

О. Є. ФЕДОРОВИЧ¹, О. С. УРУСЬКИЙ², І. Б. ЧЕПКОВ³, М. І. ЛУХАНІН³,
Ю. Л. ПРОНЧАКОВ¹, К. О. РИБКА¹, Ю. О. ЛЕЩЕНКО¹

¹ Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

² «Прогрестех-Україна», Київ, Україна

³ ЦНДІ озброєння та військової техніки, Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНОЇ ЛОГІСТИКИ ВІЙСЬКОВИХ ВАНТАЖІВ З УРАХУВАННЯМ ЗБИТКІВ, ЯКІ ВИНИКАЮТЬ У ЗОНІ БОЙОВИХ ДІЙ ЧЕРЕЗ ЗАПІЗНЕННЯ У ПОСТАЧАННІ

Формується та вирішується задача багатокритеріального характеру, пов'язана з моделюванням транспортної логістики доставки військових вантажів у зону бойових дій в умовах виникаючих запізнень та ризиків. Актуальність дослідження пов'язана з аналізом можливих збитків, які виникають у зоні бойових дій (втрата особового складу збройних сил, пошкодження та знищення військової техніки, зміна характеру бойових дій від наступальних до оборонних, тощо) через запізнення постачання озброєння та військової техніки. Метою дослідження є моделювання логістики перевезень у різномірній транспортній мережі для забезпечення своєчасної доставки військових вантажів в умовах можливих запізнень та ризиків, які впливають на величину збитків у зоні бойових дій. Враховуючи складну динаміку доставки військових вантажів, пов'язаних з різномірністю та перевалками у транспортній мережі, для дослідження постачання створена оригінальна агентна імітаційна модель, яка дозволяє оцінити запізнення, ризики та збитки. Представлено новий алгоритм для мінімізації часу доставки військових вантажів, заснований на розповсюдженні клонів заявок у графі, який представляє різномірну транспортну мережу. Представлено алгоритм мінімізації ризиків постачання у воєнний час, який враховує довгі логістичні ланцюги транспортування військових вантажів у зону бойових дій. Проводиться дослідження збитків, пов'язаних з несвоєчасним надходженням різних видів військової техніки та озброєння у зону бойових дій, який заснований на використанні повного факторного експерименту та оцінках воєнних фахівців в галузі військової логістики. Враховуючи протиріччя критеріїв запізнень, ризиків та збитків, формується та вирішується багатокритеріальна задача оптимізації пошуку компромісів за допомогою цілочисельного (булевого) програмування. Ефективність запропонованого підходу демонструється на прикладі моделювання постачання військових вантажів у зону бойових дій. Проаналізовано альтернативні маршрути постачання, виникаючі ризики та збитки через запізнення постачання. Обґрунтовується вибір компромісного варіанту маршруту доставки військового вантажу у зону бойових дій. Наукова новизна проведеного дослідження пов'язана з розробкою методів та моделей заснованих на агентному імітаційному моделюванні, теорії експериментів та цілочисельної оптимізації, що дозволяє оцінити запізнення та збитки постачання військових вантажів у зону бойових дій у довгих логістичних ланцюгах різномірної транспортної мережі. Результати дослідження доцільно використовувати для формування раціональних маршрутів постачання військових вантажів у воєнний час.

Ключові слова: логістика постачання військових вантажів; різномірна транспортна мережа; запізнення та ризики у постачанні; збитки у зоні бойових дій; агентне імітаційне моделювання.

Вступ

Логістична складова є однією з важливих компонентів у воєнний час [1, 2]. Несвоєчасне постачання озброєння, військової техніки, боєприпасів та запчастин у зону можливих бойових дій надає суттєвий вплив на характер та хід війни [3, 4]. Запізнення у доставки військових вантажів призводить до мож-

ливих збитків при проведенні бойових дій (втрата особового складу збройних сил, пошкодження та знищення військової техніки, зміна характеру бойових дій від наступальних до оборонних, тощо) [5, 6]. Тому актуальне рішення задачі організації раціональних логістичних взаємодій при перевезенні військових вантажів, які у теперішній час здійснюються у різномірній транспортній мережі з переходами (пе-

ревалками) з транспортної магістралі одного типу на інший [7, 8]. Наприклад, доставка військових вантажів здійснюється за довгим логістичним транспортним ланцюгом: авіаційний-автомобільний-залізничний-автомобільний транспорти.

Для організації таких складних взаємодій формуються розподільні логістичні центри, місця перевалок, тимчасове складування тощо. Таке різноманіття логістичних компонент, а також довгі логістичні ланцюги призводять до великих ризиків, які необхідно враховувати при формуванні маршрутів постачання військових вантажів.

Проведений аналіз публікацій за даною тематикою показав, що основну увагу у наукових роботах приділяється формуванню маршрутів руху вантажів у однорідному (моно) транспортному середовищі без урахування переходу з однієї транспортної артерії на іншу, перевалок вантажів та їх тимчасового збереження [9, 10]. Окрім того, відсутні роботи пов'язані з виникненням збитків (особливо у воєнний час) через логістичні затримки та аналізом ризиків, що виникають у логістиці постачання через умови воєнного часу [11-13].

Таким чином, виникає протиріччя, пов'язане з вимогами своєчасної доставки військових вантажів, що суттєво впливає на величину збитків та хід бойових дій, та можливостями транспортної логістики, пов'язаної з різномірною транспортною мережею та довгими логістичними ланцюгами з перевалками, що призводить до ризиків перевезень у воєнний час.

Виникає складна науково-прикладна задача багатокритеріального характеру, пов'язана зі своєчасною доставкою військових вантажів, що впливає на розмір збитку та хід бойових дій. При цьому необхідно враховувати різномірність транспортної мережі, наявність перевалок, а також виникаючі ризики постачання [14, 15].

