

УДК 005.963.1:629.7.-027.3

doi: 10.32620/aktt.2026.4.08

О. Є. ФЕДОРОВИЧ, О. В. МАЛЄЄВА, О. С. ГУБКА, А. В. ПОПОВ, Т. С. ПІСКЛОВА

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ДОВГИХ ЛОГІСТИЧНИХ ЛАНЦЮГІВ ПОСТАЧАННЯ ДЛЯ МАСОВОГО ВИРОБНИЦТВА АВІАЦІЙНИХ БЕЗПІЛОТНИХ КОМПЛЕКСІВ В УМОВАХ ЗРОСТАННЯ ВПЛИВУ ЗАГРОЗ

Предметом дослідження публікації є розробка комплексу логічно пов'язаних моделей, які дозволять обґрунтувати логістику довгих ланцюгів постачання комплектуючих для масованого, масштабованого виробництва високотехнологічних виробів (авіаційних безпілотних комплексів), в різноманітному транспортному середовищі (автомобільному, залізничному, морському та інших видів транспорту). **Метою** дослідження є підтримка масового виробництва сучасних авіаційних безпілотних комплексів (АБК) необхідною кількістю комплектуючих за рахунок моделювання та обґрунтування складу виробників комплектуючих і логістичних ланцюгів постачання в умовах зростання впливу загроз. **Завдання**, які необхідно вирішити: розробити модель вибору та формування складу постачальників комплектуючих; провести моделювання процесу створення запасів комплектуючих; розробити модель для обґрунтування складу видів транспорту для постачання масованого виробництва АБК; промоделювати вплив уразливостей на довгі ланцюги постачання. Використані **математичні методи та моделі**: системний аналіз для дослідження логістики постачання в довгих транспортних ланцюгах; цілочисельне (булеве) програмування для пошуку раціональних рішень у множині можливих варіантів постачання; багатокритеріальна оптимізація для пошуку компромісу серед логістичних показників (витрати, часу, ризиків); теорія комбінаторного аналізу для оцінки та генерування можливих варіантів постачання комплектуючих. **Отримано наступні результати**: запропоновано комплекс моделей для обґрунтування логістики постачання комплектуючих у масовому, масштабованому виробництві АБК, в умовах довгих ланцюгів постачання, обмеженості часу та ресурсів і зростання впливу загроз. **Новизна** запропонованого підходу полягає в науковому обґрунтуванні планів постачання комплектуючих у різноманітному транспортному середовищі для масового виробництва АБК за рахунок створення комплексу логічно пов'язаних оптимізаційних моделей.

Ключові слова: логістика постачання, довгі ланцюги постачання, масове виробництво; високотехнологічні вироби, вплив загроз, оптимізаційні моделі, вибір раціональних варіантів, багатокритеріальна оптимізація.

1. Вступ

Масованість використання авіаційних безпілотних комплексів (АБК) є одним із чинників успіху в проведенні військових місій [1]. Інноваційність технологічних розробок сучасної зброї призвела до зміни характеру військових дій та використання нових стратегій і тактик на полі бою, які пов'язані з ефективністю АБК [2]. Відносна дешевизна АБК дозволяє проводити масовані атаки по вартісним цілям противника, що сприяє успіху у військових місіях [3]. Але для проведення активних бойових дій у повітрі та на землі необхідно сформувати розподілену виробничу структуру для масового виробництва різних видів АБК в умовах особливого стану країни. Складність цього завдання пов'язана з необхідністю формування безперебійної логістики постачання комплектуючих з різних віддалених місць виробництва.

Труднощі постачання спричинені довгими логістичними ланцюгами в різноманітному транспортному середовищі та збільшенням впливу загроз різного характеру (політико-економічних, кліматичних, терористичних, військових).

Таким чином, можна зробити висновок про актуальність запропонованого дослідження, в якому створюється комплекс логічно пов'язаних моделей для аналізу та планування логістики постачання й гарантованого забезпечення масового виробництва АБК в умовах зростання впливу загроз.

1.1. Мотивація дослідження

Складність постачання комплектуючих для масового виробництва АБК пов'язана, у першу чергу, з виникненням довгих логістичних ланцюгів, різноманітністю використовуваних транспортних мереж та впливу великої кількості загроз [4].



Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International

Виникає проблемне питання щодо планування руху комплектуючих та формування необхідної множини постачальників-виробників, а також створення потрібних запасів комплектуючих для масштабованого виробництва АБК військового призначення. «Масштабованість (scaling up) виробництва українських дронів та ракет» - це один з основних пріоритетів та критичних потреб України, як зазначено М. Федоровим [5]. В даному контексті масштабованість визначає плановане нарощення виробництва на сукупності розподілених підприємств.

Це визначає актуальність створення комплексу логічно пов'язаних моделей, які дозволяють обґрунтувати можливі дії щодо налагодження постачання комплектуючих для виробництва АБК в умовах особливого стану країни. Таким чином, забезпечується плановість і гарантованість випуску необхідної кількості та видів АБК військового призначення, що сприятиме становленню військового паритету сил, підвищенню обороноздатності країни в нових умовах проведення війни на виснаження ресурсів.

1.2. Аналіз існуючих досліджень

На сучасній фазі військового протистояння підвищення бойової активності противника призвело до необхідності планування контрзаходів у вигляді масованих ройових атак дронів по цілям противника [5]. Для проведення атакуючих місій необхідно мати потрібну множину дронів (ударних, розвідувальних, перехоплювачів тощо), які забезпечать зупинку наступальних дій противника та дадуть можливість перехопити військову ініціативу на полі бою.

Проведемо короткий аналіз проблем, які виникли при створенні масованого виробництва АБК військового призначення:

1. Вплив інновацій на зміну існуючої множини комплектуючих авіаційних безпілотних комплексів та на потрібність налагодження їх виробництва.

У статті [6] показано, що впровадження адитивних технологій змінює традиційну номенклатуру авіаційних комплектуючих, оскільки значна частина деталей може виготовлятися локально за цифровими моделями. Результати дослідження обґрунтовують доцільність налагодження власного виробництва компонентів безпілотних комплексів для підвищення їхньої автономності та стійкості. Автори огляду [7] наголошують, що забезпечення технологічної незалежності та масштабування виробництва компонентів стають ключовими факторами розвитку сучасних безпілотних авіаційних комплексів. Поява модульних архітектур призводить до постійної зміни складу комплектуючих і потребує швидкої адаптації виробничих процесів.

2. Формування необхідного складу постачальників комплектуючих, з урахуванням їх потужностей і ланцюгів постачання.

У статті [8] проведено аналіз можливих постачальників комплектуючих БПЛА. Порівняння різних логістичних структур постачання розкриває їх особливості в контексті ключових критеріїв, таких як мінімальний ризик та витрати, швидкість постачання, масштабованість і гнучкість у кризових ситуаціях. Автори роботи [9] запропонували методику формування складу постачальників для аерокосмічної та оборонної галузей на основі багатокритеріальних методів АНР, TOPSIS і SECA. При виборі постачальників враховуються не лише вартість і якість продукції, а й виробничі потужності, технологічний рівень, надійність ланцюгів постачання.

3. Довгі ланцюги постачання в різноманітному транспортному середовищі, які впливають на час, витрати та ризики постачання.

У статті [10] досліджено ланцюги постачання, в яких вантажі переміщуються різними видами транспорту, а маршрути формуються в мультимодальному середовищі. Автори розробили математичну модель, що дозволяє одночасно враховувати час доставки, транспортні витрати та обмеження пропускної здатності логістичної мережі. У статті [11] розглянуто проблему управління мультимодальними перевезеннями в часово-змінних транспортних мережах, де поєднуються автомобільний, залізничний та морський транспорт. Результати дослідження підтверджують, що оптимізація маршрутів у різноманітних транспортних системах дає змогу знизити ризики та підвищити ефективність постачання.

4. Складнощі щодо створення необхідних запасів комплектуючих у короткий час, потрібний для масового виробництва АБК.

