196.

References

1. Nakonechnyy, O. Analiz umov ta faktoriv, shcho vplyvayut' na efektyvnist' funktsionuvannya systemy lohistyky syl obrony 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.

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. Havrylyuk, I. Yu., Mats'ko, O. Y., Dachkovs'kyi, V. O. Kontseptual'ni osnovy upravlinnya potokamy v systemi lohistychnoho zabezpechennya Zbroynykh Syl Ukrayiny [Conceptual basis of flow management in the system of logistic support of the armed forces of Ukraine]. *Suchasni informatsiyi tekhnolohiyi u sferi bezpeky ta obrony – 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.

4. Fedorovych O. Ye., Urus'kyi O. S., Chepkov I. B., Lukhanin M. I., Pronchakov Yu. L., Rybka K. O., Leshchenko Yu. O. Modelyuvannya transportnoyi lohistyky viys'kovykh vantazhiv z urakhuvanniam zbytkiv, yaki vynykayut' u zoni boyovykh diy cherez zapiznennya u postachanni [Simulation of transport logistics of military cargo considering the losses occurring in the war zone due to delays in delivery]. *Radioelektronni i komp'uterni sistemi – Radioelectronic and computer systems*, 2022, no. 2, pp. 63-74. DOI: 10.32620/reks.2022.2.05.

5. Halizahari, M., Daud, Mohamad Faris., Sarkawi, Azizi Ahmad. The Impacts of Transportation System towards the Military Logistics Support in Sabah. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 2022, vol. 12, iss. 3, pp. 1092-1097. DOI: 10.18517/ijaseit.12.3.14516.

6. Dimitrov, M. S., Irinkov, V. N. State and trends in the development of the logistic system of the Bulgarian Armed Forces. *Obronność–Zeszyty Naukowe Wydziału Zarządzania i Dowodzenia Akademii Sztuki Wojennej*, 2018, no. 3 (27), pp. 35-44.

7. 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.

8. 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.
9. Fedorovich, O., Pronchakov, Y. Metod formuvannya lohistrychnykh transportnykh vzayemodiy dlya novoho portfelyu zamovlen' rozpodileno 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.
10. Lai, C.-M., Tseng, M.-L. Designing a reliable hierarchical military logistic network using an improved simplified swarm optimization. *Computers and Industrial Engineering*, 2022, vol. 169, article no. 108153. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108153.
11. Milewski, R., Smal, T. Decision making scenarios in military transport processes. *Archives of Transport*, 2018, vol. 45, iss. 1, pp. 65-81. DOI: 10.5604/01.3001.0012.0945.
12. Demertzis, K., Kikiras, P., Iliadis, L. A Blockchain Secure and Integrity-Preserved Architecture for Military Logistics Operations. *Communications in Computer and Information Science*, 2022, vol. 1600, pp. 271-283. DOI: 10.1007/978-3-031-08223-8_23.
13. Školník, M. New trends in the management of logistics in the Armed Forces of the Slovak Republic. *Zeszyty Naukowe Akademii Sztuki Wojennej*, 2018, no. 3(112), pp. 53-63. DOI: 10.5604/01.3001.0013.0878.
14. Stepaniuk, M. Y., Sinitsyn, I. P., Kotelia, O. V. Problema stvorenniya informatsiyoi systemy lohistryky v Zbroynykh Sylakh Ukrayiny, shcho vidpovidaye standartam NATO [About applicability of NATO logistics information systems in Ukraine]. *Problemy prohramuvannya – Problems in programming*, 2018, no. 4, pp. 101-110. DOI: 10.15407/pp2018.04.101.
15. 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*, 2019, no. 3, pp. 6-15.
16. Barbu, M.-L. Theoretical considerations concerning the setting of the capability requirements specific to combat engineers structures supporting management activities from the airfield. *Journal of Defense Resources Management*, 2019, vol. 10, iss. 2(19), pp. 188-196.

Надійшла до редакції 05.10.2022, розглянута на редколегії 20.11.2022

SIMULATION OF CRITICAL VULNERABILITIES IN THE LOGISTICS OF SUPPLY ARMS AND MILITARY EQUIPMENT UNDER CONDITIONS OF MILITARY THREAT

*Oleg Fedorovych, Yevhenii Polishchuk, Yevhen Chmykhun,
Vladyslav Solovyov*

The systemic nature problem related to the simulation of the influence of military threats on the logistics chain of the supply of weapons and military equipment (spare parts for aircrafts, ammunition for rocket systems of volley fire, etc.) is being solved. Military threats can lead to logistical damage (destruction: airfields, bridges, railways, and highways, etc.), which is investigated in this paper. The relevance of the research is related to the systemic nature of the solution to the logistical problem. The occurrence of losses leads to the taking of preventive measures to reduce the level of critical vulnerabilities (for example, runways, ground equipment of airfields, etc.) of the logistical supply chain (for example, aviation) of weapons and military equipment under conditions of martial law. The study aims to create a set of models that will allow making a systematic analysis of the sequence of events associated with the emergence of a military threat in the logistics of the supply of weapons and military equipment: the appearance of a military threat – the emergence of critical vulnerabilities in the logistics chain – the appearance of logistical losses – the formation of preventive actions. The analysis of publications and studies on the logistics of military supplies with the identification of unresolved problems has been carried out. A model to analyze the criticality of vulnerabilities of the logistics supply chain, using the assessments of military experts and the planning of virtual experiments has been created. A model to analyze the causal chain: military threat – critical vulnerability – losses using qualitative assessments of experts in the form of linguistic variable values has been developed. The lexicographic arrangement of possible alternative ways to supply weapons and military equipment to the zone of military conflict is used. This made it possible to select a rational supply option to reduce possible logistical losses. The optimization model to reduce the level of criticality of vulnerabilities in the logistics supply chain to ensure the mini-

mization of losses has been created. In this case, the time, risks and costs of carrying out the preventive actions under conditions of martial law are considered. An agent model to study the dynamic processes of moving forward the military cargo in the logistics supply chain, which helps simulate the occurrence of a military threat, the activation of critical vulnerabilities, and the appearance of possible logistical losses has been developed. The efficiency of the proposed approach is ensured by a systematic representation of the sequence of events on the emergence of a military threat, the activation of critical vulnerabilities, the appearance of logistical losses, which ensures the adoption of rational preventive actions to prevent the consequences of military threats. The scientific novelty of the study is related to the development of original models, which are based on the systematic presentation of the logistics chain of the supply of weapons and military equipment to the zone of military conflict under conditions of military threat to ensure that efficient preventive actions are done to minimize logistical losses. The results of the study should be used to plan the preventive measures to minimize possible losses and ensure military supplies under conditions of the risk of military threats.

Keywords: logistics supply chain of military cargo; military threat; critical logistics vulnerability; occurrence of logistics losses; optimization; agent simulation modeling.

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.

Поліщук Євгеній Володимирович – аспірант каф. комп’ютерних наук та інформаційних технологій, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Чмихун Євген Костянтинович – аспірант каф. комп’ютерних наук та інформаційних технологій, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Соловйов Владислав Станіславович – аспірант каф. комп’ютерних наук та інформаційних технологій, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Oleg Fedorovych – 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.

Yevhenii Polishchuk – PhD student of Computer Science and Information Technologies Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: kafius@ukr.net.

Yevhen Chmykhun – PhD student of Computer Science and Information Technologies Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: kafius@ukr.net.

Vladyslav Solovyov – PhD student of Computer Science and Information Technologies Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: kafius@ukr.net.