Метою дослідження є моделювання логістики перевезень у різномірній транспортній мережі для забезпечення своєчасної доставки військових вантажів в умовах можливих запізнень та ризиків, які впливають на величину збитків у зоні бойових дій.

В якості основних критеріїв, для оцінки досягнення мети дослідження, використовується час перевезення вантажів у різномірній транспортній мережі, величина збитку, пов'язаного з несвоєчасною доставкою військового вантажу, а також розмір накопичуваного ризику в логістиці постачання у воєнний час.

Для реалізації поставленої мети дослідження необхідно вирішити наступні задачі:

1. Побудувати агентну імітаційну модель для дослідження перевезень військових вантажів.

2. Розробити алгоритм мінімізації часу доставки військових вантажів у різномірній транспортній мережі.

3. Розробити алгоритм маршрутизації для мінімізації ризиків постачання військових вантажів.

4. Розробити метод аналізу можливого збитку, пов'язаного з запізненням постачання озброєння та військової техніки у зону бойових дій.

5. Сформувані метод пошуку компромісних рішень при формуванні маршрутів постачання озброєння та військової техніки у зону бойових дій.

6. Навести приклад моделювання постачання військових вантажів у зону бойових дій.

1. Агентна імітаційна модель для дослідження перевезень військових вантажів

Через довгі логістичні ланцюги, пов'язані з доставкою військових вантажів, основний аспект дослідження спрямований на моделювання динамічних процесів постачання у складній різномірній транспортній мережі. Тому, в якості основного інструменту дослідження використовується розроблена агентна імітаційна модель, яка дозволяє імітувати часові затримки у складних структурах транспортних мереж з можливими паралельними процесами постачання, пов'язаними поміж собою умовами синхронізації.

Імітаційна модель реалізована у вигляді агентного представлення. Основою створення є класична система моделювання складних процесів GPSS, яка використовується для моделювання динамічних процесів у соціотехнічних системах.

У імітаційній моделі відокремлений агент управління, який за допомогою заданого масштабу часу здійснює управління основними подіями, які виникають у ході просування заявок (військових вантажів) у транспортній мережі. В якості основних подій, пов'язаних з переміщенням військових вантажів використано:

- подія формування (генерування) заявки у транспортну мережу;
- подія виходу заявки з вершини графу G (транспортного вузлу);
- подія приходу заявки до транспортного вузлу;
- подія зайняття заявкою ділянки магістралі;
- подія звільнення транспортної ділянки магістралі:
- подія потрапляння заявки (військового вантажу) у зону бойових дій;
- подія синхронізації декількох заявок (наприклад, прихід військової техніки та боєприпасів).

У розробленій імітаційній моделі можливе дослідження паралельних процесів руху заявок, кожний з яких пов'язаний зі своїм маршрутом руху. Процеси можуть синхронізуватися, що пов'язане з особливостями використання військових вантажів у зоні бойових дій.

Імітаційна модель реалізована у вигляді множини агентів, відносно ізольованих програмних модулів, зі своєю внутрішньою структурою, пов'язаною з реалізацією подій у системі моделювання. Події моделюються у системному часі, з урахуванням заданого масштабу часу, за допомогою послідовного списку подій. Реалізація подій здійснюється шляхом перегляду заголовку списку подій. Планування майбутніх подій здійснюється за причинно-наслідковим зв'язком. Наприклад, за причиною зайняття ділянки транспортної магістралі, виникає наслідок – звільнення цієї ділянки при переміщенні військового вантажу. Підсумковою подією у моделюванні є подія потрапляння заявки (військового вантажу) у зону бойових дій.

Основними агентами у імітаційній моделі є:

1. Агент опису транспортної мережі.
2. Генератор заявок (використовується для формування заявок у вигляді військових вантажів, які надходять до транспортної мережі).
3. Агент транспортного вузлу (пов'язаний з подіями приходу та виходу військових вантажів з транспортного вузлу).
4. Агент транспортної ділянки магістралі (пов'язаний з подіями зайняття та звільнення військового вантажем ділянки транспортної магістралі).
5. Агент синхронізації приходу декілька заявок (спрацьовує при приході тих заявок, які пов'язані з умовою їх синхронізації).
6. Агент потрапляння заявок (військових вантажів) у зону бойових дій (ЗБД).
7. Агент накопичення ризиків при русі заявки (військового вантажу) у різномірній транспортній мережі. Ризики задаються, заздалегідь, експертами як для транспортних вузлів, так і для ділянок транспортних магістралей.
8. Агент формування збитків, пов'язаних з запізненням доставки військових вантажів. Величина збитку задається експертами та залежить від заданих строків доставки військових вантажів.
9. Агент управління ходом моделювання. Здійснює формування системного часу у відповідності для заданого масштабу, планує та реалізує список майбутніх подій з урахуванням причинно-наслідкових подій.
10. Агент результатів моделювання. До результатів відносяться: час доставки військового вантажу у зону бойових дій, величина запізнення у доставці військового вантажу, величина збитку, через запіз-

нення, у доставці військових вантажів, величина підсумкового ризику доставки військових вантажів.

На рис. 1 наведена структурна схема агентної моделі.