Автори статті [12] показали, що масове виробництво БПЛА критично залежить від обмеженої кількості постачальників вуглецевого волокна, літєвих акумуляторів, мікросхем і рідкоземельних матеріалів. Підкреслено, що виробничі потужності для багатьох компонентів неможливо швидко наростити, і це створює «вузькі місця» під час різкого збільшення випуску дронів. Стаття [13] аналізує труднощі оборонного виробництва, пов'язані з масштабуванням випуску продукції та забезпеченням необхідних запасів матеріалів і комплектуючих. Особлива увага приділяється проблемам інтеграції даних, управління ризиками та цифровізації постачання в умовах швидкого зростання виробництва.

5. Створення розподіленої мережі підприємств, що забезпечить масштабованість виробництва АБК.

Робота [14] досліджує функціонування розподілених виробничих мереж, побудованих на основі те-

хнологій адитивного виробництва. Показано, що взаємодія декількох виробничих центрів дозволяє скоротити час виконання замовлень і забезпечити швидке масштабування виробництва. У статті [15] проаналізовано принципи побудови стійких інтелектуальних виробничих систем, здатних функціонувати в умовах зовнішніх загроз і порушення ланцюгів постачання. Застосування цифрових технологій і міжзаводської кооперації забезпечує можливість швидкого виробництва складної техніки.

6. Поява та поширення вразливостей у логістичних ланцюгах комплектуючих. Ці вразливості активно використовує противник в якості цілей для здійснення атакуючих місій.

У статті [16] визначено ключові фактори вразливості виробничих ланцюгів постачання, зокрема надмірну концентрацію постачальників, інформаційну непрозорість і залежність від глобальних логістичних мереж. Отримані результати можна використати для аналізу способів, за допомогою яких противник здатний використовувати слабкі місця логістичних систем. Автори роботи [17] показали, що навіть локальні порушення можуть викликати системні наслідки через взаємозалежність маршрутів і постачальників. Підтверджено, що противник може використовувати наявні вразливості логістичних мереж для дестабілізації постачання.

7. Мінімізація витрат на постачання через довгі логістичні ланцюги та зростання вартості енергоресурсів.

У роботі [18] досліджено вплив коливань цін на енергоносії на глобальні логістичні ланцюги та витрати на транспортування. Для мінімізації витрат запропоновано використання «зелених» технологій, підвищення енергоефективності та адаптивних логістичних стратегій. Стаття [19] присвячена комплексній оптимізації транспортних витрат у морських ланцюгах постачання з урахуванням паливних витрат, часу перевезення та фінансових факторів. Автори продемонстрували, що інтегроване планування маршрутів і застосування цифрових технологій дозволяють суттєво знизити сукупні логістичні витрати.

8. Особливості довгих транспортних ланцюгів, витрат, часу на постачання комплектуючих для масованого виробництва високотехнологічних виробів (АБК).

У статті [20] досліджено вплив затримок у глобальних ланцюгах постачання на час доставки, витрати та дефіцит комплектуючих у високотехнологічних галузях. Показано, що збільшення тривалості транспортування та невизначеність постачання призводять до зростання цін, накопичення запасів і виникнення перебоїв у виробництві. Автори роботи [21] зазначили, що зростання геополітичних загроз, тран-

спортних ризиків і дефіциту електронних компонентів істотно ускладнюють масштабування виробництва. Для зниження витрат і скорочення часу постачання пропонується диверсифікація постачальників, створення регіональних виробничих мереж і формування стратегічних запасів компонентів.

Це неповний перелік проблем постачання комплектуючих для виробництва нових АБК, які продовжують поповнюватись, в умовах зростання політичної напруженості, поширення конфліктів і глобалізації економіки, що вказує на актуальність пошуку нових рішень щодо планування постачання для масового виробництва високотехнологічних виробів у мінливих умовах політико-економічного середовища [22].

Детальний аналіз існуючих підходів щодо логістики постачання комплектуючих для виробництва інноваційної техніки виявив їх недоліки, які було враховано в даній роботі для пошуку нових рішень:

- у більшості публікацій автори розглядають часткові задачі, пов'язані з логістикою постачання для виробництва високотехнологічних виробів [23, 20];
- немає комплексних рішень щодо проблеми аналізу та впливу довгих логістичних ланцюгів на основні показники постачання [24, 25];
- не проведено аналіз труднощів, які виникають при створенні логістичних потоків комплектуючих в умовах обмеженості ресурсів [26];
- при формуванні множини нових постачальників комплектуючих не враховуються в повній мірі їх можливості та логістичні ланцюги постачання, з оцінкою впливу ризиків [27, 28];
- не враховується необхідність перепланування маршрутів постачання внаслідок виникнення загроз у динамічному навколишньому середовищі [28, 25];
- обмежена кількість публікацій щодо проблем та їх вирішення при плануванні постачання в умовах впливу військових загроз [20, 26].

1.3. Мета та структура дослідження

Таким чином, в результаті аналізу проблеми виявлено протиріччя між необхідністю формування потрібної множини виробників комплектуючих з урахуванням логістичних ланцюгів постачання при налагодженні масового виробництва нових АБК, та невідосконаленістю існуючих моделей, які не дозволяють у повній мірі враховувати логістичні особливості постачання комплектуючих в умовах військового стану.

Метою дослідження є підтримка масового виробництва сучасних авіаційних безпілотних комплексів (АБК) необхідною кількістю комплектуючих, за ра-

хунок моделювання та обґрунтування складу виробників комплектуючих і логістичних ланцюгів постачання, в умовах зростання впливу загроз.

У відповідності до поставленої мети дослідження, необхідно розв'язати наступні завдання:

1. Розробити модель обґрунтування складу постачальників комплектуючих для виробництва нових АБК.

2. Створити модель формування запасів комплектуючих для планового масового виробництва АБК в умовах впливу загроз.

3. Розробити модель обґрунтування складу видів транспорту для постачання комплектуючих АБК в довгих ланцюгах постачання.

4. Промоделювати вплив вразливостей на логістичні ланцюги постачання комплектуючих для планування превентивних заходів щодо мінімізації цього впливу.

Стаття побудована наступним чином:

Розділ 2 присвячено формуванню множини постачальників комплектуючих з урахуванням планів масового виробництва АБК.

Розділ 3 пов'язаний зі створенням запасів комплектуючих для розподіленого виробництва АБК.

Розділ 4 присвячено моделюванню та пошуку раціонального складу видів транспорту в різноманітному транспортному середовищі для постачання комплектуючих у виробництві АБК.

Розділ 5 пов'язаний з аналізом вразливостей в логістичних ланцюгах постачання та моделюванню превентивних заходів щодо зменшення їх впливу.

Розділ 6 містить обговорення наукових результатів та їх представлення у вигляді методології, що дозволяє підкреслити значущість проведеного дослідження для практичного застосування.

Розділ 7 завершує статтю підсумовуванням висновків, дає перспективу для подальших досліджень та створення прикладної інформаційної технології планування логістики постачання комплектуючих для масового виробництва високотехнологічної техніки в умовах зростання впливу загроз.

2. Модель обґрунтування складу постачальників комплектуючих для виробництва нових АБК

Інноваційність використання нових АБК, які можуть забезпечити створення військового паритету сил на полі бою, залежить від можливостей їх масового виробництва в умовах особливого стану країни. Але інноваційність АБК дуже впливає на постачання комплектуючих від підприємств-виробників для налагодження масового виробництва. Виникає складне завдання пошуку та обґрунтування множини поста-

чальників комплектуючих з урахуванням їх можливостей та логістичних зв'язків з виробництвом АБК, яке розглядається та розв'язується в цьому розділі. Це завдання передбачає багатоваріантний аналіз можливих постачальників. Для аналізу можливостей виробників-постачальників комплектуючих, враховуючи їх транспортні зв'язки з основним виробництвом АБК будемо використовувати наступні показники:

- потужність виробника-постачальника комплектуючих (P);

- логістичні витрати на постачання комплектуючих (W);

- час постачання комплектуючих (T);

- ризики постачання комплектуючих (R).

