

Ю. ПОЛУПАН, О. МАЛЕСЬВА

МОДЕЛІ ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ ПОСТАЧАННЯ КОМПЛЕКТОВАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БПЛА В УМОВАХ РИЗИКУ, ОБМЕЖЕНИХ ЛОГІСТИЧНИХ ВИТРАТ І ЧАСУ

Предметом дослідження є логістичні структури для забезпечення постачання комплектування для виробництва БПЛА. **Мета статті** – підвищення ефективності постачання ресурсів для виробництва БПЛА внаслідок вибору раціональної логістичної структури. Окреслено такі **завдання**: аналіз особливостей формування логістичної структури постачання деталей для виробництва БПЛА; формування множини варіантів логістичних структур постачання та критеріїв для їх оцінювання; розроблення математичних моделей багатокритеріального вибору логістичної структури. Упроваджено такі **методи**: аналіз та узагальнення інформації, структурний варіантний синтез, метод основного критерію. **Досягнуті результати**. Для різних класів БПЛА узагальнено основні види комплектувальних елементів. Аналіз можливих постачальників комплектування продемонстрував варіантність вибору, а звідси й множину та різноманітність імовірних структур постачання. Формування та аналіз основних видів логістичних структур дав змогу визначити низку критеріїв для оцінювання їх недоліків і переваг. Порівняння різних логістичних структур підприємства розкриває їх особливості в контексті ключових критеріїв, таких як мінімальний ризик, мінімальні витрати, швидкість постачання, масштабованість і гнучкість у кризових ситуаціях. Сформовано дерево вибору логістичної структури з огляду на стратегічні цілі підприємства (зниження вартості, часу доправлення вантажу або логістичних ризиків). Сформульовано узагальнену задачу багатокритеріального вибору логістичної структури із застосуванням методу основного критерію. Розглянуто три варіанти формалізованої моделі задачі вибору раціональної структури. **Висновки**: результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення логістичних стратегій у сфері виробництва БПЛА, зокрема щодо зниження часу доправлення (відповідно до визначеного ритму виробництва) й мінімізації ризиків в умовах воєнного періоду. Напрямом подальших досліджень є розроблення моделей оптимізації на комбінованих структурах постачання та збуту.

Ключові слова: логістична структура; вибір постачальників; виробництво БПЛА; маршрути постачання; ризики; ланцюги постачання; багатокритеріальний вибір; мінімізація витрат; метод основного критерію.

Вступ

У сучасних умовах зростає потреба у високотехнологічних військових рішеннях, здатних забезпечити стратегічну перевагу на полі бою. Одним із ключових напрямів розвитку оборонних технологій є безпілотні літальні апарати (БПЛА), які відіграють важливу роль у розвідуванні, спостереженні, коригуванні артилерійського вогню та нанесенні ударів по ворожих позиціях. Саме тому вдосконалення дронів і створення їх нових моделей є критично важливим завданням для оборонної промисловості.

Поточні військові конфлікти демонструють, що потреба у БПЛА значно зростає, зокрема у компактних і мобільних моделях, які можуть працювати в складних умовах бойових дій. Значна увага приділяється дронам-камікадзе, що здатні самостійно знаходити та знищувати цілі, а також багатофункціональним БПЛА, які поєднують завдання розвідки та ударного застосування [1].

Однак створення та модернізація безпілотників неможливі без ефективної логістики. Логістичні

процеси охоплюють постачання комплектування, організацію виробництва, тестування та доправлення готових дронів до місць їх застосування. В умовах війни або підвищеного військового навантаження важливо налагодити безперебійні логістичні канали постачання, зокрема для компонентів високоточної електроніки, двигунів, систем зв'язку та навігації. Крім того, необхідно зважати на можливість оперативного обслуговування та ремонту БПЛА, що вимагає створення розгалуженої системи технічної підтримки та сервісного обслуговування [2].

Отже, удосконалення виробництва БПЛА та оптимізація логістичних процесів є ключовими завданнями для підприємств, що працюють у сфері оборонних технологій. Це не лише сприяє підвищенню боєздатності армії, а й забезпечує стратегічну незалежність у виробництві критично важливих систем. Дослідження, спрямовані на формування ефективних методів постачання з використанням інформаційних технологій для управління логістикою процесів виробництва БПЛА, є актуальним завданням.

Аналіз публікацій та постановка завдань

Існує значна кількість публікацій, присвячених питанням логістичного забезпечення виробничого підприємства. Так, у статті [3] проаналізовано теоретичні аспекти управління витратами в процесі логістичної діяльності підприємства. Узагальнено основні типи логістичних рішень, критерії їх формування та основні методи прийняття. Запропоновано підходи до управління витратами під час прийняття рішень, що сприяють зниженню витрат і створенню конкурентних переваг підприємства. Автори статті [4] проаналізували фактори, що впливають на витрати логістично-постачальницької діяльності підприємств. Виокремлено та систематизовано внутрішні та зовнішні чинники, що визначають ефективність логістичних процесів, таких як стратегія постачання, складське господарство, конкуренція та інфраструктура. У статті [4] досліджено фактори, що впливають на прийняття логістичних рішень у ланцюгу постачання. Особливу увагу приділено класифікації логістичних витрат та їх впливу на ефективність процесів постачання.

У студіях [5–7] розкрито сутність оптимізації основних логістичних бізнес-процесів на підприємстві. Проаналізовано еталонну модель оптимізації системи управління бізнес-процесами, зокрема використання методів контролю на етапі оцінювання результатів оптимізації. Розглянуто необхідність адаптації стратегічного маркетингового управління до умов бізнес-процесів ланцюга постачання товарів повсякденного попиту. Особливу увагу зосереджено на інтеграції маркетингу й логістики для підвищення ефективності обслуговування клієнтів, управління попитом і скорочення витрат [8, 9].

У роботі [10] запропоновано алгоритм управління асортиментом і товарними запасами в умовах ринкової нестабільності. Упроваджено методи статистичного аналізу, прогнозування, машинного навчання [11, 12].

Стаття [13] присвячена інноваціям у логістичному менеджменті, зокрема методам проектування логістичних систем на основі процесно-матричної організаційної структури для оптимізації матеріальних, інформаційних і фінансових потоків. У роботі [14] проаналізовано вплив сталого управління ланцюгами постачання на динамічні можливості та ефективність

підприємств, з особливою увагою до компаній у країнах, що розвиваються.

У праці [15] досліджено роль блокчейну та інформаційно-комунікаційних технологій у ланцюгу постачання. Автори виявляють ключові чинники впровадження блокчейну за допомогою рейтинг-кон'юнктурного аналізу, що дає змогу розробити ефективну архітектуру для інтеграції та сталого розвитку ланцюга постачання. Розв'язано завдання управління ризиками в ланцюгах постачання з визначенням основних ризикових подій і стратегій мінімізації загроз через організаційні підходи [16, 17]. Стаття [18] присвячена аналізу змін у логістичних ланцюгах постачання внаслідок війни та євроінтеграції. Розглянуто виклики, цифрову трансформацію та адаптацію маршрутів, а також запропоновано способи вдосконалення за допомогою аналітики й міжнародної співпраці.

Автори роботи [19] проаналізували мобільні логістичні та моніторингові системи, що використовують рої БПЛА. Крім того, досліджено основні виклики впровадження таких систем та перспективи їх розвитку для покращення ефективності логістичних операцій і моніторингу в динамічних умовах.

Отже, значну кількість досліджень присвячено підвищенню ефективності управління логістичними процесами, зокрема в умовах невизначеності та ризиків. Але водночас недостатньо уваги приділено саме формуванню логістичних структур, зокрема логістичних ланцюгів постачання ресурсів для виробництва продукції подвійного призначення в умовах воєнного стану. Не взято до уваги значний рівень невизначеності в плануванні логістичних систем виробництва у воєнний період.

Мета статті – підвищення ефективності постачання ресурсів для виробництва БПЛА за допомогою вибору раціональної структури з огляду на невизначеність на етапі попереднього планування логістичних завдань.

Для досягнення мети необхідно розв'язати такі завдання:

- 1) проаналізувати особливості формування логістичної структури постачання деталей для виробництва БПЛА;
- 2) сформулювати множину варіантів логістичних структур постачання та критеріїв для їх оцінювання;
- 3) розробити математичні моделі багатокритеріального вибору логістичної структури.

