

Сапічев Микола Миколайович

<https://orcid.org/0009-0002-8211-8901>

Шкурят Богдан Жоржович (доктор філософії)

<https://orcid.org/0000-0002-3654-0506>

Резнік Дмитро Вікторович (кандидат військових наук, доцент)

<https://orcid.org/0000-0003-3980-923X>

Мильников Геннадій Васильович (кандидат військових наук, доцент)

<https://orcid.org/0009-0000-9333-4349>

Національний університет оборони України, Київ, Україна

КОМБІНОВАНИЙ ПІДХІД ДО ОПТИМІЗАЦІЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАСОБАМИ УРАЖЕННЯ ПІДРОЗДІЛІВ ПРОТИПОВІТРЯНОЇ ОБОРОНИ

Забезпечення засобами ураження сил і засобів протиповітряної оборони є невід'ємною складовою логістики сучасних бойових дій. Досвід війни засвідчив, що чинні схеми постачання засобів ураження не завжди забезпечують необхідну оперативність і стійкість логістичних ланцюгів, особливо в умовах інтенсивного вогневого впливу противника та динамічної зміни обстановки. Це виявило обмежену ефективність традиційних підходів до організації доставки засобів ураження в сучасних умовах.

Метою дослідження є визначення шляхів удосконалення забезпечення підрозділів ППО засобами ураження за рахунок комбінованого використання наявних підходів до оптимізації доставки.

У статті запропоновано комбінований підхід до організації доставки засобів ураження, який поєднує елементи класичної транспортної задачі та мережесих моделей маршрутизації з розподілом функцій між стратегічним, оперативним і тактичним рівнями. Для досягнення мети дослідження застосовано комплекс загальнонаукових і спеціальних методів: системний аналіз, узагальнення, методи розв'язання транспортної задачі. Моделювання двох варіантів постачання – прямої доставки та комбінованого – показало переваги останнього у забезпеченні більшої гнучкості, стійкості логістичного ланцюга та можливості оперативного перепланування порівняно з класичною схемою постачання.

Результати дослідження можуть бути використані органами управління логістичним забезпеченням для планування доставки засобів ураження та інших матеріально-технічних ресурсів в умовах динамічних бойових дій. Стаття також буде корисною для фахівців з військової логістики, дослідників у галузі прикладної оптимізації та розробників автоматизованих систем підтримки прийняття рішень у сфері логістики.

Ключові слова: логістичне забезпечення, ефективність забезпечення, засоби ураження, комбінована транспортна задача.

Вступ

У сучасних збройних конфліктах зростання ефективності бойового застосування сил і засобів ППО безпосередньо залежить від їхнього своєчасного та комплексного логістичного забезпечення, зокрема забезпечення засобами ураження (ЗУ). Неповне та несвочасне поповнення їх запасів призводить до зниження боєздатності підрозділів і зриву виконання бойових завдань. Тому планування логістичного забезпечення в умовах ведення бойових дій має спиратися на кількісні методи аналізу та моделювання, що забезпечують обґрунтоване прийняття рішень щодо розміщення сил і засобів, маршрутів підвезення та організації місць зосередження і складів. Нормативні документи Збройних Сил України [1-3] та НАТО [4, 5] підкреслюють необхідність підтримання працездатності логістичної системи як у мирний час, так і в особливий період, а також важливість готовності транспортних і ремонтно-відновлювальних підрозділів до дій у зоні ураження противника. Практична реалізація цього вимагає

уніфікації маршрутів, створення та підтримання пунктів накопичення (хабів, складів, арсеналів), а також налагодження процедур доставки матеріальних засобів, зокрема, засобів ураження, що, за досвідом бойових дій, не завжди реалізовувалося в повній мірі та призводило до зниження ефективності доставки матеріально-технічних засобів, зокрема засобів ураження [6-9]. Додатково, чинні керівні документи підкреслюють пріоритетність безперебійної доставки засобів ураження до підрозділів ППО, що підтверджує актуальність дослідження напрямів удосконалення логістичного забезпечення підрозділів ППО у сучасних умовах війни [10, 11].

Завдання підвищення ефективності логістичного забезпечення сил ППО нерозривно пов'язане з оптимізацією транспортних процесів. Але традиційні методики планування доставки матеріально-технічних засобів у військовій логістиці [11-14] не в повній мірі враховують багаторівневу природу логістичної мережі, високу динамічність бойової обстановки, стохастичність

ризиків і можливість оперативного переспрямування маршрутів. У той же час цивільна логістика застосовує ефективні алгоритми та практики (hub-and-spoke архітектури, евристичні й метаевристичні підходи до VRP/TSP, ре-тайм оптимізацію маршрутів і методи стійкості ланцюгів) [15-21], які здатні компенсувати ці недоліки.

розв'язання транспортних задач та визначення їх потенціалу щодо підвищення ефективності забезпечення засобами ураження підрозділів ППО. На основі результатів аналізу розроблено комбінований підхід до організації доставки засобів ураження. Запропонований підхід апробовано шляхом сценарного моделювання порівняльних схем постачання; апробація включатиме оцінку часових показників доставки, витрат пального та показників стійкості логістичних потоків. На підставі отриманих результатів сформульовані загальні рекомендації підвищення ефективності забезпечення засобами ураження підрозділів ППО.

Гіпотеза дослідження полягає в тому, що принципи і моделі розв'язання транспортних задач, які успішно використовуються в цивільній логістиці, можуть бути адаптовані для військових умов з урахуванням обмежень бойової обстановки, ризиків маршруту, вимог до живучості та часових інтервалів доставки.

