

Ю. Полупан, О. Малєєва

МОДЕЛІ ЛОГІСТИКИ ЗБУТУ ТЕХНІЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ ОБОРОННОГО ПРИЗНАЧЕННЯ В УМОВАХ РИЗИКІВ ВОЄННОГО ЧАСУ

Предметом дослідження статті є процеси організації та оптимізації логістики збуту технічної продукції оборонного призначення в умовах воєнного часу, зокрема побудова мережевої структури логістики з огляду на реверсивні потоки, ризики й обмежені ресурси. **Мета роботи** – підвищення ефективності логістики збуту технічної продукції оборонного призначення за умов воєнного часу способом побудови адаптивної структури логістичних потоків і розроблення математичної моделі оптимізації відповідно до ризиків і ресурсних обмежень. У статті необхідно розв'язати такі **завдання**: аналіз особливостей логістики збуту технічної оборонної продукції в умовах бойових дій; розроблення структурної моделі логістичних потоків з огляду на прямі й зворотні зв'язки та повторне використання компонентів; побудова математичної моделі оптимізації логістичних процесів, зважаючи на часові витрати, ризики затримок та ресурсні обмеження; обґрунтування застосування сценарного аналізу та адаптивного планування для підвищення стійкості та безперервності постачання в умовах невизначеності. Застосовано такі **методи**: системний підхід, структурна декомпозиція логістичних процесів, ризик-орієнтований підхід, математичне моделювання з обмеженнями, сценарний аналіз і адаптивне планування. **Досягнуті результати**. Побудовано структурну модель логістичних потоків у забезпеченні ЗСУ, яка бере до уваги прямі й зворотні потоки та повторне використання компонентів; розроблено математичну модель оптимізації логістики збуту з цільовою функцією мінімізації часу та обмеженнями на обсяг постачання, сукупний ризик і кількість маршрутів. Показано, що взяття до уваги ризиків значно впливає на вибір оптимальних маршрутів і стратегій. Обґрунтовано доцільність застосування сценарного аналізу й адаптивного планування для підтримки безперервності постачання в умовах бойових дій. **Висновки**. Запропоновані структурна та математична моделі дають змогу зменшити час логістичного циклу, підвищити стійкість логістичної системи до ризиків і забезпечити оперативне реагування на зміни обстановки. Упровадження реверсивної логістики та повторного використання компонентів сприяє зниженню витрат і дефіциту ресурсів. Сценарний аналіз і адаптивне планування є ефективними інструментами управління логістикою збуту технічної продукції в умовах невизначеності та воєнних ризиків.

Ключові слова: логістика збуту; технічна продукція; забезпечення ЗСУ; структурна модель; математична модель; оптимізація; управління ризиками.

Вступ

У контексті забезпечення ефективного функціонування підприємства, що спеціалізується на виробництві технічної продукції оборонного призначення, важливе місце посідає логістика збуту. Збутова логістика охоплює всі процеси, пов'язані з переміщенням готової продукції – від місця виробництва до кінцевого споживача (наприклад, військових частин). Її основною метою є забезпечення вчасної, надійної та безпечної доставки продукції, зокрема модернізованих зразків технічного обладнання, таких як безпілотні авіаційні комплекси [1].

В умовах бойових дій і високої невизначеності особливо актуальним є формування адаптивних моделей логістики збуту, що беруть до уваги ризики руйнування інфраструктури, блокування маршрутів, обстріли й кібератаки. Особливість технічної оборонної продукції зумовлює необхідність дотримання

спеціальних умов зберігання, транспортування та обліку, що додатково ускладнює логістичні процеси.

Для розв'язання окреслених питань необхідно розробити математичні моделі та цифрові рішення, що зважають як на прямі, так і зворотні потоки, зокрема ремонт, утилізацію та повторне використання компонентів.

Тому актуальним є завдання створення комплексної математичної моделі логістики збуту технічної продукції оборонного призначення, яка дасть змогу мінімізувати загальний час виконання логістичного циклу, знизити ризики затримок і водночас зберегти належний рівень безпеки й функціональності постачання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз публікацій з окресленої теми свідчить про значне зацікавлення проблематикою реверсивної

логістики та управління ризиками як у науковому, так і в професійному середовищі.

Сучасні дослідження активно вивчають реверсивну логістику та її роль у сталому розвитку. У роботі [2] систематизовано види зворотних потоків, фактори, бар'єри та витрати, що впливають на управлінські рішення в цій сфері. У статті [3] проаналізовано співпрацю цивільного й військового секторів у реверсивній логістиці для підтримки циркулярної економіки ЄС, запропоновано модель інтеграції сталого ланцюга постачання. У праці [4] подано інформаційну систему для управління військовим ланцюгом постачання на основі аналізу інцидентів, що підвищує стійкість операцій.

Автор статті [5] досліджує застосування військових логістичних дронів для швидкого доправлення ресурсів у складних умовах, наголошує на їх автономності та гнучкості. У роботі [6] проаналізовано методи оптимізації військової логістики в Україні, зокрема цифрові технології та безпілотники. У дослідженні [7] запропоновано математичні моделі та геоінформаційні системи для оптимізації логістичних маршрутів харчових підприємств під час воєнного стану.

Статтю [8] присвячено застосуванню алгоритму A* для оптимізації військових маршрутів із використанням штучного інтелекту. У роботі [9] проаналізовано стратегії управління логістичними ланцюгами в умовах конфлікту для підвищення стійкості бізнесу. Автори статті [10] визначили економічні пріоритети воєнного часу, зокрема йдеться про розвиток високоточної зброї та співпрацю з Польщею.