Матеріали й методи

На етапі попереднього планування логістики постачання та збуту необхідно обрати структуру з огляду на низку критеріїв. Отже, виникає завдання побудови моделі багатокритеріального оцінювання відповідної ситуації прийняття рішення [20]. Формалізація процедури оцінювання варіантів логістичних структур часто пов'язана з необхідністю переходу від якісних лінгвістичних змінних до певної метрики заданого набору окремих критеріїв варіантів.

З формального погляду вибір найкращого варіанта логістичної структури з допустимого набору є завданням прийняття рішень з визначення найкращого з них $x^\circ \in X$, де X – допустима множина варіантів. Кожне рішення $x_i \in X$, $i = \overline{1, n}$ визначається кортежем різномірних часткових критеріїв

$$K = \langle k_j(x) \rangle, j = \overline{1, m}. \quad (1)$$

Тоді оптимальним буде рішення

$$x^\circ = \arg \max_{x \in X} \langle k_j(x) \rangle, \forall j = \overline{1, m}. \quad (2)$$

Труднощі прийняття рішення про вибір найкращого варіанта в багатокритеріальних задачах виникають у ситуаціях, коли один частковий критерій не може бути покращений без погіршення хоча б одного іншого критерію. Ця ситуація ототожнюється із так званою областю компромісів (область Парето). Розв'язання компромісної задачі може здійснюватися запровадженням деякого додаткового правила (принципу оптимальності), що дає змогу прийняти рішення про вибір єдиного найкращого варіанта.

Для вибору пріоритетного варіанта з множини структур, що подані на третьому рівні дерева (рис. 8), можна застосувати метод основного критерію.

Цей метод базується на виділенні одного з критеріїв (який є переважним в умовах певного підприємства) та переведення всіх інших критеріїв в обмеження. Для цього аналізуються конкретні особливості багатокритеріальної задачі, з множини часткових критеріїв обирається один – найважливіший. Для кожного з інших часткових критеріїв призначається граничне значення, нижче за яке він не може опускатися. Отже, всі часткові критерії, крім одного, перетворюються на обмеження, що додатково звужують множину допустимих рішень X . Тоді вихідна багатокритеріальна задача (1) перетворюється на однокритеріальну:

$$x^\circ = \arg \max_{x \in X} k^*(x), k_i(x) \geq (\leq) k_{\text{ггг}}(x), i = \overline{1, n-1}, \quad (3)$$

де $k^*(x)$ – оптимізаційний скалярний критерій;

$k_{\text{ггг}}$ – найгірші допустимі значення часткових критеріїв-обмежень;

знак " $\geq$ " використовується для критеріїв, які необхідно максимізувати, а знак " $\leq$ " – мінімізувати.

У процесі реалізації розглянутого методу важливо звертати особливу увагу на те, щоб припустима множина рішень, яка визначається частковими критеріями-обмеженнями, не виявилася порожньою.

Результати дослідження

1. Аналіз видів комплектування для виробництва БПЛА

Безпілотні літальні апарати можна розрізняти за різними параметрами, зокрема за призначенням, дальністю польоту, рівнем автономності та технічними характеристиками. Основні класи БПЛА [21]:

- розвідувальні – призначені для збирання інформації, спостереження та коригування артилерії;
- ударні – оснащені зброєю та здатні завдавати високоточних ударів по ворогу;
- тактичні – використовуються на оперативному рівні для підтримки військових підрозділів безпосередньо на полі бою;
- стратегічні – великі апарати, які можуть здійснювати далекі польоти та виконувати завдання високої складності.

Усі класи БПЛА містять численні комплектування, кожне з яких відіграє важливу роль у забезпеченні ефективності, безпеки та стабільності роботи дронів [22]. Але певні класи мають інноваційні компоненти, призначені для забезпечення (удосконалення) виконання особливих функцій – від руху і маневреності до збирання та передачі інформації, необхідної для виконання військових місій.

Основою будь-якого БПЛА є рама й корпус. Рама забезпечує структурну цілісність апарата й утримує всі інші елементи. Для виготовлення рам використовуються матеріали, що поєднують легкість і міцність, а також стійкість до механічних пошкоджень. Найбільш поширеними є карбонові волокна, алюмінієві сплави й пластикові композити. Карбонові матеріали дають високу міцність за умови мінімальної ваги, алюмінієві сплави додають корозійну стійкість, а пластикові композити роблять конструкцію більш маневреною та знижують її вартість. В Україні компанії, зокрема *Drone Frames*

та *Vyriy Drone*, виготовляють рами та корпуси для БПЛА, постачаючи їх як для комерційних, так і для військових потреб.

Наступний важливий елемент БПЛА – це двигуни та пропелери, що забезпечують основну рухову силу для підйому та переміщення апарата. Для багатороторних дронів (мультикоптерів) кожен ротор оснащений окремим двигуном, що уможливорює високу маневреність і стабільність польоту. У дронів із фіксованими крилами двигуни забезпечують швидкість і підйомну силу. Для живлення двигунів використовуються безщіткові електричні мотори, яким властиві висока ефективність і низький рівень шуму. В Україні компанії, зокрема *Escadrone* та *AIR 3F*, спеціалізуються на виготовленні двигунів і пропелерів для різних типів дронів, забезпечуючи високу якість та надійність своїх компонентів.

Акумулятори є критично важливими для гарантування тривалості польоту БПЛА. Від ефективності акумуляторів залежить здатність апарата виконувати свої функції протягом заданого часу. Найпоширенішими є літій-полімерні (LiPo) та літій-іонні (Li-ion) акумулятори. LiPo-акумулятори мають високу енергетичну щільність і здатні швидко заряджатися, що робить їх ідеальними для дронів. Літій-іонним акумуляторам властивий значний термін служби, а також вони більш безпечні, хоча важчі та мають меншу ємність для однакового об'єму. Для підвищення безпеки акумулятори зазвичай оснащують системами захисту від перезаряджень та перегріву. В Україні компанії *PAWELL BATTERY* та *BTRY Energy* постачають літій-полімерні та літій-іонні акумулятори, що відповідають вимогам високих стандартів безпеки та ефективності.

Щоб забезпечити стабільність польоту та контроль над рухами БПЛА, використовують системи управління та навігації. Польотний контролер (FC) координує роботу двигунів і датчиків, що дає змогу дрону залишатися стабільним у польоті. Гіроскопи визначають орієнтацію апарата в просторі, акселератори вимірюють прискорення, а барометри – висоту польоту. GPS-модулі допомагають точно позиціювати БПЛА та здійснювати автономні польоти. Вітчизняні компанії *USMT* та *SkyLab UA* постачають високоточні навігаційні системи, польотні контролери та GPS-модулі для БПЛА, що забезпечують їх стабільність і точність у роботі.

Системи зв'язку є критичними для ефективного керування БПЛА. Вони забезпечують двосторонній

зв'язок між оператором і дроном, що дає змогу здійснювати передачу команд та отримувати зворотний зв'язок від апарата. З метою передачі інформації можуть використовуватися радіочастотні системи (RF), Wi-Fi або супутникові канали зв'язку. Для дронів, що працюють на великих відстанях або в умовах поганого зв'язку, часто застосовуються супутникові канали. В Україні компанії *Dronarnia* та *3DTech* розробляють і постачають радіочастотні та супутникові системи для передачі інформації на значні відстані.

Сенсори та камери на борту БПЛА виконують важливу роль під час збирання інформації та моніторингу місцевості. Вони можуть бути оптичними, інфрачервоними (для нічного бачення) або термальними (для вимірювання температури). Також з метою створення точних тривимірних карт місцевості використовуються лідарні сенсори. Камери та сенсори дають змогу БПЛА виконувати різноманітні завдання – від спостереження до наукових досліджень. В Україні компанії *UAV in UA* і *Modelistam* постачають високоякісні сенсори та камери для різних завдань – від військових до комерційних.

Крім того, важливими є системи захисту та додаткові функції БПЛА, які забезпечують безпеку та надійність операцій. До таких систем належать антивірусні програми для захисту від хакерських атак, а також резервні системи для аварійного приземлення дрону в разі збоїв або втрати зв'язку. У нашій країні компанії *Kvertus* та *DracoTech* розробляють такі системи, забезпечуючи безпеку та стабільність роботи БПЛА навіть у складних умовах.