При цьому основними припущеннями та обмеженнями дослідження вважатимуться:

мережа доставки засобів ураження поділяється на три рівні: стратегічний (до найбільш безпечних пунктів перевантаження), оперативний (поблизу та в межах операційної зони) та тактичний (для доставки засобів ураження вогнеvim підрозділам);

залізничний спосіб доставки застосовується тільки за умови забезпечення безпеки інфраструктури та логістичних процесів;

складні за вмістом вантажі (засоби ураження до різних ЗРК) розглядаються у спрощеному вигляді та мають однакову пріоритетність;

додаткові витрати часу/ресурсів на супроводження вантажів вважаються як фіксовані надбавки у часі/витратах для певних маршрутів у відповідних сценаріях;

укомплектованість особовим складом, засобами доставки та перевантаження, їх готовність, дозволяють виконувати всі операції із забезпечення засобами ураження в межах нормативів;

аналіз проводиться за набором детермінованих сценаріїв; повністю стохастична оптимізація не реалізується в базовій версії, але передбачена як можливе розширення.

оперативні дані щодо стану інфраструктури та доріг доступні в агрегованому вигляді або з затримкою.

Матеріали та методи

Для досягнення мети дослідження застосовано комплекс загальнонаукових та спеціальних методів: системний аналіз, синтез, порівняння та узагальнення [19, 20]. Матеріальну базу становили нормативно-методичні документи міністерства оборони та Збройних Сил України та навчально-методичні посібники [1-5, 10-13], а також емпіричні дані щодо практики забезпечення підрозділів ППО

Метою дослідження є визначення шляхів удосконалення забезпечення підрозділів ППО засобами ураження за рахунок комбінованого використання наявних підходів до оптимізації доставки.

Основні завдання дослідження полягають у проведенні системного аналізу сучасних методів

у ході російсько-української війни (фактичні показники часу доставки, витрат пального, інтенсивності використання транспорту), узагальнення досвіду цивільних логістичних операторів [6-9, 16-19].

Методологічно дослідження поєднує аналіз практики й математичне моделювання. На стратегічному рівні використано класичну транспортну задачу для планування великих партій; на оперативному – моделі VRP/MDVRP для маршрутизації з урахуванням хабів; на тактичному – задачі маршрутизації останньої милі (TSP/VRP з часовими вікнами). Для порівняння підходів проаналізовано класичні алгоритми (методи “північно-західного кута”, мінімальної вартості, MODI) та сучасні евристичні/метаевристичні методи (2-opt, 3-opt, LNS, генетичні алгоритми) [13-15, 20, 23].

Практична частина включала побудову комбінованої математичної постановки транспортної задачі та її розв'язання з використанням точних методів на стратегічних підзадачах і евристик на великомасштабних інстанціях. Для кількісної оцінки виконано сценарне моделювання двох варіантів: “базовий” (пряма доставка) та “хаб-сценарій” (через пункти накопичення). Оцінювані показники: середній час доставки, сумарні перевізні витрати, кількість рейсів, витрати пального та стійкість логістичних потоків. Сценарне моделювання застосовано для первинного оцінювання адекватності запропонованого підходу до доставки ЗУ. Додатково враховано фіксовані надбавки часу/витрат для супроводження на відповідних маршрутах.

Результати аналізу та моделювання використані для формулювання запропонованої комбінованої транспортної задачі і обґрунтування практичних рекомендацій щодо організації хабів, оптимізації маршрутів та планування резервних шляхів.

Результати

Досвід бойових дій підтверджує, що маршрути доставки засобів ураження (ЗУ) є пріоритетними цілями для ураження противником, що призводить до втрат та зниження ефективності логістичного забезпечення підрозділів ППО. Для підвищення ефективності та безпеки постачання ЗУ критично необхідним є вдосконалення логістичної системи через впровадження організаційно-технічних заходів.

З цієї метою було проведено аналіз існуючих підходів до оптимізації поставок, серед яких ключове місце займає транспортна Задача (ТЗ), що є базовою моделлю в дослідженні операцій та логістиці. ТЗ дозволяє мінімізувати витрати перевезень, оптимізувати маршрути та раціонально розподіляти ресурси.

Аналіз методів розв'язання транспортної задачі

Класична ТЗ спрямована на пошук найвигіднішого плану перевезення однорідного продукту від m постачальників до n споживачів за критерієм найменшої вартості перевезення [13-15]. До її переваг слід віднести: простоту математичної постановки, наявність ефективних алгоритмів точного розв'язання (наприклад, Метод потенціалів). Вказана задача доцільна для глобального планування розподілу великих партій ЗУ між основними логістичними хабами ППО. Поряд з тим, класична ТЗ не враховує послідовність об'їзду проміжних пунктів та обмеження ємності транспортних засобів.

Задача комівояжера (Traveling Salesman Problem, TSP) є класичною комбінаторною задачею оптимізації, де потрібно знайти найкоротший маршрут, що проходить через усі n міст рівно один раз і повертається у вихідну точку. Але не існує алгоритму, який би точно розв'язував її для великих n . Розрізняють симетричну, асиметричну та метричну TSP. Практична значущість задачі величезна – від оптимізації логістичних маршрутів до складання розкладів. Для оцінки якості наближених рішень застосовуються нижні межі, зокрема оцінка Гельда – Карпа, що ґрунтується на побудові так званого 1-дерева. У науковій літературі доведено, що навіть для $n=50$ споживачів точне розв'язання задачі вимагає значних обчислювальних ресурсів [12-15]. Отже, до її переваг відноситься можливість її застосування для коротких маршрутів, і навпаки, для довгих маршрутів з великою кількістю споживачів вона не дуже придатна.

Задача маршрутизації транспортних засобів (Vehicle Routing Problem, VRP) є узагальненням TSP. У ній необхідно скласти оптимальні маршрути для кількох транспортних засобів, які виходять із одного або кількох депо та обслуговують множину клієнтів. Основні варіанти VRP включають:

CVRP (Capacitated VRP) – з обмеженням на вантажопідйомність машин;

VRPTW (VRP with Time Windows) – з часовими вікнами для відвідування клієнтів;

MDVRP (Multi-Depot VRP) – з кількома хабами.