У студіях [11, 12] запропоновано алгоритми й системи для підвищення ефективності матеріально-технічного забезпечення військ, автоматизації управління потоками та прогнозування потреб. У статті [13] подано агентну модель логістики постачання озброєння з огляду на ризики, що сприяє військовому паритету.

Дослідження [14] присвячено реверсивній логістиці перероблення електронних відходів у воєнних умовах для зниження витрат і дефіциту сировини. Автори роботи [15] запропонували методи прогнозування й оптимізації реверсивної логістики із застосуванням логістичної регресії та дерев рішень для підтримки циркулярної економіки.

У статті [16] проаналізовано загрози реверсивної логістики під час перероблення відпрацьованих автомобілів, а також упроваджено нечіткий аналіз для їх мінімізації. У праці [17] доведено, що сучасна

логістика орієнтована на сервіс, стійкі відношення та створення цінності, а не на простий обмін товарами. Роботу [18] присвячено ключовим вузлам мереж зворотної логістики з ремануфактурингом, наголошено на недостатності досліджень для медичних і меблевих товарів, а також на ролі нових технологій.

Автори статті [19] запропонували концепцію інтеграції прямої та зворотної логістики в будівництві для циркулярної економіки, зосереджуючи увагу на подоланні бар'єрів у замкненні матеріальних циклів.

З огляду сучасних студій можна зробити висновок про актуальність дослідження інтеграції реверсивної логістики та управління ризиками в умовах воєнного часу, зокрема для виробництва й збуту технічної оборонної продукції. Недоліками проаналізованих підходів є вузька спеціалізація моделей (переважно на окремих етапах або видах продукції), відсутність комплексної уваги до зворотних потоків, ризиків і дефіциту ресурсів в єдиній системі, а також недостатня орієнтація на практичні інструменти сценарного планування й адаптації логістичних рішень у реальному часі. Водночас наявні роботи створюють основу для подальших досліджень, оскільки демонструють значення цифрових технологій, штучного інтелекту й агентного моделювання для підвищення стійкості логістичних систем, особливо в умовах конфлікту.

Мета й завдання роботи

Метою дослідження є підвищення ефективності логістики збуту технічної продукції оборонного призначення за умов воєнного часу способом побудови адаптивної структури логістичних потоків; розроблення математичної моделі оптимізації з огляду на ризики й ресурсні обмеження.

У статті передбачено виконання таких завдань:

- 1) аналіз особливостей логістики збуту технічної оборонної продукції в умовах бойових дій;
 - 2) розроблення структурної моделі логістичних потоків, зважаючи на прямі та зворотні зв'язки й повторне використання компонентів;
 - 3) побудова математичної моделі оптимізації логістичних процесів відповідно до часових витрат, ризиків затримок і ресурсних обмежень;
 - 4) обґрунтування впровадження сценарного аналізу й адаптивного планування для підвищення стійкості та безперервності постачання в умовах невизначеності.
-

Матеріали й методи

У дослідженні впроваджено комплексний підхід, що поєднує аналіз теоретичних основ логістики збуту технічної оборонної продукції в умовах бойових дій, а також відомості про функціонування відповідних логістичних систем. Основними методами стали системний аналіз логістичних потоків [20], розроблення структурної моделі взаємодії виробничих підприємств, складів, ремонтних і утилізаційних пунктів з огляду на прямі та зворотні зв'язки [21].

Для оптимізації логістичних процесів застосовано математичне моделювання, зважаючи на часові витрати, ризики затримок і ресурсні обмеження. Також використано сценарний аналіз і адаптивне планування [22], що дають змогу забезпечити безперервність і стійкість постачання в умовах високої невизначеності та загроз бойових дій.

Розглянемо особливості побудови й функціонування системи логістики збуту технічної продукції оборонного призначення в сучасних умовах. Збутова логістика такої продукції розрізняється складною структурою, оскільки поєднує прямі й зворотні потоки, потребує високого рівня цифровізації та гнучкості для швидкого реагування на зміну обстановки. Вона має брати до уваги високі вимоги до зберігання, транспортування та обліку, що випливають з особливостей самої продукції: складності конструкції, чутливості до зовнішніх впливів, потреби в гарантійному обслуговуванні та високої вартості компонентів.

Крім того, система має бути стійкою до ризиків, зокрема руйнування транспортної інфраструктури, загроз обстрілів або кібератак, нестачі ресурсів і зміни безпекової ситуації [23]. Для цього передбачаються децентралізовані логістичні пункти, альтернативні маршрути доправлення та гнучке управління запасами, а також упровадження сучасних інформаційних систем, що допомагають контролювати рух продукції в реальному часі.

Ще однією ключовою особливістю є наявність розвиненої реверсивної логістики, що забезпечує повернення техніки з військових частин для ремонту чи утилізації та повторне використання придатних компонентів. Це дає змогу зменшити загальний обсяг витрат і прискорити логістичний цикл, що є критично важливим в умовах інтенсивної експлуатації техніки. Розглянемо детальніше основні етапи функціонування такої логістичної системи.

Першим етапом процесу є організація складування, яке може бути як централізованим на основному складі, так і децентралізованим – у логістичних пунктах ближче до споживача. Це підвищує оперативність доставки, скорочує час реагування на потреби замовника й знижує ризики транспортування в зоні бойових дій. Для ефективного зберігання необхідно дотримуватися відповідних умов (температура, волога, пил), забезпечити фізичну та інформаційну безпеку, охоронну інфраструктуру та під'єднання до логістичних ІТ-систем. Продукція має бути правильно маркована, упакована та збережена відповідно до технічних регламентів. Упровадження WMS-систем дає змогу вести точний облік, контролювати залишки та оптимізувати маршрути відвантаження.