Фірми, що постачають ці компоненти, зазвичай спеціалізуються на одному або кількох категоріях, але також можуть пропонувати додаткові продукти для комплексних рішень. Нижче подано таблицю, що відтворює основні компоненти БПЛА, зокрема рами, двигуни, акумулятори, системи управління, камери, сенсори та системи захисту.

Також важливо зауважити, що компанії можуть розширювати свій асортимент, додаючи нові компоненти, що дає змогу їм бути більш гнучкими в задоволенні потреб клієнтів. Результати аналізу подано в табл. 1. Зазначимо, що за більш детального аналізу асортименту перелічених компаній можуть бути додані й інші продукти для БПЛА. Однак, як видно з таблиці, для забезпечення виробництва комплектування для БПЛА постає завдання вибору множини постачальників.

Таблиця 1. Постачальники й типи комплектування для БПЛА

Постачальник	Рами та корпуси	Двигуни та пропелери	Акумулятори	Системи управління	Системи зв'язку	Камери та сенсори	Системи захисту
Drone Frames	+	+	+	+	+	+	+
VYRIY Drone	+	+	+	+	+	+	+
Escadrone	+	+	+	+	+	+	+
AIR 3F	+	+	+	+	+	+	+
PAWELL BATTERY	–	–	+	–	–	–	–
BTRY.Energy	–	–	+	–	–	–	–
USMT	–	–	–	+	+	+	+
SkyLab UA	+	+	+	+	+	+	+
Dronarnia	+	+	+	+	+	+	+
3DTech	+	+	+	+	+	+	+
UAV in UA	+	+	+	+	+	+	+
Modelistam	+	+	+	+	+	+	+
Kvertus	+	+	+	+	+	+	+
DracoTech	–	–	–	–	–	–	+

У виборі постачальників необхідно брати до уваги множину ймовірних маршрутів постачання. Потрібно оцінити варіанти широкої мережі постачальників (з вузькою спеціалізацією) або співробітництва тільки з окремими постачальниками (із значним асортиментом комплектування та позитивним досвідом співпраці). Другий варіант може бути переважним щодо зменшення логістичних шляхів. Але він має недолік – для проєктів модернізації БПЛА може виникнути потреба в інноваційних елементах, які здатні забезпечити лише окремі постачальники.

В умовах активних бойових дій постачання компонентів для БПЛА від закордонних постачальників може здаватися менш ризикованим (якщо порівнювати з місцевим виробництвом) завдяки стабільності політичної ситуації в багатьох країнах та розвинутій інфраструктурі. Однак важливо зауважити, що терміни постачання таких компонентів можуть бути значно тривалішими через митні процедури, міжнародні санкції та транспортні обмеження. Це створює ризики затримок, які можуть негативно вплинути на оперативність постачання, що критично важливо в умовах, де кожен момент є вирішальним. Крім того, закордонні постачальники можуть стати ненадійними через непередбачувані фактори, наприклад зміни в політичній або економічній ситуації, введення нових санкцій чи порушення стабільності міжнародних торгових шляхів. Навіть добре зарекомендовані компанії можуть зіткнутися з труднощами у виконанні зобов'язань, що підвищує ризики вчасного постачання критичних компонентів.

Тому, незважаючи на потенційну надійність імпортованих компонентів, варто максимально

орієнтуватися на місцевих виробників. Це дасть змогу знизити залежність від зовнішніх факторів, забезпечуючи оперативність, гнучкість і надійність у виконанні військових завдань.

2. Варіанти логістичних структур постачання та критерії їх оцінювання

У процесі формування логістичних каналів постачання ресурсів і збуту продукції можна розглядати різні структури взаємодії учасників логістичних процесів, кожна з яких має свої особливості, переваги та виклики. Одна з найпростіших структур – це модель організації постачання, що передбачає прямий зв'язок між одним постачальником та одним замовником без посередників або складських приміщень (рис. 1). У цій моделі постачальник безпосередньо постачає товар або ресурси замовнику, що дає змогу значно знизити витрати, оскільки немає необхідності в додаткових етапах логістики, таких як склади або логістичні посередники [23]. Така структура особливо ефективна для малих підприємств або компаній, що мають обмежену кількість замовників і постачальників. Вона дає змогу краще контролювати постачальні процеси, оскільки всі етапи обмежуються лише двома учасниками. Однак така модель має і певні ризики. Залежність від одного постачальника й одного замовника може стати суттєвим недоліком у разі виникнення проблем на будь-якому з етапів – від виробництва до дорозправки. Крім того, така структура є обмеженою за масштабами, оскільки для більш складних і масштабних операцій необхідно мати більшу кількість учасників у ланцюгу постачання, що знижує гнучкість і швидкість реагування.

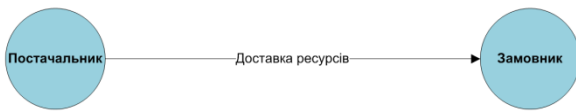


Рис. 1. Прямая структура постачання

Іншою моделлю є мережа з кількома постачальниками та одним замовником, де останній отримує ресурси від постачальників (рис. 2). Модель з кількома постачальниками та одним замовником зменшує ризики перебоїв у постачанні завдяки диверсифікації джерел ресурсів. Це підвищує надійність постачання, знижує залежність від одного постачальника й дає змогу обирати більш вигідні умови співпраці, що може знизити витрати й підвищити конкурентоспроможність [24].

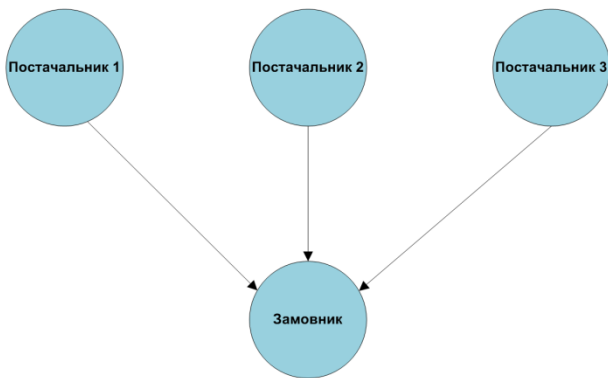


Рис. 2. Модель з кількома постачальниками та одним замовником

Однак управління такою мережею вимагає значних зусиль для координації постачальників, забезпечення ефективного обміну інформацією, узгодження графіків і контролю виконання угод. Крім того, складна логістика, необхідність моніторингу якості та вчасності постачань можуть ускладнити управління запасами й транспортуванням. Отже, хоча ця модель підвищує гнучкість і знижує ризики, вона потребує ретельного управління для забезпечення ефективності та мінімізації потенційних недоліків.

Мережа з кількома постачальниками та кількома замовниками створює складніші ланцюги постачання, що вимагає ретельного управління та координації. У такій структурі часто виникає потреба в складських приміщеннях або спеціальних послугах для підтримки постачань і вчасного розподілу ресурсів. Це допомагає зберігати необхідні запаси та забезпечувати безперервність постачання, особливо в умовах непередбачуваних змін попиту або пропозиції (рис. 3).

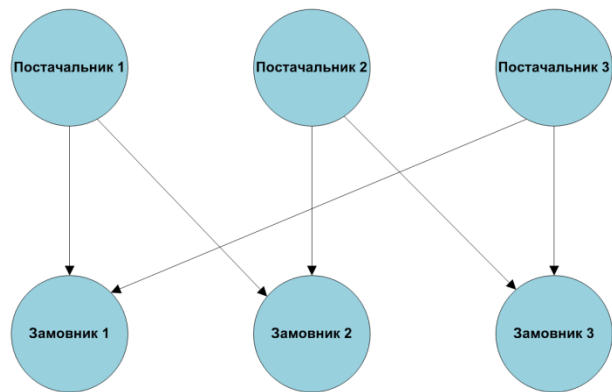


Рис. 3. Мережа з кількома постачальниками та кількома замовниками

З одного боку, така структура забезпечує більшу гнучкість і знижує залежність від окремих постачальників, оскільки замовник може обирати з кількох джерел постачання. Це дає змогу адаптуватися до змін на ринку та зменшити ризики, пов'язані з перебоями в постачанні [25]. Однак, з іншого боку, така мережа потребує більше ресурсів для координації та контролю, оскільки необхідно управляти взаємодією між численними учасниками, що може бути складним завданням.

Крім того, зростання кількості учасників у ланцюзі постачання може збільшити кількість можливих ризиків, пов'язаних з багатofакторним управлінням. Наприклад, можуть виникнути проблеми з комунікацією, невчасним виконанням зобов'язань або якістю постачання, що, ймовірно, вплине на загальну ефективність ланцюга постачання.