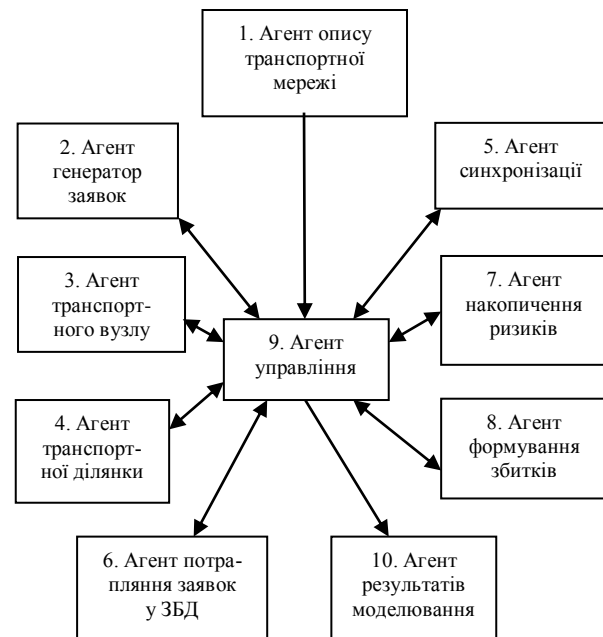


Рис. 1. Структурна схема агентної моделі

2. Алгоритм мінімізації часу доставки військових вантажів у різномірній транспортній мережі

У теперішній час відомі алгоритми мінімізації часу доставки вантажів (наприклад, алгоритм Дейкстри). Більшість з них носить академічний характер, тому не можуть бути використаними у реальних умовах, пов'язаних з військовими вантажами та бойовими діями. Необхідно відмітити наступні особливості у транспортній логістиці доставки військових вантажів у воєнний час:

- використання різномірної транспортної мережі з великою кількістю переходів (перевалок) з однієї транспортної магістралі на іншу;
- використання паралельних рухів військових вантажів з різних джерел постачання;
- виконання вимог синхронізації та консолідації військових вантажів;
- облік ризиків воєнного характеру, пов'язаних з переміщенням вантажів як за транспортним магістралям, так і за вузлами;
- виникаючі запізнення у доставці військових вантажів, які можуть призводити до збитків (втрата особового складу збройних сил, пошкодження та знищення військової техніки, зміна характеру бойових дій від наступальних до оборонних, тощо).

Тому, було розроблено новий алгоритм маршрутизації, враховуючий перелічені особливості доставки військових вантажів у воєнний час. Алгоритм реалізований у рамках розробленої агентної імітаційної моделі. Представимо послідовність дій алгоритму у вигляді наступних основних кроків:

1. Генеруються заявки (військові вантажі) різного типу, пов'язані з заданою партією озброєння та військової техніки. Генерація заявок здійснюється за допомогою агента генератора заявок з урахування заданого план-графіку постачання озброєння та військової техніки.

2. З транспортних вузлів (у томі числі з похідних) виходять копії (клони) заявок різного типу, які рухаються за всіма можливими транспортними ділянками магістралі, які пов'язані з даним транспортним вузлом.

3. При приході заявки у сусідній транспортний вузол, здійснюється перевірка того, що заявки не проходили через даний транспортний вузол. У випадку, якщо заявка (клон) займала цей транспортний вузол, то вона блокується, її рух припиняється через більше значення часу приходу у вже помічений транспортний вузол, який було пройдено іншою заявкою раніше (заявка є неперспективною для подальшого руху).

4. При приході заявки (клону) у даний транспортний вузол перевіряється умова синхронізації (консолідації). Якщо ця умова є в наявності, то виникає процес очікування заявки інших заявок. Прихід останньої заявки забезпечує формування заявки нового типу та подальшого її руху у різномірній транспортній мережі.

5. При досягненні заявками зони бойових дій (ЗБД), фіксується час їх приходу.

6. З фінішного транспортного вузлу (ЗБД) формується, у зворотному напрямі, маршрут (маршрути) руху заявок (військових вантажів) шляхом послідовного проходження за поміченими транспортними вузлами.

7. Отриманий маршрут є мінімальним за часом та використовується, у подальшому, для визначення запізнення надходження військових вантажів у зону бойових дій, з урахування заданих строків постачання.

8. При русі заявок (клонів), за ділянками магістралі та транспортними вузлами, здійснюється накопичення значень ризиків, яке у вигляді підсумкового значення ризику, формується після приходів військових вантажів у ЗБД.

9. У залежності від отриманих запізнень у надходженні військових вантажів у ЗБД, формується величина можливого збитку у зоні бойових дій за допомогою воєнних фахівців.

3. Алгоритм маршрутизації для мінімізації ризиків постачання військових вантажів

Довгі логістичні ланцюги постачання стають особливо вразливими у воєнний час. Зростають ризики, пов'язані з несвоєчасною доставкою військових вантажів у зону бойових дій. Тому, необхідно моделювати ризики та їх накопичення у довгих логістичних ланцюгах, з урахуванням виникаючих загроз та вразливостей.

Розроблено алгоритм маршрутизації, який дозволяє мінімізувати ризики постачання в умовах загроз та вразливостей. Основою для розробки є алгоритм для мінімізації часу постачання вантажів у різномірній транспортній мережі. Особливістю алгоритму на відміну від алгоритму, який наведено у п. 2 є зміна керуючої дії у моделюванні. В якості управління подіями використовується не системний час, а значення накопичуваного ризику при руху заявок (клонів) в графі G, що представляє різномірну транспортну мережу. Тому, список майбутніх подій, формується не за значенням часу, а за значенням накопичуваного ризику.

На початку списку подій завжди знаходиться подія з мінімальним значенням накопичуваного ризику. Впродовж руху заявок (клонів), транспортні вузли помічаються пройденими заявками (клонами). Не перспективні заявки (клони), з більшим значенням накопичуваного ризику, відкидаються. У випадку використання умови синхронізації (консолідації) заявок виконується очікування заявок (клонів), до надходження останньої, пов'язаної з конкретною партією військових вантажів.

У фінішній транспортній вузол (зона бойових дій) надходить заявка (клон) у вигляді партії військового вантажу з мінімальним значенням накопичуваного ризику. У зворотній фазі алгоритму (рух від ЗБД до похідних транспортних вузлів постачання) формується маршрут руху заявок і тим самим вирішується задача маршрутизації для мінімізації ризиків постачання військових вантажів в умовах загроз та вразливостей.