Наступний етап – оброблення замовлень: отримання заявок, перевірка наявності продукції, формування документів, перевірка комплектності та технічного стану. Цифрове оброблення охоплює інтеграцію із системами електронного документообігу та логістичного контролю. Після цього виконується пакування з огляду на характеристики техніки та підготовка до транспортування [24].

Ключовим етапом є транспортування відповідно до зони доставки, інфраструктури та безпекової ситуації. Найчастіше використовується автомобільний транспорт, але для об'ємних або віддалених вантажів – залізничний чи авіаційний. Необхідно передбачати альтернативні маршрути. Доправлення здійснюється безпосередньо до військових частин або через логістичні хаби. За потреби залучають сторонніх логістичних операторів за умови належного контролю [25].

Після прибуття організовується приймання продукції: перевірка цілісності, відповідності технічним вимогам і підписання акта. За потреби відбувається тестування на місці. Завершальний етап – зворотний зв'язок: збирання відгуків, виявлення недоліків, оновлення інформації в ІТ-системах для оптимізації наступних циклів.

Реверсивна логістика охоплює повернення техніки: БпЛА – на ремонт, пошкоджені апарати – на утилізацію, придатні компоненти – на повторне використання. В умовах війни цей процес набуває критичного значення через високу частоту зносу техніки. Повернення передбачає реєстрацію, транспортування, діагностику, ремонт або заміну компонентів і повторне впровадження в експлуатацію.

Швидкість і ефективність ремонту напряму впливають на бойову спроможність.

Утилізація здійснюється щодо техніки, яка не підлягає ремонту. Вона передбачає транспортування до спеціалізованих пунктів, демонтаж і знищення згідно з екологічними стандартами. Компоненти, що підлягають повторному використанню, обліковують та зберігають.

Зворотна логістика у воєнний час стикається з труднощами: небезпека маршрутів, руйнування інфраструктури, нестача ресурсів і недостатня координація між учасниками. Це призводить до затримок та ускладнень ремонту й утилізації техніки.

Результати дослідження

1. Структурна модель логістичних потоків

Загальна схема логістики збуту продукції оборонного призначення містить такі типи об'єктів (пунктів): виробничі підприємства, склади (підприємства, оптові, волонтерські), пункти ремонту (підприємства, волонтерські, 3D-друку), пункти утилізації. Між вказаними об'єктами мають реалізовуватися як прямі зв'язки, так і зворотні (до пунктів ремонту). Структурна модель логістичних потоків у забезпеченні ЗСУ зображена на рис. 1.

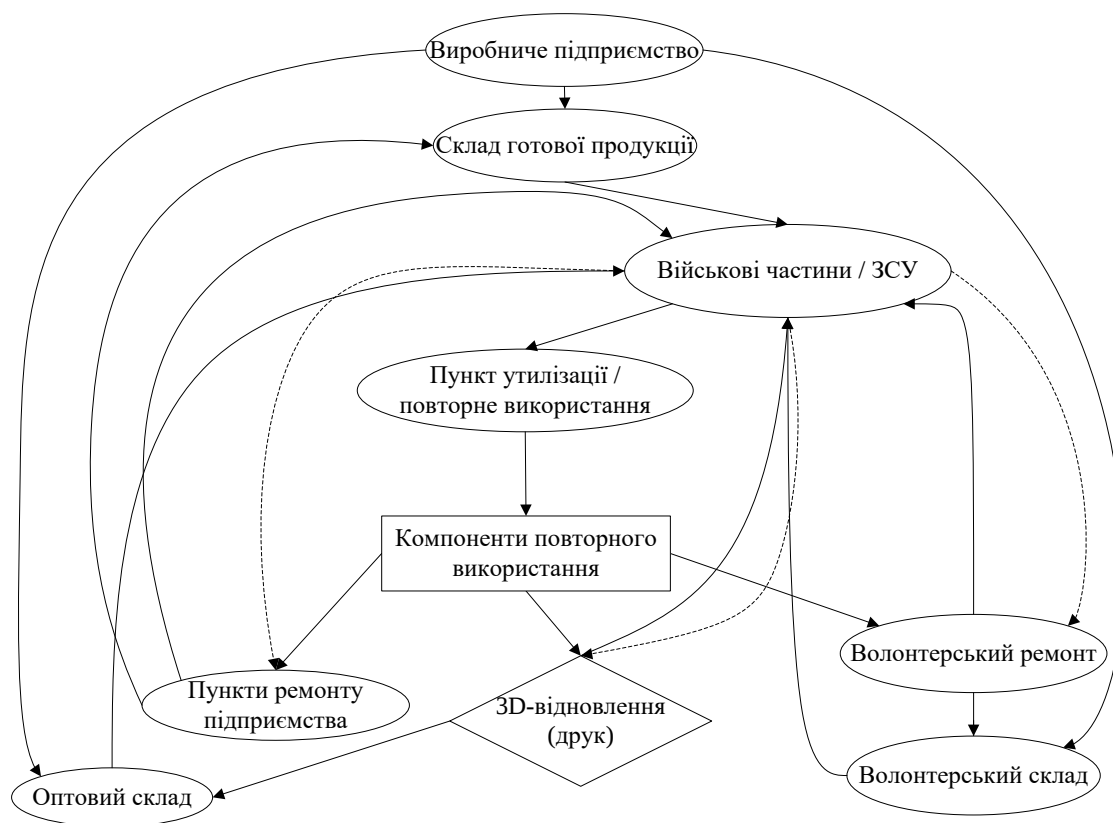


Рис. 1. Структурна модель логістичних потоків у забезпеченні ЗСУ технічною продукцією

Центральне місце в ланцюгу належить виробничому підприємству, що постачає готову продукцію до складів різного типу: складу готової продукції, оптового й волонтерського складів. Зі складів продукція надходить до військових частин, де використовується за призначенням. У процесі експлуатації техніка може частково втратити функціональність або повністю вийти з ладу. У такому разі вона повертається до ремонтних пунктів: виробничих, волонтерських або

3D-відновлення. Після відновлення техніка може бути відправлена як безпосередньо до військових частин, так і на склади для подальшого розподілу.