У сучасних ланцюгах постачання широко застосовуються моделі, що поєднують використання посередників, таких як логістичні оператори та дистриб'ютори, зі складськими приміщеннями для зберігання товарів. Такі структури сприяють ефективному управлінню логістичними процесами, оптимізації витрат і забезпеченню безперебійного постачання продукції (рис. 4).

Посередники відіграють важливу роль у координації процесів доправлення та розподілу товарів між постачальниками та замовниками. Використання логістичних компаній дає змогу підприємствам скоротити витрати на транспортування та управління запасами, оскільки посередники володіють розвинутою інфраструктурою та технологіями, що підвищують ефективність перевезень і складування [26]. Крім того, централізоване управління запасами допомагає уникнути нестачі

чи надлишку продукції, що позитивно впливає на стабільність постачань [27].

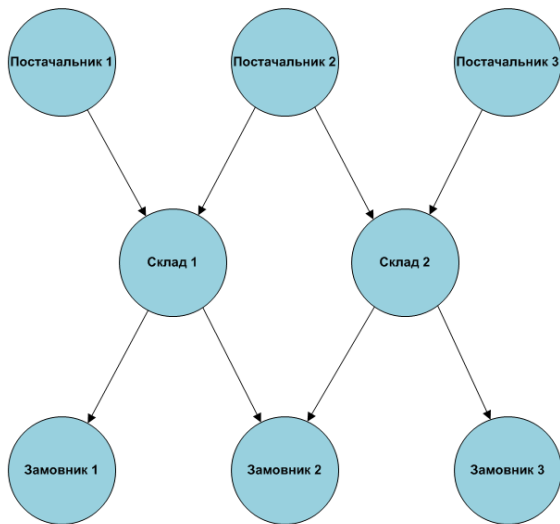


Рис. 4. Мережа з кількома постачальниками та кількома замовниками зі складами

Водночас логістичні мережі часто містять складські приміщення, що виконують функцію буфера між постачальниками та кінцевими споживачами. Завдяки цьому можна швидко реагувати на зміни в попиті та забезпечувати вчасне доправлення продукції без необхідності чекати нових партій товару від виробника. Це особливо важливо в умовах коливань ринку та непередбачуваних затримок у постачанні.

Попри численні переваги, така модель має і певні недоліки. Залучення посередників передбачає додаткові фінансові витрати, які можуть бути суттєвими, особливо в разі значних обсягів операцій. Крім того, передача частини логістичних функцій зовнішнім компаніям може зменшити рівень контролю над постачанням, що іноді призводить до затримок або інших операційних ризиків. Використання складських приміщень також супроводжується витратами на їх оренду, утримання персоналу, обслуговування запасів і впровадження сучасних інформаційних систем для управління ними.

Отже, поєднання посередників та складських приміщень у логістичних мережах дає змогу підприємствам підвищити ефективність постачань і зменшити витрати, проте вимагає ретельного аналізу всіх супутніх ризиків та витрат. Оптимальний вибір моделі постачання залежить від особливостей діяльності компанії, характеристик ринку та стратегічних цілей бізнесу.

У разі, коли в мережі постачання присутній посередник, тобто зовнішній логістичний оператор, його роль полягає в оптимізації процесів доправлення та розподілу товарів між постачальниками та замовниками (рис. 5). Зовнішні логістичні оператори мають доступ до більш ефективних транспортних і складських ресурсів, що дає змогу знижувати витрати на транспортування, зберігання та інші логістичні послуги. Вони також можуть централізовано управляти запасами, що забезпечує вчасність постачань і зменшує витрати на зберігання товарів.

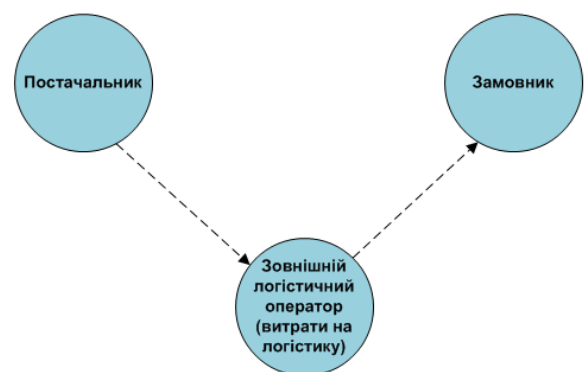


Рис. 5. Логістична структура із залученням зовнішніх логістичних операторів

Залучення таких операторів допомагає підприємствам знизити свої внутрішні витрати, оскільки вони не змушені утримувати власну інфраструктуру для транспортування та зберігання товарів або вести логістичну діяльність самостійно. Проте ця модель має недоліки. Присутність посередника в ланцюгу постачання може призвести до додаткових витрат, адже оператори отримують оплату за свої послуги. Це особливо відчутно за умови великих обсягів операцій, що може знижувати загальну ефективність системи. Крім того, відсутність прямого контролю над процесами спричиняє підвищення ризиків, пов'язаних з ненадійністю оператора або затримками в доправленнях.

Отже, хоча зовнішні логістичні оператори можуть значно оптимізувати витрати на логістику та покращити управління запасами, підприємства мають ретельно оцінювати вигоди від таких послуг порівняно з потенційними витратами та ризиками, що можуть виникнути під час використання цієї моделі постачання.

Ще більш складною є структура, що містить інтегровані інформаційні технології, такі як ERP (*Enterprise Resource Planning*), TMS (*Transportation*

Management Systems) та WMS (Warehouse Management Systems) [28]. Використання цих технологій дає змогу автоматизувати чимало процесів управління постачаннями, що знижує витрати й покращує контроль за всіма етапами логістики (рис. 6). Наприклад, ERP-системи дають змогу інтегрувати всі бізнес-процеси компанії, зокрема планування, закупівлі, облік, та розподіл ресурсів, а TMS допомагає управляти процесами транспортування, моніторити вантажі та оптимізувати маршрути. WMS забезпечує ефективне управління складськими запасами, що зменшує ризик нестачі товарів чи надлишку на складах.

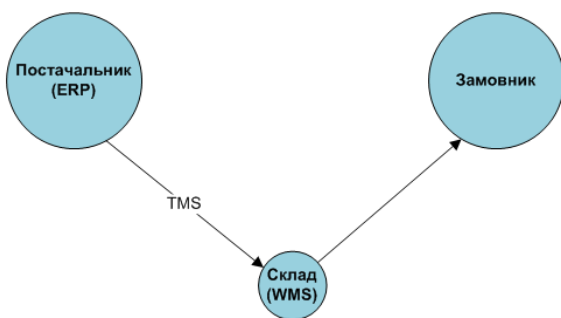


Рис. 6. Логістична структура з інтегрованими технологіями (ERP, TMS та WMS)

Однак упровадження таких складних і дорогих систем потребує значних капіталовкладень і ресурсів для підтримки та інтеграції в наявну інфраструктуру компанії. Це може бути серйозною перешкодою для малих і середніх підприємств, що мають обмежений бюджет для таких технологічних інвестицій. Однак для великих компаній, що працюють на глобальних ринках, така інтеграція може стати ключем до зниження витрат і підвищення ефективності логістики.

Альтернативні маршрути транспортування, що передбачають використання різних видів транспорту або зміну маршрутів залежно від умов, є важливим складником ефективного управління логістикою (рис. 7). Така модель дає змогу значно збільшити гнучкість, оскільки забезпечує можливість швидко адаптуватися до непередбачуваних ситуацій, таких як затори, погодні умови або технічні несправності [29]. Використання кількох видів транспорту, наприклад, поєднання залізничного, автотранспортного й морського транспорту, сприяє забезпеченню безперервності постачання, навіть якщо один із маршрутів стає недоступним. Це також допомагає знижувати ризики, пов'язані з перебоями в постачанні або затримками.