4. Метод аналізу можливого збитку, пов'язаного із запізненням постачання військової техніки у зону бойових дій

Успіх бойових дій у конкретній зоні воєнного конфлікту залежить, у першу чергу, від своєчасності логістичного постачання необхідних видів озброєння та військової техніки. Запізнення у постачанні окремих складових озброєння та військової техніки призводить до виникнення збитку (втрата особового

складу збройних сил, пошкодження та знищення військової техніки, зміна характеру бойових дій від наступальних до оборонних, тощо), величина якого залежить від важливості тих чи інших видів озброєння, вкрай необхідних для успішного виконання воєнних цілей операції у зоні бойових дій. Виникає задача дослідження запізнь окремих видів озброєння та військової техніки, які повинні надходити у зону бойових дій. Ці запізнення впливають на величину збитку при виконанні бойових задач. Для вирішення поставленої задачі необхідно проаналізувати можливі (альтернативні) варіанти появи запізнь для окремих видів озброєння та військової техніки. Далі необхідно оцінити вплив запізнення на величину збитку. Задача зводиться до перебору множини варіантів запізнення, пов'язаних з окремими видами озброєння та військової техніки. Наприклад, для трьох видів ($n=3$) озброєння, загальна кількість можливих варіантів запізнення буде $N = 2^n = 2^3 = 8$.

Згенерувати всі можливі варіанти можливо за допомогою двійкового лічильника, у вигляді:

1. 000
2. 001
3. 010
4. 011
5. 100
6. 101
7. 110
8. 111,

де перший варіант означає відсутність запізнь, тобто своєчасне надходження усіх трьох видів озброєння у зону бойових дій, що відповідає відсутності (або мінімальному значенню) збитку. Останній, восьмий, варіант означає наявність запізнь для всіх видів озброєння, а значить максимальне значення збитку у зоні бойових дій. Для оцінки збитку використовуються воєнні фахівці (експерти), які можуть оцінити значення збитків у деякій шкалі (наприклад, у десятибальній шкалі), де мінімальне значення збитку пов'язане з першим варіантом, а максимальне значення - пов'язане з останнім, восьмим варіантом.

Для оцінки впливу запізнь на величину збитку скористаємось повнофакторним експериментом (ПФЕ), де рядок плану буде представляти комбінацію можливих запізнь, для окремих видів озброєнь, а підсумковий стовбець (справа), експертні оцінки можливого збитку.

Розглянемо ілюстрований приклад дослідження впливу запізнь на величину збитку у зоні бойових дій. Нехай, для прикладу, що розглядається, для успішного виконання бойових задач, використовуються три види озброєнь:

1. Ракетні системи залпового вогню (РСЗВ) (змінна X_1).

2. Артилерійські системи (пушки, гаубиці, міномети) (змінна X_2).

3. Протитанкові системи (змінна X_3).

План віртуального експерименту з оцінками військових фахівців (експертів) представимо у вигляді ПФЕ (рис. 2).

№	X_1	X_2	X_3	Y
1	-1	-1	-1	0
2	-1	-1	+1	2
3	-1	+1	-1	3
4	-1	+1	+1	5
5	+1	-1	-1	5
6	+1	-1	+1	7
7	+1	+1	-1	8
8	+1	+1	+1	10

Рис. 2. Використання ПФЕ для оцінки збитку

Тут -1 – означає відсутність запізнення (нульове значення двійкового лічильника), а +1 – наявність запізнення (одичинне значення двійкового лічильника). У стовбці Y знаходяться, у бальному представленні, оцінки значень збитків. Далі за допомогою відомих формул розрахунку для ПФЕ визначається значення параметрів неповної квадратичної залежності:

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

де b_0 – відповідає центру експерименту;

b_1 – коефіцієнт, пов'язаний з впливом фактору X_1 ;

b_2 – коефіцієнт, пов'язаний з впливом фактору X_2 ;

b_3 – коефіцієнт, пов'язаний з впливом фактору X_3 ;

b_{12} – коефіцієнт для оцінки кореляції факторів X_1 та X_2 ;

b_{13} – коефіцієнт для оцінки кореляції факторів X_1 та X_3 ;

b_{23} – коефіцієнт для оцінки кореляції факторів X_2 та X_3 ;

b_{123} – коефіцієнт для оцінки кореляції факторів X_1 , X_2 та X_3 .

Нас цікавить лінійна частина цієї залежності, яка дозволяє оцінити вплив окремих видів озброєння на величину збитку (Y). Після виконаних розрахунків, отримаємо:

$$Y = 3,75 + 2,5X_1 + 1,5X_2 + X_3.$$

З отриманої залежності бачимо, що самий суттєвий вплив запізнень на величину збитку у зоні бойових дій, оказує несвоєчасне постачання РСЗВ. Менше значення, оказує запізнення у постачанні систем артилерійського озброєння. Найменший вплив на величину збитку у зоні бойових дій оказує несвоєчасне постачання протитанкових систем.

Якщо для оцінки збитку (пов'язаного з запізненням), при надходженні окремих видів озброєння та військової техніки у зону бойових дій, використовується не один експерт а група, то у цьому випадку здійснюється усереднення оцінок при формуванні значень збитку.

У випадку протиріччя оцінок експертів, для формування компромісних оцінок, можна використувати метод ELEKTRA. За допомогою цього методу, шляхом багатокрокової ітерації, досягаємо компромісних значень оцінок для групи експертів.

5. Метод пошуку компромісних рішень при формуванні маршрутів постачання озброєння та військової техніки у зону бойових дій

Аналіз задач постачання озброєння та військової техніки, у зону бойових дій, показав наявність протиріччя критеріїв, пов'язаних з часом доставки військових вантажів, ризиків та збитків. Тому, необхідно, шляхом багатоваріантного аналізу, знайти компромісне рішення, пов'язане з запізненням військових вантажів та збитками виникаючими у зоні бойових дій.