У разі неможливості відновлення техніка направляється до пунктів утилізації, де її розбирають. Частина непридатних компонентів утилізується, а інша частина, що зберегла функціональність, може бути використана повторно. Водночас система передбачає застосування компонентів, які були вироблені раніше, не потребують нового проектування

та можуть бути застосовані в поточному виробництві або ремонті – так звані компоненти повторного використання. Вони надходять до ремонтних пунктів або до 3D-виробництва, а також можуть інтегруватися у виробничий процес, що забезпечує економію ресурсів і прискорення логістичних операцій.

Особливу роль у схемі відіграють зворотні логістичні зв'язки, позначені пунктирними лініями. Вони відтворюють переміщення техніки з військових частин до ремонтних пунктів або пунктів утилізації, а також циркуляцію компонентів повторного використання між утилізацією, ремонтними точками та виробництвом. Така гнучка структура дає змогу мінімізувати втрати, скоротити час обігу техніки й оперативно реагувати на потреби війська.

В умовах бойових дій ефективність логістичних процесів визначається їх адаптивністю та цифровізацією: відстеженням вантажів у реальному часі, автоматизованим управлінням, обміном інформацією та прогнозуванням потреб. Використання дронів для доправлення техніки до військових частин знижує ризики для персоналу й підвищує мобільність логістичних операцій.

У цьому контексті все більшої актуальності набуває питання скорочення часу логістичного обігу. У сучасних умовах ведення бойових дій завдання оптимізації логістичних процесів у часі стає критично важливою. Основною метою є мінімізація загального часу виконання логістичного циклу – від складування до приймання та реверсивної логістики – за умови забезпечення надійності, безпеки й відповідності технічним і організаційним вимогам.

Особливу увагу в цьому разі необхідно приділити етапу транспортування, адже саме він є найбільш вразливим до впливу зовнішніх ризиків, таких як затримки на маршрутах через руйнування інфраструктури, блокування, зміну безпекової ситуації, а також втрат часу, пов'язаних із переміщенням небезпечними територіями. Так, наприклад, перевезення техніки прифронтовими районами може потребувати попереднього погодження маршрутів, супроводу або доправлення малими партіями, що суттєво впливає на загальний час.

Додатковим чинником, що ускладнює виконання логістичних завдань, є інформаційний складник: затримки в її обробленні, збої в ІТ-системах, відсутність вчасного оновлення відомостей про запаси або замовлення, а також слабка координація між логістичними ланками можуть

призводити до суттєвого збільшення загального часу виконання операцій. У цьому контексті важливою є цифровізація логістичних процесів: застосування WMS-систем, інтеграція з електронним документообігом, автоматизоване відстеження вантажів у реальному часі, що дає змогу зменшити ризики затримок і підвищити адаптивність системи. Наприклад, упровадження RFID-міток для ідентифікації техніки на кожному етапі дає змогу зменшити кількість помилок і покращити прозорість постачання.

2. Математична модель оптимізації часу доправлення в логістичному ланцюзі збуту в умовах ризиків

Оптимізаційна задача передбачає розгляд усіх етапів логістичного ланцюга як послідовних компонентів із відповідними часовими витратами та ризиками затримки. Для математичного моделювання запропоновано використовувати таку формулу обчислення загального часу логістичного процесу з огляду на загрози:

$$T_{total} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij} (1 + r_{ij}) x_{ij},$$

де T_{total} – загальний час логістичного процесу;

t_{ij} – номінальний час транспортування або оброблення вантажу між вузлами i та j ;

r_{ij} – коефіцієнт ризику затримки на ділянці $i - j$;

n – загальна кількість логістичних вузлів;

$x_{ij} \in \{0, 1\}$ – змінна вибору маршруту.

Ця функція відтворює загальний час проходження логістичного ланцюга, зважаючи на ризики, і є цільовою функцією оптимізаційної задачі, яка мінімізується. Проте за відсутності обмежень задача має тривіальний розв'язок, що не відтворює реальні умови збуту, оскільки формально її мінімум може бути досягнутий за нульового значення змінних x_{ij} , що не відповідає реальним умовам логістики. Тому математична модель доповнюється такими обмеженнями.

1. Обмеження на мінімальний обсяг постачання. Це гарантує, що система логістичних маршрутів задовольнить щонайменше мінімально необхідну потребу в доправленні продукції оборонного призначення. У контексті забезпечення військових частин це може бути визначене значенням (Q_{min}),

що встановлюється залежно від потреб технічного або оборонного характеру:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n q_{ij} x_{ij} \geq Q_{\min},$$

де q_{ij} – імовірний обсяг вантажу, який може бути перевезено за маршрутом $i - j$;

$x_{ij} \in \{0, 1\}$ – змінна вибору маршруту;

$Q_{\min}$ – мінімальний необхідний обсяг доставки.