Ці задачі відображають реальні умови роботи логістичних компаній, таких як “Нова пошта” чи “Rapid”.

Задача VRP забезпечує максимально реалістичне моделювання логістики в умовах обмежень, але значна обчислювальна складність вимагає застосування евристичних методів (генетичні алгоритми, мурашині алгоритми).

У сучасних транспортних задачах враховуються стохастичні фактори – випадкові зміни попиту, затори на дорогах, погодні умови, аварії. Тому будуються стохастичні моделі, де параметри мають імовірнісний характер. Крім того, все частіше використовують багатокритеріальні постановки: мінімізація не лише витрат, але й часу доставки, викидів CO₂, ризиків безпеки. Це робить моделі

більш реалістичними, але й значно складнішими для розв'язання.

До найбільш поширених методів розв'язання ТЗ відносяться метод північно-західного кута, метод мінімальної вартості, евристичні (2-орт, 3-орт) та метаевристичні (генетичні алгоритми, мурашині колонії) методи для TSP/VRP. Метод північно-західного кута придатний для формування початкового плану, але має низьку точність (далекій від оптимального). Метод мінімальної вартості дає план ближчий до оптимального, зменшуючи кількість ітерацій. Евристичні та метаевристичні методи дозволяють знаходити якісні рішення для великих, складних задач (тисячі пунктів) за прийнятний час, що є ключовим для реальної військової логістики, проте ці методи не використовуються на практиці у військах.

Поряд з цим, на прикладі чотирьох великих логістичних компаній (таблиця 1) можна простежити практичне застосування як класичних, так і сучасних методів оптимізації перевезень [16-19]. В Україні компанії “Нова пошта” та “Rapid” активно впроваджують моделі VRP і TSP для організації кур'єрської доставки. “Укрзалізниця” використовує класичну транспортну задачу для планування маршрутів та розподілу вантажопотоків, тоді як міжнародна компанія “Maersk” застосовує глобальні мережеві моделі для оптимізації процесів морських перевезень і міжнародної торгівлі.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз практичних реалізацій транспортних задач

Компанія	Теоретична модель	Методи розв'язання	Практичне застосування
Нова пошта	TSP, VRP	Жадібні алгоритми, 2-орт, 3-орт	Оптимізація кур'єрських маршрутів у містах
Укрзалізниця	Класична транспортна задача	Метод потенціалів, мережеве програмування	Оптимальний розподіл вантажів
Rapid	TSP з часовими вікнами	Евристики, прогнознi алгоритми	Доставка клієнтам у часових проміжках
Maersk	Глобальна транспортна задача	Стохастичні моделі, евристики	Оптимізація морських контейнерних маршрутів

Отже, для підвищення ефективності забезпечення ЗУ підрозділів ППО доцільне використання комбінованого підходу, а саме:

класична ТЗ (метод потенціалів/мережеве програмування) більш придатна для стратегічного та тактичного розподілу великих обсягів ЗУ між основними складами;

VRP/TSP (евристичні, метаевристичні методи) доцільні для оперативного планування маршрутів “останньої милі” (тактичного рівня) з урахуванням часових вікон, вантажопідйомності та стохастичних

факторів (затори, ризики), що забезпечує швидкість, мінімізацію ризиків та ресурсів.

Практичне застосування цих моделей великими логістичними компаніями (“Нова пошта”, “Maersk”) підтверджує їхню високу ефективність та адаптивність до складних реальних умов, що повністю обґрунтовує їхнє використання у військовій логістиці.

Удосконалення забезпечення засобами ураження угруповань, частин, підрозділів ППО

Ключовими напрямками для удосконалення забезпечення підрозділів ППО засобами ураження на основі використання досвіду логістичних компаній є: створення мережі локальних хабів-накопичувачів; запровадження багаторівневої комбінованої транспортної моделі з узгодженням стратегічного, оперативного та тактичного рівнів перевезень; організація управління й моніторингу маршрутами у режимі реального часу; уніфікація процедур приймання та контролю якості постачання; підвищення кваліфікації персоналу; застосування прогностичного планування запасів та оптимізація використання транспортних і паливних ресурсів.

Розвиток системи резервних маршрутів і цифровізація обліку підвищують стійкість логістичних потоків і керованість процесів постачання. Реалізація вказаних заходів створює необхідну методологічну та організаційну базу для подальших кількісних розрахунків і моделювання ефективності функціонування удосконаленої системи забезпечення засобами ураження сил і засобів ППО [12-14].

Для кількісного підтвердження ефективності вдосконаленої системи та обґрунтування її практичного застосування було виконано моделювання процесу доставки ЗУ.

З цією метою визначено вихідні дані, до яких належать відстані між пунктами постачання, середні швидкості руху, тривалості привалів, вантажомісткість транспортних засобів, добовий попит у засобах ураження та потрібні витрати пального. Подальші розрахунки виконуються для двох сценаріїв – базового (пряма доставка) та хаб-сценарію (з використанням проміжних пунктів накопичення), що дозволяє кількісно порівняти вплив кожного з них на загальну ефективність забезпечення засобами ураження. При цьому під хабом розуміється локальний пункт у межах 100 км від м. Дніпро, розташований перед містом (тобто відстань до хабу скорочується до 100 км (для розрахунків прийнята максимальна різниця відстані), кожен хаб може накопичувати до 10 ракет.

Час доставки ЗУ згідно обраного маршруту (сценарію) знаходиться за формулою:

$$t_f = \frac{D_f}{V_{road}} + t_{pr} \quad (1)$$

де t_f – час доставки ЗУ згідно обраного маршруту;
 D_f – протяжність обраного маршруту

доставки ЗУ;

V_{road} – середня швидкість руху засобів транспортування ЗУ;

t_{pr} – середній час на привали (зупинки).