Нехай, з використанням думки військових фахівців, сформовано множину альтернативних маршрутів доставки озброєння та військової техніки у зону бойових дій. Для кожного k-го варіанта маршруту відома попередня оцінка можливих часових затримок t_{ik} для i-х транспортних вузлів логістичного ланцюгу постачання, t_{jk} – затримка на ділянках магістралі при руху військових вантажів.

Тоді сумарний час, пов'язаний з постачанням військових вантажів можна представити у вигляді:

$$T_k = \sum_{i=1}^{n_k} t_{ik} + \sum_{j=1}^{m_k} t_{jk},$$

тут n_k – кількість транспортних вузлів у k-му маршруті руху вантажа;

m_k – кількість ділянок транспортної магістралі у k-му варіанті маршруту.

Величина можливого запізнення при надходженні військових вантажів у зону бойових дій для k-го варіанту маршруту:

$$\Delta T_k = T_k - T_0,$$

де T_0 – плануємиий строк доставки військових вантажів до зони бойових дій.

Таким же чином, можливо оцінити ризики, які накопичуються при руху вантажів у зоні бойових дій. Для k-го маршруту:

$$R_k = \sum_{i=1}^{n_k} r_{ik} + \sum_{j=1}^{m_k} r_{jk}.$$

При цьому, необхідно $R_k \leq R_0$, де R_0 – допустиме значення ризику, пов'язане з постачанням військових вантажів у зону бойових дій.

Для пошуку компромісного маршруту доставки військового вантажу у зону бойових дій, скористаємося методом цілочисельного (булевого) програмування.

Введемо змінні x_k , при цьому $x_k=1$ відповідає використанню k-му маршруту доставки військового вантажу у зону бойових дій, $x_k=0$ – відповідає невикористанню k-му маршруту. При цьому $\sum_{k=1}^N x_k = 1$,

що відповідає вибору одного альтернативного маршруту для вирішення задачі маршрутизації, тут N – кількість можливих маршрутів руху військових вантажів, заданих експертами.

Тоді, з урахування змінних x_k , критерій запізнення військових вантажів, при надходженні у зону бойових дій, буде мати наступний вигляд:

$$\Delta T = \sum_{k=1}^N \left(\sum_{i=1}^{n_k} t_{ik} + \sum_{j=1}^{m_k} t_{jk} \right) x_k - T_0.$$

В свою чергу, величина накопичуваного ризику буде обчислена у вигляді:

$$R = \sum_{k=1}^N \left(\sum_{i=1}^{n_k} r_{ik} + \sum_{j=1}^{m_k} r_{jk} \right) x_k.$$

Для пошуку компромісного рішення введемо комплексний критерій:

$$\begin{aligned} Q &= \alpha_T \Delta T + \alpha_R R = \alpha_T \sum_{k=1}^N \Delta T_k x_k + \alpha_R \sum_{k=1}^N R_k x_k = \\ &= \frac{\alpha_T}{\Delta T_{\max}} \left[\sum_{k=1}^N \left(\sum_{i=1}^{n_k} t_{ik} + \sum_{j=1}^{m_k} t_{jk} \right) x_k - T_0 \right] + \\ &+ \frac{\alpha_R}{R_0} \left[\sum_{k=1}^N \left(\sum_{i=1}^{n_k} r_{ik} + \sum_{j=1}^{m_k} r_{jk} \right) x_k \right]. \end{aligned}$$

$$\text{Тут } \Delta T_k = \frac{\Delta T_k}{\Delta T_{\max}}, R_k = \frac{R_k}{R_0}, T_{\max} - \text{максима-}$$

льне значення затримки, яке було взяте після аналізу множини можливих маршрутів постачання військових маршрутів у зону бойових дій, де $\alpha_T + \alpha_R = 1$, α_T – значимість (вага критерію затримки), α_R – значимість (вага критерію ризиків постачання).

Необхідно знайти $\min Q$ з урахуванням

$$R \leq R_0, \sum_{k=1}^N X_k = 1.$$

Отримане рішення є компромісним, та враховує можливе запізнення та ризики при надходженні військових вантажів у зону бойових дій.

6. Приклад моделювання постачання військових вантажів у зону бойових дій

Розглянемо ілюстрований приклад постачання військових вантажів в зону бойових дій для транспортної мережі, яка наведена у вигляді графу G на рис. 3.

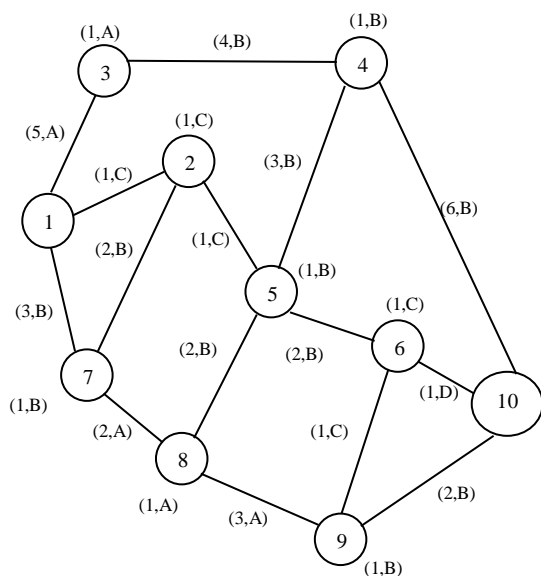


Рис. 3. Граф G постачання військових вантажів

В якості вершин графу використані транспортні вузли, а в якості ребер – ділянки транспортної мережі. Часові затримки на вузлах та ділянках транспортної магістралі представлено в годинах. Для зручності оцінювання ризиків та збитків, використано значення лінгвістичних змінних, які переводяться у подальшому у бальні оцінки. Для ризиків, маємо наступні значення лінгвістичних змінних:

- A – мінімальне значення ризику;
- B – задовільне значення ризику;
- C – допустиме значення ризику;

D – максимальний ризик.