Це обмеження виконує роль гарантії функціональної спроможності логістичної мережі. Воно запобігає вибору лише "найбільш швидких" або "найменш ризикованих" маршрутів, які, однак, не забезпечують необхідного обсягу постачання. Отже, модель змушена долучити маршрути, що забезпечують потрібну пропускну здатність.

2. Обмеження на сукупний ризик. Оскільки в процесі доправлення продукції оборонного призначення до військових частин маршрути можуть суттєво різнитися за рівнем безпеки, важливо обмежити допустимий рівень ризику для всієї логістичної системи. Надмірне накопичення маршрутів із високими ризиками може призвести до зриву постачання або втрати вантажів. Для обмеження загроз обираються маршрути, що задовольняють умову:

$$\max_i (1 - \prod_{j=1}^n r_{ij} x_{ij}) \leq R_{\max},$$

де r_{ij} – імовірність ризикових подій на маршруті $i - j$ (наприклад, можливого обстрілу, блокування, пошкодження);

$x_{ij} \in \{0, 1\}$ – змінна вибору маршруту;

$R_{\max}$ – гранично допустиме значення сукупного ризику.

Це обмеження діє як фільтр, що не дає змогу долучити в логістичну систему надмірно небезпечні маршрути навіть у разі їх високої швидкості або вантажомісткості. Отже, воно зберігає баланс між ефективністю та безпекою.

3. Обмеження на кількість задіяних маршрутів. Це додаткове обмеження є корисним у разі, коли існують обмеження на кількість одночасно активних маршрутів через нестачу ресурсів: транспорту, персоналу, пального або організаційної спроможності.

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq M,$$

де $x_{ij} \in \{0, 1\}$ – змінна вибору маршруту;

M – максимальна кількість маршрутів, що може бути активована одночасно.

Це обмеження забезпечує реалістичність моделі у разі, коли ресурси на транспортні операції обмежені, наприклад, через кількість доступних вантажівок, залізничних платформ чи через потребу уникати надмірного розпорошення зусиль.

З практичного погляду воно може бути особливо корисним у застосуванні адаптивного планування, коли доводиться розглядати кілька сценаріїв із різними значеннями M залежно від обстановки на момент прийняття рішень.

3. Застосування сценарного аналізу й адаптивного планування в умовах невизначеності

Запропонована математична модель дає змогу формалізувати задачу вибору логістичних маршрутів з огляду на ключові обмеження на обсяг постачання, рівень ризику та доступні ресурси. Однак у реальних умовах бойових дій ефективність логістичних рішень залежить не лише від початкової оптимізації, а й від здатності системи адаптуватися до змін середовища в режимі реального часу. Постійні загрози руйнування маршрутів, блокування або зміни безпекової ситуації вимагають динамічного підходу до управління логістикою, що передбачає сценарний аналіз і адаптивне планування.

Перевагою запропонованої моделі є можливість оцінювання впливу загроз на загальний час реалізації логістичного процесу. Якщо деякі етапи мають підвищені ризики (наприклад, транспортування через зону бойових дій або оброблення замовлень без цифрової автоматизації), їх внесок у загальний час суттєво зростає. У такому разі доцільно аналізувати альтернативні маршрути або впроваджувати додаткові ІТ-рішення, щоб зменшити коефіцієнти r_i на критичних ділянках.

Оптимізаційна задача зводиться до мінімізації T_{total} способом вибору таких маршрутів, технологій оброблення, способів транспортування та стратегій організації зберігання, що знижують як базовий час t_{ij} , так і ризики затримок r_{ij} .

Отже, оптимізація логістичних процесів у часі в умовах бойових дій має комплексний характер і потребує уваги як до матеріально-технічних, так і інформаційних параметрів. Вона має розв'язуватися

в межах адаптивної, динамічної моделі управління, здатної реагувати на зміни обстановки за допомогою цифрових інструментів, прогнозування та мережевої координації між усіма учасниками логістичного ланцюга.

Зважаючи на високу динамічність бойових дій та численні ризики, просте планування логістичних процесів заздалегідь часто є недостатнім. Для ефективного управління часом логістичного циклу необхідно зважати на можливі зміни обстановки та невизначеності, що можуть призвести до раптових затримок або руйнувань критичних ланок. Саме тому важливо застосовувати сценарний аналіз із розробленням альтернативних планів дій, що дає змогу адаптувати логістичну модель до різних рівнів загроз і надзвичайних ситуацій.

Такий підхід реалізується завдяки створенню моделей, які в реальному часі оновлюються з огляду на нові показники, що надходять від інформаційних систем, моніторингу й розвідки. Це допомагає не лише прогнозувати можливі затримки, а й оперативно коригувати маршрути й організацію постачання, забезпечуючи безперервність логістичних процесів навіть у складних умовах бойових дій.

Сценарний аналіз і адаптивне планування є ключовими елементами управління логістичними процесами в умовах військових дій, коли ситуація швидко змінюється, а ризики надзвичайно високі. Для забезпечення безперервності збуту продукції та мінімізації втрат часу розробляються кілька альтернативних планів дій, що відповідають різним рівням загроз. Зазвичай це декілька сценаріїв: план *A* – оптимальний за сприятливих умов, план *B* – із додатковими заходами безпеки, план *C* – резервний, що передбачає обхідні маршрути в разі руйнування або блокування основних логістичних ланок. Такі плани формуються на основі графових моделей логістичної мережі, де вершинами є склади та інші логістичні вузли, а ребрами – маршрути транспортування. Для кожного сценарію визначається відповідна підмножина маршрутів з огляду на часові витрати й коефіцієнти ризику.