Унаслідок багатоваріантності вибору потрібних виробників-постачальників комплектуючих для розв'язання задачі будемо використовувати метод цілочисельного (булевого) програмування, який показав свою ефективність при розв'язанні завдань комбінаторного багатоваріантного аналізу в різних напрямках досліджень (виробництво, логістика, проектування тощо). Введемо булеву змінну x_{jk} , яка приймає такі значення:

$$x_{jk} = \begin{cases} 1, \text{ якщо для } j\text{-го найменування} \\ \text{комплектуючих при створенні} \\ \text{нового АБК} \\ \text{використано } k\text{-й склад} \\ \text{постачальників-виробників;} \\ 0, \text{ в іншому випадку.} \end{cases} \quad (1)$$

Представимо показники (P, W, T, R) у формальному вигляді з використанням змінної x_{jk} :

$$P = \sum_{j=1}^N P_j = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} P_{jk} x_{jk}, \quad (2)$$

де N – номенклатура комплектуючих для виробництва нового АБК;

n_j – кількість можливих варіантів складу постачальників-виробників для виробництва j-го найменування комплектуючих;

P_{jk} – потужність постачальників-виробників j-го найменування комплектуючих з урахуванням їх k-го складу.

$$W = \sum_{j=1}^N W_j = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} w_{jk} x_{jk}, \quad (3)$$

де w_{jk} – логістичні витрати, пов'язані з постачанням комплектуючих j-го найменування від k-го складу постачальників-виробників.

$$T = \sum_{j=1}^N T_j = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} t_{jk} x_{jk}, \quad (4)$$

де t_{jk} – час постачання комплектуючих j -го найменування k -м складом постачальників-виробників комплектуючих.

$$R = \sum_{j=1}^N R_j = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} r_{jk} x_{jk}, \quad (5)$$

де r_{jk} – ризики логістики постачання комплектуючих j -го найменування k -м складом постачальників-виробників.

При формуванні моделей оптимізаційних задач необхідно враховувати обмеження за витратами, часом та ризиками постачання. Розглянемо послідовність розв'язання оптимізаційних задач для пошуку раціонального складу постачальників-виробників комплектуючих в умовах обмеженості ресурсів:

$$1. \quad \max P, P = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} p_{jk} x_{jk}, \quad (6)$$

з урахуванням обмежень:

$$W \leq W', W = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} w_{jk} x_{jk}, \quad (7)$$

де W' – обмеження на логістичні витрати постачання.

$$T \leq T', T = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} t_{jk} x_{jk}, \quad (8)$$

де T' – обмеження щодо часу поставки комплектуючих.

$$R \leq R', R = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} r_{jk} x_{jk}, \quad (9)$$

де R' – обмеження щодо ризику логістики постачання комплектуючих.

$$2. \quad \min W, W = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} w_{jk} x_{jk}, \quad (10)$$

з урахуванням обмежень:

$$P \geq P', P = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} p_{jk} x_{jk}, \quad (11)$$

де P' – мінімальна допустима потужність постачальника-виробника комплектуючих для налагодження планового виробництва нових АБК.

$$T \leq T', T = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} t_{jk} x_{jk}, \quad (12)$$

$$R \leq R', R = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} r_{jk} x_{jk}, \quad (13)$$

$$3. \quad \min T, T = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} t_{jk} x_{jk}, \quad (14)$$

що справедливо для послідовного постачання комплектуючих. Але при можливості паралельного постачання комплектуючих від постачальників-виробників слід використовувати таку цільову функцію:

$$\min \max_j \sum_{k=1}^{n_j} t_{jk} x_{jk}. \quad (15)$$

Необхідно враховувати такі обмеження:

$$P \geq P', P = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} p_{jk} x_{jk}, \quad (16)$$

$$W \leq W', W = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} w_{jk} x_{jk}, \quad (17)$$

$$R \leq R', R = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} r_{jk} x_{jk}, \quad (18)$$

$$4. \quad \min R, R = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} r_{jk} x_{jk}, \quad (19)$$

з урахуванням обмежень:

$$P \geq P', P = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} p_{jk} x_{jk}, \quad (20)$$

$$W \leq W', W = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} w_{jk} x_{jk}, \quad (21)$$

$$R \leq R', R = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} r_{jk} x_{jk}, \quad (22)$$

5. Можлива постановка та розв'язання багатокритеріальної задачі оптимізації. Необхідно знайти компромісне значення для показників P , W , T , R , в умовах обмеженості ресурсів, виділених на постачання комплектуючих. Тому необхідно сформулювати

комплексний показник Q з урахування пріоритетності («ваги») окремих показників:

$$\alpha_P + \alpha_W + \alpha_T + \alpha_R = 1. \quad (23)$$

Необхідно мінімізувати комплексний показник Q для пошуку компромісу серед показників P , W , T , R :

$$\min Q = \alpha_P \hat{P} + \alpha_W \hat{W} + \alpha_T \hat{T} + \alpha_R \hat{R}, \quad (24)$$

де $\hat{P}, \hat{W}, \hat{T}, \hat{R}$ – нормовані значення показників:

$$\begin{aligned} \hat{P} &= \frac{P - P^*}{P^* - P'}, \quad \hat{W} = \frac{W - W^*}{W' - W^*}, \\ \hat{T} &= \frac{T - T^*}{T' - T^*}, \quad \hat{R} = \frac{R - R^*}{R' - R^*}. \end{aligned} \quad (25)$$

3. Модель формування запасів комплектуючих для планового масового виробництва в умовах впливу загроз

Налагодження масового розподіленого виробництва потребує створення мережі високотехнологічних підприємств, для яких необхідно сформувати запаси комплектуючих для планового випуску АБК. Розмір запасів залежить від потужності підприємства та портфелю замовлень щодо виробництва АБК. Тому виникає актуальне завдання створення необхідних запасів для випуску потрібної кількості АБК у плановому періоді роботи підприємства. Але обмеження за кількістю комплектуючих унаслідок обмежених можливостей постачальників не дає змогу повністю задовольнити мережу розподілених виробництв, які пов'язані з випуском АБК. Тому, необхідно проводити раціональний розподіл запасів комплектуючих з урахуванням пріоритетності підприємств. Умовами для визначення пріоритету для використання підприємством комплектуючих можуть бути:

- потужність підприємства;
- відносно безпечне місце розташування;
- логістика постачання комплектуючих.

Розглянемо в якості пріоритету для постачання комплектуючих потужність підприємства з випуску АБК. Для розв'язання задачі раціонального розподілу комплектуючих будемо розглядати підмножини всієї множини (M) підприємств-виробників АБК, які буде в першу чергу використано для створення необхідних запасів комплектуючих щодо планового виробництва. Для формування всіх підмножин підприємств і подальшого порівняння їх між собою для вибору раціонального варіанта будемо використовувати основні результати теорії перераху-

вання (де Брейн, Пойа) [29, 30]. На першому етапі перерахування необхідно оцінити кількість можливих варіантів (K). Формула розрахунку представлена як частковий випадок основної теореми перерахування:

$$K = 2^M - 1. \quad (26)$$

На другому етапі формуються (генеруються) можливі варіанти, кількість яких K . Для цього можна використати двійковий лічильник, значення якого представляє собою підмножини множини M можливих варіантів. Наприклад, для $M=3$:

$$K = 2^3 - 1 = 7 \quad (27)$$

Підмножини виробників мають вигляд

$$\begin{array}{ll} 1. 001 & 5. 101 \\ 2. 010 & 6. 110 \\ 3. 011 & 7. 111. \\ 4. 100 & \end{array} \quad (28)$$

Тут перша позиція лічильника пов'язана з першим підприємством, друга – з другим, третя – з третім.

Тоді, наприклад, 5-й варіант (101) означає, що підмножина виробників складається з двох підприємств – першого та третього.

Введемо булеву змінну, яка буде пов'язана з вибором того чи іншого варіанту з переліку підмножин підприємств:

$$x_{je} = \begin{cases} 1, \text{ якщо запаси комплектуючих } \\ j\text{-го найменування формуються} \\ \text{для } e\text{-го складу (підмножини)} \\ \text{підприємств-виробників АБК;} \\ 0, \text{ в іншому випадку.} \end{cases} \quad (29)$$

Будемо використовувати наступні показники для оцінки варіантів і пошуку раціонального складу підприємств, для якого будуть у першу чергу формуватися запаси комплектуючих для налагодження планового випуску АБК:

- потужність підприємств (P);
- запаси комплектуючих (V);
- витрати на формування запасів комплектуючих (W);
- час на формування запасів комплектуючих (T);
- ризики логістики формування запасів комплектуючих (R).