У бальних оцінках: A=3, B=5, C=7, D=10.

Для оцінки збитку, який виникає через запізнення у постачанні військових вантажів у зону бойових дій, використовується наступні лінгвістичні змінні:

- K – мінімальний збиток;
- L – задовільне значення збитку;
- M – допустиме значення збитку;
- N – критичне значення збитку.

В дужках на рис. 3 представлено значення часу та ризику на ділянках магістралі та транспортних вузлах. Перша вершина графу G відповідає транспортному вузлу – джерело постачання військових вантажів. Остання, десята вершина графу G , відповідає надходженню військової техніки у зону бойових дій. Використовуючи розроблену агентну імітаційну модель (п. 1), алгоритм пошуку маршруту з мінімальним часом (п. 2) та алгоритм пошуку маршруту з мінімальним значенням ризику (п. 3), а також отримані оцінки від воєнних фахівців (експертів), побудовано табл. 1, з множиною можливих маршрутів постачання військової техніки у зону бойових дій.

Попередній аналіз результатів моделювання показав:

1. Варіанти маршрутів постачання військової техніки: 1, 8, 10, 13, 14, 16 усунені у подальшому дослідженні, через недопустимі (критичні) значення збитку, який виникає у зоні бойових дій.

2. Враховуючи підсумкове значення ризику (більше 50 балів), яке виникає та накопичується під час руху військових вантажів на ділянках транспортної магістралі та вузлах, варіанти маршрутів: 5, 6, 7, 9, 11, 15 відсунені від подальшого дослідження.

3. Третій варіант маршруту постачання військової техніки відповідає, мініальному часу запізнення, але при цьому є достатньо високе значення ризику $R=48$ балів.

4. Перший варіант маршруту постачання військової техніки у зону бойових дій відповідає мініальному значенню ризику $R=21$ балів, але при цьому має недопустиме значення збитку – N, час запізнення відповідає 100 %, тому він також був відсунутий від розгляду.

5. Варіанти маршрутів постачання військової техніки у зону бойових дій з проміжними значеннями запізнення, ризиків та збитків: 2, 4, 12, 17, 18 має сенс розглядати ці варіанти для вибору компромісного рішення.

Як підсумковий варіант маршруту постачання військової техніки у зону бойових дій, було обрано 17 варіант маршруту з запізненням – 63 %, мінімальним ризиком – 29 балів та допустимим значенням збитку – M.

Таблиця 1

Приклад дослідження постачання військової техніки у ЗБД

№ №	Маршрути	Час шляху	Час запізнення		Ризики		Збиток
			години	%	Лінгвістичні змінні	Бали	
1	1-3-4-10	16	8	100	2A,3B	21	N
2	1-2-5-4-10	14	6	75	4B,3C	41	M
3	1-2-5-6-10	8	0	0	2B,4C,D	48	K
4	1-2-5-8-9-10	13	5	63	2A,3B,3C	42	M
5	1-2-7-8-5-6-10	15	7	88	2A,5B,3C	52	M
6	1-2-5-6-9-10	11	3	38	4B,5C	55	L
7	1-2-7-8-9-6-10	15	7	88	3A,3B,3C,D	55	M
8	1-2-7-8-5-4-10	21	13	163	A,7B,2C	52	N
9	1-7-2-5-6-10	14	6	75	4B,3C,D	51	M
10	1-7-2-5-4-10	20	12	150	A,5B,2C	42	N
11	1-7-2-5-6-10	14	6	75	5B,3C,D	56	M
12	1-7-2-5-8-9-10	13	5	63	2A,4Bb,3C	47	M
13	1-7-2-5-8-9-10	20	12	150	3A,5B,3C,D	65	N
14	1-7-8-5-4-10	22	14	175	2A,7B	41	N
15	1-7-8-5-6-10	12	6	75	2A,6B,C,D	53	M
16	1-7-8-5-6-9-10	17	9	113	2A,7B,2C	55	N
17	1-7-8-9-10	13	5	63	3A,4B	29	M
18	1-7-8-9-6-10	14	6	75	3A,3B,2C,D	48	M

Висновки

Проведене дослідження пов'язане з моделюванням логістичних ланцюгів постачання військових вантажів (озброєння, військова техніка) у зону бойових дій.

У результаті попереднього аналізу, виявлені недоліки існуючих методів маршрутизації, які пов'язані, у основному, з мирним часом та не враховують запізнення та ризики, які виникають у довгих логістичних ланцюгах постачання військових вантажів, що призводить до виникнення збитків (втрата особового складу збройних сил, пошкодження та знищення військової техніки, зміна характеру бойових дій від наступальних до оборонних, тощо).

Для моделювання постачання озброєння та військової техніки, в умовах бойових дій, розроблена агентна імітаційна модель дослідження довгих логістичних ланцюгів постачання. Розроблено оригінальний алгоритм маршрутизації, який дозволяє, шляхом розмноження заявок (клони заявок), знайти оптимальний маршрут в різномірній транспортній мережі з мінімальним часом, з урахуванням ризиків в окремих елементах логістичного ланцюга та складних умов синхронізації (консолідація заявок). Для пошуку маршруту постачання з мінімальним значення ризику, побудований алгоритм, в якому, при

руху заявок у графі транспортної мережі, здійснюється накопичення ризику постачання.