Одним із найважливіших завдань є моделювання випадків раптового руйнування логістичної ланки, наприклад виходу з ладу складу, знищення транспортної інфраструктури або втрати транспортних засобів. У такій ситуації логістична модель оновлюється внаслідок вилучення пошкоджених вузлів або шляхів з графа, після чого перераховується оптимальний маршрут, зважаючи на новий стан системи.

Це дає змогу оперативно адаптуватися до змін і продовжувати постачання навіть за значних ускладнень.

Для зручності прийняття рішень результати сценарного аналізу можуть візуалізуватися на географічних картах із виділенням доступних і недоступних маршрутів, оцінкою часу доправлення та рівня ризику на кожному етапі. Візуалізація допомагає операторам швидко орієнтуватися в поточній ситуації та обирати найбільш доцільні варіанти дій.

Отже, сценарний аналіз і адаптивне планування забезпечують комплексний підхід до управління логістикою в складних умовах бойових дій. Вони дають змогу не лише готуватися до можливих негативних сценаріїв, але й швидко реагувати на зміни, підтримуючи стійкість і ефективність логістичних процесів. Упровадження таких підходів у поєднанні із сучасними цифровими технологіями перетворює логістичну систему на живу, самовідновлювану структуру, здатну забезпечувати безперервність постачання навіть у найскладніших умовах.

Для реалізації сценарного підходу розроблено застосунок, що дає змогу будувати маршрути доправлення з огляду на небезпечні ділянки. У побудові маршруту забезпечується мінімізація часу, але основним обмеженням є сукупний ризик (надійність доправлення).

На рис. 2 подано результат побудови маршруту між вказаними пунктами. Серед вхідних показників для моделювання вказується динамічна інформація – рівень небезпеки в кожній з областей України (на рисунку позначено відповідним кольором). Він обчислюється на підставі відомостей про кількість небезпечних подій (обстрілів, влучань ракет, КАБів, дронів тощо) за певний період часу.

Було визначено найкоротший маршрут доправлення продукції оборонного призначення з Ужгорода до Херсона: Ужгород → Львів → Тернопіль → Хмельницький → Вінниця → Кропивницький → Миколаїв → Херсон, довжина якого дорівнює 943 км, приблизний час маршруту становить 13 год 30 хв. Необхідно було брати до уваги проміжні склади у Львові та Кропивницькому. У другому сценарії зважали на ризики маршруту з підвищеним рівнем небезпеки (індекс небезпечності – 0.56) і побудовано більш безпечний маршрут: Ужгород → Львів → Луцьк → Рівне → Житомир → Вінниця → Кропивницький → Миколаїв → Херсон, довжина якого дорівнює 1 114 км, приблизний час доправлення 15 год 50 хв.

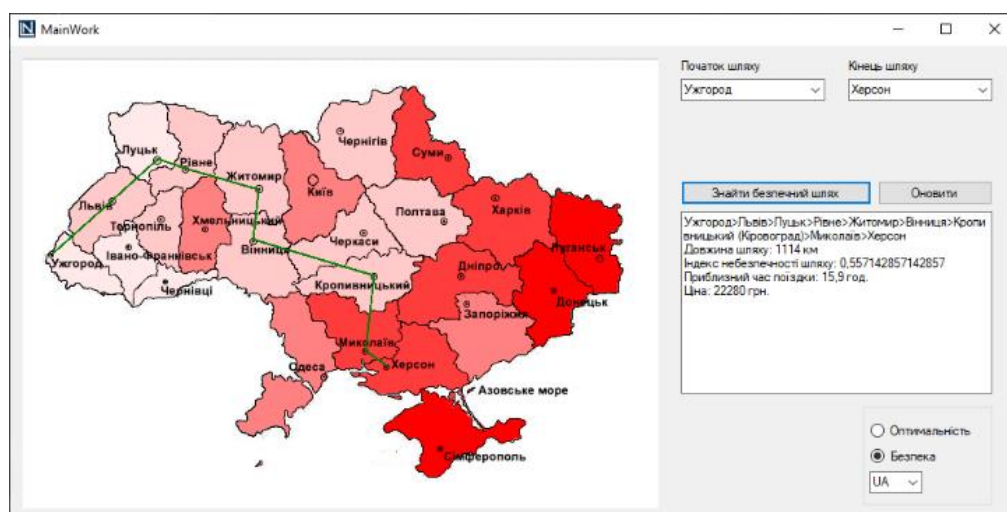


Рис. 2. Приклад побудови маршруту збуту відповідно до рівнів небезпечності ділянок

Отже, обмеження за рівнем ризику зумовило вибір субоптимального рішення щодо часу доправлення.

Висновки

У статті досліджено особливості побудови логістики збуту технічної продукції оборонного призначення в умовах воєнного часу. Показано, що для забезпечення ефективності та стійкості логістичної системи потрібна комплексна мережева структура, яка об'єднує прямі та зворотні потоки, а також високий рівень цифровізації для гнучкого реагування на ризики обстрілів і руйнування інфраструктури.

Розроблено структурну модель логістичних потоків, що містить виробничі підприємства, склади різного типу, ремонтні пункти, пункти утилізації та військові частини. Особливу увагу приділено повторному використанню компонентів, що сприяє зменшенню витрат і підвищенню швидкості обігу техніки.

Для оптимізації логістичних процесів запропоновано математичну модель, яка бере до уваги часові витрати, ризики затримок на різних

етапах ланцюга постачання, а також обмеження на мінімальний обсяг постачання, допустимий рівень загрози й доступність ресурсів. Це дає змогу формувати оптимальний набір маршрутів і технологій оброблення з огляду на реальну ситуацію бойових дій.