Представимо показники P , V , W , T , R у формальному вигляді з використанням змінної x_{je} :

$$P = \sum_{j=1}^N P_j = \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^{2^M-1} p_{je} X_{je}, \quad (30)$$

де N – номенклатура комплектуючих, які потрібні для створення АБК;

p_{je} – потужність e -го складу підприємств, які будуть використовувати для своєї роботи комплектуючі j -го найменування;

$$V = \sum_{j=1}^N V_j = \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^{2^M-1} v_{je} X_{je}, \quad (31)$$

де v_{je} – потрібний запас комплектуючих j -го найменування, необхідний для планового випуску АБК e -м складом підприємств;

$$W = \sum_{j=1}^N W_j = \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^{2^M-1} w_{je} X_{je}, \quad (32)$$

тут w_{je} – логістичні витрати на створення запасів комплектуючих (v_{je});

$$T = \sum_{j=1}^N T_j = \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^{2^M-1} t_{je} X_{je}, \quad (33)$$

де t_{je} – час на створення потрібних запасів комплектуючих (v_{je}).

$$R = \sum_{j=1}^N R_j = \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^{2^M-1} r_{je} X_{je}, \quad (34)$$

де r_{je} – логістичний ризик формування запасів комплектуючих (v_{je}).

Необхідно максимізувати формування запасів комплектуючих V шляхом пошуку раціонального варіанта складу підприємств-виробників АБК:

$$\max V, V = \sum_{j=1}^N V_j = \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^{2^M-1} v_{je} X_{je}, \quad (35)$$

з використанням обмежень, які пов'язані з можливостями підприємств-виробників комплектуючих налагодити масове виробництво та логістику постачання:

$$P \geq P', P = \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^{2^M-1} p_{je} X_{je}, \quad (36)$$

де P' – обмеження щодо потужності підприємств-виробників, які можуть забезпечити випуск АБК зі створеними запасами комплектуючих;

$$W \leq W', W = \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^{2^M-1} w_{je} X_{je}, \quad (37)$$

де W' – обмеження за логістичними витратами на формування запасів комплектуючих для планового виробництва АБК;

$$T \leq T', T = \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^{2^M-1} t_{je} X_{je}, \quad (38)$$

де T' – обмеження за часом формування комплектуючих для планового випуску АБК.

$$R \leq R', R = \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^{2^M-1} r_{je} X_{je}, \quad (39)$$

де R' – обмеження за ризиком логістики формування запасів комплектуючих в умовах особливого стану країни.

Можлива інша постановка задачі оптимізації щодо формування запасів комплектуючих, яка пов'язана з часом формування запасів, що дуже важливо для швидкого налагодження випуску нових АБК. Тоді розглядаємо таку цільову функцію:

$$\min T, T = \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^{2^M-1} t_{je} X_{je}, \quad (40)$$

з використанням обмежень:

$$P \geq P', P = \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^{2^M-1} p_{je} X_{je}, \quad (41)$$

$$V \geq V', V = \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^{2^M-1} v_{je} X_{je}, \quad (42)$$

де V' – обмеження за запасами комплектуючих, які необхідні для планової роботи підприємств-виробників АБК;

$$W \leq W', W = \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^{2^M-1} w_{je} X_{je}, \quad (43)$$

$$R \leq R', R = \sum_{j=1}^N \sum_{e=1}^{2^M-1} r_{je} x_{je}. \quad (44)$$

4. Модель обґрунтування складу видів транспорту для постачання комплектуючих

Для створення високотехнологічних виробів потрібна велика множина комплектуючих, які можуть вироблятися та рухатися з різних кутків світу. Виникають довгі ланцюги постачання в різноманітному транспортному середовищі (автомобільному, залізничному, морському та інших видах транспорту). Унаслідок довгих ланцюгів постачання в різноманітному транспортному середовищі зростає час, витрати та ризики формування запасів комплектуючих для планового масового виробництва АБК в розподіленій мережі підприємств. Це визначає актуальність завдання вибору раціональної множини видів транспорту для своєчасного постачання комплектуючих для виробництва АБК у передбаченій планами кількості.

У розділі 3 було сформовано множину підприємств, яким необхідно в першу чергу постачати комплектуючі в умовах обмежених ресурсів. Для цих підприємств необхідно сформувати множину логістичних компонент у вигляді видів транспорту для формування руху комплектуючих. Вибір раціонального варіанту складу видів транспорту залежить від місць розташування виробників комплектуючих.

Введемо показники, які буде використано для пошуку раціонального складу видів транспорту в розподіленій мережі постачання:

- множина комплектуючих, яка необхідна для планового випуску АБК (F);
- час постачання комплектуючих (T);
- логістичні витрати на постачання комплектуючих (W);
- ризики використання різних видів транспорту в логістиці постачання (R).

Введемо булеву змінну x_{jly} , яка має такі значення:

$$x_{jly} = \begin{cases} 1, \text{ якщо для } l\text{-го} \\ \text{підприємства-виробника} \\ \text{АБК обрано } z\text{-й склад} \\ \text{видів транспорту для} \\ \text{постачання } j\text{-го найменування} \\ \text{комплектуючих;} \\ 0, \text{ в іншому випадку.} \end{cases} \quad (45)$$

Представимо показники F, T, W, R у формальному вигляді з використанням булевої змінної x_{jly} :

$$F = \sum_{j=1}^N F_j = \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^M \sum_{z=1}^{2^{S_l}-1} f_{jly} x_{jly}, \quad (46)$$

де N – номенклатура комплектуючих для створення АБК;

M – множина підприємств-виробників АБК;

S_l – множина можливих видів транспорту для формування логістики постачання для l-го підприємства;

$2^{S_l} - 1$ – кількість можливих варіантів складу видів транспорту для постачання комплектуючих l-у підприємству;

f_{jly} – множина комплектуючих j-го найменування, яка буде спрямована l-у підприємству для формування запасів з використанням z-го складу видів транспорту;

$$T = \sum_{j=1}^N T_j = \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^M \sum_{z=1}^{2^{S_l}-1} t_{jly} x_{jly}, \quad (47)$$

де t_{jly} – час, який буде витрачений на постачання комплектуючих j-го найменування для l-го підприємства-виробника АБК при використанні z-го складу видів транспорту;

$$W = \sum_{j=1}^N W_j = \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^M \sum_{z=1}^{2^{S_l}-1} w_{jly} x_{jly}, \quad (48)$$

де w_{jly} – логістичні витрати на постачання комплектуючих j-го найменування для l-го підприємства-виробника АБК при виборі z-го складу видів транспорту;

$$R = \sum_{j=1}^N R_j = \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^M \sum_{z=1}^{2^{S_l}-1} r_{jly} x_{jly}, \quad (49)$$

де r_{jly} – ризики, які виникають унаслідок довгих ланцюгів постачання комплектуючих j-го найменування для l-го підприємства-виробника АБК з використанням z-го складу видів транспорту.

Можливі такі постановки оптимізаційної задачі пошуку раціонального складу видів транспорту для постачання комплектуючих підприємствам-виробникам АБК:

$$1. \quad \max F, F = \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^M \sum_{z=1}^{2^{S_l}-1} f_{jly} x_{jly}, \quad (50)$$

з урахуванням обмежень $F \leq F'$, F' – обмеження щодо можливостей постачальників комплектуючих, які пов'язані з їх виробничими потужностями;

$$T \leq T', T = \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^M \sum_{z=1}^{2^{S_l}-1} t_{j|z} x_{j|z}, \quad (51)$$

де T' – обмеження за часом постачання, яке пов'язане з необхідністю швидкого налагодження масованого, масштабованого виробництва АБК;

$$W \leq W', W = \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^M \sum_{z=1}^{2^{S_l}-1} w_{j|z} x_{j|z}, \quad (52)$$

де W' – обмеження за витратам на логістику постачання комплектуючих;

$$R \leq R', R = \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^M \sum_{z=1}^{2^{S_l}-1} r_{j|z} x_{j|z}, \quad (53)$$

де R' – обмеження щодо допустимих логістичних ризиків постачання комплектуючих.