Проведено аналіз можливого збитку через запізнення постачання, з урахуванням окремих видів озброєння та військової техніки, у зону бойових дій, з використання методу теорії експерименту, у вигляді повного факторного експерименту. Для пошуку компромісних рішень у задачі маршрутизації військових вантажів, з урахуванням можливого протиріччя критеріїв запізнення ризиків, а також збитків, використовується метод цілочисельного (булевого) програмування.

Наведено приклад моделювання постачання військових вантажів у зону бойових дій, з обґрунтуванням результатів моделювання.

Таким чином, можна стверджувати, що проведено дослідження, яке засноване на моделюванні транспортної логістики при постачанні військових вантажів у зону бойових дій, яке включає розробку агентної імітаційної моделі постачання, алгоритмів мінімізації часу запізнення постачання військових вантажів та ризиків постачання, а також пошуку компромісних рішень, при формуванні маршрутів руху у довгих логістичних ланцюгах постачання, повністю підтверджує виконання мети дослідження.

Використані математичні методи та методи моделювання: системний аналіз, агентне імітаційне

моделювання, теорія експерименту, метод експертного оцінювання, метод цілочисельної оптимізації, використання лінгвістичних змінних.

Запропонований підхід дозволяє, при плануванні постачання озброєння та військової техніки у зону бойових дій, сформуванню раціональних маршрутів транспортування військових вантажів з урахуванням мінімальних запізнь, збитків та ризиків, які виникають через довгі логістичні ланцюги постачання в різномірній транспортній мережі, з можливими перевалками вантажів.

Внесок авторів: системний аналіз, мінімізація часу та ризиків постачання – **О. Є. Федорович, М. І. Луханін;** оцінювання збитків через запізнення та ризиків постачання – **І. Б. Чепков;** аналіз маршрутів постачання військових вантажів – **О. С. Уруський, Ю. Л. Прончаков;** агентне імітаційне моделювання – **К. О. Рибка, Ю. О. Лещенко.** Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

Література

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. A Military Logistics Network Planning System [Text] / M. B. Rogers, B. M. McConnell, T. J. Hodgson et al. // Military Operations Research. – 2018. – Vol. 23, No. 4. – P. 5-24. DOI: 10.5711/1082598323405.
7. 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.
8. Cano, J. A. ICT Validation in Logistics Processes: Improvement of Distribution Processes in a Goods Sector Company [Text] / J. A. Cano, R. A. Gómez, P. Cortés // Informatics. – 2021. – Vol. 8, No. 75. DOI: 10.3390/informatics8040075.
9. 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.
10. 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.
11. 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 // Obronność–Zeszyty Naukowe Wydziału Zarządzania i Dowodzenia Akademii Sztuki Wojennej. – 2018. – No. 3 (27). – P. 35-44.
12. Synchronized Humanitarian, Military and Commercial Logistics: An Evolving Synergistic Partnership [Text] / P. Yuste, J. Campbell, D. Canyon et al. // Safety. – 2019. – Vol. 5, No. 4. – Article No. 67. DOI: 10.3390/safety5040067.
13. Dachkovskiy, V. Methods of evaluation of efficiency of logistic operations [Text] / V. Dachkovskiy // Journal of Scientific Papers «Social Development and Security». – 2021. – Vol. 11, No. 1. – P. 179-196. DOI: 10.33445/sds.2021.11.1.17.
14. 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.
15. Universal method for solving optimization problems under the conditions of uncertainty in the initial data [Text] / L. Raskin, O. Sira, L. Sukhomlyn, Y. Parfeniuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 1, No. 4(109). – P. 46-53. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225515.

References

1. Stepaniuk, M. Y., Sinityn, I. P., Kotelia, O. V. Problema stvorenniya informatsiyanoi systemy lohistyky v zbroynnykh sylakh Ukrainy, 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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, no. 2(19), pp. 188-196.
6. Rogers, M. B., McConnell, B. M., Hodgson, T. J. et al. A Military Logistics Network Planning System. *Military Operations Research*, 2018, vol. 23, no. 4, pp. 5-24. DOI: 10.5711/1082598323405.
7. Fedorovich, O., Pronchakov, Y. Metod formuvannya lohistychnykh transportnykh vzayemodiy dlya novoho portfelyu zamovlen' rozpodilenoho 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.
8. Cano, J. A., Gómez, R. A., Cortés, P. ICT Validation in Logistics Processes: Improvement of Distribution Processes in a Goods Sector Company. *Informatics*, 2021, vol. 8, no. 75. DOI: 10.3390/informatics8040075.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Yuste, P., Campbell, J., Canyon, D. et al. Synchronized Humanitarian, Military and Commercial Logistics: An Evolving Synergistic Partnership. *Safety*, 2019, vol. 5, no. 4, article no. 67. DOI: 10.3390/safety5040067.
13. Dachkovskiy, V. Methods of evaluation of efficiency of logistic operations. *Journal of Scientific Papers «Social Development and Security»*, 2021, vol. 11, no. 1, pp. 179-196. DOI: 10.33445/sds.2021.11.1.17.
14. 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.
15. Raskin, L., Sira, O., Sukhomlyn, L., Parfeniuk, Y. Universal method for solving optimization problems under the conditions of uncertainty in the initial data. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, vol. 1, no. 4(109), pp. 46-53. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225515.