Обидва сценарії постачання починаються в місті Львів (припускається, що ЗУ вже прибули на Львівський вузол) (рис. 1). На рисунку 2 відображено маршрут доставки ЗУ автомобільним транспортом з метою забезпечення угруповань та підрозділів ППО з використанням запропонованого комбінованого підходу (хаби 1,5,8 – основні для прийому та подальшого розподілу ЗУ).

“Базовий сценарій” доставки ЗУ згідно обраного маршруту розраховується за формулою:

$$t_{base} = \sum_{k=1}^K t_k + t_{local} \quad (2)$$

де t_{base} – базовий повний час доставки ЗУ згідно обраного маршруту;

$\sum_{k=1}^K t_k$ – час подолання окремих ділянок маршруту;

t_{local} – час на локальну доставку в заданих межах позиційного району.

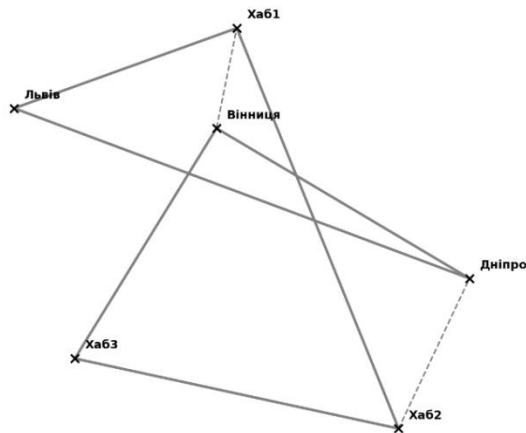


Рисунок 1 – Схема пошуку рішень для доставки засобів ураження



Рисунок 2 – Приклад розрахованого маршруту доставки ЗУ згідно “Хаб сценарію” з 10 хабами

“Хаб сценарій” доставки ЗУ згідно обраного маршруту розраховується за формулою:

$$t_{hub} = \sum_{k=1}^K t_k + \sum_{h=1}^H t_h + t_{local} \quad (3)$$

де t_{hub} – час доставки ЗУ згідно обраного маршруту з використанням хабів;
 $\sum_{k=1}^K t_k$ – час подолання окремих ділянок маршруту від хабу до підрозділу;
 $\sum_{h=1}^H t_h$ – час подолання окремих ділянок маршруту від хабу до хабу.

Різниця часу доставки ЗУ між обраними сценаріями визначається за виразом:

$$t_{lead} = t_{base} - t_{hub} \quad (4)$$

Згідно вихідних даних, наведених в таблиці 2, отримано наступні часові показники:

1) “Базовий сценарій”:

$t_1 = 11,00$ год.

$t_2 = 16,06$ год.

Використовуючи формулу (2) та дані з табл. 4, отримано:

$t_{base} = 29,06$ год.

2) “Хаб сценарій” (t_{hub}):

$t_3 = 12,06$ год.

$t_{hub} = 25,06$ год.

За виразом (4) отримано значення різниці між сценаріями: $t_{lead} = 4,00$ год.

За результатами сценарного моделювання, доставка засобів ураження на позиції підрозділу із використанням проміжних хабів скорочує час рейсу приблизно на 4 години ($\approx 14\%$) порівняно з прямою схемою постачання. Подальше збільшення обсягів перевезень може забезпечити додатковий вииграш у часі за рахунок локального накопичення запасів на хабах та реалізації паралельних процесів доставки між ними і в межах позиційного району.

Таблиця 2

Результати розрахунків часу перевезення засобів ураження

№ з/п	Маршрут доставки	D (км)	t ₁ (год.)	t ₂ (год.)	t ₃ (год.)	t _{base} (год.)	t _{hub} (год.)	t _{lead} (год.)	t _{local} (год.)	t _{pr} (год.)	V _{road} (год.)
1.	Ділянка маршруту Львів – Вінниця, D ₁	350	11,00	-	-	-	-	-	2	4	50
2.	Ділянка маршруту Вінниця - Дніпро, D ₂	503	-	16,06	-	-	-	-	2	6	50
3.	Ділянка маршруту Вінниця – Дніпро з хабом, D ₃	403	-	-	12,06	-	-	-	2	4	50
4.	Базовий маршрут Львів - Дніпро	-	-	-	-	29,1	-	4,00	-	-	-
5.	Маршрут Львів – Дніпро з хабом	-	-	-	-	-	25,06		-	-	-

Наступним кроком доцільно розглянути витрату пального згідно обраних сценаріїв доставки ЗУ, яка в загальному випадку визначається для одного транспортного засобу за виразом:

$$q_k = \frac{D_k \cdot (Q + Cor)}{100} \quad (5)$$

де q_k – витрата пального на вибраній ділянці маршруту ЗУ k ;

D_k – протяжність k -ї ділянки маршруту доставки ЗУ;

Q – середня витрата палива на 100км шляху транспортного засобу (згідно керівних документів або технічної документації).

Cor – коефіцієнт згідно норм для автомобілів з причепами, що виконує роботу, яка обчислюється в тонно-кілометрах (на 100км шляху збільшується на 1,3 л. на тонну вантажу).

Витрата пального для доставки ЗУ за “базовим сценарієм” згідно обраного маршруту руху транспортним засобом розраховується за формулою:

$$q_{base} = \sum_{k=1}^K q_k + q_{local} \quad (6)$$

де $\sum_{k=1}^K q_k$ – витрата пального для подолання окремих ділянок маршруту;
 q_{local} – витрата пального на локальну (Last-mile) доставку ЗУ.

Витрата пального для доставки ЗУ згідно обраного маршруту руху транспортним засобом з використанням “Хаб сценарію”:

$$q_{hub} = \sum_{k=1}^K q_k + \sum_{h=1}^H q_h + q_{local} \quad (7)$$

де $\sum_{h=1}^H q_h$ – витрата пального на один рейс від хабу до хабу;

Різниця витрати палива для доставки ЗУ між обраними сценаріями визначається за формулою:

$$q_{lead} = q_{base} - q_{hub} \quad (8)$$

Отже, маючи з табл. 3 такі вихідні дані, як відстань між ділянками маршруту, витрата пального на локальну доставку ЗУ, середня витрата пального на 100 км маршруту, з використанням виразу (5), визначається витрата пального для перевезення ЗУ згідно обраного сценарію:

$q_1 = 252,00$ л;

$q_2 = 362.16$ л.