Наукова новизна дослідження полягає у створенні комплексної адаптивної моделі управління логістикою збуту, яка поєднує оптимізацію часу, управління ризиками та сценарний аналіз з використанням цифрових технологій для моніторингу й оперативного коригування планів у режимі реального часу.

Практичне впровадження розробленої моделі дає змогу підвищити стійкість логістичної системи, скоротити час логістичного циклу та забезпечити безперервність постачання навіть в умовах високої невизначеності й динамічної безпекової ситуації.

Напрямами подальших досліджень є деталізація механізмів взаємодії між учасниками логістичного ланцюга й розроблення цифрових рішень для автоматизації сценарного аналізу з огляду на зворотні цикли.

References

1. De Koster, R., Le-Duc, T., Roodbergen, K. J. (2007), "Design and control of warehouse order picking: A literature review", *European Journal of Operational Research*, Vol. 182, No. 2, P. 481–501. DOI: 10.1016/j.ejor.2006.07.009
2. Savchenko, L., Hryhorak, M. (2018), "Conceptual foundations for the development of reverse logistics in the circular economy", *Pryazovskyi Economic Bulletin*, P. 14–32. URL: http://www.pev.kpu.zp.ua/journals/2018/5_10_uk/5_10_2018.pdf
3. Vasiliauskas, A. V., Ivanauskas, S., Čižiūnienė, K. (2024), "Challenges of ensuring reverse logistics in a military organization using outsourced services", *Sustainability*, Vol. 16, No. 11, Article 4569. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16114569>
4. Cantelmi, R., Di Gravio, G., Patriarca, R. (2020), "Learning from incidents: A supply chain management perspective in military environments", *Sustainability*, Vol. 12, No. 14, Article 5750. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12145750>
5. Minculete, G. (2025), "Military logistics drones: The innovative solution for transportation challenges on the battlefield", *Review of the Air Force Academy*, P. 342–354. DOI: <https://doi.org/10.2478/raft-2025-0033>

6. Hres, O. M. (2024), "Optimization of logistic processes for supplying military units during active combat: the Ukrainian experience", *Scientific Bulletin of the International Humanitarian University. Series: Jurisprudence*, No. 71. P. 4–7. DOI: <https://doi.org/10.32782/2307-1745.2024.71.1>
7. Zahorianska, O., Ziabrev, V., Kyshchuk, D. (2025), "Logistical support of enterprise operations under martial law: problems and ways of optimization", *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic sciences*, Vol. 342, No. 3(2), P. 43–48. DOI: [https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-342-3\(2\)](https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-342-3(2))
8. Burkivskiy, O. S. (2025), "Optimization of military logistics under combat conditions using the A* algorithm", *Natural and Technical Sciences*, Vol. 1, No. 17, P. 168–172. DOI: <https://jvestnik-sss.donnu.edu.ua/article/view/17323>
9. Tereshchenko, S. I., Yevtushenko, A. M. (2023), "Supply chain: management and optimization", *Journal of Strategic Economic Studies*, No. 6(17), P. 207–214. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5398.2023.6.21>
10. Havrys, P., Nesterenko, R., Havrys, M. (2022), "Prospects and logistics support for the creation of high-precision weapons in a wartime economy", *The collection of scientific works of the Military Institute of Internal Troops of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine*. Vol. 1, No. 39. P. 89–97. DOI: <https://doi.org/10.33405/2409-7470/2022/1/39/263373>
11. Dachkovskiy, V. O., Sampir, O. M. (2019), "Algorithm of the functioning of the logistics support system", *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, No. 2(35), P. 87–92. DOI: <https://doi.org/10.33099/2311-7249/2019-35-2-87-92>
12. Havryliuk, I. Yu., Matsko, O. Y., Dachkovskiy, V. O. (2019), "Conceptual foundations of flow management in the logistics support system of the Armed Forces of Ukraine", *Modern Information Technologies in the Sphere of Security and Defence*, Vol. 34, No. 1, P. 37–44. DOI: [10.33099/2311-7249/2019-34-1-37-44](https://doi.org/10.33099/2311-7249/2019-34-1-37-44)
13. Fedorovych, O. Ye., Uruskyi, O. S., Pronchakov, Yu. L., Rybka, A. V., Leshchenko, Yu. O. (2022), "Modeling logistics for achieving military parity of forces in combat zones", *Aerospace technic and technology*, No. 4. DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2022.4.07>
14. Pereira, N., Antunes, J., Barreto, L. (2023), "Impact of management and reverse logistics on recycling in a war scenario", *Sustainability*, Vol. 15, No. 4, Article 3835. DOI: [10.3390/su15043835](https://doi.org/10.3390/su15043835)
15. Abba Dabo, A.-A., Hosseinian-Far, A. (2023), "An integrated methodology for enhancing reverse logistics flows and networks in Industry 5.0", *Logistics*, Vol. 7, No. 4, Article 97. DOI: [10.3390/logistics7040097](https://doi.org/10.3390/logistics7040097)
16. Omosa, G. B., Numfor, S. A., Kosacka-Olejnik, M. (2023), "Modeling a reverse logistics supply chain for end-of-life vehicle recycling risk management: a fuzzy risk analysis approach", *Sustainability*, Vol. 15, No. 3, Article 2142. DOI: [10.3390/su15032142](https://doi.org/10.3390/su15032142)
17. Carvalho, J. C. de, Vilas-Boas, J., O'Neill, H. (2014), "Logistics and supply chain management: an area with a strategic service perspective", *American Journal of Industrial and Business Management*, Vol. 4, No. 1. DOI: [10.4236/ajibm.2014.41005](https://doi.org/10.4236/ajibm.2014.41005)
18. Zhang, X., Zou, B., Feng, Z., Wang, Y., Yan, W. (2022), "A review on remanufacturing reverse logistics network design and model optimization", *Processes*, Vol. 10, No. 1, Article 84. DOI: [10.3390/pr10010084](https://doi.org/10.3390/pr10010084)
19. Ding, L., Wang, T., Chan, P. (2023), "Forward and reverse logistics for circular economy in construction: a systematic literature review", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 388, Article 135981. DOI: [10.1016/j.jclepro.2023.135981](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135981)
20. Bezkorovainyi, V., Binkovska, A., Noskov, V., Gopejenko, V., Kosenko, V. (2025), "Adaptation of logistics network structures in emergency situations", *Advanced Information Systems*. Vol. 9, No. 4, P. 39–50. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.4.06>
21. Malyeyeva, O., Malieieva, Yu., Kosenko, V., Artiukh, R. (2020), "Formalized Models of Processes and Optimization of Indicators for Complex Equipment Recycling Project", *2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine, P. 583–586. DOI: [10.1109/PICST51311.2020.9467933](https://doi.org/10.1109/PICST51311.2020.9467933)
22. Petrovska, I., Kuchuk, H. (2023), "Adaptive resource allocation method for data processing and security in cloud environment", *Advanced Information Systems*. Vol. 7, No. 3. P. 67–73. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.3.10>
23. Bezkorovainyi, V., Kolesnyk, L., Gopejenko, V., Kosenko, V. (2024), "The method of ranking effective project solutions in conditions of incomplete certainty", *Advanced Information Systems*, Vol. 8, No. 2, P. 27–38. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.2.04>
24. Díaz-Madroñero, M., Peidro, D., Mula, J. (2015), "A review of tactical optimization models for integrated production and transport routing planning decisions", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 88, P. 518–535. DOI: [10.1016/j.cie.2015.06.010](https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.06.010)
25. Litvinenko, D., Malyeyeva, O. (2020), "Models of stakeholders management at the stages of the life cycle of projects of transport systems' development", *Radioelectronic and Computer Systems*, No. 3, P. 97–107. DOI: [10.32620/reks.2020.3.10](https://doi.org/10.32620/reks.2020.3.10)