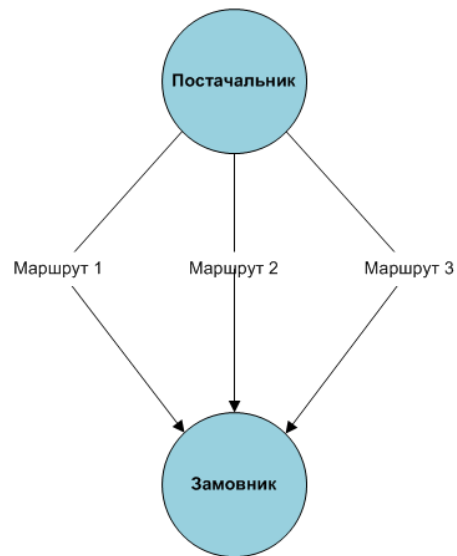


Рис. 7. Логістична структура з альтернативними маршрутами транспортування

Однак така система потребує високого рівня планування та координації. Необхідно постійно моніторити ситуацію на всіх етапах маршруту, вчасно коригувати логістичні плани та взаємодіяти з різними транспортними операторами. Для цього потрібні додаткові ресурси та інформаційні системи, що дають змогу ефективно управляти комплексними ланцюгами постачання. Упровадження альтернативних маршрутів може бути складним і витратним, оскільки кожен новий маршрут і вид транспорту потребує окремого аналізу витрат, ризиків і часу дороз'їзду.

Проте для великих компаній, що працюють на глобальних ринках, ця модель є важливим інструментом для підтримки конкурентоспроможності, забезпечення вчасності постачань і зменшення загальних витрат на транспортування. Модель дає змогу не тільки реагувати на поточні проблеми, а й стратегічно планувати постачання, максимально використовуючи доступні транспортні можливості.

У формуванні логістичних каналів постачання та збуту продукції важливо обрати оптимальну модель, що знижує витрати та підвищує гнучкість. Моделі прямого постачання ефективні для малих підприємств, але обмежені в масштабах. Мережі з кількома постачальниками знижують ризики, але потребують складного управління. Структури з посередниками та складськими приміщеннями забезпечують гнучкість і зниження витрат, але вимагають додаткових витрат на управління. Для більшості підприємств оптимальним є поєднання

кількох постачальників з посередниками, що забезпечує баланс витрат і ефективності.

У табл. 2 подано порівняння різних логістичних структур підприємства, розкрито їх основні характеристики й переваги в контексті ключових критеріїв, таких як мінімальний ризик, мінімальні витрати, швидкість постачання, масштабованість і гнучкість у кризових ситуаціях ("+" означає, що цей критерій є перевагою логістичної структури, "-" – критерій є недоліком структури). Пряма

структура постачання, яка є найбільш простою та дешевою, забезпечує швидкість постачання завдяки мінімальній кількості етапів, але її основний недолік полягає у високому ризику через залежність від одного постачальника чи замовника. Для зменшення загроз можна застосувати мережу з кількома постачальниками та одним замовником, яка додає гнучкість і знижує ймовірність перебоїв. Однак така структура потребує додаткових витрат на координацію та управління.

Таблиця 2. Критерії оцінювання логістичних структур

Види логістичної структури	Ризик	Вартість	Швидкість	Масштабованість	Гнучкість
1. Пряма структура постачання	–	+	+	–	–
2. Мережа з кількома постачальниками та одним замовником	+	–	+	+	+
3. Мережа з кількома постачальниками та кількома замовниками	+	–	–	+	+
4. Модель постачання з посередником (зовнішній логістичний оператор)	–	–	+	–	–
5. Логістична структура із складськими приміщеннями	+	–	+	+	+
6. Логістична структура з інтегрованими технологіями (ERP, TMS, WMS)	+	–	+	+	+
7. Альтернативні маршрути транспортування	+	–	+	–	+

Якщо ж у мережі є кілька постачальників і кілька замовників, це дає змогу значно підвищити масштабованість і адаптивність бізнесу, проте таке управління може стати складним і вартісним. Моделі постачання з посередниками сприяють оптимізації логістичних процесів і зменшенню навантаження на компанію, але вони створюють додаткові витрати й ризики залежності від надійності посередника. У разі мережі без посередників компанія має повний контроль над процесами, що знижує ризики затримок, але потребує складної координації, що може уповільнювати постачання.

Логістична структура, яка містить складські приміщення, допомагає зберігати запаси, що сприяє стабільності постачання, однак вимагає значних витрат на утримання складів та управління запасами. Залучення зовнішніх логістичних операторів дає змогу оптимізувати транспортування та знизити витрати, але це створює залежність від сторонніх компаній і може виникнути проблема з якістю послуг. Інтеграція сучасних технологій, таких як ERP, TMS чи WMS, здатна автоматизувати процеси, прискорити роботу й зменшити помилки, але впровадження таких систем пов'язане з високими витратами.

Застосування альтернативних маршрутів транспортування дає змогу швидко реагувати на проблеми, знижувати ризик затримок і забезпечувати більшу гнучкість. Однак підтримка цих альтернативних шляхів спричиняє додаткові витрати, що може зробити їх менш вигідними в довгостроковій перспективі.

Зазначимо, що табл. 2 містить узагальнені оцінки. Для кожного окремого підприємства її зміст може бути уточнений або доповнений.

3. Математичні моделі вибору логістичної структури

з огляду на стратегічні цілі підприємства

У розробленні ефективної логістичної стратегії для підприємства важливо не лише організувати постачання та збут продукції, але й обрати структуру логістичних каналів, що найкраще відповідає цілям компанії. Як впливає з наведеного вище аналізу, оптимальний вибір структури залежить від низки критеріїв, серед яких мінімізація витрат, зниження ризиків та забезпечення високої швидкості постачання. Завдання полягає у створенні чітких правил вибору структури, що забезпечать максимальний ефект під заданий набір умов.

Мінімізація ризиків для виконання замовлень з виробництва БПЛА в умовах військових дій є критично важливим фактором, оскільки ризики можуть бути зумовлені залежністю від одного постачальника, перебоями в постачаннях, затримками через посередників або проблемами в управлінні запасами. Більша кількість етапів у логістичному процесі підвищує ймовірність відмов. Пряма структура постачання має менше учасників, що робить її ефективною за швидкістю, але більш вразливою до перебоїв. Натомість диверсифікована мережа з кількома постачальниками та замовниками дає змогу скоротити ризики, хоча й ускладнює управління.

Мінімізація витрат є не менш важливим критерієм, адже вартість організації логістики залежить від обраної моделі. Пряма модель є найменш витратною, оскільки не потребує посередників чи складських приміщень, але підвищує залежність від окремих контрагентів. Більш складні моделі з кількома постачальниками чи збутовими каналами знижують ризики, але потребують додаткових витрат на координацію. Залучення посередників або складських приміщень може оптимізувати транспортування та забезпечити наявність запасів, проте супроводжується додатковими витратами.

Швидкість постачання та збуту є особливо важливою для підприємств, що працюють у динамічному конкурентному середовищі або мають обмеження за часом. Пряма структура є найбільш ефективною щодо швидкості, оскільки мінімізує кількість етапів у логістичному ланцюгу, скорочуючи час доправлення. Водночас використання складських приміщень чи зовнішніх посередників може сприяти утриманню запасів і оптимізації транспортування, але спричиняє складність у координації.

Вибір структури логістичного каналу має базуватися на пріоритетах підприємства. Якщо основна мета – зниження витрат за мінімальних ризиків, тоді доцільним вибором може бути мережа з кількома постачальниками та одним замовником або безпосередній зв'язок без посередників. Це допомагає уникнути зайвих витрат на координацію, хоча потребує ефективного управління логістичними процесами.

Якщо підприємство прагне до гнучкості та масштабованості, оптимальним варіантом є мережа з кількома постачальниками й замовниками. Така модель сприяє диверсифікації ризиків, проте потребує більшої координації та фінансових ресурсів. Вона ефективна для компаній з великими обсягами

постачання та потребою швидкого реагування на зміни ринку.

Для забезпечення максимальної швидкості постачання та збуту найкращою є пряма структура постачання. Це дає змогу мінімізувати час доправлення, проте підвищує залежність від ключових контрагентів. У разі необхідності зменшення навантаження на логістичну інфраструктуру можна розглянути варіант із залученням посередників, що оптимізує транспортування та знижує витрати на утримання складів. Водночас необхідно зважати на можливу залежність від зовнішніх операторів.

Компаніям, що прагнуть забезпечити максимальний контроль над логістикою та мінімізувати ризики затримок, доцільно впроваджувати інтегровані технології, такі як ERP, TMS чи WMS. Вони дають змогу автоматизувати управління запасами, транспортуванням і координацією, зменшуючи ймовірність помилок. Проте їх упровадження потребує значних фінансових і ресурсних вкладень.