2. Необхідно мінімізувати час на постачання комплектуючих для швидкого формування запасів і налагодження планового масового виробництва АБК:

$$\min T, T = \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^M \sum_{z=1}^{2^{S_l}-1} t_{j|z} x_{j|z}, \quad (54)$$

з використанням обмежень:

$$F \leq F', F = \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^M \sum_{z=1}^{2^{S_l}-1} f_{j|z} x_{j|z}, \quad (55)$$

$$W \leq W', W = \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^M \sum_{z=1}^{2^{S_l}-1} w_{j|z} x_{j|z}, \quad (56)$$

$$R \leq R', R = \sum_{j=1}^N \sum_{l=1}^M \sum_{z=1}^{2^{S_l}-1} r_{j|z} x_{j|z}. \quad (57)$$

5. Моделювання впливу вразливостей на логістичні ланцюги постачання комплектуючих

Обґрунтовані в розділі 4 склади видів транспорту в розподіленій логістиці для постачання комплектуючих у виробництві АБК потребують дослідження з вибору логістичних компонент (транспортних хабів, вузлів, центрів розподілу, магістральних ділянок тощо) для виявлення впливу можливих вразливостей. Це визначає актуальність завдання аналізу можливих вразливостей та проведенню превентивних заходів для мінімізації їх впливу, яке розв'язується в цьому розділі. До таких вразливостей відносяться:

- застарілі (деградовані за часом) логістичні компоненти;

- логістичні компоненти, які мають суттєвий вплив на функціонування транспортної системи.

Вразливості використовуються противником як цілі для порушення та руйнування логістики виробництва.

Для аналізу вразливостей необхідно сформулювати їх можливу множину за допомогою експертів з транспортної логістики, а також наявної множини статистичних даних. Ця множина вразливостей (L) не може бути врахована повністю унаслідок обмеженості ресурсів на превентивні дії, які спрямовані на їх мінімізацію. Тому для проведення превентивних заходів необхідно використовувати підмножину L_k , яку слід обґрунтувати. Далі необхідно сформулювати показники для оцінки превентивних заходів щодо вразливостей з урахуванням обмежених ресурсів на реалізацію цих заходів:

- витрати на проведення превентивних заходів (W);

- час, потрібний на проведення превентивних заходів (T);

- ризики проєкту реалізації превентивних заходів (R).

Для вибору превентивних заходів введемо булеву змінну x_{jke} , яка має такий вигляд:

$$x_{jke} = \begin{cases} 1, \text{ якщо для постачання } j\text{-го} \\ \text{найменування комплектуючих} \\ \text{буде обрано } k - \text{й вид транспорту,} \\ \text{з } e\text{-м можливим складом} \\ \text{вразливостей} \\ 0, \text{ в іншому випадку.} \end{cases} \quad (58)$$

Представимо показники W , T , R у формальному вигляді з використанням змінної x_{jke} :

$$W = \sum_{j=1}^N W_j = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} \sum_{e=1}^{2^{S_k}-1} w_{jke} x_{jke}, \quad (59)$$

де N – номенклатура комплектуючих для створення АБК;

n_j – кількість можливих видів транспорту, які будуть обрані для постачання j -го найменування комплектуючих;

S_k – множина вразливостей, які використані в превентивних діях для k -го виду транспорту;

$2^{S_k} - 1$ – кількість можливих варіантів (підмножина S_k), яка буде використана для вибору раціонального планування превентивних заходів;

w_{jke} – витрати на проведення превентивних заходів щодо e -го складу вразливостей при постачанні j -го найменування комплектуючих з урахуванням вибору k -го виду транспорту;

$$T = \sum_{j=1}^N T_j = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} \sum_{e=1}^{2^{S_k}-1} t_{jke} X_{jke}, \quad (60)$$

де t_{jke} – час, який потрібний для проведення превентивних заходів щодо e -го складу вразливостей при постачанні j -го найменування комплектуючих з урахуванням вибору k -го виду транспорту;

$$R = \sum_{j=1}^N R_j = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} \sum_{e=1}^{2^{S_k}-1} r_{jke} X_{jke}, \quad (61)$$

де r_{jke} – ризики планування та проведення превентивних заходів щодо e -го складу вразливостей при постачанні j -го найменування комплектуючих з урахуванням вибору k -го виду транспорту.

Сформуємо оптимізаційні задачі, пов'язані з проведенням превентивних заходів щодо мінімізації впливу вразливостей на постачання комплектуючих для масового виробництва АБК:

1. Мінімізація витрат на проведення превентивних заходів щодо мінімізації впливу вразливостей на постачання комплектуючих для масового виробництва АБК в умовах обмеженості ресурсів:

$$\min W, W = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} \sum_{e=1}^{2^{S_k}-1} w_{jke} X_{jke}, \quad (62)$$

з урахуванням обмежень:

$$T \leq T', T = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} \sum_{e=1}^{2^{S_k}-1} t_{jke} X_{jke}, \quad (63)$$

де T' – допустимий час, який виділено на проведення превентивних заходів щодо мінімізації вразливостей у логістиці постачання комплектуючих для виробництва АБК;

$$R \leq R', R = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} \sum_{e=1}^{2^{S_k}-1} r_{jke} X_{jke}, \quad (64)$$

де R' – допустимий ризик планування та проведення превентивних заходів для мінімізації вразливостей у логістиці постачання комплектуючих для виробництва АБК.

2. Мінімізація часу на проведення превентивних заходів у логістиці постачання комплектуючих для мінімізації впливу вразливостей. Це актуально в умовах наявності військових загроз та їх впливу на логістику постачання в масштабованому виробництві АБК:

$$\min T, T = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} \sum_{e=1}^{2^{S_k}-1} t_{jke} X_{jke}, \quad (65)$$

з урахуванням обмежень:

$$W \leq W', W = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} \sum_{e=1}^{2^{S_k}-1} w_{jke} X_{jke}, \quad (66)$$

де W' – обмеження за допустимими витратами на превентивні заходи.

$$R \leq R', R = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^{n_j} \sum_{e=1}^{2^{S_k}-1} r_{jke} X_{jke}. \quad (67)$$

6. Результати та обговорення

Новий характер сучасної війни сформувався за появи технологічних та тактичних інновацій. Це потребує швидкого створення та масового виробництва нової високотехнологічної техніки (АБК). Масоване використання БПЛА дозволяє створити на полі бою сіру зону (Kill Zone) для відсічі атак противника. Це потребує налагодження масштабованого виробництва АБК. При створенні розподіленої мережі виробників виникає складне завдання щодо планування постачання комплектуючих в умовах впливу загроз. Це визначає актуальність представленого в цій роботі дослідження з формування моделей аналізу довгих логістичних ланцюгів постачання комплектуючих. Виявлено основні фактори, які додають труднощів для постачання комплектуючих:

- інноваційність нових АБК, що впливає на формування існуючих та розробку множини нових компонентів;
- обмеження потужності виробників комплектуючих, що впливає на формування запасів;
- поява довгих ланцюгів постачання комплектуючих, що впливає на ризики постачання;

- різномірне транспортне середовище, яке має вразливі компоненти для постачання комплектуючих.

Поява довгих логістичних ланцюгів пов'язана з великою відстанню розташування виробників комплектуючих від основного виробництва АБК. Це призводить до використання декількох видів транспорту в різномірному транспортному середовищі для постачання комплектуючих. Для врахування цих ускладнюючих обставин було створено моделі, які досліджують параметри довгих ланцюгів постачання, формують потрібний склад постачальників і транспортне забезпечення. У якості обмежень щодо постачання використано показники часу, витрат і ризиків. Розподіленість і велика кількість виробників логістичних компонент, які використовуються для постачання комплектуючих, впливає на появу вразливостей. Тому було створено моделі аналізу вразливостей логістики постачання для планування превентивних заходів щодо їх мінімізації або нейтралізації.