$q_3 = 290.16$ л.

За допомогою формул (6),(7) визначається потреба пального для одного транспортного засобу згідно обраного сценарію рейсу:

1) “Базовий сценарій”: $q_{base} = 614.16$ л;

2) “Хаб сценарій”: $q_{hub} = 578.16$ л.

Використовуючи формулу (8) обчислюємо різницю витрати пального для доставки ЗУ між обраними сценаріями: $q_{lead} = 36.00$ л.

Економія = 324.00 л/добу (5.86%).

Для забезпечення 3 підрозділів по 12 ЗУ на добу необхідно здійснити 9 рейсів, для яких:

$q_{base} = 5527.44$ л/добу;

$q_{hub} = 5203.44$ л/добу.

Примітка:

1) Ємність авто: 4 ЗУ/авто (для розрахунків). Тоді потрібно 9 рейсів/добу для доставки 36 ракет;

2) Концепція хабів: хаб — локальний пункт у межах 100 км від м.Дніпро, кожен хаб може накопичувати 10 ЗУ.

Таблиця 3

Результати розрахунків потреби в ресурсах на перевезення засобів ураження

№ з/п	Маршрут доставки	D (км)	q_1 (л.)	q_2 (л.)	q_3 (л.)	q_4 (л.)	q_{base} (л.)	q_{hub} (л.)	q_{lead} (л.)	q_{local} (л.)	$Q + k$ (л.)
1.	Ділянка маршруту Львів – Вінниця, D1	350	252	-	-	-	-	-	-	36	72
2.	Ділянка маршруту Вінниця - Дніпро, D2	503	-	362	-	-	-	-	-	36	72
3.	Ділянка маршруту Вінниця – Дніпро з хабом, D3	403	-	-	-	-	-	-	-	36	72
4.	Локальна доставка, D4	50	-	-	-	36	-	-	-	36	72
5.	Базовий маршрут Львів - Дніпро	-	-	-	-	-	614	-	36	36	72
6.	Маршрут Львів – Дніпро з хабом	-	-	-	-	-	-	578		36	72

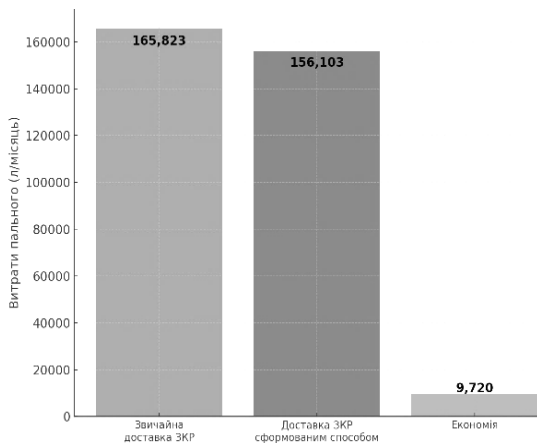


Рисунок 3 – Порівняння витрат пального при використанні “Базового сценарію” та “Хаб сценарію”

В результаті: доставка ЗУ на позицію одного підрозділу зі створенням хабів за прикладом компанії “Нова пошта” з метою зменшення часу на доставку, а також за прикладом маршрутизації компанії “Rapid” через створені хаби дають економію пального $\approx 5\text{--}6\%$ для утримування ППО, що в перспективі (з урахуванням кількості транспортних засобів та тривалості операції) дасть значну економію ресурсів. На рис. 3 показана економія пального на доставку ЗУ для утримування ППО на 1 місяць бойових дій при використанні “Базового сценарію” та “Хаб сценарію” за умови повного поповнення боекомплектів 1 раз на 5 днів.

Комбінований підхід до організації доставки засобів ураження

Забезпечення підрозділів ППО засобами ураження вимагає комплексного підходу до

транспортного планування. Кожен етап переміщення – від стратегічних залізничних перевезень до маршів своїм ходом і доставки до позиційних районів або місць розосередження — потребує використання різних моделей та методів оптимізації. На основі аналізу практики провідних логістичних компаній (таблиця 1) можна сформулювати наступні рекомендації для підвищення ефективності військової логістики підрозділів ППО (табл. 3).

Для перевезення великих партій ЗУ, боєприпасів і технічного майна доцільно застосовувати класичну транспортну задачу з використанням методу мінімальної вартості для формування початкового плану і методу потенціалів (MODI) для досягнення оптимального розподілу потоків доцільно використовувати залізничні перевезення. Згадані методи дозволяють скорочувати час очікування на станціях, ефективно розподіляти ресурси та зменшувати затримки при завантаженні/вивантаженні. Приклад з практики “Maersk” та “Укрзалізниця” демонструє, як багатокритеріальні моделі допомагають враховувати не лише час і вартість, а й ризики, пов’язані з маршрутом (табл. 4).

Під час маршу підрозділів своїм ходом доцільніше використовувати моделі VRP (Vehicle Routing Problem) і MDVRP (Multi-Depot VRP) з часовими вікнами. Вони враховують реалії пересування у колоні: різні швидкості вдень і вночі, дистанції між машинами, часи привалів та необхідність розосередження. Жадібні алгоритми дозволяють швидко сформувати базовий план, тоді як локальні методи оптимізації (2-opt, 3-opt) скорочують час маршів на 10-15% [24].

Подібні принципи успішно використовує компанія “Нова пошта” у міській логістиці, застосовуючи автоматизовані системи планування маршрутів та GPS-моніторинг (табл. 3).