Загалом, вибір логістичної структури залежить від стратегічних цілей підприємства: зниження ризиків, мінімізації витрат, швидкості постачання. Рішення необхідно приймати, зважаючи на ринкові умови та здатність компанії адаптуватися до змін. Узагальнена процедура вибору подана у вигляді дерева на рис. 8.

Зазначимо, що критерії масштабованості та гнучкості управління (див. табл. 1) не є стратегічними цілями виробництва. Вони розглядаються як умови, тобто є обмеженнями в постановці багатокритеріальної задачі.

Зазначимо, що на рис. 8 стратегічні цілі підприємства (другий рівень дерева) є основними критеріями, за якими обирається множина допустимих структур третього рівня. Для вибору переважної структури з визначеної множини можна застосовувати низку додаткових обмежень, якими є умови замовника для постачання продукції, а також виробничі обмеження підприємства.

Подано варіанти формалізованої задачі вибору раціональної структури. Запропонуємо такі позначки: s_i – варіанти видів логістичних структур, $s_i \in S, i = \overline{1, n}$; $W(s_i)$ – оцінка логістичних витрат у структурі s_i ; $T(s_i)$ – оцінка часу доправлення в структурі s_i ; $R(s_i)$ – оцінка ризику доправлення в структурі s_i .

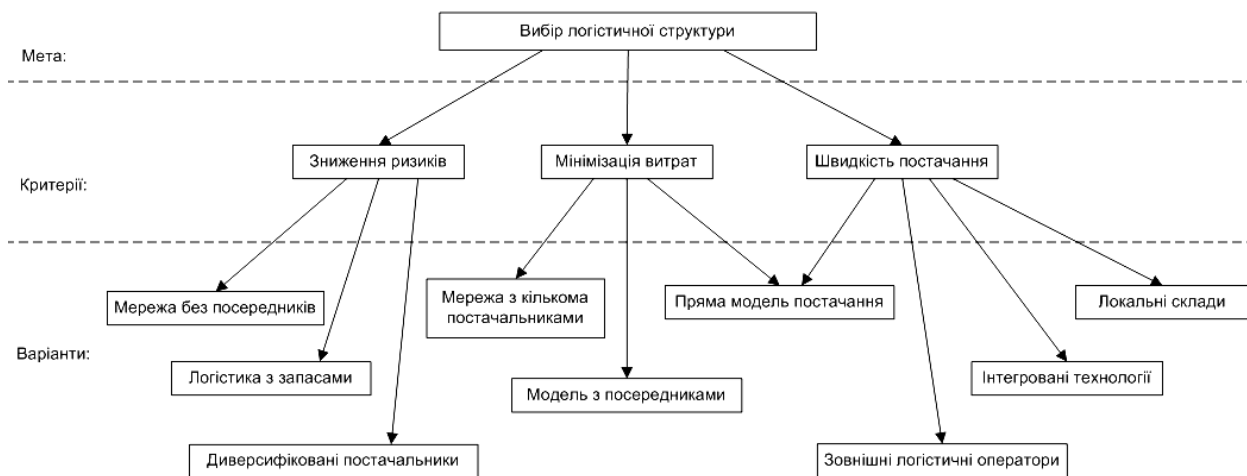


Рис. 8. Дерево вибору логістичної структури з огляду на стратегічні цілі підприємства

1. Стратегічна мета підприємства – мінімізація логістичних витрат, тоді правило вибору переважного варіанта:

$$s^o = \arg \min_{s_i \in S} W(s_i), \quad T(s^o) \leq T^*, \quad R(s^o) \leq R^*, \quad (4)$$

де T^* – максимально допустимий час доправлення;

R^* – максимально допустимий ризик доправлення.

2. Стратегічна мета підприємства – мінімізація часу доправлення, тоді правило вибору переважного варіанта:

$$s^o = \arg \min_{s_i \in S} T(s_i), \quad W(s^o) \leq W^*, \quad R(s^o) \leq R^*, \quad (5)$$

де W^* – максимально допустимі логістичні витрати.

3. Стратегічна мета підприємства – мінімізація ризиків доправлення, тоді правило вибору переважного варіанта:

$$s^o = \arg \min_{s_i \in S} R(s_i), \quad W(s^o) \leq W^*, \quad T(s^o) \leq T^*. \quad (6)$$

На рівні попереднього планування логістичної структури немає змоги застосувати кількісні оцінки логістичних параметрів (часу, витрат, ризиків) і формалізоване подання задачі. Тому переважна структура обирається неформалізовано способом послідовного вибору умов і відхилення варіантів, які їх не задовольняють.

Висновки

Під час дослідження розглянуто основні методи й технології оптимізації логістичних процесів на прикладі постачання комплектування для БПЛА. Особливу увагу приділено вибору постачальників,

управлінню маршрутами постачання та оцінюванню ризиків, які є критичними для забезпечення ефективності логістичних операцій у цій сфері.

Для різних класів БПЛА узагальнено основні види комплектувальних елементів, кожен з яких відіграє важливу роль у забезпеченні їх ефективності, безпеки та стабільності роботи. Аналіз можливих постачальників комплектування продемонстрував варіантність множини постачальників, а звідси й множину та різноманітність можливих структур постачання. Формування й аналіз основних видів логістичних структур дали змогу сформувати низку критеріїв для оцінювання їх недоліків і переваг. Сформовано дерево вибору логістичної структури з огляду на стратегічні цілі підприємства (зменшення витрат, часу та ризиків доправлення). Сформульовано узагальнену задачу багатокритеріального вибору логістичної структури. Наведено три варіанти математичних моделей для застосування методу основного критерію відповідно до стратегічних цілей підприємства.

Результати дослідження продемонстрували значний потенціал для вдосконалення логістичних стратегій у сфері безпілотних систем. Упровадження запропонованих моделей сприятиме вдосконаленню логістичних стратегій у сфері виробництва БПЛА щодо зниження часу доправлення (відповідно до визначеного ритму виробництва) та мінімізації ризиків в умовах воєнного періоду.

Напрямом подальших досліджень є розроблення моделей оптимізації на комбінованих структурах постачання та збуту.