Надійшла (Received) 25.05.2024

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.11.2025

Publication date (Дата публікації) 28.12.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Полупан Юрій Володимирович – Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", аспірант кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Харків, Україна; e-mail: yuriypolupan6@gmail.com; ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-3030-8448>; Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=60146024600>

Малєєва Ольга Володимирівна – доктор технічних наук, професор, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", професор кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Харків, Україна; e-mail: o.maleyeva@khai.edu; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9336-4182>; Scopus ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=60146226200>

Polupan Yuriy – PhD Student at the Department of Computer Science and Information Technologies, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine.

Malyeyeva Olga – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Professor at the Department of Computer Science and Information Technologies, Kharkiv, Ukraine.

MODELS OF DISTRIBUTION LOGISTICS OF TECHNICAL DEFENSE PRODUCTS UNDER WARTIME RISK CONDITIONS

The subject of this article is the processes of organization and optimization of the distribution logistics of technical defense products under wartime conditions, in particular, the development of a network logistics structure considering reverse flows, risks, and limited resources. **The purpose** of the study is to improve the efficiency of distribution logistics of technical defense products in wartime by constructing an adaptive structure of logistics flows and developing a mathematical optimization model that accounts for risks and resource constraints. The article addresses the following **tasks**: analysis of the specific features of distribution logistics for technical defense products in combat conditions; development of a structural model of logistics flows that considers direct and reverse links as well as the reuse of components; construction of a mathematical model for optimizing logistics processes with consideration of time costs, delay risks, and resource constraints; justification of the application of scenario analysis and adaptive planning to enhance the resilience and continuity of supply under uncertainty. The following **methods** are applied: a systems approach, structural decomposition of logistics processes, risk-based approach, constrained mathematical modeling, scenario analysis, and adaptive planning. **The results** obtained include the construction of a structural model of logistics flows for supplying the Armed Forces of Ukraine, which takes into account direct and reverse flows as well as component reuse; the development of a mathematical model for optimization of distribution logistics with an objective function of minimizing time and constraints on supply volume, total risk, and the number of routes. It is demonstrated that risk consideration significantly affects the choice of optimal routes and strategies. The feasibility of using scenario analysis and adaptive planning to ensure continuity of supply in combat conditions is substantiated. **Conclusions.** The proposed structural and mathematical models make it possible to reduce the logistics cycle time, increase the resilience of the logistics system to risks, and ensure rapid response to changing circumstances. The use of reverse logistics and component reuse helps reduce costs and mitigate resource shortages. Scenario analysis and adaptive planning are effective tools for managing the distribution logistics of technical products under uncertainty and wartime risks.

Keywords: distribution logistics; technical products; supply of the Armed Forces of Ukraine; structural model; mathematical model; optimization; risk management.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Полупан Ю. В., Малєєва О. В. Моделі логістики збуту технічної продукції оборонного призначення в умовах ризиків воєнного часу. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2025. № 4 (34). С. 68–77. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.4.068>

Polupan, Y., Malyeyeva, O. (2025), "Models of distribution logistics of technical defense products under wartime risk conditions", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (34), P. 68–77. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.4.068>