Для доставки безпосередньо в позиційні райони ефективними є моделі TSP (Traveling Salesman Problem) з часовими вікнами. Такі задачі допомагають оптимізувати підвезення боєприпасів

та засобів ураження безпосередньо до підрозділів у стислі терміни.

Жадібні алгоритми забезпечують швидке рішення, а алгоритм Кристофідеса або локальні методи (2-opt) гарантують близькість результату до оптимального. Компанія Rapid є прикладом застосування подібних моделей, успішно організовуючи доставку в умовах обмежених часових вікон (табл. 4).

Таблиця 4

Порівняльна таблиця доцільності застосування методів перевезення

Рівень перевезень, умови	Засоби та способи доставки	Метод вирішення ТЗ	Приклад організації, де застосовано	Очікуваний ефект
Стратегічний рівень	Залізниця (масові перевезення)	Мінімальна вартість + потенціали	Maersk, Укрзалізниця	Скорочення затримок, оптимізація ешелонів, зменшення часу очікування
Оперативний рівень	Автотранспорт (колонами)	VRP/MDVRP + 2-opt/3-opt	Нова пошта	–10–15% часу маршів
Тактичний рівень	Автотранспорт (розосереджено)	TSP + жадібний + 2-opt/Кристофідес	Rapid	Оперативність і точність дозавантаження в позиційних районах
Динамічна бойова обстановка	Комбінована доставка	Детальне планування, резервні маршрути	Maersk	Стійкість логістики, зменшення уразливості

Оптимізувати доставку засобів ураження можна за рахунок комбінування методів на різних рівнях системи доставки. На стратегічному рівні залізничні перевезення оптимізуються за допомогою класичної транспортної задачі. На оперативному рівні маршрути маршу своїм ходом плануються з використанням VRP/MDVRP. На тактичному рівні для доставки в позиційні райони чи місця розосередження застосовується TSP. Важливим елементом є завчасне і детальне планування: передбачення резервних маршрутів, часових графіків і сценаріїв реагування на зміни обстановки. Приклади подібної інтеграції демонструють компанії: “Maersk” (глобальне планування), “Укрзалізниця” (мережеве управління), “Нова пошта” (оперативне перепланування) та “Rapid” (доставка з часовими вікнами (табл. 4).

Таким чином, практичне застосування комбінованого підходу, що сформований на основі різних методів вирішення транспортної задачі, забезпечить удосконалення забезпечення підрозділів ППО засобами ураження в умовах ведення бойових дій.

Обговорення

Проведене дослідження доводить, що використання комбінованих транспортних задач для логістичного забезпечення угруповання ППО є ефективним інструментом підвищення швидкості та надійності доставки засобів ураження. Отримані результати показали, що впровадження “хаб-сценарію”, побудованого за аналогією з цивільними логістичними системами (“Нова пошта”, “Rapid”), забезпечує скорочення часу доставки приблизно на 14% та економію пального до 6%.

Отримані значення підтверджують практичну доцільність адаптації цивільних логістичних

принципів до військових умов. Використання моделей VRP, TSP, MDVRP у поєднанні з класичними методами транспортної задачі (метод мінімальної вартості, метод потенціалів) дозволяє інтегрувати планування на стратегічному, оперативному та тактичному рівнях.

Порівняння отриманих у ході сценарного моделювання результатів із практикою вітчизняних та міжнародних логістичних компаній свідчить, що розроблений підхід відповідає світовим тенденціям в галузі логістики, побудови адаптивних маршрутів і оптимізації багаторівневих транспортних мереж.

В роботі проведено лише первинний аналіз адекватності запропонованого підходу, для подальшого його удосконалення доцільно врахувати стохастичні фактори (наприклад, затримки із зовнішніх причин, втрати внаслідок аварій та дій противника), а також ризики різного характеру. Отже, сформований підхід може стати основою для подальших досліджень щодо:

створення автоматизованої системи підтримки прийняття рішень при забезпеченні підрозділів ППО засобами ураження;

моделювання сценаріїв в умовах бойових втрат, зруйнованих маршрутів і часових обмежень;

розширення розрахунків з урахуванням багатокритеріальної оптимізації (час – витрати – ризики).

Висновки

На підставі проведеного дослідження обґрунтовано, що інтеграція класичних і сучасних методів вирішення транспортної задачі є перспективним напрямом підвищення ефективності забезпечення підрозділів ППО засобами ураження.

Було проаналізовано та адаптовано комбінований підхід, що поєднує рішення класичної транспортної

задачі (для стратегічного планування, наприклад, залізничних перевезень) та методів VRP/TSP (для оперативного рівня та доставки у позиційні райони)

Первинне оцінювання сформованого комбінованого підходу показало підвищення ефективності доставки ЗУ за показниками часу (на 14%) та пального (на 6%). Крім того, практична доцільність застосування наведених методів підтверджена успішною адаптацією досвіду провідних національних та міжнародних логістичних компаній, що може сприяти підвищенню стійкості системи логістичного забезпечення і зниженню ризиків зриву доставки.

Таким чином, інтеграція запропонованих рішень створює основу для більш швидкого, надійного та економічного забезпечення Повітряних Сил ЗСУ в умовах сучасних бойових дій.