Список літератури

1. Чирак, М. Шляхи підвищення бойових спроможностей військових частин за рахунок оптимізації застосування ударних БПЛА. *Повітряна міць України*, № 1(6), 2024, С. 99–104. DOI: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-99-104>
2. Корсунов, С. І., Волков, А. Ф., Оборонов, М. І., Орехов, С. В., Гуртовенко, В. В., Федченко, С. І. Трансформація завдань безпілотної авіації: від створення до застосування у воєнних конфліктах сучасності. *Наука і техніка Повітряних Сил ЗСУ*, № 3(44), 2021, С. 66–81. DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.44.08>
3. Muha, R. An Overview of the Problematic Issues in Logistics Cost Management. *Pomorstvo*, Vol. 33, No. 1, 2019, P. 102–109. DOI: <https://doi.org/10.31217/p.33.1.11>
4. Skerlic, S. Factors that influence logistics decision making in the supply chain of the automotive industry. *Transport Problems*, Vol. 15, No. 3, 2020, P. 117–126. DOI: <https://doi.org/10.21307/tp-2020-038>
5. Завадська, О., Місюкевич, В., Сисосєв, В. В. Оптимізація ланцюга постачань у комерційній логістиці: вплив на ефективність та прибутковість. *Вісник Хмельницького національного університету*, 322(5), 2023. С. 234–241. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2023-322-5-39>
6. Fedorovich, O., Pronchakov, Y., Leshchenko, Y., Yelizieva, A. Using of the component method in logistics of supplies of high-tech production components. *Advanced Information Systems*, No. 5(3), 2021, P. 40–45. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.06>
7. Mahat, D., Niranjan, K., Naidu, C. S. K. V. R., Babu, S. B. G. T., Kumar, M. S., N. L. AI-Driven Optimization of Supply Chain and Logistics in Mechanical Engineering, *10th IEEE UPCON, Gautam Buddha Nagar, India*, 2023, P. 1611–1616. DOI: <https://doi.org/10.1109/UPCON59197.2023.10434905>
8. Крикавський, Є. В., Якимишин, Л. Я. Компліментарність стратегій маркетингу та логістики в ланцюгу поставок товарів повсякденного попиту. *Маркетинг і цифрові технології*, Т. 2, № 1, 2018. С. 21–32. DOI: <https://doi.org/10.15276/mdt.2.1.2018.2>
9. Rybakov, D. S. A process model of a logistics system as a basis for optimisation programme implementation. *Int. J. of Logistics Research and Applications*, Vol. 21, No. 1, 2018, P. 72–93. DOI: <https://doi.org/10.1080/13675567.2017.1361910>
10. Ковтун, В. В., Ворона, М. В., Михелєв, І. Л. Алгоритм управління асортиментом та прогнозування рівня товарних запасів. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, № 4, 2024. С. 75–91. DOI: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.4.7>
11. Onukwulu, E. C., Agho, M. O., Eyo-Udo, N. L. Developing a framework for AI-driven optimization of supply chains in energy sector. *Global Journal of Advanced Research and Reviews*, Vol. 1, No. 2, 2023, P. 82–101. DOI: <https://doi.org/10.58175/gjarr.2023.1.2.0064>
12. Ahmed, A., Rahman, S., Islam, M., Chowdhury, F., Badhan, I. A. Challenges and Opportunities in Implementing Machine Learning For Healthcare Supply Chain Optimization. *Int. Journal of Business and Management Sciences*, Vol. 3, No. 7, 2023, P. 6–31. DOI: <https://doi.org/10.55640/ijbms-03-07-02>
13. Cherchata, A., Popovychenko, I., Andrusiv, U., Shkurovatskyi, O. Innovations in logistics management as a direction for improving logistics activities. *Management Systems in Production Engineering*, Vol. 30, No. 1, 2022, P. 9–17. DOI: <https://doi.org/10.2478/mspe-2022-0002>
14. Hong, J., Zhang, Y., Ding, M. Sustainable supply chain management practices, dynamic capabilities, and enterprise performance. *J. of Cleaner Production*, Vol. 172(2). 2017, P. 3508–3519. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.093>
15. Samant, S., Dey, K. Blockchain technology adoption, architecture, and sustainable agri-food supply chains. *J. of Cleaner Production*, Vol. 284, 2021, 124731. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124731>
16. Olson, D. L., Wu, D. Enterprise risk management in supply chains. In: *Enterprise Risk Management Models*, 2023, P. 1–14. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-68038-4_1
17. Hashemi, S. R., Arasteh, A., Paydar, M. M. Risk Management of Disruption and Sustainable Development of Supply Chains. *Interdisciplinary J. of Management Studies*, No. 16(1), 2023, P. 277–297. DOI: <https://doi.org/10.22059/ijms.2022.329830.674732>
18. Завербний, А. С., Ломага, Ю. Р. Проблеми та перспективи формування логістичних ланцюгів постачання у воєнний період. *Економіка та суспільство*, № 45. 2022. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-45-23>
19. Крюченков, О. І., Морозова, О. І., Нікітіна, Т. С. Мобільні логістичні та моніторингові системи на базі роїв БПЛА. *Системи управління, навігації та зв'язку*, № 4, 2024, С. 96–102. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.4.096>
20. Артюх, Р. В., Малєєва, О. В. Структурні та параметричні моделі вибору та оцінки варіантів технологічного розвитку соціотехнічної системи. *Математичні моделі та новітні технології управління економічними та технічними системами*, 2017. С. 302–314. URL: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/b55000b9-9782-4244-b1be-9930e7419da8/content>

21. Fahlstrom, P. G., Gleason, T. J., Sadraey, M. H. *Introduction to UAV Systems*. Wiley, 2022. URL: <https://gnindia.dronacharya.info/ME/Common-Subjects-8th-Sem/Downloads/FUNDAMENTALS-OF-DRONE-TECHNOLOGY/Books/FUNDAMENTALS-OF-DRONE-TECHNOLOGY-text-book-4.pdf>
22. Vasić, Z., Maksimović, S., Georgijević, D. Applied Integrated Design in Composite UAV Development. *Applied Composite Materials*, Vol. 25, 2018, P. 221–236. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10443-017-9611-y>
23. Chiang, A.-H., Huang, M.-Y. Demand-pull vs supply-push strategy: org. structure, supply chain integration and response. *J. of Manufacturing Technology Management*, Vol. 32, No. 8, 2021, P. 1493–1514. DOI: <https://doi.org/10.1108/JMTM-08-2020-0324>
24. Мороз, М., Загорянський, В., Гайкова, Т., Кузев, І. Використання методів дослідження операцій для оптимізації перевезень. *Вісник ХТУ "ХПІ"*, № 1(11), 2022, С. 44–50. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2022.01.07>
25. Ламберт, Д. М., Купер, М. С. Supply Chain Management: Implementation Issues and Research Opportunities. *Int. J. of Logistics Management*, 2000, Vol. 11, No. 2, P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1108/09574099810805807>
26. Гірна, О. Б., Кобилюх, О. Я. До питання функціонування ланцюга постачання в аспекті аутсорсингу. *Економічний простір*, 2023, № 187, С. 91–96. DOI: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/187-15>
27. Загурський, О. М. Аналіз ефективності транспортних процесів у ланцюгах постачань. *Machinery & Energetics*, Vol. 9, No. 4, 2018, С. 43–48. DOI: <https://doi.org/10.31548/me2018.04.043>
28. Polusmiak, Y., Pavliuk, T., Kosach, I. Project management in the construction industry: logistics optimisation. *Management and Entrepreneurship Trends of Development*, Vol. 4(30), 2024, P. 69–78. DOI: <https://doi.org/10.26661/2522-1566/2024-4/30-06>
29. Горпенко, Д. Р., Болтунков, В. О. Порівняльний аналіз методів розв'язання оперативних задач транспортної логістики. *Інформатика та мат. методи в моделюванні*, Т. 13, № 1–2, 2023, С. 34–47. DOI: <https://doi.org/10.15276/imms.v13.no1-2.34>

References

1. Chyrak, M. (2024), "Ways to improve the combat capabilities of military units through optimizing the use of strike UAVs". *Povitrjana Mic Ukrainy*, no. 1(6), P. 99–104. DOI: <https://doi.org/10.33099/2786-7714-2024-1-6-99-104>
2. Korsunov, S. I., Volkov, A. F., Oboronov, M. I., Oriekhov, S. V., Hurtovenko, V. V., Fedchenko, S. I. (2021), "Transformation of unmanned aviation tasks: from creation to application in modern armed conflicts". *Science and Technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*, No. 3(44), P. 66–81. DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.44.08>
3. Muha, R. (2019), "An overview of the problematic issues in logistics cost management". *Pomorstvo*, Vol. 33, No. 1, P. 102–109. DOI: <https://doi.org/10.31217/p.33.1.11>
4. Skerlic, S. (2020), "Factors that influence logistics decision making in the supply chain of the automotive industry". *Transport Problems*, Vol. 15, No. 3, P. 117–126. DOI: <https://doi.org/10.21307/tp-2020-038>
5. Zavadzka, O., Misyukevych, V., Sysioev, V. V. (2023). "Optimization of the supply chain in commercial logistics: impact on efficiency and profitability". *Bulletin of the Khmelnytskyi National University*. 322(5), С. 234–241. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2023-322-5-39>
6. Fedorovich, O., Pronchakov, Y., Leshchenko, Y., Yelizieva, A. (2021), "Using of the component method in logistics of supplies of high-tech production components". *Advanced Information Systems*, No. 5(3), P. 40–45. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.06>
7. Mahat, D., Niranjana, K., Naidu, C. S. K. V. R., Babu, S. B. G. T., Kumar, M. S., N. L. (2023), "AI-driven optimization of supply chain and logistics in mechanical engineering". *2023 10th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering (UPCON)*, Gautam Buddha Nagar, India, P. 1611–1616. DOI: <https://doi.org/10.1109/UPCON59197.2023.10434905>
8. Krykavskiy, Ye. V., Yakymyshyn, L. Ya. (2018), "Complementarity of marketing and logistics strategies in the supply chain of consumer goods". *Marketing and Digital Technologies*, Vol. 2, No. 1, P. 21–32. DOI: <https://doi.org/10.15276/mdt.2.1.2018.2>
9. Rybakov, D. S. (2018), "A process model of a logistics system as a basis for optimisation programme implementation". *International Journal of Logistics Research and Applications*, Vol. 21, No. 1, P. 72–93. DOI: <https://doi.org/10.1080/13675567.2017.1361910>
10. Kovtun, V. V., Vorona, M. V., Mikhelev, I. L. (2024), "Algorithm for assortment management and forecasting of stock levels". *Tavriya Scientific Bulletin. Series: Technical Sciences*, No. 4. P. 375–91. DOI: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.4.7>
11. Onukwulu, E. C., Agho, M. O., Eyo-Udo, N. L. (2023), "Developing a framework for AI-driven optimization of supply chains in energy sector". *Global Journal of Advanced Research and Reviews*, Vol. 1, No. 2, P. 82–101. DOI: <https://doi.org/10.58175/gjarr.2023.1.2.0064>