Запропоновано таку послідовність дій при проведенні досліджень логістики постачання комплектуючих для масового виробництва високотехнологічних виробів (АБК):

- аналіз впливу довгих логістичних ланцюгів постачання комплектуючих на виробництво АБК;
- обґрунтування складу виробників комплектуючих;
- проведення раціонального розподілу комплектуючих по мережі виробників АБК;
- обґрунтування потрібного складу видів транспорту для постачання комплектуючих в умовах впливу загроз;
- обґрунтування превентивних заходів щодо мінімізації впливу вразливостей на логістику постачання комплектуючих.

Для реалізації цієї послідовності в роботі створено логічно пов'язані моделі, які дозволяють у повній мірі проаналізувати та обґрунтувати логістику постачання комплектуючих для масового виробництва АБК. Обмеження потужностей виробників комплектуючих призвели до необхідності використання їх підмножин і пошуку раціонального складу. Сформовано та розв'язано багатокритеріальну задачу оптимізації логістики постачання комплектуючих в умовах існуючих обмежень. На основі даної оптимізаційної моделі проводиться раціональний розподіл запасів комплектуючих з урахуванням пріоритетності та потужності підприємств – виробників комплектуючих.

Актуальність дослідження пов'язана з необхідністю наукового обґрунтування логістики постачання комплектуючих у довгих логістичних ланцюгах для налагодження масового виробництва АБК.

Розроблений комплекс моделей є математичним інструментарієм для проведення розрахунків з процесу планування постачання комплектуючих при створенні інноваційних видів АБК.

Майбутні дослідження будуть спрямовані на створення прикладної інформаційної технології дослідження для обґрунтування довгих логістичних ланцюгів постачання для організації масового виробництва АБК. Це дозволить провести експериментальні дослідження із застосуванням розроблених оптимізаційних моделей та обґрунтувати доцільність запропонованого підходу для реалізації логістичних дій щодо масштабованого виробництва АБК.

7. Висновки

Проведене дослідження є науковим підґрунтям для створення раціональних логістичних ланцюгів постачання комплектуючих для масового виробництва високотехнологічних виробів (АБК), і дозволяє:

- сформувати множину підприємств-виробників АБК з урахуванням їх потужностей, які потребують необхідних запасів комплектуючих в умовах обмеженості ресурсів;
- обґрунтувати необхідні запаси комплектуючих з урахуванням можливостей постачальників-виробників і логістики руху від них до основного виробництва АБК у розподіленій транспортній мережі;
- сформувати потрібний склад видів транспорту в довгих ланцюгах постачання;
- виявити актуальну множину вразливостей у довгих ланцюгах постачання для планування превентивних заходів щодо їх мінімізації або нейтралізації.

Наукова новизна запропонованого підходу полягає в обґрунтуванні, за допомогою створеного комплексу логічно пов'язаних моделей, логістики постачання комплектуючих для масового виробництва високотехнологічних виробів (АБК) в умовах особливого стану країни.

Таким чином, можливо зробити основний висновок щодо проведеного дослідження: запропонований комплекс логічно пов'язаних моделей дозволяє обґрунтувати плани постачання комплектуючих для масового виробництва АБК з урахуванням можливостей виробників-постачальників комплектуючих в умовах впливу загроз, що сприятиме підвищенню обороноздатності країни та успішності проведення військових дій.

Внесок авторів: системний аналіз логістики постачання – **О. Є. Федорович**; створення раціонального складу постачальників комплектуючих – **О. В. Малєва**; обґрунтування потрібних запасів комплектуючих – **О. С. Губка**; вибір складу транспо-

рtnих систем в постачанні – **А. В. Попов**; планування превентивних заходів щодо мінімізації вразливостей – **Т. С. Пісклова**.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Фінансування

Дослідження було підтримано проектом Міністерства освіти і науки України № 0125U001562.

Доступність даних

Дані, використані в дослідженні, доступні за обґрунтованим запитом до авторів.

Використання засобів штучного інтелекту

Під час підготовки рукопису інструменти штучного інтелекту не використовувалися.

Усі автори прочитали та схвалили опубліковану версію цього рукопису.

Література

1. Alqudsi, Y. UAV swarms: research, challenges, and future directions / Y. Alqudsi, M. Makaraci // *Journal of Engineering and Applied Science*. – 2025. – Vol. 72. – 24 p. DOI: 10.1186/s44147-025-00582-3.
2. Kallenborn, Z. InfoSwarms: drone swarms and information warfare / Z. Kallenborn // *Naval War College Review*. – 2022. – Vol. 75, iss. 2. – P. 45–68. DOI: 10.55540/0031-1723.3154.
3. Military logistics planning models for enemy targets attack by a swarm of combat drones / O. Fedorovich, D. Kritskiy, L. Malieiev et al. // *Radioelectronic and Computer Systems*. – 2024. – № 1 (109). – P. 207–216. DOI: 10.32620/reks.2024.1.16.
4. Полупан, Ю. Моделювання й аналіз логістичних маршрутів постачання та збуту високотехнологічної продукції з огляду на різні види транспорту / Ю. Полупан, О. Малєєва, М. Кікоть // *Автоматизовані системи управління та прилади автоматики*. – 2026. – № 1 (188). – С. 191–202. DOI: 10.30837/0135-1710.2026.188.191.
5. Will the drone always get through? Offensive myths and defensive realities / A. Calcara, A. Gilli, M. Gilli, I. Zaccagnini // *Security Studies*. – 2022. – Vol. 31, iss. 5. – P. 791–825. DOI: 10.1080/09636412.2022.2153734.
6. Impact of additive manufacturing on the supply chain of aerospace spare parts industry – a review / B. Debnath, M. S. Shakur, F. Tanjum et al. // *Logistics*. – 2022. – Vol. 6, iss. 2. – 25 p. DOI: 10.3390/logistics6020028.
7. A comprehensive review of recent research trends on unmanned aerial vehicles (UAVs) / K. Telli, O. Kraa, Y. Himeur et al. // *Systems*. – 2023. – Vol. 11, iss. 8. – 48 p. DOI: 10.3390/systems11080400.
8. Полупан, Ю. Моделі вибору раціональної структури постачання комплектування для виробництва БПЛА в умовах ризику, обмежених логістичних витрат і часу / Ю. Полупан, О. Малєєва // *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. – 2025. – № 3(33). – С. 111–125. DOI: 10.30837/2522-9818.2025.3.111.
9. Supplier selection for aerospace & defense industry through MCDM methods / A. Rasmussen, H. Sabic, S. Saha, I. Nielsen // *Cleaner Engineering and Technology*. – 2023. – Vol. 12. – 13 p. DOI: 10.1016/j.clet.2022.100590.
10. Lead-time-based freight routing in multi-modal networks considering the physical internet / A. Shahedi, F. Gallo, M. Saeednia, N. Sacco // *Journal of Supply Chain Management Science*. – 2023. – Vol. 4, iss. 3–4. – P. 61–80. DOI: 10.59490/jscms.2023.7183.
11. Liu, S. Multimodal transportation route optimization of cold chain container in time-varying network considering carbon emissions / S. Liu. // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15, iss. 5. – 30 p. DOI: 10.3390/su15054435.
12. The drone supply chain war: identifying the chokepoints to making a drone / M. Amoah, M. Bazilian, J. Matisek, K. Schweiker. – Washington: Center for Strategic and International Studies, 2025. – Available et: <https://www.csis.org/analysis/drone-supply-chain-war-identifying-chokepoints-making-drone> (дата звернення: 24.06.2026)
13. Integrating Industry 4.0 technologies in defense manufacturing: challenges, solutions, and potential opportunities / H. Ullah, M. Uzair, Z. Jan, M. Ullah // *Array*. – 2024. – Vol. 23. – 18 p. DOI: 10.1016/j.array.2024.100358.
14. Mendonça P. A. OEE approach applied to additive manufacturing systems in distributed manufacturing networks / P. A. Mendonça, R. P. Francisco, D. S. Rabelo // *Computers & Industrial Engineering*. – 2022. – Vol. 171. – 11 p. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108359.
15. Aspects of resilience for smart manufacturing systems / D. S. Fowler, G. Epiphaniou, M. D. Higgins, C. Maple // *Strategic Change*. – 2023. – Vol. 32, iss. 6. – P. 183–193. DOI: 10.1002/jsc.2555.
16. Analysis of supply chain vulnerability factors in manufacturing enterprises: a fuzzy DEMATEL approach / S. K. Sharma, S. Routroy, R. K. Singh, U. Nag // *International Journal of Logistics Research and Applications*. – 2024. – Vol. 27, iss. 5. – P. 814–841. DOI: 10.1080/13675567.2022.2083590.
17. Birge, J. R. Disruption and rerouting in supply chain networks / J. R. Birge, A. Capponi, P.-C. Chen // *Operations Research*. – 2023. – Vol. 71, iss. 2. – P. 750–767. DOI: 10.1287/opre.2022.2409.
18. Role of green technologies, climate uncertainties and energy prices on the supply chain: policy-based analysis through the lens of sustainable development /

J. Cheng, K. S. Mohammed, P. Misra et al. // *Technological Forecasting and Social Change*. – 2023. – Vol. 194. – 12 p. DOI: 10.1016/j.techfore.2023.122705.