Список використаних джерел

1. Доктрина з організації переміщення та перевезень (транспортувань) у Збройних Силах України ВКП 4-00(03).01 : №2464\НВГПШ від 20 серпня 2020 року. Київ: ГПШ ЗС України, 2020.
2. Доктрина застосування сил логістики ВКП 4-32(03).01 : №387\НВГПШ від 04 лютого 2021 року. Київ: ГПШ ЗС України, 2020.
3. Доктрина Об'єднана логістика: ВКП 4-00(01).01 : №2861\НВГПШ від 24 вересня 2020 року. Київ: ГПШ ЗС України, 2020.
4. AJP-4 (Allied Joint Doctrine for Logistics). Published by the NATO Standardization office (NSO), Dec. 2018.
5. AJP-4.4 (Allied Joint Doctrine for Movement). Published by the NATO Standardization office (NSO), Sep. 2022.
6. М. А. Левченко, В. Г. Паталаха, Д. В. Резнік, В. С. Мельниченко, П. А. Дранник, Б. Ж. Шкурат, О. В. Глоба, та В. П. Бринцева, Застосування сил та засобів протиповітряної оборони України російсько-українській війні: досвід, уроки, рекомендації (лютий 2022 року – липень 2023 року). Київ: НУОУ, 2024.
7. Б. Ж. Шкурат, М. А. Левченко, В. Г. Паталаха, Д. В. Резнік, В. С. Мельниченко, П. А. Дранник, О. В. Глоба, та В. П. Бринцева, Застосування сил та засобів протиповітряної оборони України російсько-українській війні: досвід, уроки, рекомендації (серпень – грудень 2023 року). Київ: НУОУ, 2024.
8. Б. Ж. Шкурат, В. Г. Паталаха, Д. В. Резнік, Ю. О. Горобець, П. А. Дранник, О. В. Глоба, та В. П. Бринцева, Засоби протиповітряної та протиракетної оборони Сил оборони України. Іноземне озброєння. Київ: НУОУ, 2025.
9. Є. В. Смиченко, В. В. Поліщук, М. Ю. Миронюк, Ю. М. Коломієць, та С. М. Базіло, "Аналіз роботи органів військового управління щодо забезпечення матеріально-технічними засобами військ протягом 2020–2022 років в зоні проведення операції Об'єднаних Сил", Повітряна міць України, № 1(4), с. 58–62, 2023. DOI: 10.33099/2786-7714-2023-1-4-58-62.
10. Методичні рекомендації щодо пересування частин і підрозділів ЗРВ. ПС ЗСУ, 2020.
11. Настанова з логістичного забезпечення Збройних Сил України: Затв. наказом ГПШ ЗСУ №494 від 28.08.2019 р. 2019.
12. Теоретичні основи МТЗ військ (сил). Київ: МОУ ЦНДІ ЗСУ, 2014.
13. В. О. Дачковський, С. А. Копашинський, І. В. Овчаренко, та ін., Основи оцінювання ефективності функціонування системи логістики. Київ: НУОУ, 2025.
14. І. С. Романченко, В. О. Шуєнкін, С. С. Трегубенко, І. Ю. Марко, П. С. Закусило, та О. І. Хазанович, Розвиток теорії матеріально-технічного забезпечення військ. Київ: ЦНДІ ЗС України, 2020.
15. А. І. Козаченко, Logistics and Transport Systems. Київ: Національний авіаційний університет, 2020.
16. Nova Digital розробила RouteStripe - продукт для підвищення ефективності адресної доставки. Офіційний сайт компанії Нова Пошта. [Online]. Доступно: <https://novaposhta.ua/routestripe> (дата звернення: 25 жов. 2025).
17. Digital transformation at Maersk: the never-ending pace of change. [Online]. Доступно: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15228053.2023.2300921> (дата звернення: 25 жов. 2025).
18. Д. Д. Ковальов, "Використання генетичних алгоритмів при плануванні залізничних перевезень у міжнародному сполученні", Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, т. 29, № 1, с. 69-77, 2024. DOI: 10.18664/iksz.v29i1.300983.
19. Cargo transportation across Ukraine and Kyiv. [Online]. Доступно: <https://rapid.com.ua/en/poslugy/perevzennya-vantazhiv-po-ukraini-and-kyivi> (дата звернення: 25 жов. 2025).
20. Системний аналіз та дослідження операцій, В. Вігліньський, Ред. Київ: КНЕУ, 2018.
21. В. М. Вовк та Л. М. Зомчак, Оптимізаційні моделі економіки. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2013.
22. Ф. Д. Швець, Основи наукових досліджень. Рівне: НУВГП, 2013.
23. Metody naukovo doslidzhennya. [Online]. Доступно: <https://blog.magistr.ua/metody-naukovogo-doslidzhennya/> (дата звернення: 25 жов. 2025).
24. M.-S. Chang, S.-R. Chen, та C.-F. Hsueh, "Real-Time Vehicle Routing Problem with Time Windows and Simultaneous Delivery/Pickup Demands," Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, т. 5, Oct. 2003, с. 2273–2286.

Mykola Sapichev

<https://orcid.org/0009-0002-8211-8901>

Bohdan Shkurat (Doctor of Philosophy)

<https://orcid.org/0000-0002-3654-0506>

Dmytro Rieznik (Candidate of military sciences, docent)

<https://orcid.org/0000-0003-3980-923X>

Hennadii Mylnikov (Candidate of military sciences, docent)

<https://orcid.org/0009-0000-9333-4349>

The National Defence University of Ukraine, Kyiv, Ukraine

A COMBINED APPROACH TO OPTIMIZING THE PROVISION OF MUNITIONS FOR AIR DEFENCE UNITS

The provision of munitions for Air Defence forces and assets is an integral component of modern combat logistics. The increasing intensity and power of enemy air attack means used during the russian-

Ukrainian war imposes heightened requirements for the operational readiness and timely resupply of these munitions.

Insufficient or untimely delivery of munitions directly affects the combat readiness of Air Defence units. Therefore, the goal of this research is to define ways to increase the effectiveness of munition supply to Air Defence units by developing a combined multi-level approach to delivery optimization.

The paper proposes the formulation of a combined transport task for the delivery of munitions, distributing functions across strategic, operational, and tactical levels. To achieve the research goal, a complex of general scientific and specific methods was applied, including system analysis, synthesis, and transport task solution methods. Modeling two supply scenarios (direct delivery and hub-scenario) demonstrated the practical advantage of the proposed delivery approach over the classical one.

The research results can be used by logistics management personnel for planning the delivery of munitions and other material and technical assets in dynamic combat conditions. The article will also be useful for military logistics specialists, researchers in the field of applied optimization, and developers of automated decision support systems in logistics.