Надійшла до редакції 11.03.2022, розглянута на редколегії 15.04.2022

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ ЛОГИСТИКИ ВОЕННЫХ ГРУЗОВ С УЧЕТОМ УЩЕРБА, ВОЗНИКАЮЩЕГО В ЗОНЕ БОЕВЫХ ДЕЙСТВИЙ ИЗ-ЗА ЗАПАЗДЫВАНИЙ В СНАБЖЕНИИ

О. Е. Федорович, О. С. Урусский, И. Б. Чепков, М. И. Луханин, Ю. Л. Прончак, К. О. Рыбка, Ю. А. Леценко

Формируется и решается задача многокритериального характера, связанная с моделированием транспортной логистики доставки военных грузов в зону боевых действий в условиях возникающих запаздываний и рисков. Актуальность исследования связана с анализом возможного ущерба, возникающего в зоне боевых действий (утрата личного состава вооруженных сил, повреждение и уничтожение военной

техники, изменение характера боевых действий от наступательных к оборонительным и т.п.) из-за запаздываний поставок вооружения и военной техники. Целью исследования является моделирование логистики перевозок в разнородной транспортной сети для обеспечения своевременной доставки военных грузов в условиях возможных запаздываний и рисков, влияющих на величину ущерба в зоне боевых действий. Учитывая сложную динамику доставки военных грузов, связанных с разнородностью и перевалками в транспортной сети, для исследования поставок создана оригинальная агентная имитационная модель, позволяющая оценить запаздывание, риски и ущербы. Представлен новый алгоритм для минимизации времени доставки военных грузов, основанный на распространении клонов заявок в графе, который представляет разнородную транспортную сеть. Представлен алгоритм минимизации рисков поставки в военное время, учитывающий длинные логистические цепи транспортировки военных грузов в зону боевых действий. Проводится исследование ущерба, связанного с несвоевременным поступлением различных видов военной техники и вооружения в зону боевых действий, которое основано на использовании полного факторного эксперимента и оценках военных специалистов в области военной логистики. Учитывая противоречивый характер критериев запаздываний, рисков и ущербов, формируется и решается многокритериальная задача оптимизации и поиска компромиссов с помощью целочисленного (булевого) программирования. Эффективность предлагаемого подхода демонстрируется на примере моделирования поставок военных грузов в зону боевых действий. Проанализированы альтернативные маршруты поставки, возникающие риски и ущербы из-за запаздываний поставки. Обосновывается выбор компромиссного варианта маршрута доставки военного груза в зону боевых действий. Научная новизна проведенного исследования связана с разработкой методов и моделей, которые основаны на агентном имитационном моделировании, теории экспериментов и целочисленной оптимизации, позволяющей оценить запаздывание и ущербы при поставках военных грузов в зону боевых действий в длинных логистических цепях разнородной транспортной сети. Результаты исследования целесообразно использовать для формирования рациональных маршрутов поставок военных грузов в военное время.

Ключевые слова: логистика поставки военных грузов; разнородная транспортная сеть; запаздывание и риски в снабжении; ущерб в зоне боевых действий; агентное имитационное моделирование.

SIMULATION OF TRANSPORT LOGISTICS OF MILITARY CARGO CONSIDERING THE LOSSES OCCURRING IN THE WAR ZONE DUE TO DELAYS IN DELIVERY

*Oleg Fedorovich, Oleg Uruskiy, Igor Chepkov, Mikhail Lukhanin, Yurii Pronchakov,
Kseniia Rybka, Yuliia Leshchenko*

The multi-criteria task related to the simulation of transport logistics for the delivery of military cargo to the war zone in the conditions of delays and risks is stated and solved. The relevance of the study is related to the analysis of possible losses in the war zone (loss of armed forces, damage and destruction of military equipment, change in hostilities from offensive to defensive, etc.) due to the delayed supply of weapons and military equipment. The study simulates the logistics of transportation in the diverse transport networks to ensure timely delivery of military cargo in the conditions of possible delays and risks that affect the amount of damage in the war zone. Given the complex dynamics of military cargo delivery related to heterogeneity and transshipment in the transport network, the original agent simulation model has been created. This model makes it possible to study the supply process and allows to assess delays, risks and losses. A new algorithm to minimize the delivery time of military cargo, based on the distribution of request clones in a graph representing a heterogeneous transport network is presented. An algorithm to minimize supply risks in wartime that considers long logistics chains for transporting military cargo to the war zone is presented. We study the losses caused by the untimely arrival of various types of military equipment and weapons in the war zone, based on full factorial experiments and the assessments of military experts in the field of military logistics are conducted. Given the contradictions of the criteria of delays, risks and losses, the multi-criteria problem of compromise search optimization based on integer (Boolean) programming is stated and solved. The efficiency of the proposed approach is demonstrated by simulating military cargo supply to the war zone. Alternative supply routes, risks and losses due to delays in supply are analyzed. The choice of the compromise alternative of military cargo delivery route to the war zone is substantiated. The scientific novelty of the study is related to the development of methods and models based on agent simulation, experimental theory and integer optimization, that makes it possible to estimate the delays and losses in the supply of military cargo to the war zone in long logistics chains of

diverse transport network. The results of the study can be used to build the optimal routes to supply military cargo in wartime.

Keywords: logistics of military cargo supply; heterogeneous transport network; delays and delivery risks; losses in the war zone; agent simulation.

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.

Уруський Олег Семенович – д-р техн. наук, старш. наук. співроб., «Прогрестех-Україна», Київ, Україна.

Чепков Ігор Борисович – д-р техн. наук, проф., начальник, Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ, Україна.

Луханін Михайло Іванович – д-р техн. наук, проф., голов. наук. співроб., Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, Київ, Україна.

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

Рибка Ксенія Олегівна – 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 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.

Oleg Uruskiy – Doctor of Technical Science, Senior Researcher, "Progrestech-Ukraine", Kiev, Ukraine, e-mail: Poexp2005@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2374-5318.

Igor Chepkov – Doctor of Technical Science, Professor, Chief of Central Scientific Research Institute of Armaments and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: cndi_ovt@mil.gov.ua, ORCID: 0000-0002-4294-4152.

Mikhail Lukhanin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Scientific Employee, Central Scientific Research Institute of Armaments and Military Equipment of Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine, e-mail: luhaninm51@ukr.net, ORCID: 0000-0002-1919-8526.

Yurii Pronchakov – Candidate of Technical Sciences PhD, 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.