19. Prause, G. Optimizing voyage costs in maritime supply chains: a holistic approach towards logistics service improvement and supply chain finance / G. Prause, E. O. Olaniyi // *Transport and Telecommunication*. – 2023. – Vol. 24, iss. 4. – P. 361–374. DOI: 10.2478/tjt-2023-0028.

20. Building resilience in high-tech supply chains / G. A. Aguilar-Hernandez, A. Singhvi, C. Böcher, et al. // *Nature Electronics*. – 2023. – Vol. 6. – P. 546–548. DOI: 10.1038/s41928-023-01015-w.

21. Carvalho, M. The aggregate effects of global and local supply chain disruptions: 2020–2022 / M. Carvalho, M. Faria-e-Castro, J. A. Blanco // *Journal of International Economics*. – 2023. – Vol. 146. – 28 p. DOI: 10.1016/j.jinteco.2023.103788.

22. Tactical supply chain planning from a risk perspective / C. Kalla, T. Kreuter, L. F. Scavarda, B. Hellingrath // *Journal of Operations Management and Strategy*. – 2023. – Vol. 14, iss. 1. – P. 1–16. DOI: 10.20586/joms.14.1_1.

23. Mahdikhani M., High-technology within the supply chain: a systematic review / M. Mahdikhani, M. Gonzalez, R. Teixeira // *Management Decision*. – 2023. – Vol. 61, iss. 8. – P. 2257–2279. DOI: 10.1108/MD-05-2022-0697.

24. Madani, B. A systematic review of sustainable supply chain network design: optimization approaches and research trends / B. Madani, A. Saihi, A. A. Abdelfatah // *Sustainability*. – 2024. – Vol. 16, iss. 8. – 33 p. DOI: 10.3390/su16083226.

25. The impact of COVID-19 on supply chains: systematic review and future research directions / H. Younis, M. Alsharairi, H. Younes, B. Sundarakani // *Operational Research*. – 2023. – Vol. 23, iss. 48. – 31 p. DOI: 10.1007/s12351-023-00790-w.

26. Dulia, E. F. An integrated supply chain network design for advanced air mobility aircraft manufacturing using stochastic optimization / E. F. Dulia, S. A. M. Shihab // *Supply Chain Analytics*. – 2024. – Vol. 8. – 30 p. DOI: 10.1016/j.sca.2024.100083.

27. Designing a reliable-sustainable supply chain network: adaptive m -objective ε -constraint method / A. Sepehri, E. B. Tirkolaee, V. Simic, S. S. Ali // *Annals of Operations Research*. – 2026. – Vol. 359. – P. 921–952. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10479-024-05961-2>.

28. A multi-objective mixed-integer programming approach for supply chain disruption response with lead-time awareness / J. A. Estrada-Garcia, M. Bi, D. M. Tilbury et al. // *Proceedings of the IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2023)*, Auckland, New Zealand. – 2023. – 6 p. DOI: 10.1109/CASE56687.2023.10260370J.

29. Kirst, D. Mechanised Metamathematics. An Investigation of First-Order Logic and Set Theory in Constructive Type Theory / D. Kirst. – Saarbrücken, 2022. – Режим доступу: https://www.ps.uni-saarland.de/extras/kirst-thesis/thesis_final_print.pdf (дата звернення: 24.06.2026)

30. Modeling the life cycle reduction for the rapid development of UAVs for use in military missions / O. Fedorovich, A. Popov, T. Pisklova et al. // *Aerospace Technic and Technology*. – 2026. – No. 1 (209). – P. 95–107. DOI: 10.32620/aktt.2026.1.09.

References

1. Alqudsi, Y., Makaraci, M. UAV swarms: research, challenges, and future directions. *Journal of Engineering and Applied Science*, 2025, vol. 72, 24 p. DOI: 10.1186/s44147-025-00582-3.

2. Kallenborn, Z. InfoSwarms: drone swarms and information warfare. *Naval War College Review*, 2022, vol. 75, no. 2, pp. 45–68. DOI: 10.55540/0031-1723.3154.

3. Fedorovych, O., Kritskiy, D., Malieiev, L., Rybka, K., Rybka, A. Military logistics planning models for enemy targets attack by a swarm of combat drones. *Radioelectronic and Computer Systems*, 2024, no. 1, pp. 207–216. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2024.1.16>.

4. Polupan, Yu., Malyeyeva, O., Kikot, M. Modeliuvannya y analiz lohistychnykh marshrutiv postachannya ta zbutu vysokotekhnolohichnoi produktsii z ohliadu na rizni vydy transportu [Modeling and analysis of logistics supply and distribution routes for high-tech products considering different modes of transport]. *Avtomatyzovani systemy upravlinnia ta prylady avtomatyky – Management Information Systems and Devices*, 2026, no. 1 (188), pp. 191–202. DOI: 10.30837/0135-1710.2026.188.191.

5. Calcara, A., Gilli, A., Gilli, M., Zaccagnini, I. Will the drone always get through? Offensive myths and defensive realities. *Security Studies*, 2022, vol. 31, iss. 5, pp. 791–825. DOI: 10.1080/09636412.2022.2153734.

6. Debnath, B., Shakur, M. S., Tanjum, F., Rahman, M. A., Adnan, Z. H. Impact of additive manufacturing on the supply chain of aerospace spare parts industry – a review. *Logistics*, 2022, vol. 6, iss. 2. 25 p. DOI: 10.3390/logistics6020028.

7. Telli, K., Kraa, O., Himeur, Y., Ouamane, A., Boumehraz, M., Atalla, S., Mansoor, W. A comprehensive review of recent research trends on unmanned aerial vehicles (UAVs). *Systems*, 2023, vol. 11, iss. 8. 48 p. DOI: 10.3390/systems11080400.

8. Polupan, Yu., Malyeyeva, O. Modeli vyboru ratsionalnoi struktury postachannya komplektovannya dlia vyrobnytstva BPLA v umovakh ryzyku, обмежyenykh lohistychnykh vytrat i chasu [Models for selecting a rational supply structure of components for UAV manufacturing UNDER risk conditions, constrained logistics costs and time limitations]. *Suchasnyi stan naukovykh doslidzhen ta tekhnolohii v promyslovosti – Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, 2025, no. 3 (33), pp. 111–125. DOI: 10.30837/2522-9818.2025.3.111.

9. Rasmussen, A., Sabic, H., Saha, S., Nielsen, I. Supplier selection for aerospace & defense industry

through MCDM methods. *Cleaner Engineering and Technology*, 2023, vol. 12, 13 p. DOI: 10.1016/j.clet.2022.100590.

10. Shahedi, A., Gallo, F., Saeednia, M., Sacco, N. Lead-time-based freight routing in multi-modal networks considering the physical internet. *Journal of Supply Chain Management Science*, 2023, vol. 4, iss. 3–4, pp. 61–80. DOI: 10.59490/jscms.2023.7183.

11. Liu, S. Multimodal transportation route optimization of cold chain container in time-varying network considering carbon emissions. *Sustainability*, 2023, vol. 15, iss. 5, 30 p. DOI: 10.3390/su15054435

12. Amoah, M., Bazilian, M., Matissek, J., Schweiker, K. *The Drone Supply Chain War: Identifying the Chokepoints to Making a Drone*. Center for Strategic and International Studies, Washington, 2025. Available et: <https://www.csis.org/analysis/drone-supply-chain-war-identifying-chokepoints-making-drone>

13. Ullah H., Uzair M., Jan Z., Ullah M. Integrating Industry 4.0 technologies in defense manufacturing: challenges, solutions, and potential opportunities. *Array*, 2024, vol. 23, 18 p. DOI: 10.1016/j.array.2024.100358.