Keywords: logistics support, provision effectiveness, air defence, munitions, combined transport task.

References

1. Doktryna z orhanizatsii peremishchen ta perevezen (transportuvan) u Zbroinykh Sylakh Ukrainy VKP 4-00(03).01 : №2464\NVHSh vid 20 serpnja 2020 roku. Kyiv: HSh ZS Ukrainy, 2020.
2. Doktryna zastosuvannia syl lohistyky VKP 4-32(03).01 : №387\NVHSh vid 04 liutoho 2021 roku. Kyiv: HSh ZS Ukrainy, 2020.
3. Doktryna Obiednana lohistyka: VKP 4-00(01).01 : №2861\NVHSh vid 24 veresnia 2020 roku. Kyiv: HSh ZS Ukrainy, 2020.
4. AJP-4 (Allied Joint Doctrine for Logistics). Published by the NATO Standardization office (NSO), Dec. 2018.
5. AJP-4.4 (Allied Joint Doctrine for Movement). Published by the NATO Standardization office (NSO), Sep. 2022.
6. M. A. Levchenko, V. H. Patalakha, D. V. Rieznik, V. S. Melnychenko, P. A. Drannyk, B. Zh. Shkurat, O. V. Hloba, ta V. P. Bryntseva, Zastosuvannia syl ta zasobiv protyvopovitrianoi oborony Ukrainy rosiisko-ukrainskii viini: dosvid, uroky, rekomendatsii (liutyi 2022 roku – lypen 2023 roku). Kyiv: NUOU, 2024.
7. B. Zh. Shkurat, M. A. Levchenko, V. H. Patalakha, D. V. Rieznik, V. S. Melnychenko, P. A. Drannyk, O. V. Hloba, ta V. P. Bryntseva, Zastosuvannia syl ta zasobiv protyvopovitrianoi oborony Ukrainy rosiisko-ukrainskii viini: dosvid, uroky, rekomendatsii (serpen – hruden 2023 roku). Kyiv: NUOU, 2024.
8. B. Zh. Shkurat, V. H. Patalakha, D. V. Rieznik, Yu. O. Horobets, P. A. Drannyk, O. V. Hloba, ta V. P. Bryntseva, Zasoby protyvopovitrianoi ta protyraketnoi oborony Syl oborony Ukrainy. Inozemne ozbroiennia. Kyiv: NUOU, 2025.
9. Ye. V. Smychenko, V. V. Polishchuk, M. Yu. Myroniuk, Yu. M. Kolomiets, ta S. M. Bazilo, "Analiz roboty orhaniv viiskovoho upravlinnia shchodo zabezpechennia materialno-tekhnichnymy zasobamy viisk protiahom 2020–2022 rokiv v zoni provedennia operatsii Obiednanykh Syl," Povitriana mits Ukrainy, vol. 1, no. 4, pp. 58–62, 2023. DOI: 10.33099/2786-7714-2023-1-4-58-62.
10. Metodychni rekomendatsii shchodo peresuvannia chastyn i pidrozdiliv ZRV. PS ZSU, 2020.
11. Nastanova z lohistychnoho zabezpechennia Zbroinykh Syl Ukrainy: Zatv. nakazom HSh ZSU №494 vid 28.08.2019 r. 2019.
12. Teoretychni osnovy MTZ viisk (syl). Kyiv: MOU TsNDI ZSU, 2014.
13. V. O. Dachkovskiy, S. A. Kopashynskiy, I. V. Ovcharenko, ta in., Osnovy otsiniuvannia efektyvnosti funktsionuvannia systemy lohistyky. Kyiv: NUOU, 2025.
14. I. S. Romanchenko, V. O. Shuienkin, S. S. Trehubenko, I. Yu. Marko, P. S. Zakusylo, ta O. I. Khazanovych, Rozvytok teorii materialno-tekhnichnoho zabezpechennia viisk. Kyiv: TsNDI ZS Ukrainy, 2020.
15. A. I. Kozachenko, Logistics and Transport Systems. Kyiv: Natsionalnyi aviatsiynyi universytet, 2020.
16. Nova Digital rozrobiv RouteStripe - produkt dlia pidvyshchennia efektyvnosti adresnoi dostavky. Ofitsiyni sait kompanii Nova Poshta. [Online]. Dostupno: <https://novaposhta.ua/routestripe> (access date: Oct. 25, 2025).
17. Digital transformation at Maersk: the never-ending pace of change. [Online]. Dostupno: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15228053.2023.2300921> (access date: Oct. 25, 2025).
18. D. D. Kovalov, "Vykorystannia henetychnykh alhorytmiv pry planuvanni zaliznychnykh perevezen u mizhnarodnomu spoluchenni," Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti, vol. 29, no. 1, pp. 69–77, 2024. DOI: 10.18664/ikszt.v29i1.300983.
19. Cargo transportation across Ukraine and Kyiv. [Online]. Dostupno: <https://rapid.com.ua/en/poslugy/perevzennya-vantazhiv-po-ukraini-and-kyivi> (access date: Oct. 25, 2025).
20. Systemnyi analiz ta doslidzhennia operatsii, V. Vitlinskiy, Ed. Kyiv: KNEU, 2018.
21. V. M. Vovk ta L. M. Zomchak, Optymizatsiini modeli ekonomiky. Lviv: LNU imeni Ivana Franka, 2013.
22. F. D. Shvets, Osnovy naukovykh doslidzhen. Rivne: NUVHP, 2013.
23. Metody naukovo doslidzhennia. [Online]. Dostupno: <https://blog.magistr.ua/metody-naukovogo-doslidzhennia/> (data zvernennia: access date: Oct. 25, 2025).
24. M.-S. Chang, S.-R. Chen, ta C.-F. Hsueh, "Real-Time Vehicle Routing Problem with Time Windows and Simultaneous Delivery/Pickup Demands," Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, vol. 5, Oct. 2003, pp. 2273–2286.