12. Ahmed, A., Rahman, S., Islam, M., Chowdhury, F., Badhan, I. A. (2023), "Challenges and opportunities in implementing machine learning for healthcare supply chain optimization: A data-driven examination". *International Journal of Business and Management Sciences*, Vol. 3, No. 7, P. 6–31. DOI: <https://doi.org/10.55640/ijbms-03-07-02>
13. Cherchata, A., Popovychenko, I., Andrusiv, U., Shkuropatskyi, O. (2022), "Innovations in logistics management as a direction for improving the logistics activities of enterprises". *Management Systems in Production Engineering*, Vol. 30, No. 1, P. 9–17. DOI: <https://doi.org/10.2478/mspe-2022-0002>
14. Hong, J., Zhang, Y., Ding, M. (2017), "Sustainable supply chain management practices, supply chain dynamic capabilities, and enterprise performance". *Journal of Cleaner Production*, Vol. 172, No. 2. P. 3508–3519. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.093>
15. Samant, S., Dey, K. (2021), "Blockchain technology adoption, architecture, and sustainable agri-food supply chains". *Journal of Cleaner Production*, Vol. 284, 124731. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124731>
16. Olson, D. L., Wu, D. (2023), "Enterprise risk management in supply chains". In: *Enterprise Risk Management Models*, P. 1–14. DOI: 10.1007/978-3-662-68038-4_1
17. Hashemi, S. R., Arasteh, A., Paydar, M. M. (2023), "Risk management of disruption and sustainable development of supply chains". *Interdisciplinary Journal of Management Studies*, Vol. 16, No. 1, P. 277–297. DOI: <https://doi.org/10.22059/ijms.2022.329830.674732>
18. Zaverbnyi, A. S., Lomaha, Y. R. (2022), "Problems and prospects of forming supply chains during wartime under the conditions of European integration". *Economy and Society*, No. 45. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-45-23>
19. Kryuchenkov, O. I., Morozova, O. I., Nikitina, T. S. (2024), "Mobile logistics and monitoring systems based on UAV swarms: challenges and development directions". *Control, Navigation and Communication Systems*, No. 4, P. 96–102. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2024.4.096>
20. Artiukh, R. V., Malyeyeva, O. V. (2017), "Structural and parametric models for selection and evaluation of technological development options of socio-technical systems". In: *Mathematical Models and Modern Technologies for Managing Economic and Technical Systems*. P. 302–314. available at: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/b55000b9-9782-4244-b1be-9930e7419da8/content>
21. Fahlstrom, P. G., Gleason, T. J., Sadraey, M. H. (2022), Introduction to UAV Systems. Wiley, available at: <https://gnindia.dronacharya.info/ME/Common-Subjects-8th-Sem/Downloads/FUNDAMENTALS-OF-DRONE-TECHNOLOGY/Books/FUNDAMENTALS-OF-DRONE-TECHNOLOGY-text-book-4.pdf>
22. Vasić, Z., Maksimović, S., Georgijević, D. (2018) "Applied integrated design in composite UAV development". *Applied Composite Materials*, Vol. 25, P. 221–236. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10443-017-9611-y>
23. Chiang, A.-H., Huang, M.-Y. "Demand-pull vs supply-push strategy: the effects of organizational structure on supply chain integration and response capabilities". *Journal of Manufacturing Technology Management*, 2021, Vol. 32, No. 8, P. 1493–1514. DOI: <https://doi.org/10.1108/JMTM-08-2020-0324>
24. Moroz, M., Zahoryanskyi, V., Haikova, T., Kuzev, I. (2022), "Using operations research methods to optimize bulk cargo transportation in the agro-industrial complex". *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New Solutions in Modern Technologies*, No. 1(11), P. 44–50. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2022.01.07>
25. Lambert, D. M., Cooper, M. S. (2000), "Supply chain management: Implementation issues and research opportunities". *International Journal of Logistics Management*, Vol. 11, No. 2, P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1108/09574099810805807>
26. Hirna, O. B., Kobyliukh, O. Ya. (2023), "On the functioning of the supply chain in the context of outsourcing and logistics operators". *Economic Space: Collected Scientific Works*, No. 187, P. 91–96. DOI: <https://doi.org/10.32782/2224-6282/187-15>
27. Zahurskyi, O. M. (2018), "Analysis of transport process efficiency in supply chains". *Machinery Energetics. Journal of Rural Production Research*, Vol. 9, No. 4, P. 43–48. DOI: 10.31548/me2018.04.043
28. Polusmiak, Yu. I., Pavliuk, T. S., Kosach, I. (2024), "Project management in the construction industry: identifying logistics problems and ways to optimise them". *Management and Entrepreneurship Trends of Development*, Vol. 4, No. 30, P. 69–78. DOI: <https://doi.org/10.26661/2522-1566/2024-4/30-06>
29. Horpenko, D. R., Boltonkov, V. O. (2023), "Comparative analysis of methods for solving operational problems in transport logistics". *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*, Vol. 13, No. 1–2, P. 34–47. DOI: <https://doi.org/10.15276/imms.v13.no1-2.34>

Надійшла (Received) 03.01.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Полупан Юрій Володимирович – аспірант, Національний аерокосмічний університет, кафедра комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Харків, Україна; e-mail: yuriypolupan6@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0009-3030-8448>

Малєєва Ольга Володимирівна – доктор технічних наук, професор, Національний аерокосмічний університет, професор кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Харків, Україна; e-mail: o.maleyeva@khai.edu; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9336-4182>

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

Malayeva 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 FOR SELECTING A RATIONAL SUPPLY STRUCTURE OF COMPONENTS FOR UAV MANUFACTURING UNDER RISK CONDITIONS, CONSTRAINED LOGISTICS COSTS AND TIME LIMITATIONS

The subject of this paper is logistics structures used to ensure the supply of components for the production of unmanned aerial vehicles (UAVs). **The goal** of the article is to improve the efficiency of supply of components for UAV production through the selection of a rational logistics structure. The following **tasks** are addressed: to analyze the peculiarities of the formation of the logistic structure of supply of components of the UAV production; to form a set of logistics supply structures options and criteria for their evaluation; and to develop mathematical models for the multicriteria selection of a logistics structure. **The methods** used include data analysis and generalization, structural variant synthesis and the main criterion method. The following **results** were obtained according to the objectives. The main types of component elements were generalized for different UAV classes. The analysis of potential component suppliers revealed a variety of choices, which determines the diversity and heterogeneity of possible supply structures. The formation and analysis of the main types of logistics structures made it possible to define a set of criteria for evaluation their advantages and disadvantages. A comparative analysis of various logistics structures of the enterprise is conducted, highlighting their key characteristics based on the main criteria such as minimal risk, cost efficiency, delivery speed, scalability, and flexibility in crisis conditions. A decision tree for the selection of logistics structure, considering the strategic goals of the enterprise (such as minimizing cost, delivery time, or logistics risks), was developed. A generalized multicriteria decision-making problem was formulated using the main criterion method. Three formalized models of the problem of selecting a rational logistics structure were discussed. **Conclusions:** The results of the study can be applied to improve logistics strategies in the field of UAV manufacturing, particularly in reducing delivery time (according to the established production rhythm) and minimizing risks during wartime conditions. Further research will focus on developing optimization models for combined supply and distribution structures.

Keywords: logistics structure; supplier selection; UAV production; supply routes; risks; supply chains; multicriteria selection; cost minimization; main criterion method.

Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions

Полупан Ю. В., Малєєва О. В. Моделі вибору раціональної структури постачання комплектів для виробництва БПЛА в умовах ризику, обмежених логістичних витрат і часу. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2025. № 3 (33). С. 111–125. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.3.111>

Polupan, Y., Malayeva, O. (2025), "Models for selecting a rational supply structure of components for UAV manufacturing under risk conditions, constrained logistics costs and time limitations", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 3 (33), P. 111–125. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.3.111>