14. Mendonça, P. A., Francisco, R. P., Rabelo, D. S. OEE approach applied to additive manufacturing systems in distributed manufacturing networks. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, vol. 171, 11 p. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108359.

15. Fowler, D. S., Epiphanious, G., Higgins, M. D., Maple, C. Aspects of resilience for smart manufacturing systems. *Strategic Change*, 2023, vol. 32, iss. 6, pp. 183–193. DOI: 10.1002/jsc.2555.

16. Sharma, S. K., Routroy, S., Singh, R. K., Nag U. Analysis of supply chain vulnerability factors in manufacturing enterprises: a fuzzy DEMATEL approach. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 2024, vol. 27, iss. 5, pp. 814–841. DOI: 10.1080/13675567.2022.2083590.

17. Birge, J. R., Capponi, A., Chen, P.-C. Disruption and rerouting in supply chain networks. *Operations Research*, 2023, vol. 71, iss. 2, pp. 750–767. DOI: 10.1287/opre.2022.2409.

18. Cheng, J., Mohammed, K. S., Misra, P., Tedeschi, M., Ma, X. Role of green technologies, climate uncertainties and energy prices on the supply chain: policy-based analysis through the lens of sustainable development. *Technological Forecasting and Social Change*, 2023, vol. 194, 12 p. DOI: 10.1016/j.techfore.2023.122705.

19. Prause, G., Olaniyi, E. O. Optimizing voyage costs in maritime supply chains: a holistic approach towards logistics service improvement and supply chain finance. *Transport and Telecommunication*, 2023, vol. 24, iss. 4, pp. 361–374. DOI: 10.2478/tjt-2023-0028.

20. Aguilar-Hernandez, G. A., Singhvi, A., Böcher, C., Zhong, X. Building resilience in high-tech supply

chains. *Nature Electronics*, 2023, vol. 6, pp. 546–548. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41928-023-01015-w>.

21. Carvalho, M., Faria-e-Castro, M., Blanco, J. A. The aggregate effects of global and local supply chain disruptions: 2020–2022. *Journal of International Economics*, 2023, vol. 146, 28 p. DOI: 10.1016/j.jinteco.2023.103788.

22. Kalla, C., Kreuter, T., Scavarda, L. F., Hellgrath, B. Tactical supply chain planning from a risk perspective. *Journal of Operations Management and Strategy*, 2023, vol. 14, iss. 1, pp. 1–16. DOI: 10.20586/joms.14.1_1.

23. Mahdikhani, M., Gonzalez, M., Teixeira, R. High-technology within the supply chain: a systematic review. *Management Decision*, 2023, vol. 61, iss. 8, pp. 2257–2279. DOI: 10.1108/MD-05-2022-0697.

24. Madani, B., Saihi, A., Abdelfatah, A. A. A systematic review of sustainable supply chain network design: optimization approaches and research trends. *Sustainability*, 2024, vol. 16, iss. 8, 33 p. DOI: 10.3390/su16083226.

25. Younis, H., Alsharairi, M., Younes, H., Sundarakani, B. The impact of COVID-19 on supply chains: systematic review and future research directions. *Operational Research*, 2023, vol. 23, iss. 48, 31 p. DOI: 10.1007/s12351-023-00790-w

26. Dulia E. F., Shihab S. A. M. An integrated supply chain network design for advanced air mobility aircraft manufacturing using stochastic optimization. *Supply Chain Analytics*, 2024. Vol. 8, 30 p. DOI: 10.1016/j.sca.2024.100083.

27. Sepehri A. Tirkolaee E. B., Simic V., Ali S. S. Designing a reliable-sustainable supply chain network: adaptive m-objective ϵ -constraint method. *Annals of Operations Research*, 2026, vol. 359, pp. 921–952. DOI: 10.1007/s10479-024-05961-2.

28. Estrada-Garcia J.-A., Bi M., Tilbury D. M., Barton K., Shen S. A multi-objective mixed-integer programming approach for supply chain disruption response with lead-time. *Proceedings of the IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2023)*, Auckland, New Zealand, 2023. 6 p. DOI: 10.1109/CASE56687.2023.10260370J.

29. Kirst, D. *Mechanised Metamathematics. An Investigation of First-Order Logic and Set Theory in Constructive Type Theory*. Saarbrücken, 2022. Available et: https://www.ps.uni-saarland.de/extras/kirst-thesis/thesis_final_print.pdf

30. Fedorovich, O., Popov, A., Pisklova, T., Malieiev, L., Rybka, A., Fedorovich, V. Modeling the life cycle reduction for the rapid development of UAVs for use in military missions. *Aerospace Technic and Technology*, 2026, no. 1 (209), pp. 95–107. DOI: 10.32620/aktt.2026.1.09.

MODELING OF LONG LOGISTICS SUPPLY CHAINS FOR MASS PRODUCTION OF AERIAL UNMANNED SYSTEMS UNDER INCREASING THREAT IMPACT

Oleg Fedorovich, Olga Malyeyeva, Oleksii Hubka, Andriy Popov, Tetyana Pisklova

The subject of this study presented in this publication is the development of a set of logically interconnected models intended to substantiate long supply logistics chains for components required in the mass, scalable production of high-technology products, specifically unmanned aerial systems, within a heterogeneous transportation environment (road, rail, maritime, and other transport modes). **The purpose** of the work is to support the mass production of modern aviation unmanned systems (UAS) with the required volume of components by modeling and substantiating the selection of component suppliers and supply chain logistics under conditions of increasing threat levels. **The tasks** addressed are as follows: to develop a model for selecting and establishing component suppliers networks; to model component inventory formation processes; to develop a model for optimizing the modal split of transportation used in supplying the mass production of UAS; and to model the influence of vulnerabilities on long supply chains. The mathematical methods and models used include: system analysis for investigating supply logistics within long transportation chains; integer (Boolean) programming for identifying rational solutions from the set of possible supply alternatives; multicriteria optimization for identifying a compromise among logistics indicators (costs, delivery time, and risks); and combinatorial analysis theory for evaluating and generating possible alternatives for component supply. **The following results** were obtained: a set of models to substantiate component supply logistics for mass, scalable production of unmanned aerial systems under conditions characterized by long supply chains, time and resource constraints, and escalating threat impact was developed. **The scientific novelty** of the proposed approach lies in the substantiation of component supply plans in a heterogeneous transportation environment for the mass production of unmanned aerial systems by creating a set of logically interconnected optimization models.

Keywords: supply logistics; long supply chains; mass production; high-technology products; threat impact; optimization models; selection of rational alternatives; multicriteria optimization.

Федорович Олег Євгенович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Малєєва Ольга Володимирівна – д-р техн. наук, проф., проф. каф. комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Губка Олексій Сергійович – канд. техн. наук, доц., каф. комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Попов Андрій Вячеславович – канд. техн. наук, доц., каф. комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Пісклова Тетяна Сергіївна – м.н.с. каф. комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Oleg Fedorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computer Science and Information Technologies, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.fedorovych@khai.edu, ORCID: 0000-0001-7883-1144.

Olga Malyeyeva – Doctor of Sciences (Technical Sciences), Professor, Professor at the Department of Computer Science and Information Technologies, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.maleyeva@khai.edu, ORCID: 0000-0002-9336-4182.

Oleksii Hubka – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computer Science and Information Technologies, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: o.gubka@khai.edu, ORCID: 0009-0009-7954-5639.

Andriy Popov – Candidate of Technical Science, Associate Professor, Associate Professor at the Computer Science and Information Technologies Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute" Kharkiv, Ukraine, e-mail: a.popov@khai.edu; ORCID: 0000-0001-8984-731X.

Tetyana Pisklova – Junior Research Fellow at the Computer Science and Information Technologies Department, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine, e-mail: t.pisklova@khai.edu; ORCID: 0009-0003-5375-0120.